



Rui Manuel Vicente Mendes

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

Contributo para a avaliação da viabilidade do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para a produção de energia elétrica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente – Perfil de Engenharia Sanitária

Orientador: Prof. Doutora Leonor Miranda Monteiro do Amaral,
Professora Auxiliar, FCT/UNL
Co-orientador: Engenheira Lisete Calado Epifâneo,
SIMARSUL, S.A.

Júri:

*Presidente: Prof. Doutor António Pedro de Macedo Coimbra Mano
Arguente: Prof. Doutora Rita Maurício Rodrigues Rosa
Vogal: Prof. Doutora Leonor Miranda Monteiro do Amaral*



Rui Manuel Vicente Mendes

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

Contributo para a avaliação da viabilidade do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para a produção de energia elétrica

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente – Perfil de Engenharia Sanitária

Orientador: Prof. Doutora Leonor Miranda Monteiro do Amaral,
Professora Auxiliar, FCT/UNL
Co-orientador: Engenheira Lisete Calado Epifâneo,
SIMARSUL, S.A.

Contributo para a avaliação da viabilidade do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para a produção de energia elétrica

© Copyright em nome de Rui Manuel Vicente Mendes, da FCT/UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

À FCT/UNL e aos docentes que contribuíram para a minha formação, em especial aos do ramo de Engenharia Sanitária.

À SIMARSUL agradeço a possibilidade de fazer esta dissertação em ambiente empresarial e a todas as pessoas da SIMARSUL que contribuíram e me incentivaram durante este período, em especial à Direção de Engenharia, pela boa disposição e conhecimentos partilhados.

Ao Prof. Doutor Alberto Martinho, agradeço a disponibilidade e conhecimentos partilhados.

À Prof. Doutora Leonor Amaral, agradeço pela orientação da dissertação, pela partilha de conhecimentos, espírito crítico, disponibilidade, entusiasmo e simpatia com que sempre me recebeu.

À Engenheira Lisete Epifâneo, agradeço pela co-orientação da dissertação, por toda a sua dedicação, partilha de conhecimentos, sugestões, espírito crítico, paciência e inteira disponibilidade.

Aos meus colegas Bruno Fonseca, Irina Figueiredo, Joana Rito, José Santos, Shari Alves, Sónia Almeida e Tiago Lima agradeço a amizade, o companheirismo e apoio. Muito aprendi e partilhei com eles, um obrigado pela vossa presença ao longo deste meu percurso académico.

Ao Diogo Candeias, Helena Almeida, João Esteves, João Montalvo, Natália Silva, Pedro Félix, Vítor Antunes e Wilson Ferreira pela amizade, companheirismo, apoio e incentivo para alcançar todos os objetivos a que me proponho.

À minha família em especial, agradeço toda a dedicação, carinho, apoio incondicional e a sua insubstituível presença que nunca esqueço.

Resumo

Numa sociedade com elevado consumo energético a escassez de combustíveis fósseis é cada vez mais preocupante, assim como a poluição atmosférica resultante da sua utilização, há portanto uma necessidade crescente de recorrer a energias renováveis.

A digestão anaeróbia de lamas é um processo de estabilização de lamas, que é vulgarmente utilizado nas ETAR e tem como produtos finais lama digerida e biogás. Dadas as características do biogás é possível ser utilizado para produção de energia.

Neste âmbito, a presente dissertação aborda teoricamente a digestão anaeróbia, o biogás e as tecnologias de produção de energia.

Tem como primeiro objetivo a avaliação da viabilidade do aproveitamento do biogás produzido nos digestores anaeróbios para produção de energia elétrica em casos de estudo específicos, mais concretamente nas ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa, tendo-se concluído que o aproveitamento estudado não se demonstrou viável.

Um segundo objetivo é a comparação entre o funcionamento da digestão anaeróbia de lamas das ETAR de Fernão Ferro, Zona Industrial da Autoeuropa, Quinta do Conde, Seixal e Sesimbra (cinco casos de estudo).

A proposta de uma folha de cálculo como contributo para avaliação da viabilidade do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio, idêntica à utilizada para a avaliação nas ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa, constitui o terceiro objectivo desta dissertação. Pretende-se que esta ferramenta seja abrangente e versátil com um propósito de ser utilizada como guia de cálculo aplicável a qualquer caso de digestão anaeróbia a frio para venda da energia elétrica. A referida folha de cálculo é estruturada por Condições de Exploração, Custos de Investimento, Custos de Operação/Manutenção e Balanço Económico.

Palavras chave: Digestão anaeróbia, biogás, valorização energética, recuperação de recursos

Abstract

In a society with high energy consumption the scarcity of fossil fuels is an increasing concern, as well as air pollution resulting from their use, so there is a growing need for renewable energy.

The anaerobic digestion of sludge is a sludge stabilization process which is commonly used in wastewater treatment plants and it has as end products digested sludge and biogas. Given the characteristics of biogas it's possible to use for energy production.

In this context, this thesis theoretically discusses anaerobic digestion, biogas and energy production technologies.

Has as its first objective the evaluation of the feasibility of utilizing the biogas produced in the anaerobic digesters to produce electricity in specific case studies, specifically in Wastewater treatment plants of Fernão Ferro and Zona Industrial da Autoeuropa, having concluded that the study did not use demonstrated feasible.

A second objective is to compare the operation of the anaerobic digestion of sludge from Wastewater treatment plants of Fernão Ferro, Zona Industrial da Autoeuropa, Quinta do Conde, Seixal e Sesimbra (five studies).

The proposal of a worksheet as a contribution to assessing the feasibility of utilizing the biogas produced in the anaerobic digestors at cold temperatures, identical to that used for the evaluation of the Wastewater treatment plants of Fernão Ferro and Zona Industrial da Autoeuropa, constitutes the third objective of this thesis. It is intended that this tool is embracing and versatile with a purpose to be used as a calculation guide applicable to any case of anaerobic digestion at cold temperatures for sale of electricity. That worksheet is structured by Operation Conditions, Investment Costs, Operating/Maintenance Costs and Economic Balance.

Keywords: Anaerobic digestion, biogas, energy valorization, resources recovery

Simbologia e Notações

AGV – Ácidos gordos voláteis

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

CBO5 – Carência bioquímica de oxigénio

CH₄ – metano

CH₃COOH – Ácido acético

CO – Monóxido de carbono

CO₂ – Dióxido de carbono

CV – Carga Volúmica de Sólidos Voláteis

EPA – Environmental Protection Agency – Agência para a Proteção do Ambiente

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

FFR – Fernão Ferro

H₂ – Hidrogénio

HCO₃ – Bicarbonato

H₂S – Sulfureto de Hidrogénio – Gás sulfídrico

IEA – Internacional Energy Agency

N₂ – Azoto

NO_x – Óxidos de azoto

O₂ – Oxigénio

QTC – Quinta do Conde

SIMARSUL – Sistema Integrado Multimunicipal de Águas Residuais da Península de Setúbal, S.A.

SSB – Sesimbra

SXL – Seixal

T_{RH} – Tempo de retenção hidráulico

ZIA – Zona Industrial da Autoeuropa

INDICE GERAL

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 | DIGESTÃO ANAERÓBIA..... | 3 |
| 2.1 | Fases da digestão anaeróbia..... | 3 |
| 2.1.1 | Hidrólise..... | 4 |
| 2.1.2 | Acidogénese..... | 4 |
| 2.1.3 | Acetogénese..... | 4 |
| 2.1.4 | Metanogénese..... | 5 |
| 2.2 | Vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia..... | 5 |
| 2.3 | Cinética e modelos da digestão anaeróbia..... | 6 |
| 2.4 | Fatores ambientais..... | 8 |
| 2.4.1 | Temperatura..... | 9 |
| 2.4.2 | pH..... | 10 |
| 2.4.3 | Alcalinidade..... | 11 |
| 2.4.4 | Macro e micro nutrientes..... | 13 |
| 2.4.5 | Toxicidade..... | 15 |
| 2.5 | Sistemas de digestão anaeróbia..... | 17 |
| 2.6 | Tipos de digestores anaeróbios..... | 18 |
| 2.7 | Principais modelos de digestão..... | 20 |
| 2.8 | Principais parâmetros operacionais..... | 23 |
| 2.8.1 | Temperatura..... | 23 |
| 2.8.2 | Mistura/agitação..... | 24 |
| 2.8.3 | Tempo de retenção..... | 26 |
| 2.8.4 | Carga volúmica..... | 26 |
| 2.9 | Crítérios de dimensionamento de digestores anaeróbios em baixa e alta carga..... | 27 |
| 3 | BIOGÁS..... | 31 |
| 3.1 | Propriedades do biogás..... | 31 |
| 3.2 | Produção de biogás..... | 34 |
| 3.3 | Sistemas de limpeza do biogás..... | 35 |
| 3.3.1 | Remoção de sulfureto de hidrogénio..... | 35 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.3.2 | Remoção de dióxido de carbono..... | 36 |
| 3.3.3 | Remoção de vapor de água e partículas | 37 |
| 3.3.4 | Remoção de siloxanos | 38 |
| 3.4 | Armazenamento..... | 39 |
| 4 | INTRODUÇÃO ÀS TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA | 41 |
| 4.1 | Turbina a vapor | 41 |
| 4.2 | Turbinas e microturbinas a gás..... | 43 |
| 4.3 | Motor de combustão interna alternativo | 46 |
| 4.4 | Célula de combustível..... | 49 |
| 5 | METODOLOGIA | 51 |
| 6 | RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 65 |
| 6.1 | Avaliação da viabilidade de aproveitamento do biogás produzido nos digestores anaeróbios das ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa para produção de energia elétrica | 65 |
| 6.2 | Comparação de desempenho entre as ETAR em estudo | 69 |
| 6.3 | Construção de uma folha de cálculo para avaliação do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para produção de energia elétrica..... | 84 |
| 7 | CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS | 89 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 91 |
| 9 | ANEXOS..... | 95 |

Índice de Quadros

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Modelos cinéticos usados no processo de tratamento por microrganismos anaeróbios..... | 7 |
| Quadro 2 - Gamas de temperatura ótima da digestão anaeróbia..... | 9 |
| Quadro 3 - Composição típica de células bacterianas..... | 14 |
| Quadro 4 - Relação C/N em lamas | 15 |
| Quadro 5 - Materiais inorgânicos tóxicos e inibitórios na digestão anaeróbia..... | 16 |
| Quadro 6 - Materiais orgânicos tóxicos e inibitórios na digestão anaeróbia..... | 16 |
| Quadro 7 - Critérios de dimensionamento para digestão em baixa e alta carga..... | 28 |
| Quadro 8 - Composição do biogás e intervalos típicos (%) em que estão presentes os principais constituintes do biogás | 31 |
| Quadro 9 - Propriedades físicas do metano (CH ₄), dióxido de carbono (CO ₂) e de sulfureto de hidrogénio (H ₂ S)..... | 32 |
| Quadro 10 - Requisitos de remoção de componentes gasosos do biogás de acordo com a utilização prevista..... | 35 |
| Quadro 11 - Solubilidade na água, para diferentes temperaturas, dos principais, gases que compõem o biogás..... | 37 |
| Quadro 12 - Dados padrão das tecnologias de produção de energia abordadas | 42 |
| Quadro 13 - Dados de projecto da fase sólida das ETAR | 60 |
| Quadro 14 - Produção de biogás e potência necessária a instalar | 65 |
| Quadro 15 - Resultados da avaliação de investimento na ETAR de Fernão Ferro..... | 66 |
| Quadro 16 - Resultados do investimento caso houvesse produção de biogás na ETAR de Fernão Ferro para cobrir investimento..... | 67 |
| Quadro 17 - Resultados da avaliação de investimento para a ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa..... | 68 |
| Quadro 18 - Resultados do investimento caso houvesse produção de biogás na ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa para cobrir o investimento | 69 |

Índices de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Diagrama de fases da digestão anaeróbia | 3 |
| Figura 2 - Taxa de crescimento das bactérias metanogénicas psicrófilas, mesófilas e termófilas | 9 |
| Figura 3 - Relação entre o pH e a concentração de bicarbonato, a uma temperatura de 35°C..... | 13 |
| Figura 4 - Sistemas de digestão anaeróbia descontínuo e contínuo | 17 |
| Figura 5 - Modelos de reatores anaeróbios de biomassa em suspensão mais comuns | 19 |
| Figura 6 - Modelos de reatores anaeróbios de biomassa fixa mais comuns | 20 |
| Figura 7 - Digestão anaeróbia em baixa carga | 21 |
| Figura 8 - Digestão anaeróbia em alta carga | 22 |
| Figura 9 - Digestão anaeróbia com dois reatores | 23 |
| Figura 10 - Influência da temperatura e do tempo de retenção na eficiência de digestão anaeróbia de lamas primárias | 24 |
| Figura 11 - Principais tipos de agitação e mistura em digestores anaeróbios | 25 |
| Figura 12 - Propriedades e comportamento do biogás como combustível face à percentagem de metano na sua constituição | 33 |
| Figura 13 - Ciclo simples de uma turbina a vapor | 43 |
| Figura 14 - Componentes de uma turbina a gás | 44 |
| Figura 15 - Funcionamento de uma turbina a gás..... | 45 |
| Figura 16 - Corte de uma turbina a gás..... | 46 |
| Figura 17 - Vista do interior de um motor de combustão interna alternativo..... | 47 |
| Figura 18 - Fases de funcionamento de um motor de ciclo Otto..... | 48 |
| Figura 19 - Ilustração dos componentes e funcionamento de uma célula de combustível..... | 49 |
| Figura 20 - Esquema da metodologia utilizada | 52 |
| Figura 21 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR de Fernão Ferro | 54 |
| Figura 22 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa | 55 |
| Figura 23 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR da Quinta do Conde | 56 |

| | |
|---|----|
| Figura 24 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR do Seixal | 57 |
| Figura 25 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR de Sesimbra | 58 |
| Figura 26 - Evolução do caudal de água residual e caudal de lama afluente à digestão | 70 |
| Figura 27 - Evolução do caudal de lama afluente à digestão, caudal de biogás e carga volúmica | 72 |
| Figura 28 - Evolução do caudal de biogás, pH da lama espessada e digerida | 73 |
| Figura 29 - Evolução do caudal de biogás e dos sólidos voláteis afluentes | 74 |
| Figura 30 - Evolução do caudal de biogás e da temperatura de digestão | 75 |
| Figura 31 - Evolução do caudal de biogás e do T_{RH} | 76 |
| Figura 32 - Evolução dos AGV e Alcalinidade..... | 77 |
| Figura 33 - Evolução da relação caudal de biogás / caudal de água residual e caudal de biogás / caudal de lama afluente à digestão | 78 |
| Figura 34 - Evolução do caudal de lama afluente à digestão e da quantidade de sólidos voláteis afluentes..... | 79 |
| Figura 35 - Evolução da carga volúmica e da produtividade de biogás face ao T_{RH} | 80 |
| Figura 36 - Evolução da CV nos digestores anaeróbios | 81 |
| Figura 37 - Relação entre a Produtividade específica de biogás e o T_{RH} | 81 |
| Figura 38 - Relação entre a Carga volúmica e o T_{RH} | 82 |
| Figura 39 - Produtividade de biogás face à carga volúmica..... | 83 |
| Figura 40 - Evolução da produtividade específica de biogás | 84 |
| Figura 41 - Reprodução da folha de cálculo. 1ª parte - Condições de Exploração..... | 85 |
| Figura 42 - Reprodução da folha de cálculo. 2ª parte - Custos de Investimento | 86 |
| Figura 43 - Reprodução da folha de cálculo. 3ª parte - Custos de Manutenção..... | 87 |
| Figura 44 - Reprodução da folha de cálculo. 4ª parte - Balanço Económico | 88 |

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de água residual na sociedade atual é visto como uma prioridade no que respeita aos problemas ambientais e de saúde pública. Devido à água ter uma ampla influência nos ecossistemas, este tratamento é ambientalmente indispensável para não deteriorar a qualidade dos meios aquáticos e consequentemente condicionar os seus usos e afetar a saúde pública. Há também um balanço entre o esforço de preservação ambiental e esforço financeiro aplicado, sendo este balanço diferente de país para país, onde são definidos pela legislação valores mínimos de qualidade na descarga de água residual tratada para o meio recetor, precavendo deste modo a poluição e deterioração do mesmo.

O sistema de tratamento da água residual estrutura-se em três fases: fase líquida, fase sólida e fase gasosa. Dependendo do grau de exigência, o tratamento da fase líquida, pode compreender tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento da fase sólida deve-se à produção de lamas geradas no tratamento da linha líquida, que nesta fase passam por processos de espessamento, estabilização e desidratação, sendo este trabalho focado na digestão anaeróbia, um tipo de processo de estabilização de lamas que é o mais comumente utilizado. Por fim, o tratamento da fase gasosa que se consubstancia na operação de desodorização e que se deve à libertação de gases que podem ser incómodos devido aos maus cheiros e até mesmo perigosos para a saúde humana.

Numa época em que a eficiência energética é entendida como um objetivo estratégico torna-se relevante procurar e maximizar, em cada área de atividade, particularidades das mesmas que possam contribuir para este objetivo.

Associadas a esta problemática podem estar também questões de qualidade do ar/poluição atmosférica, nomeadamente a emissão de poluentes relacionados com o efeito de estufa.

No que respeita às águas residuais o consumo energético é um fator preponderante na gestão dos sistemas de recolha/drenagem, transporte e tratamento de águas residuais. Atualmente um critério base no projeto e construção destes sistemas é a utilização de motores de alto rendimento (motores EFF1 ou IE2 ou IE3), utilização de controlo eletrónico de velocidade dos motores elétricos, controlo de variáveis de processo em contínuo, etc.

A fase sólida tem sido objeto de maior atenção devido ao elevado peso que comporta nos custos de exploração e por a digestão anaeróbia ser um processo de tratamento capaz de ser altamente rentabilizado, com interesse do ponto de vista económico e energético.

A digestão anaeróbia surge, nas Estações de Tratamento de Águas Residuais municipais, essencialmente na linha sólida, ou seja no tratamento biológico das lamas produzidas na fase líquida. Do processo de decomposição biológica de matéria orgânica resulta a libertação de biogás, que deve ser queimado. Da sua combustão, liberta-se principalmente CO₂ para a atmosfera, que é 27 vezes menos prejudicial para o ambiente do que o metano contido no

biogás. O biogás é na sua maioria constituído por CH_4 , o que significa que é um gás combustível com um Poder Calorífico Inferior (PCI) adequado para a queima em caldeiras, motores de cogeração, turbinas, permitindo a sua valorização energética, sendo esta outra medida de eficiência.

2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A Digestão Anaeróbia tem como objetivo o tratamento de lamas permitindo a sua estabilização, que ocorre na ausência de oxigênio e devido à ação de vários tipos de bactérias. Este processo, ocorre numa série de fases distintas e consiste na degradação de matéria orgânica, acompanhada da redução dos organismos patogênicos, redução do volume de lamas, controle do potencial de putrefação da matéria orgânica, transformação das lamas num produto inerte, inócuo e de fácil desidratação (Turovskiy e Mathai, 2006) .

2.1 Fases da digestão anaeróbia

O processo da digestão anaeróbia ocorre dividindo-se em quatro fases, sendo estas a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 1).

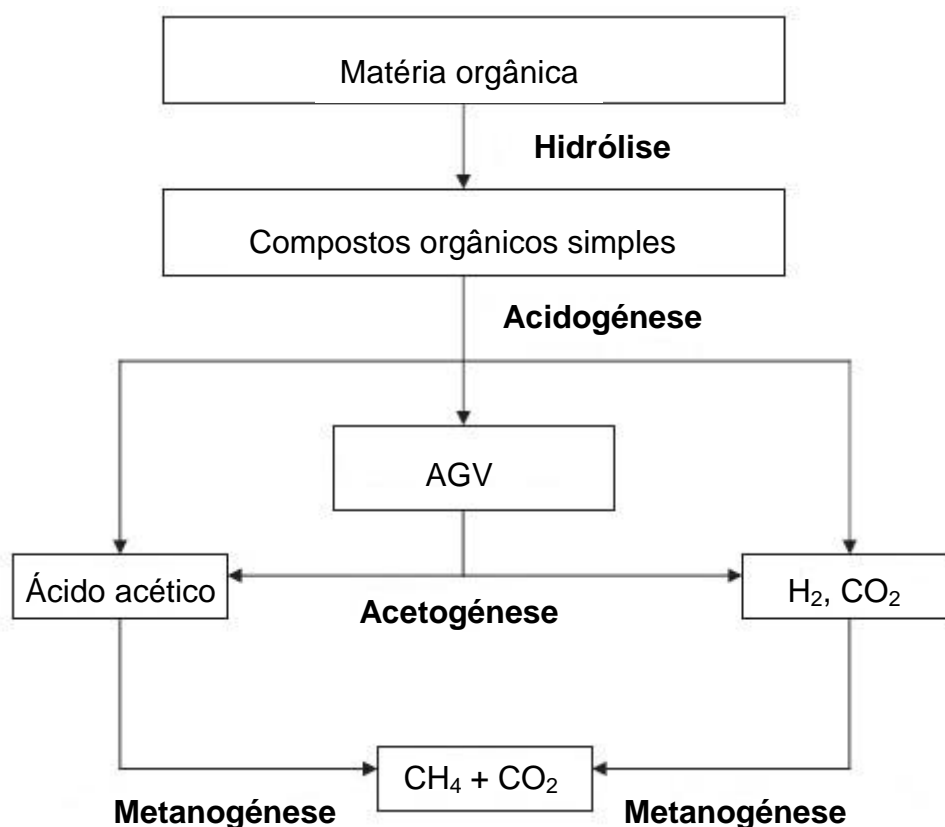


Figura 1 - Diagrama de fases da digestão anaeróbia (adaptado de Appels *et al.*, 2008)

Conforme se mostra na Figura 1 a conversão de matéria orgânica em biogás ocorre devido à sequência de fases, as quais têm associados microrganismos característicos de cada uma (Van Haandel e Lettinga, 1994).

2.1.1 Hidrólise

Uma vez que as bactérias anaeróbias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, a primeira fase do processo é a hidrólise de materiais particulados complexos em materiais dissolvidos mais simples, os quais podem atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas.

A hidrólise é desencadeada através de exo-enzimas, excretadas pelas bactérias fermentativas, que decompõem as moléculas, como as proteínas em aminoácidos, os hidratos de carbono em açúcares, os lípidos em cadeias longas de ácidos gordos e glicerina, etc.

Na prática, a taxa de hidrólise pode ser limitante para a taxa global da digestão anaeróbia. Em particular, a taxa de conversão de lípidos torna-se muito baixa abaixo dos 20°C (Van Haandel e Lettinga, 1994).

2.1.2 Acidogénese

Na fase da acidogénese os compostos solúveis gerados na hidrólise são absorvidos e metabolizados pelas células das bactérias fermentativas e depois excretados sob a forma de compostos orgânicos simples. Estes compostos são, por exemplo, ácidos gordos voláteis, álcoois, ácido láctico e compostos minerais como dióxido de carbono, hidrogénio, amónia e gás sulfídrico (Van Haandel e Lettinga, 1994).

Esta fase é realizada essencialmente por bactérias, na sua maioria anaeróbias estritas. Contudo, existem algumas bactérias facultativas, que conseguem metabolizar matéria orgânica por via oxidativa. Este facto tem grande importância na digestão anaeróbia, devido ao oxigénio dissolvido ser tóxico para os microrganismos estritamente anaeróbios, como é o caso das bactérias metanogénicas. A presença das bactérias facultativas servem assim como o garante de sobrevivência para as bactérias anaeróbias estritas (Van Haandel e Lettinga, 1994).

2.1.3 Acetogénese

Na acetogénese os produtos das acidogénese são convertidos em acetato, hidrogénio e dióxido de carbono. Da matéria orgânica originalmente presente na lama afluenta à digestão, 70% é convertida em ácido acético e o resto principalmente em hidrogénio. Dependendo do estado de oxidação da matéria orgânica, a formação de ácido acético é acompanhada pela formação de dióxido de carbono e/ou hidrogénio. Os processos podem ocorrer simultaneamente, mas é costume formar-se mais hidrogénio do que dióxido de carbono,

porque o número médio de elétrons disponíveis na matéria orgânica é geralmente maior do que quatro por átomo de carbono. Portanto, a conversão da matéria orgânica em ácido acético é acompanhada maioritariamente pela formação de hidrogénio (Van Haandel e Lettinga, 1994).

2.1.4 Metanogénese

A metanogénese é a última fase do processo de digestão anaeróbia, onde se dá a produção de metano. O metano é produzido a partir do ácido acético ou do dióxido de carbono e hidrogénio, usando bactérias acetotróficas ou hidrogenotróficas, respetivamente. A metanogénese é frequentemente a fase limitante da taxa global de digestão anaeróbia, devido à maior sensibilidade das bactérias metanogénicas às condições e variações do meio, embora a baixas temperaturas a fase limitante seja a hidrólise (Van Haandel e Lettinga, 1994).

2.2 Vantagens e desvantagens da digestão anaeróbia

Embora existam outros processos possíveis para a estabilização das lamas, a digestão anaeróbia apresenta algumas vantagens conforme as que se descrevem abaixo:

Vantagens da digestão anaeróbia de lamas

- Produção de biogás, que pode ser utilizado para produzir energia elétrica para sustentar total ou parcialmente os equipamentos da ETAR ou para vender essa energia à rede elétrica. Também é produzida energia térmica gerada na combustão do biogás, que pode ser aproveitada para o aquecimento das lamas na digestão, melhorando as condições de funcionamento, a produtividade e o desempenho.
- Redução da massa e volume total de lamas através da conversão em metano, dióxido de carbono e vapor de água. Da quantidade afluyente ao digestor, a quantidade de sólidos voláteis destruídos é aproximadamente 30 a 65% segundo Turovskiy e Mathai (2006), 50 a 60% segundo Qasim (1999) e menor que 50% segundo Metcalf & Eddy (1991), o que pode proporcionar uma redução significativa no custo de desidratação e deposição final de lamas.
- Produção de lamas digeridas que podem ser utilizadas para correção de solos, devido a conterem nutrientes, como azoto, fósforo, matéria orgânica, entre outros e que podem contribuir para o aumento da fertilidade e textura dos solos (Turovskiy e Mathai, 2006).
- Destruição elevada de microrganismos patogénicos, especialmente com o processo de digestão termófila (Turovskiy e Mathai, 2006).

Contudo existem também algumas desvantagens associadas a este processo de estabilização de lamas, nomeadamente:

- O custo de instalação e manutenção é elevado, devido às grandes dimensões dos digestores e equipamentos associados ao seu funcionamento.
- O processo exige elevados tempos de retenção, superiores a dez dias, para a população de bactérias se desenvolver e estabilizar a lama, o que implica grandes volumes de digestão.
- Os microrganismos presentes na digestão anaeróbia são sensíveis a pequenas variações de diversos fatores ambientais, tornando-se necessário fazer uma monitorização do desempenho e controlo do processo para prevenir distúrbios (Turovskiy e Mathai, 2006).
- Digestores anaeróbios que não são agitados, ou cujo conteúdo não é homogeneizado, estão na origem de sobrenadantes com alta concentração de sólidos suspensos, azoto e fósforo (Turovskiy e Mathai, 2006).

2.3 Cinética e modelos da digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia pode ser associado a modelos cinéticos. Ao incluir num modelo os mecanismos de reação microbianos, os fatores ambientais e os parâmetros operacionais, que afetam a viabilidade do processo e a eficiência da utilização do substrato, resultam expressões excessivamente complexas. Assim, o desenvolvimento dos modelos deu-se com base na seleção de apenas alguns dos princípios fundamentais (Malina e Pohland, 1992).

Normalmente, os modelos são desenvolvidos para descrever os efeitos dos substratos limitantes no crescimento dos microrganismos, como nutrientes e condições ambientais. Habitualmente, a hidrólise de moléculas complexas é descrita por modelos de 1ª ordem e o Quadro 1 apresenta alguns desses modelos cinéticos mais utilizados (Malina e Pohland, 1992).

Quadro 1 - Modelos cinéticos usados no processo de tratamento por microrganismos anaeróbios (Malina e Pohland, 1992)

| | | | |
|----------------------------|--|---|--|
| Cinética de primeira ordem | $\mu = \frac{kS}{S_0 - S} - b$ | $-\frac{dS}{dt} = kS$ | $S = \frac{S_0}{w + k\theta_c}$ |
| Monod | $\mu = \frac{\mu_{max}S}{K_s + S} - b$ | $-\frac{dS}{dt} = \frac{\mu_{max}XS}{Y(K_s + S)}$ | $S = \frac{K_s(1 + b\theta_c)}{\theta_c(\mu_{max} - b) - 1}$ |
| Grau | $\mu = \frac{\mu_{max}S}{S_0} - b$ | $-\frac{dS}{dt} = \frac{\mu_{max}XS}{YS_0}$ | $S = \frac{S_0(1 + b\theta_c)}{\mu_{max}\theta_c}$ |
| Contois | $\mu = \frac{\mu_{max}S}{BX + S} - b$ | $-\frac{dS}{dt} = \frac{\mu_{max}XS}{Y(BX + S)}$ | $S = \frac{BYS_0(1 + b\theta_c)}{BY(1 + b\theta_c) + \theta_c(\mu_{max} - b) - 1}$ |
| Chen e Hashimoto | $\mu = \frac{\mu_{max}S}{KS_0 + (1 - K)S} - b$ | $-\frac{dS}{dt} = \frac{\mu_{max}XS}{KX + YS}$ | $S = \frac{KS_0(1 + b\theta_c)}{(K - 1)(1 + b\theta_c) + \mu_{max}\theta_c}$ |

Onde,

X = concentração de microrganismos

θ = tempo de retenção hidráulico

θ_c = tempo de retenção de sólidos microbianos ou tempo de residência médio das células

Y = coeficiente de rendimento

S_0, S = concentração afluyente e efluente de substrato limitante ao crescimento

b = taxa específica de decaimento dos microrganismos

μ = taxa específica de crescimento dos microrganismos

$\mu_{\max} = u_m = kY$ = taxa específica máxima de utilização do substrato

k = taxa máxima de utilização do substrato por unidade de peso dos microrganismos

K_s = constante de meia saturação = concentração do substrato quando $\mu = \mu_{\max}/2$

B = constante de *Contois*

O modelo de Monod costuma ser o mais utilizado para simular o crescimento em substratos solúveis e neste modelo as concentrações do substrato afluyente e efluente são independentes. Pelo contrário, os modelos de Grau, Contois e Chen e Hashimoto, são mais utilizados para simular a concentração do substrato efluente, em função da concentração do substrato afluyente (Malina e Pohland, 1992).

Os modelos apresentados assumem uma digestão anaeróbia em mistura completa e condições constantes. Como a conversão de moléculas complexas por microrganismos anaeróbios tem uma sequência de simbioses, os modelos assumem uma fase limitante ou um componente na reação que afeta a eficiência do processo, ao reduzir a produção dos substratos precursores ou desenvolvimento de espécies competitivas do substrato (Malina e Pohland, 1992).

2.4 Fatores ambientais

Existem vários fatores ambientais que influenciam a digestão anaeróbia, sendo os mais importantes a temperatura, o pH, a alcalinidade, a presença de nutrientes e a toxicidade, descritos em seguida.

2.4.1 Temperatura

Entre os vários fatores ambientais, a temperatura é considerada um dos mais importantes, devido a ter uma elevada influência no desempenho do processo de digestão anaeróbia e a nível de operação do digestor. O desempenho do digestor depende em muito do tipo de bactérias anaeróbias que se desenvolvem no seu interior, da sua velocidade de crescimento, produção de biogás, grau de utilização do substrato, duração de arranque do digestor e a sua capacidade de resposta a variações na carga afluente.

Consoante a temperatura de digestão, verifica-se que cada tipo de bactéria tem um intervalo de temperatura ótima para o seu desenvolvimento e é classificada de acordo com essa gama de temperatura (Lettinga *et al.*, 2001). Definem-se três gamas diferentes de temperatura no funcionamento dos digestores, designadas por gama psicrófila, mesófila e termófila (Quadro 2).

Quadro 2 - Gamas de temperatura ótima da digestão anaeróbia (CCE, 2000)

| Gama de temperaturas | Intervalo |
|----------------------|-----------|
| Psicrófila | 15 – 25°C |
| Mesófila | 30 – 40°C |
| Termófila | 50 – 60°C |

A Figura 2 mostra a taxa de crescimento destes três tipos bactérias metanogénicas em função da temperatura do meio.

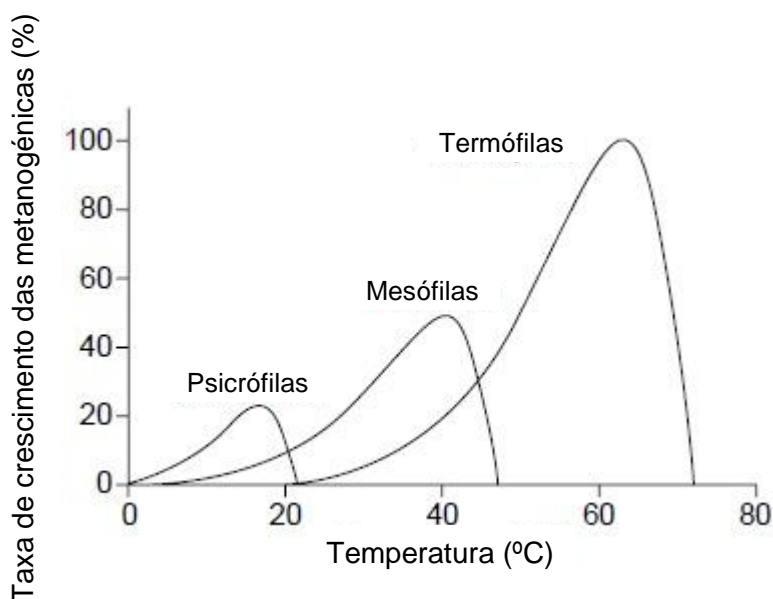


Figura 2 - Taxa de crescimento das bactérias metanogénicas psicrófilas, mesófilas e termófilas (adaptado de Wiegell, 1990)

Conforme se pode constatar pela Figura 2 verifica-se que não há uma fronteira definida entre os três tipos de microrganismos, psicrófilos, mesófilos e termófilos. É também visível que a taxa de crescimento dos microrganismos decresce acentuadamente logo que é ultrapassada a temperatura ótima. O mesmo acontece para temperaturas inferiores à sua ótima de crescimento, mas não tão acentuadamente, verificando-se que todos os tipos de bactérias conseguem sobreviver ainda numa larga gama de temperaturas mais baixas que a ótima de crescimento (Lettinga *et al.*, 2001).

No que diz respeito à taxa de degradação da matéria orgânica, na digestão anaeróbia existem dois picos, entre 35 e 40°C para a gama mesófila e 55 a 60°C para a gama termófila (Van Haandel e Lettinga, 1994). As condições termófilas apresentam taxas de digestão mais rápidas, permitindo uma maior destruição de sólidos voláteis e destruição de microrganismos patogénicos. Contudo, a digestão termófila têm grandes desvantagens face à gama mesófila, na medida em que a energia necessária para o aquecimento das lamas é bastante maior, menor qualidade do sobrenadante, contendo maiores quantidades de materiais dissolvidos, maior potencial de odores ofensivos, e o processo de estabilização pode ser menos eficiente, porque as bactérias termófilas são mais sensíveis que as mesófilas a variações de temperatura e apresentam um baixo potencial de desidratação (Turovskiy e Mathai, 2006). Portanto, entre estas duas gamas, normalmente, as condições mesófilas são mais favoráveis do ponto de vista económico (Van Haandel e Lettinga, 1994).

Em condições psicrófilas as reações químicas e biológicas são mais lentas do que em condições mesófilas e grande parte dessas reações de degradação da matéria orgânica, a baixas temperaturas, necessitam de mais energia para ocorrerem (Van Haandel e Lettinga, 1994). Também como resultado negativo devido às baixas temperaturas, especificamente inferiores a 20°C, ocorre o aumento da solubilidade dos compostos gasosos, o que resulta em maiores concentrações de metano, sulfídrico e hidrogénio nas escorrências e nas lamas digeridas (Lettinga *et al.*, 2001).

2.4.2 pH

O valor e a estabilidade do pH num digestor anaeróbio têm uma importância elevada, pois os diferentes microrganismos intervenientes no processo têm faixas ótimas de pH diferentes, ou seja, onde a sua velocidade de crescimento é máxima e reagem de forma diferente às variações de pH do meio. Segundo CCE (2000) os microrganismos mais sensíveis a variações de pH são os metanogénicos e a metanogénese só prossegue quando o pH é mantido numa gama neutra. Van Haandel e Lettinga (1994) referem que para valores de pH menores que 6,3 ou maiores que 7,8 a taxa de metanogénese diminui. Também McCarty (1964) confirma uma gama de pH ótima idêntica para a metanogénese, na ordem dos 6,6 a 7,6. Malina e Pohland

(1992) anunciam valores ótimos entre 6,8 e 7,4 e, valores extremos fora da gama entre 6,4 e 7,8. Os microrganismos acidogénicos são significativamente menos sensíveis a baixos ou altos valores de pH e têm a sua gama ótima de crescimento entre valores de 5,5 a 6, pelo que a acidogénese pode continuar mesmo quando há inibição da metanogénese, levando a uma contínua redução do pH, possivelmente conduzindo à falha do processo, por acidificação do digestor (Van Haandel e Lettinga, 1994).

Durante o processo de digestão anaeróbia, ocorre a formação contínua de ácido, que tende a baixar o pH do meio. Contudo, a formação de metano também produz alcalinidade, primariamente nas formas de dióxido de carbono e bicarbonato. Estes compostos fornecem poder tampão e amortecem as variações de pH por combinação com iões de hidrogénio (Vesilind, 2003).

Devido às diferentes condições ótimas de crescimento para os microrganismos presentes na digestão, é possível dividir o processo de digestão anaeróbia em duas fases separadas e em série: um digestor onde ocorre a acidogénese e, em seguida, um digestor onde ocorre essencialmente a metanogénese. Quando o sistema comporta apenas um digestor, o pH de alimentação deve ser corrigido para valores neutros, favorecendo a metanogénese visto que os microrganismos responsáveis pela mesma são os mais sensíveis (CCE, 2000).

O principal aspeto que controla o pH dos digestores anaeróbios é o sistema tampão proporcionado pelo bicarbonato. Portanto, o pH depende da pressão parcial de CO₂ e da concentração de componentes ácidos e alcalinos na fase líquida (CCE, 2000).

A avaliação do estado de funcionamento de um digestor anaeróbio pelo pH é limitada, devido ao poder tampão, que torna lentas e vagas as alterações verificadas nas medições. Só quando a acidez é maior que a capacidade de tampão do bicarbonato é que é detetável através de variações observadas nas medições de pH, que acima de 0,5 valores podem afetar o processo (CCE, 2000).

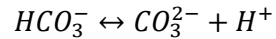
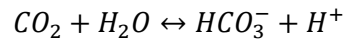
2.4.3 Alcalinidade

A alcalinidade representa a capacidade de resistência oferecida à variação do pH na presença de substâncias com características para o alterar, designando-se como o poder tampão do meio e vem expressa em mg CaCO₃/l.

A alcalinidade é o resultado da concentração de bicarbonato e ácidos gordos voláteis, expressa pela seguinte fórmula:

$$\text{Alcalinidade total} = \text{Alcalinidade a partir do bicarbonato} + \text{Alcalinidade a partir dos ácidos gordos voláteis}$$

Uma parte da alcalinidade deve-se à dissolução de CO_2 e formação de bicarbonato, sendo que a alcalinidade depende da relação dióxido de carbono-bicarbonato, definida pelas reações:



A dissolução do CO_2 no meio é proporcional à sua pressão parcial no biogás e a sua conversão depende do pH do meio, portanto a concentração em bicarbonatos, o pH e a pressão parcial do CO_2 relacionam-se entre si. Quanto maior a concentração de bicarbonato, maior a alcalinidade. (CCE, 2000)

A alcalinidade também depende das características da alimentação, a elevada presença de compostos azotados afluentes cria condições propícias à formação de bicarbonato, neste caso bicarbonato de amónia, que por sua vez leva a uma maior alcalinidade (CCE, 2000).

A restante alcalinidade deve-se aos ácidos gordos voláteis, que quando em maior concentração provocam uma diminuição da alcalinidade total, não provocando uma variação considerável do pH enquanto não foi ultrapassado o poder tampão. (CCE, 2000)

Segundo CCE (2000), normalmente os digestores apresentam boas concentrações de alcalinidade quando esta se situa na gama de valores entre 2500 e 5000 mg $CaCO_3/l$, enquanto Metcalf & Eddy (1991) sugere que a alcalinidade apresenta valores satisfatórios entre 1000 e 5000 mg $CaCO_3/l$. No que diz respeito aos ácidos gordos voláteis, Metcalf & Eddy (1991) admite valores abaixo de 250 mg/l, enquanto Malina e Pohland (1992) refere valores entre 50 e 500 mg/l na forma de ácido acético.

Conforme se pode verificar pela Figura 3, em que se mostra a relação entre o pH e a concentração da alcalinidade, à medida que a alcalinidade baixa, o pH do meio também diminui.

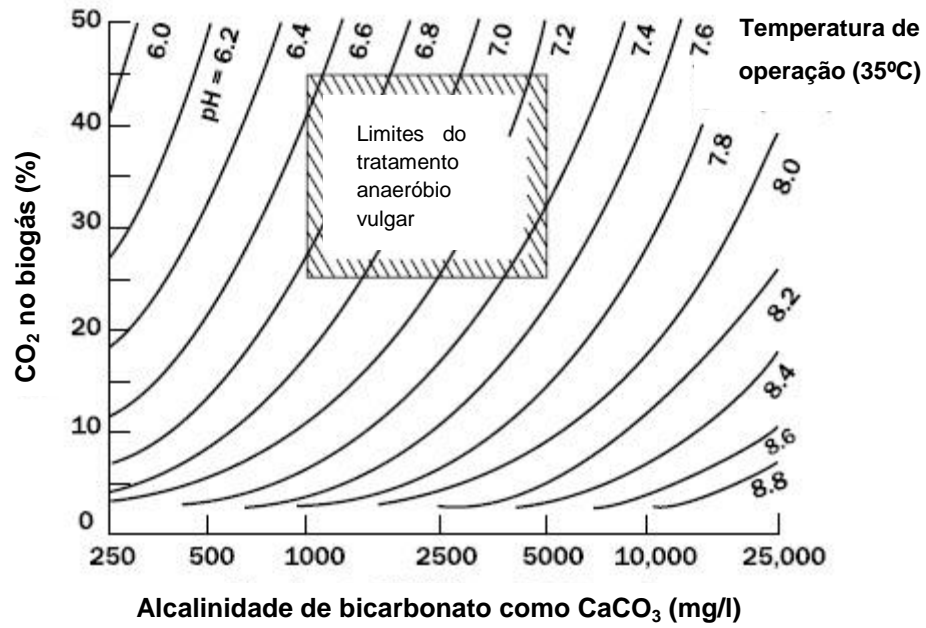


Figura 3 - Relação entre o pH e a concentração de bicarbonato, a uma temperatura de 35°C (U.S. EPA, 1979)

2.4.4 Macro e micro nutrientes

Os microrganismos presentes na digestão anaeróbia têm necessidades de nutrientes. Estas necessidades são aferidas através da composição química do material celular, apresentando-se no Quadro 3 a composição típica das células bacterianas.

Quadro 3 - Composição típica de células bacterianas (adaptado de Metcalf & Eddy, 2003)

| Elemento | Porcentagem em massa seca | |
|------------|---------------------------|--------|
| | Intervalo | Típico |
| Carbono | 45 – 55 | 50 |
| Oxigênio | 16 – 22 | 20 |
| Azoto | 12 – 16 | 14 |
| Hidrogênio | 7 – 10 | 8 |
| Fósforo | 2 – 5 | 3 |
| Enxofre | 0,8 – 1,5 | 1 |
| Potássio | 0,8 – 1,5 | 1 |
| Sódio | 0,5 – 2,0 | 1 |
| Cálcio | 0,4 – 0,7 | 0,5 |
| Magnésio | 0,4 – 0,7 | 0,5 |
| Cloro | 0,4 – 0,7 | 0,5 |
| Ferro | 0,1 – 0,4 | 0,2 |
| Outros | 0,2 – 0,5 | 0,3 |

Os principais elementos necessários à síntese do material orgânico são o carbono, o oxigênio, o azoto e o hidrogênio. Em menor quantidade, é necessário a presença de enxofre para a síntese de aminoácidos e de fósforo que é constituinte de ácidos nucleicos, fosfolípidos e ATP. O potássio, cálcio, magnésio e ferro para a formação de complexos metálicos e como co-fatores para a atividade enzimática (CCE, 2000).

O substrato pode ter características muito variáveis em termos de composição qualitativa e dependendo destas características, os macronutrientes mencionados podem encontrar-se, ou não, em proporções favoráveis ao desenvolvimento dos microrganismos. A forma como estes macronutrientes são disponibilizados no substrato também tem importância, na medida em que uma hidrólise inicial lenta de materiais de difícil decomposição poderá não permitir a formação destes elementos em quantidade ou qualidade suficientes para um desenvolvimento rápido dos microrganismos anaeróbios (CCE, 2000).

Dos macronutrientes referidos, o azoto assume uma importância elevada pois é necessário a todos os organismos vivos para a formação das suas proteínas. Para um bom funcionamento do processo anaeróbio a relação entre o carbono e o azoto (razão C/N) deve ser entre 15 e 30 (CCE, 2000). No Quadro 4 são apresentadas as razões C/N de lamas primárias e secundárias.

Quadro 4 - Relação C/N em lamas (Adaptado de MADRP, 1997 e Lagrange, 1979, citados por CCE, 2000)

| Produto orgânico | C/N |
|------------------------------|------------|
| Lamas primárias | 11 |
| Lamas secundárias (ativadas) | 6 |

Outro macronutriente importante no processo anaeróbio é o fósforo, que deve estar presente numa relação C/P de 150/1. O processo não é afetado por concentrações de fósforo elevadas, mas é inibido caso não haja presença do mesmo.

Relativamente ao enxofre, a quantidade presente deve ser limitada para não permitir o desenvolvimento excessivo de bactérias sulfato-redutoras e a consequente formação de sulfureto de hidrogénio (H₂S) a partir do enxofre.

Além dos macronutrientes já referidos, o processo anaeróbio necessita de outros elementos, em quantidades reduzidas (inferiores a 0,0001 mol/l), designados por micronutrientes, como o níquel e o cobalto, sendo a sua presença importante para o crescimento dos microrganismos anaeróbios. O níquel é utilizado para ativar o fator F₄₃₀ (co-fator envolvido na metanogénese). No entanto, os micronutrientes também podem ter um efeito inibidor no desenvolvimento bacteriano, caso estejam presentes em elevadas concentrações (CCE, 2000).

2.4.5 Toxicidade

Existem muitos materiais que são tóxicos para as bactérias num digestor anaeróbio, como os metais pesados, amónia, sulfuretos e alguns compostos inorgânicos. As condições tóxicas normalmente ocorrem devido à sobrealimentação e excessiva adição de agentes químicos. As condições tóxicas podem também ocorrer de contribuições de águas residuais industriais com compostos tóxicos. Nos Quadros 5 e 6 mostram-se algumas substâncias e as respectivas concentrações inibitórias.

Quadro 5 - Materiais inorgânicos tóxicos e inibitórios na digestão anaeróbia (adaptado de Turovskiy e Mathai, 2006)

| Elemento | Concentração moderadamente inibitória (mg/L) | Concentração fortemente inibitória (mg/L) |
|------------------------------|--|---|
| Na ⁺ | 3500 – 5500 | 8000 |
| K ⁺ | 2500 – 4500 | 12000 |
| Ca ²⁺ | 2500 – 4500 | 8000 |
| Mg ²⁺ | 1000 – 1500 | 3000 |
| NH ₄ ⁺ | 1500 – 3500 | 3000 |
| S ²⁻ | 200 | 200 |
| Cu ²⁺ | | 0,5 (solúvel) 50 – 70 (total) |
| Cr ⁶⁺ | | 3,0 (solúvel) 200 – 250 (total) |
| Cr ³⁺ | | 2,0 (solúvel) 180 – 240 (total) |
| Ni ²⁺ | | 30 (total) |
| Zn ²⁺ | | 1,0 (solúvel) |

Quadro 6 - Materiais orgânicos tóxicos e inibitórios na digestão anaeróbia (adaptado de Turovskiy e Mathai, 2006)

| Composto | Concentração resultante em 50% de redução na atividade (mM) |
|-------------------------|---|
| 1-Cloropropano | 0,1 |
| Nitrobenzeno | 0,1 |
| Acroleína | 0,2 |
| 1-Cloropane | 1,9 |
| Formaldeído | 2,4 |
| Ácido láurico | 2,6 |
| Etilbenzeno | 3,2 |
| Acrlonitrilo | 4 |
| 3-Cloro-1,2-propanodiol | 6 |
| Crotonaldeído | 6,5 |
| Ácido 2-Cloropropiónico | 8 |
| Acetato de vinila | 8 |
| Acetaldeído | 10 |
| Acetato de etilo | 11 |
| Ácido acrílico | 12 |
| Catecol | 24 |
| Fenol | 26 |
| Anilina | 26 |
| Resorcinol | 29 |
| Propanol | 90 |

Embora os metais pesados sejam necessários para a síntese celular dos microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia, estes mesmos microrganismos têm limites de tolerância para o teor dos mesmos. Ultrapassar esses valores resulta em toxicidade e pode estar na origem de falhas no processo de digestão anaeróbia. As lamas resultantes do tratamento de águas residuais municipais têm, normalmente, concentrações baixas de metais (sódio, potássio, cálcio e magnésio). Contudo, havendo contribuições significativas de descargas industriais esta situação corre o risco de entrar frequentemente em níveis já de toxicidade. Durante a digestão anaeróbia de proteínas e ureia é produzida amônia, que pode chegar a níveis tóxicos, quando as concentrações de azoto amoniacal são maiores que 1000 mg/l, mas entre 50 e 200 mg/l são benéficas para o processo (Turovskiy e Mathai, 2006).

Quando as lamas contêm altas concentrações de sulfuretos, também pode haver problemas na digestão anaeróbia porque as bactérias sulfato redutoras reduzem sulfatos a sulfuretos, os quais são tóxicos para as bactérias metanogénicas para concentrações acima de 200 mg/l. Isto pode ser controlado por precipitação dos sulfuretos a sulfuretos de ferro mediante a adição, ao digestor, de sais de ferro em quantidades controladas (Turovskiy e Mathai, 2006).

2.5 Sistemas de digestão anaeróbia

Relativamente ao modo de alimentação do reator existem dois sistemas de digestão anaeróbia, os descontínuos (Batch) e os contínuos (Figura 4).

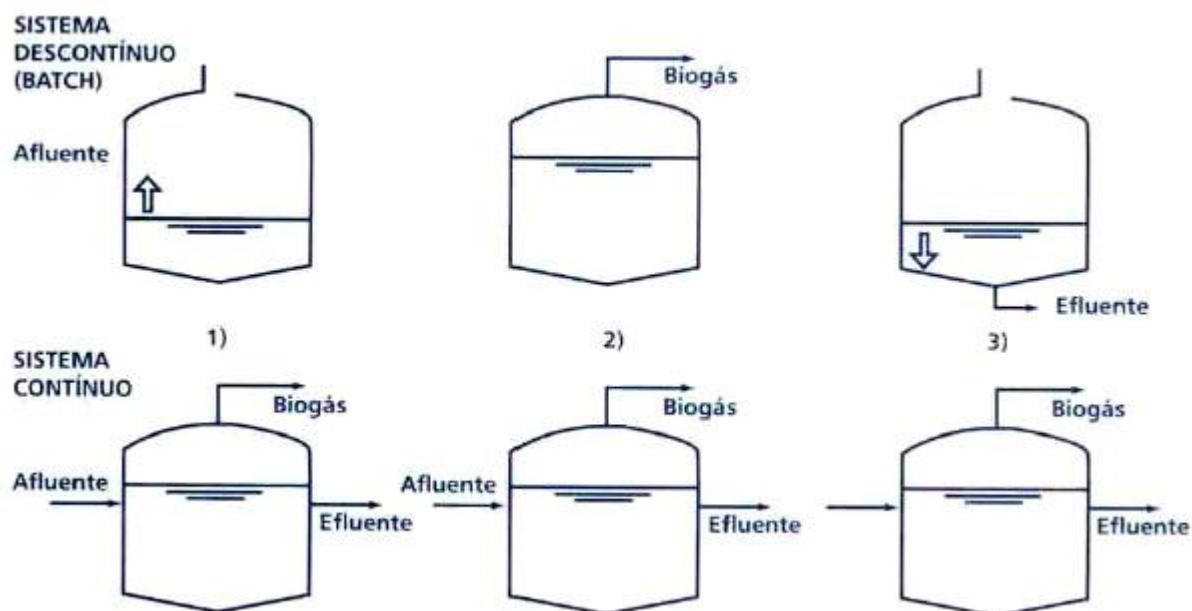


Figura 4 - Sistemas de digestão anaeróbia descontínuo e contínuo (CCE, 2000)

Sistema descontínuo de digestão anaeróbia

No sistema descontínuo, a alimentação de lama ao digestor não é feita em permanência. É introduzida uma quantidade de lamas no digestor, onde ficam durante um tempo determinado, durante o qual os microrganismos decompõem a matéria orgânica e se dá a produção de biogás, tal como se observa pelas fases 1), 2) e 3) da Figura 4. Quando esse período de residência de lamas acaba, parte destas são retiradas e é introduzida uma nova quantidade de lamas, repetindo-se o processo (CCE, 2000).

Sistema contínuo de digestão anaeróbia

Por contraste, nos sistemas contínuos o volume de lamas no digestor é constante, devido à quantidade de lamas admitidas ao digestor ser igual à quantidade que sai. Como a entrada e saída de lamas se dão ao mesmo tempo, visto o reator estar a funcionar a nível constante, as partículas de lamas têm no geral um tempo de retenção médio igual dentro do digestor. Os sistemas contínuos atualmente são os mais utilizados (CCE, 2000).

2.6 Tipos de digestores anaeróbios

Os sistemas de digestão anaeróbia contínuos dividem-se em dois grupos, digestores de biomassa suspensa e biomassa fixa, sendo a principal diferença entre eles a forma de retenção da biomassa.

Matéria suspensa (sem meio de suporte)

Neste tipo de digestor anaeróbio a biomassa encontra-se suspensa no líquido do digestor, de tipo fechado com alimentação semi contínua ou contínua e com possibilidade de serem dotados de aquecimento e agitação de lamas. Indicados para o tratamento de resíduos semi sólidos, como as lamas de ETAR (CCE, 2000). A Figura 5 apresenta os quatro modelos mais comuns deste tipo de reator.

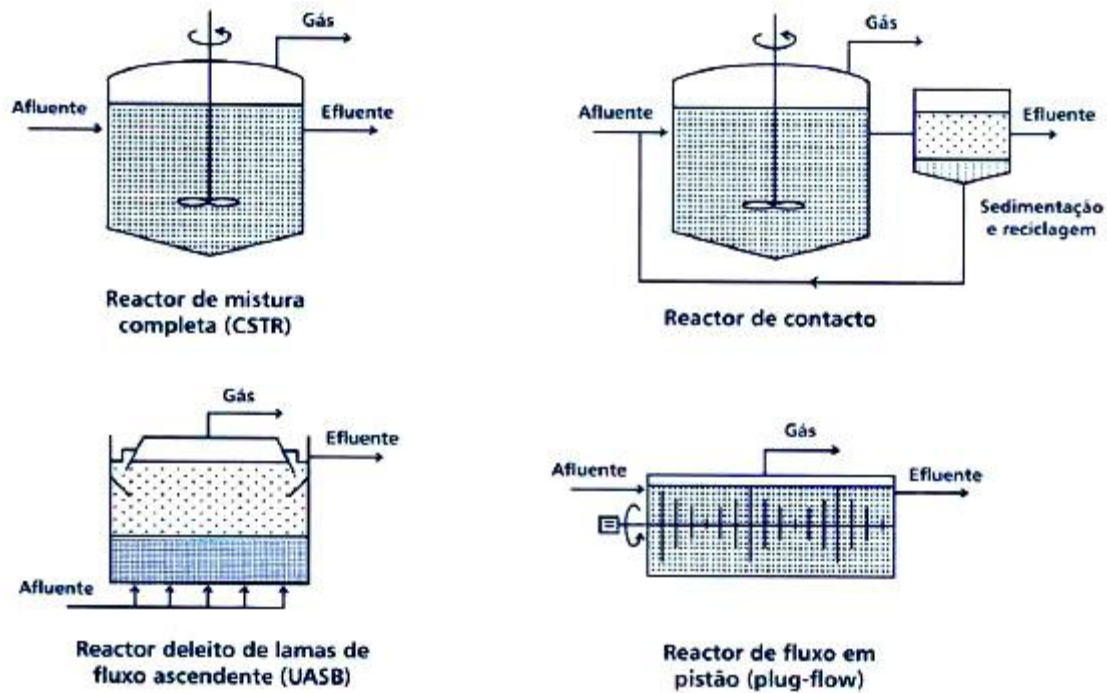


Figura 5 - Modelos de reatores anaeróbios de biomassa em suspensão mais comuns
(CCE, 2000)

Matéria fixa (com meio de suporte)

Neste tipo de digester anaeróbio a biomassa encontra-se fixa a um meio de suporte inerte, proporcionando um tempo de retenção de biomassa superior ao tempo de retenção do fluxo a tratar. O meio de suporte da biomassa pode ter diversas origens, os mais comuns são constituídos por plásticos, pedras, areia e carvão. Estes reatores são normalmente utilizados para tratar substratos com baixo teor de sólidos, devido ao risco de colmatção. Assim sendo, estes reatores de biomassa fixa não são utilizados na etapa de estabilização de lamas resultantes do tratamento de águas residuais em ETAR municipais (CCE, 2000).

A Figura 6 apresenta os três modelos mais comuns deste tipo de reator.

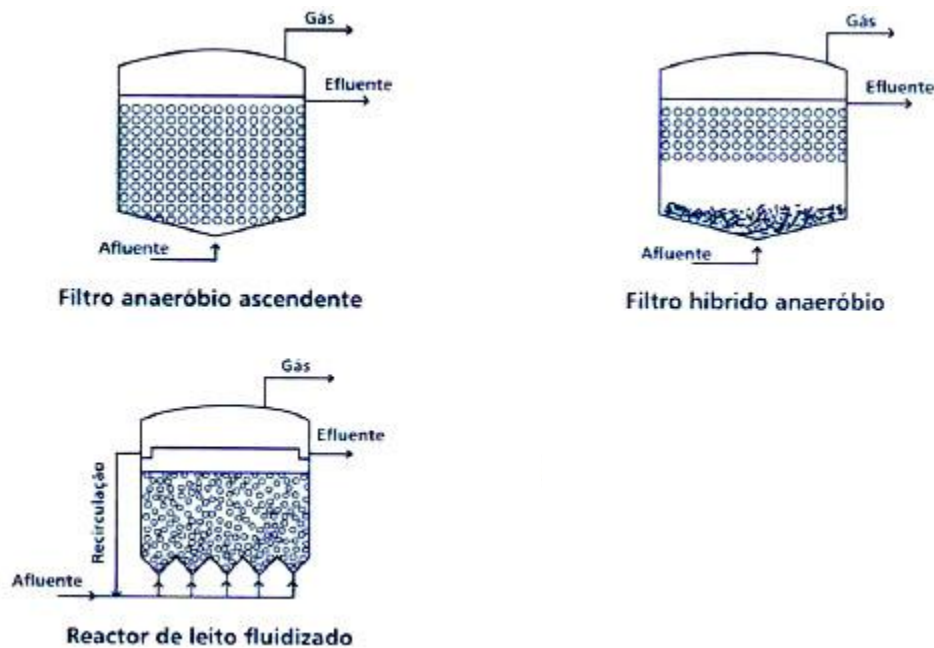


Figura 6 - Modelos de reatores anaeróbios de biomassa fixa mais comuns (CCE, 2000)

2.7 Principais modelos de digestão

Os modelos de digestão anaeróbia de lamas dividem-se em três configurações, a digestão anaeróbia em baixa carga, digestão anaeróbia em alta carga e a digestão anaeróbia em dois reatores:

Digestão anaeróbia em baixa carga

A digestão anaeróbia em baixa carga ocorre normalmente num tanque com forma cilíndrica, com fundo inclinado e cobertura plana ou côncava (Turovskiy e Mathai, 2006). O conteúdo do digestor geralmente não é aquecido e não tem agitação, o que leva a que ocorra estratificação da lama em quatro zonas distintas. Uma camada de escumas, uma camada de sobrenadante, uma camada ativa de digestão de lamas e uma camada de sólidos digeridos e inertes (Qasim, 1999).

A alimentação da lama é feita intermitentemente, assim como a remoção das lamas digeridas e sobrenadantes, que é feita periodicamente. É um modelo de digestão caracterizado por ser pouco eficiente, instável e com necessidade de tempos de digestão longos, entre trinta e sessenta dias (Qasim, 1999).

O biogás é produzido na camada ativa de digestão, que corresponde a menos de 50% do volume total do digestor, sobe à superfície do líquido e é recolhido na cobertura do digestor

(Metcalf & Eddy, 1991). Devido a todas estas limitações, a digestão anaeróbia em baixa carga é considerada apenas para ETAR de pequena dimensão (Figura 7).

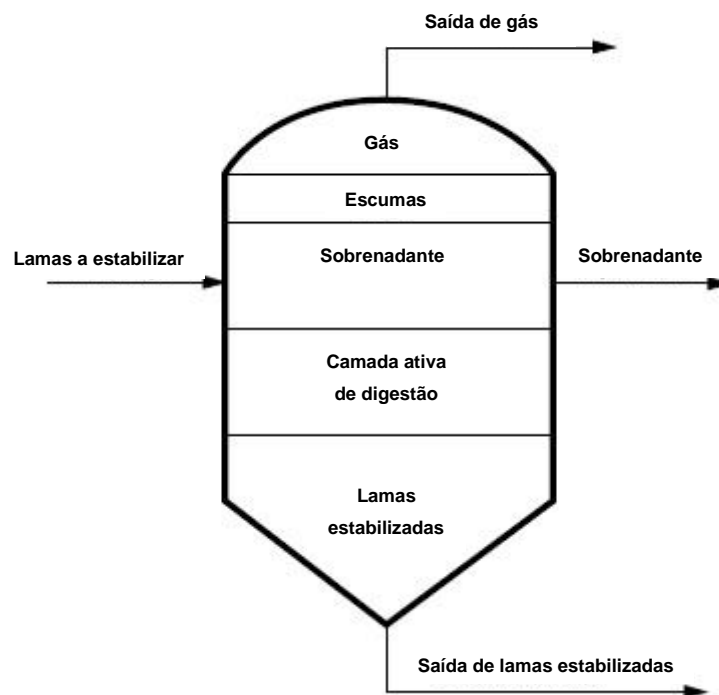


Figura 7 - Digestão anaeróbia em baixa carga (Turovskiy e Mathai, 2006)

Digestão anaeróbia em alta carga

O modelo de digestão anaeróbia em alta carga difere da digestão em baixa carga principalmente pela maior carga volúmica afluente, agitação e aquecimento do conteúdo do digestor, e alimentação contínua de lamas. Estes fatores proporcionam condições de funcionamento uniformes em todo o volume do digestor, resultando num menor volume de digestão, maior estabilidade e eficiência do processo (Metcalf & Eddy, 1991).

O aquecimento das lamas é essencial para aumentar a taxa de crescimento dos microrganismos, taxa de digestão e produção de biogás. A digestão anaeróbia em alta carga pode ser operada em gamas de temperatura mesófilas (30 a 38°C) ou termófilas (50 a 57°C) (Turovskiy e Mathai, 2006).

A agitação das lamas contribui para a redução da estratificação térmica e física, dispersão das lamas para melhor contacto com a biomassa ativa, reduz a formação de escumas, dilui as substâncias inibidoras ou o pH e temperatura de lamas afluentes, aumenta o volume efetivo de digestão do tanque face à digestão em baixa carga, permite que os gases produto da reação se separem mais facilmente, e mantém em suspensão mais matéria inorgânica, que tem

tendência para assentar. A agitação de lamas geralmente é feita por recirculação do biogás, recirculação de lamas ou agitação mecânica (Turovskiy e Mathai, 2006).

A alimentação contínua a um digestor anaeróbio de alta carga é benéfica, pois contribui para um funcionamento em condições mais estáveis e constantes. Os microrganismos metanogênicos são sensíveis a alterações às condições de funcionamento. Se se proceder a uma alimentação uniforme em vários pontos de entrada amortece o choque de aumento da carga que provoca variações na temperatura, alcalinidade e pH do digestor (Vesilind, 2003) (Figura8).

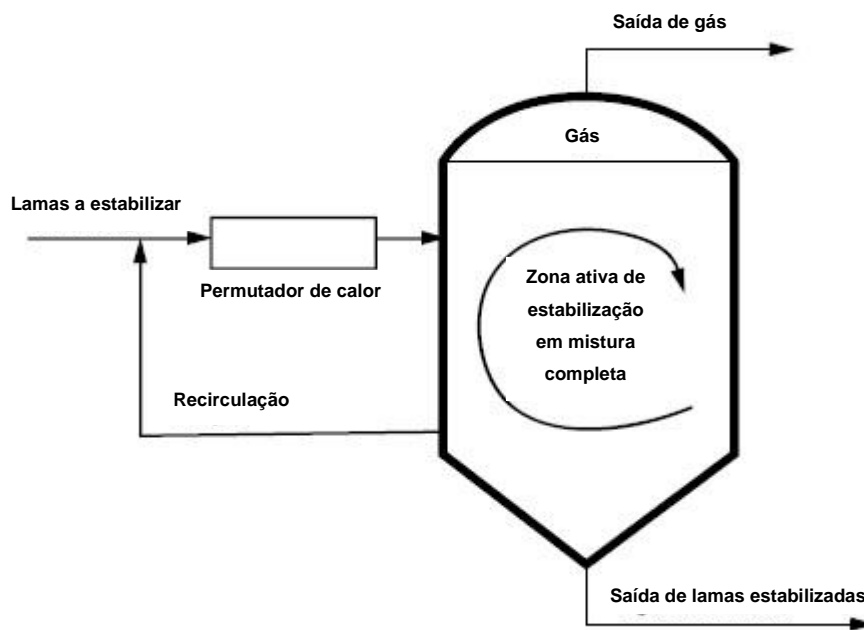


Figura 8 - Digestão anaeróbia em alta carga (Turovskiy e Mathai, 2006)

Digestão anaeróbia em dois reatores

Existe uma possível combinação em dois reatores, na qual se divide as funções de digestão e separação sólido-líquido em dois tanques em série. Neste modelo, o primeiro tanque (1ª fase) é um sistema normal de digestão em alta carga que serve para fazer a digestão anaeróbia dotada de sistema de aquecimento e de agitação. O segundo tanque (2ª fase) não tem qualquer sistema de aquecimento ou agitação, servindo principalmente para armazenamento e separação de sólidos digeridos do líquido sobrenadante. Nesta fase também pode ocorrer alguma digestão e recuperação de biogás caso o digestor seja fechado, o que dá maior segurança se as lamas permaneçam pouco tempo na 1ª fase. Por vezes o segundo tanque é aberto ou simplesmente uma lagoa de lamas (Metcalf & Eddy, 1991) (Figura9).

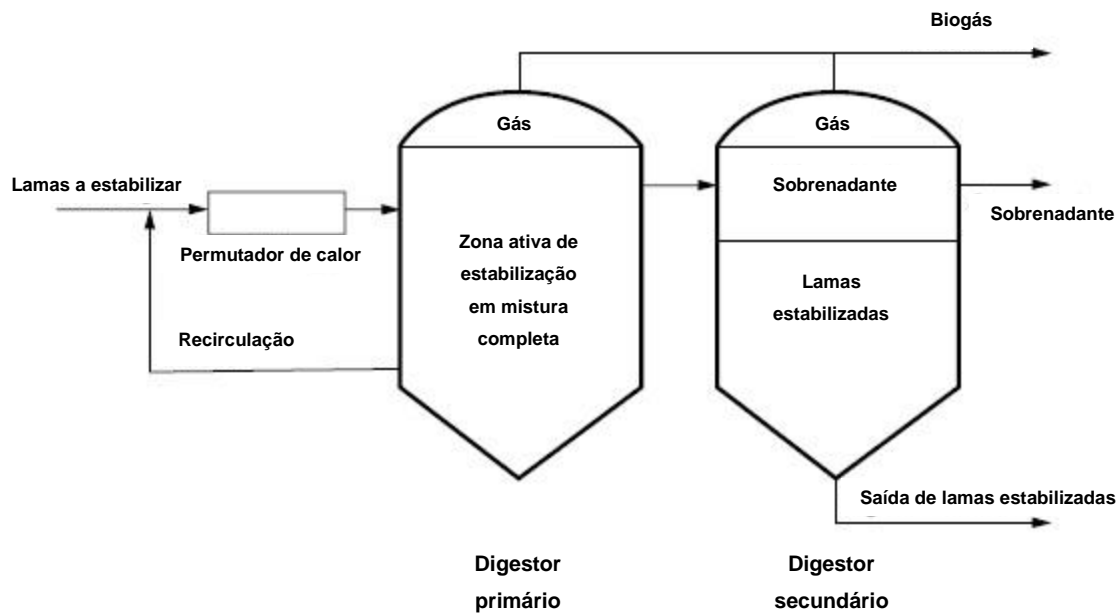


Figura 9 - Digestão anaeróbia com dois reatores (Turovskiy e Mathai, 2006)

2.8 Principais parâmetros operacionais

O propósito da digestão anaeróbia é a destruição biológica de parte dos sólidos voláteis constituintes da lama, sendo esse processo condicionado por vários parâmetros operacionais tais como a temperatura, a mistura/agitação, o tempo de retenção e a carga volúmica que se relacionam.

2.8.1 Temperatura

A temperatura de digestão é um dos parâmetros que mais influência a digestão anaeróbia, conforme já referido no ponto 2.4.1. Quanto mais elevada a temperatura, mais rápida é a digestão da lama, consecutivamente maior é a produção de biogás num determinado período de tempo e menores são os tempos de retenção necessários da lama no digestor. É também expectável que quanto maior a temperatura, maior seja a carga volúmica admissível no digestor.

Na Figura 10 pode-se observar o efeito da temperatura na eficiência de redução de matéria volátil (caso da lama primária).

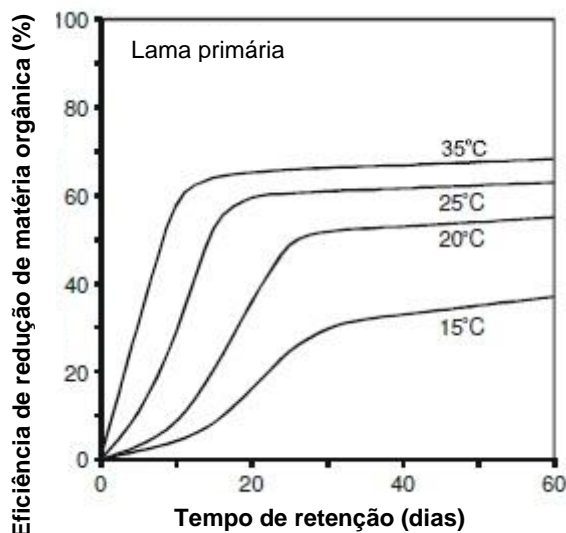


Figura 10 - Influência da temperatura e do tempo de retenção na eficiência de digestão anaeróbia de lamas primárias (adaptado de O'Rourke, 1968)

É evidente a forte dependência da temperatura, pois para temperaturas inferiores a 25°C a eficiência de digestão da lama decresce rapidamente, variação essa que nem sempre pode ser compensada por um aumento do tempo de retenção. Segundo Van Haandel e Lettinga (1994) esta redução da degradação de matéria orgânica pode ser atribuída à diminuição da taxa de hidrólise.

2.8.2 Mistura/agitação

A mistura e agitação dum digestor é um dos fatores que mais influencia o desempenho da digestão anaeróbia pelo que este parâmetro operacional se reveste de grande importância quando se pretende obter um elevado rendimento de conversão de matéria orgânica.

A mistura e agitação têm como principais vantagens a prevenção da formação de escumas, zonas mortas e depósitos de lamas, a promoção do contacto entre a lama e a biomassa ativa, dispersão rápida dos produtos metabólicos finais, como o metano, H₂S, CO₂ e materiais tóxicos, e promoção de uma uniformidade física, química, biológica e térmica, criando-se uma mistura completa do conteúdo do digestor (Malina e Pohland, 1992). As principais desvantagens são os

custos associados à instalação e operação dos equipamentos de agitação e a necessidade de uma maior eficiência na desidratação das lamas digeridas (Malina e Pohland, 1992).

Os principais tipos de sistemas de mistura e agitação utilizados nos digestores anaeróbios são a agitação mecânica, recirculação de lamas e a recirculação e injeção de biogás (Figura 11).

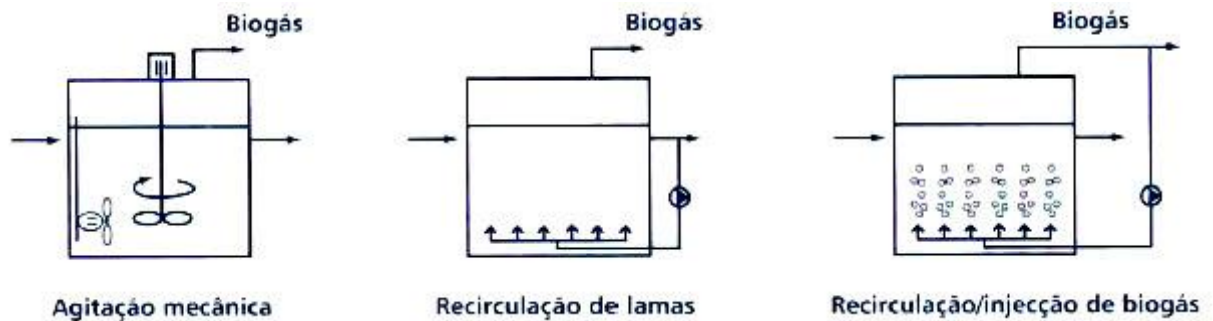


Figura 11 - Principais tipos de agitação e mistura em digestores anaeróbios (CCE, 2000)

Nos sistemas de agitação mecânica geralmente são utilizados agitadores em forma de hélice ou propulsores, que são colocados submersos no conteúdo do digestor ou montados no topo do digestor com o eixo submerso.

Nos sistemas de recirculação de lamas, o conteúdo do digestor é recirculado por bombas internas ou externas ao digestor. Ao utilizar este sistema externamente, é possível promover o aquecimento das lamas, mediante permutadores de calor. A grande desvantagem deste sistema é ter um consumo energético muito elevado (Qasim, 1999). Segundo a norma europeia EN 12255-8:2001, uma agitação eficiente deste sistema requer a recirculação do volume do digestor pelo menos cinco vezes por dia.

Nos sistemas de recirculação/injeção de biogás, o biogás produzido é recolhido no topo da cobertura e uma parte é comprimido e injetado novamente no interior do digestor. A injeção do biogás pode ser feita recorrendo a difusores distribuídos pelo fundo ou por tubos amovíveis pendentes a partir do topo do digestor. Este tipo de mistura/agitação também tem a desvantagem de ter um elevado consumo energético (CCE, 2000).

Existem também alguns problemas associados ao funcionamento destes equipamentos que são o desgaste e durabilidade dos equipamentos face às condições em que se encontram. Os efeitos de desgaste são provocados principalmente por areias, materiais inertes, entupimentos e materiais grosseiros, que causam a corrosão dos equipamentos (CCE, 2000).

2.8.3 Tempo de retenção

O tempo de retenção hidráulico (T_{RH}) pode ser definido, neste caso, como o tempo médio que um certo volume de lama permanece dentro do digestor, sendo expresso pelo quociente entre o volume (V), e o caudal (Q):

$$T_{RH} = \frac{V}{Q}$$

Este parâmetro operacional é muito importante no desempenho do reator e também no seu dimensionamento, pois determina o tempo de contacto entre o substrato e as bactérias. As bactérias metanogénicas têm um certo tempo de duplicação, ou seja, o tempo necessário para duplicar a população microbiana e o tempo de retenção hidráulico deve ser por isso superior ao seu tempo de duplicação, que a 35°C, pode ir de 2 a mais de 25 dias (CCE, 2000) (Malina e Pohland, 1992).

O tempo de retenção hidráulico dum digestor é ainda influenciado pela temperatura do seu conteúdo. Esta relação é definida por quando maior a temperatura, menor é o tempo de retenção hidráulico, que geralmente situa-se entre os 10 e os 60 dias (CEE, 2000).

Este parâmetro como determina o tempo de contacto entre o substrato e as bactérias, afeta a taxa de produção de metano, que por sua vez, é afetada pelas condições ambientais dentro do digestor, a temperatura de operação e a concentração de sólidos nas lamas afluentes (Malina e Pohland, 1992).

2.8.4 Carga volúmica

A carga volúmica dum digestor pode definir-se como a quantidade sólidos voláteis afluentes ao digestor por unidade de volume do digestor e unidade de tempo, podendo ser expressa por $\text{kg SV} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{dia}^{-1}$ (Turovskiy e Mathai, 2006).

A carga volúmica que é aplicada nos digestores anaeróbios está relacionada com a taxa de degradação de matéria orgânica da biomassa ativa presente no seu interior. Quanto maior a taxa de degradação de matéria orgânica, maior poderá ser a carga volúmica, mantendo um bom funcionamento da digestão anaeróbia (CCE, 2000).

Na fase de arranque da digestão anaeróbia, este parâmetro é crítico, devido à biomassa presente ainda não estar adaptada ao tipo de substrato e condições ambientais. A carga volúmica deve ser função da quantidade de inóculo utilizado no arranque, devendo manter-se baixa e aumentar gradualmente, sem prejudicar a adaptação da biomassa. Esta fase varia

consoante as condições ambientais e operacionais e pode ir de semanas a largos meses (CCE, 2000).

2.9 Critérios de dimensionamento de digestores anaeróbios em baixa e alta carga

Quando se dimensiona um digestor anaeróbio de lamas, há que ter em conta alguns aspetos fundamentais, que de acordo com a norma europeia EN 12255-8:2001 são os seguintes:

- Redução de sólidos voláteis exigida
- Degradabilidade
- Temperatura de operação
- Controlo da temperatura
- Tempo de retenção hidráulico
- Carga afluyente (média e máxima)
- Dimensões do digestor
- Processo (um ou dois estágios)
- Produção de biogás (média e máxima)
- Armazenamento e usos do biogás
- Limitações associadas às emissões de gases
- Limites e controlo da emissão de odores
- Frequência de alimentação
- Controlo e remoção de escumas e espumas
- Inoculação
- Sistema de agitação
- Prevenir curto-circuitos e zonas mortas
- Energia necessária para agitação ($Wh/m^3.d$) e intensidade de agitação (W/m^3)
- Isolamento térmico
- Produção de compostos agressivos nas lamas e/ou biogás
- Proteção contra a corrosão da superfície interior do digestor em contacto com o biogás
- Proteção contra a corrosão dos reservatórios de armazenamento de biogás
- A soma da pressão hidrostática máxima e da pressão máxima de biogás
- Efeito da força estática e dinâmica
- Reparação ou substituição de equipamentos sem ter de esvaziar o digestor
- Os sobrenadantes não devem ser obstruídos por nenhuma disposição de válvulas
- Mecanismo de válvula redutora de pressão
- Equipamento para dosear agentes alcalinos ou antiespumantes

Cada tipo de digestão tem as suas condições ótimas de funcionamento e para as obter existem vários parâmetros que variam consoante o que se pretende.

No Quadro 7 apresentam-se os principais parâmetros de dimensionamento de digestores anaeróbios em baixa e alta carga.

Quadro 7 - Critérios de dimensionamento para digestão em baixa e alta carga (Adaptado de Qasim, 1999 e Metcalf & Eddy, 1991)

| Parâmetro | Baixa carga | | Alta carga | |
|--|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | Qasim | Metcalf&Eddy | Qasim | Metcalf&Eddy |
| Tempo de retenção de sólidos (dias) | 30 – 60 | 30 – 90 | 10 – 20 | 15 – 20 |
| Cargavolumica (kg SV/m ³ .dia) | 0,64 – 1,6 | 0,64 – 1,6 | 2,4 – 6,41 | 1,6 – 3,2 |
| Volume (m ³ /habitante equivalente) | | | | |
| Lamas primárias | 0,03 – 0,04 | 0,06 – 0,08 | 0,02 – 0,03 | 0,04 – 0,06 |
| Lamas primárias + Lamas secundárias | 0,06 – 0,08 | 0,11 – 0,14 | 0,02 – 0,04 | 0,07 – 0,09 |
| Lamas primárias + Leitos percoladores | 0,06 – 0,14 | 0,11 – 0,17 | 0,02 – 0,04 | 0,07 – 0,11 |
| Concentração de lamas (% de peso seco) | | | | |
| Lamas primárias + Lamas secundárias | 2 – 4 | - | 4 – 6 | - |
| Lamas digeridas | 4 – 6 | 2,5 – 7 | 4 – 6 | 2,5 – 7 |

Critério de redução de volume

Como durante o processo de digestão anaeróbia o volume de sólidos sofre uma redução, conseqüentemente o volume de lamas também diminuirá e, posto isto, é possível calcular o volume de digestão necessário através do critério de redução de volume, que segundo Qasim (1999) é definido pela seguinte expressão:

$$V = \left[Q_{afluente} - \frac{2}{3} \times (Q_{afluente} - Q_{efluente}) \right] \times T_{RH}$$

Critério da população equivalente

Em alternativa também é possível calcular o volume do digestor anaeróbio com base na população equivalente e quando maior a população, maior será o volume do digestor. Cada habitante equivalente contribui com um volume de lamas mistas que de acordo com Qasim (1999), se situará entre 0,06 a 0,08 para baixa carga e entre 0,02 e 0,04 m³/hab eq para alta carga. Assim, calcula-se o volume de digestão, sabendo a população servida, através da expressão:

$$V = hab\ eq \times V_{lamas\ po\ hab\ eq}$$

Critério do tempo de retenção

O tempo de retenção, segundo Qasim (1999) e Metcalf & Eddy (1991), em digestão em baixa carga é definido entre 30 a 60 dias e em alta carga é definido entre 10 a 20 dias. Estimando o caudal de lamas afluentes ao digestor é possível calcular o volume de digestão através da seguinte fórmula:

$$V = Q_{lamas} \times T_{RH}$$

Critério da carga volúmica

A carga volúmica, tal como o tempo de retenção é diferente da digestão anaeróbia em baixa carga para a alta carga, sendo que Qasim (1999) admite valores entre 0,64 e 1,60 kg SV/m³.d para baixa carga e valores entre 2,40 e 6,41 kg SV/m³.d para alta carga. Por outro lado, Metcalf & Eddy (1991) admite valores entre 0,5 e 1,60 kg SV/m³.d para baixa carga e valores entre 1,60 e 4,8 kg SV/m³.d para alta carga. Fixando este valor e sabendo a carga de sólidos voláteis afluentes, é possível calcular o volume do digestor pela seguinte fórmula:

$$V = \frac{\text{Carga de sólidos voláteis}}{\text{Carga volúmica}}$$

3 BIOGÁS

O biogás é um subproduto da digestão anaeróbia, potencialmente valorizado como fonte de energia primária. As propriedades, produção e condicionalismos ao aproveitamento do biogás são abordados neste ponto.

3.1 Propriedades do biogás

O biogás é composto por vários gases cujo tipo e percentagens no volume total podem variar consoante as características do resíduo e das condições de funcionamento da digestão. O Quadro 8 apresenta os principais constituintes do biogás.

Quadro 8 - Composição do biogás e intervalos típicos (%) em que estão presentes os principais constituintes do biogás (La Farge, 1979 citado por CCE, 2000)

| Gás | Símbolo | % no biogás |
|---------------------|---|-------------|
| Metano | CH ₄ | 50 – 80 % |
| Dióxido de carbono | CO ₂ | 20 – 40 % |
| Hidrogénio | H ₂ | 1 – 3 % |
| Azoto | N ₂ | 0,5 – 3 % |
| Sulfídrico e outros | H ₂ S, CO, NH ₃ , O ₂ , C _n H _{2n} | 1 – 5 % |
| Vapor de água | H ₂ O | Saturado |

O biogás produzido em digestão anaeróbia de lamas é um dos melhores indicadores do desempenho do sistema, devido à estreita relação que tem com os fatores que influenciam a metanogénese e como se verifica no Quadro 8, os seus principais constituintes podem ter uma grande variação. Objetivando melhor as suas gamas de composição em lamas de ETAR, segundo Metcalf & Eddy (1991), o biogás é comumente constituído por cerca de 65 a 70% de metano, 25 a 30% de dióxido de carbono e pequenas quantidades de outros gases.

Existe um grande interesse na utilização deste gás como fonte de energia devido à presença de uma elevada percentagem de metano no seu volume. O biogás com 50 e 80% de volume de metano tem um poder calorífico inferior entre 4,95 e 7,92 kWh/m³, respetivamente (CCE, 2000). O Quadro 9 enuncia as propriedades físicas do metano, dióxido de carbono e sulfureto de hidrogénio.

Quadro 9 - Propriedades físicas do metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) e de sulfureto de hidrogénio (H₂S) (CCE, 2000)

| Propriedade | CH₄ | CO₂ | H₂S |
|---------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Peso molecular (g) | 16,04 | 44,01 | 34,08 |
| Densidade (ar = 1) | 0,555 | 1,52 | 1,19 |
| Ponto de ebulição (°C) a 1 atm | -116,7 | -78,5 | -60,5 |
| Massa específica (g/l) | 0,71 | 1,96 | 1,52 |
| Calor combustão (kWh/m ³) | 9,9 | - | 7,8 |
| Limites de inflamabilidade | 5 – 15 | - | 4 – 46 |

Estas propriedades são importantes para se selecionar um equipamento adequado para a combustão do biogás, pois têm uma grande influência nas suas características (Figura 12).

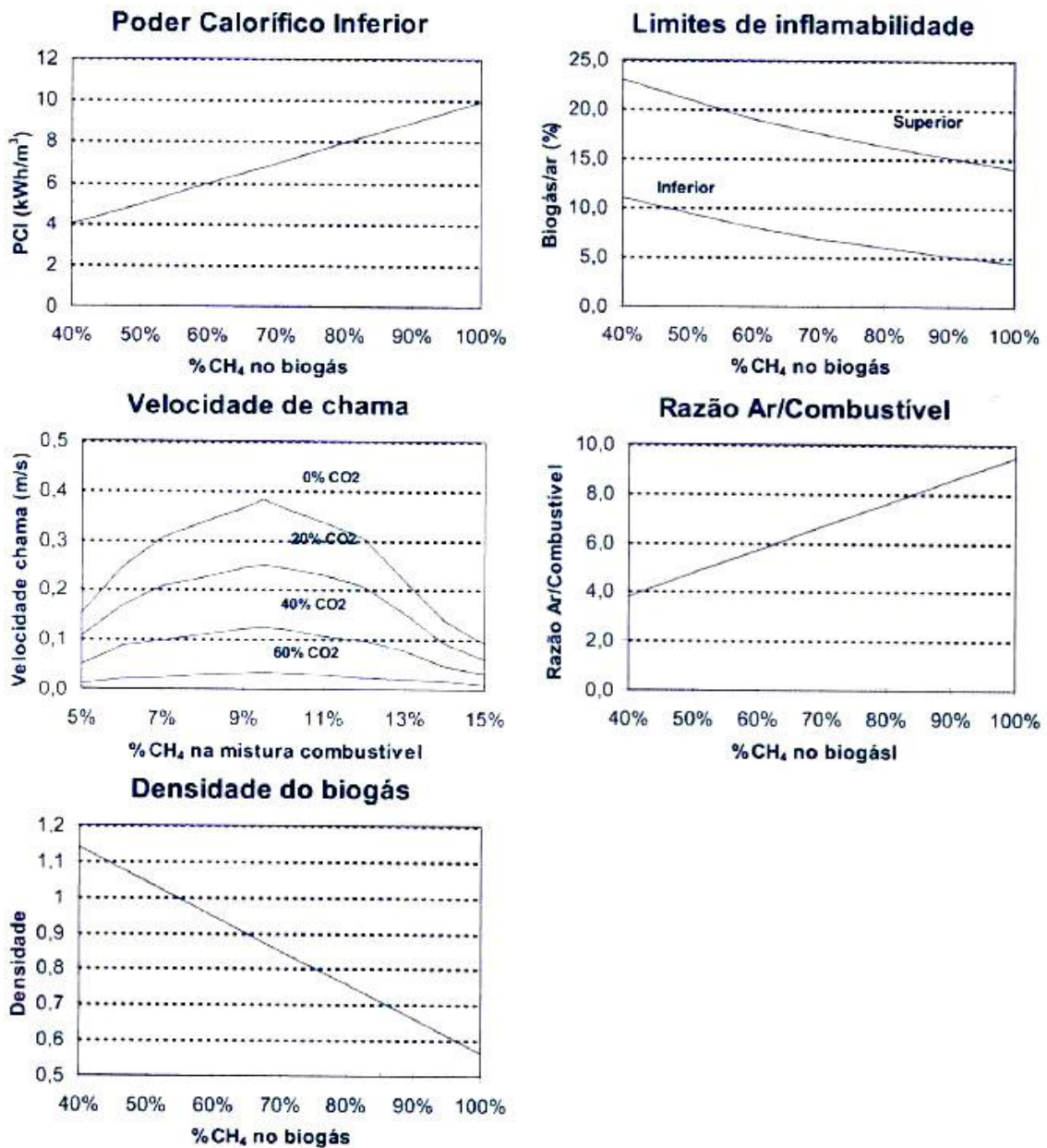


Figura 12 - Propriedades e comportamento do biogás como combustível face à percentagem de metano na sua constituição (CCE, 2000)

O poder calorífico inferior corresponde à energia libertada na forma de calor e verifica-se que quanto maior a percentagem de metano no biogás, maior o poder calorífico inferior, mostrando-se inclusivamente que variam de forma linear.

Os limites de inflamabilidade correspondem à percentagem máxima e mínima de combustível na mistura combustível/ar para que se dê a combustão, pois fora destes limites a mistura não tem qualidade suficiente para explodir. Quanto maior a percentagem de metano no biogás, menos combustível irá ser necessário, visto libertar mais energia. Consecutivamente maior será a relação ar/combustível, que já tem uma relação linear com a percentagem de metano no

biogás, sendo o valor ótimo, ou seja, quando ocorre a combustão completa, cerca de 9,4% de metano na mistura com o ar.

A velocidade da chama corresponde à velocidade com que a chama avança numa mistura ar/combustível em relação à velocidade dessa mistura. Este parâmetro tem importância principalmente no sistema de dimensionamento da admissão de ar e combustível. Ao contrário da maioria das propriedades, esta não tem uma relação linear, verificando-se para uma percentagem metano aproximadamente ótima na mistura ar/combustível, que quanto menor a percentagem de CO₂ presente, maior é a velocidade da chama.

Por fim, relativamente ao valor da densidade do biogás, este é importante principalmente para o dimensionamento dos equipamentos de armazenamento e compressão. Visto que o metano tem uma densidade menor que os outros constituintes do biogás, quando maior a percentagem de metano, menor será a densidade do biogás.

3.2 Produção de biogás

A produção de biogás é influenciada por vários fatores, nomeadamente pelos parâmetros operacionais e pela qualidade das lamas.

Existem várias fórmulas para calcular a produção de metano, segundo Qasim (1999), esta produção pode ser estimada sob o cálculo das seguintes fórmulas:

$$P_x = \frac{Y \times E \times S_0}{1 + (k_d \times \theta_c)}$$

$$V_{CH_4} = 0,35 \times [(E \times S_0) - (1,42 \times P_x)]$$

Onde,

P_x = quantidade de biomassa produzida (kg/d)

S_0 = CBO no afluyente (kg/d)

Y = coeficiente de produção (g SSV / g CBO); valores entre 0,04 e 0,1

E = eficiência de utilização; 0,6 a 0,9

k_d = coeficiente endógeno (d⁻¹); valores entre 0,02 e 0,04

θ_c = tempo de retenção de sólidos (d)

V_{CH_4} = volume de metano produzido (m³/d)

A produção de biogás pode ainda ser estimada com base nos sólidos voláteis da digestão, os valores típicos de produção de biogás por quantidade de sólidos voláteis destruídos variam de

0,75 a 1,12 m³/kg. Outro método utilizado, também com base nos sólidos voláteis, é utilizar a quantidade de sólidos voláteis afluentes ao digestor, em que se assume que a produção de biogás tem valores de 0,5 a 0,75 m³/kg de sólidos voláteis afluentes (Qasim, 1999) (Metcalf & Eddy, 1991).

3.3 Sistemas de limpeza do biogás

Como se verificou no ponto relativo às propriedades do biogás, este possui alguns contaminantes que reduzem a sua qualidade e dificultam ou impossibilitam a sua utilização em alguns equipamentos. Deste modo resulta que para algumas utilizações do biogás é necessário proceder à sua depuração para aumentar a sua qualidade. A depuração do biogás promove a remoção de contaminantes e aumenta o poder calorífico. Os sistemas de valorização do biogás como motores, turbinas, caldeiras e células de combustível requerem uma qualidade mínima do biogás para a sua utilização. Quanto melhor for a qualidade do biogás, menos impactos negativos irá ter nos equipamentos de valorização e consequentemente, menores custos de manutenção. O Quadro 10 mostra os requisitos de remoção de sulfureto de hidrogénio, dióxido de carbono e vapor de água do biogás para a sua utilização em diferentes equipamentos.

Quadro 10 - Requisitos de remoção de componentes gasosos do biogás de acordo com a utilização prevista (IEA, 2000)

| Aplicação | H ₂ S | CO ₂ | H ₂ O |
|------------------|------------------|-----------------|--------------------|
| Caldeira | < 1000ppm | Não | Não |
| Motor | < 1000ppm | Não | Evitar condensação |
| Veículos | Sim | Recomendado | Sim |
| Rede gás natural | Sim | Sim | Sim |

A depuração do biogás normalmente é feita para a remoção de sulfureto de hidrogénio, dióxido de carbono, vapor de água, partículas e siloxanos. De seguida são descritos alguns dos métodos mais utilizados para a remoção destes contaminantes.

3.3.1 Remoção de sulfureto de hidrogénio

O sulfureto de hidrogénio, também referido por gás sulfídrico, é um dos constituintes do biogás, embora em quantidades variáveis e sempre reduzidas, os seus efeitos são altamente prejudiciais. Geralmente a quantidade típica de sulfureto de hidrogénio no volume do biogás é

inferior a 1% e mesmo em pequenas concentrações este gás é altamente corrosivo (CCE, 2000).

Este constituinte do biogás é oxidado, durante a combustão, formando óxidos de enxofre que em contacto com o vapor de água levam à formação de ácidos, como ácido sulfídrico e ácido sulfuroso. Estes ácidos são capazes de corroer metais, vão degradar os equipamentos de compressão, armazenamento e combustão do biogás, devendo, por isso, o sulfureto de hidrogénio ser removido preferencialmente o mais a montante possível, embora possa ser feito só ao biogás encaminhado para o equipamento de produção de energia (CCE, 2000).

Segundo CCE (2000) os principais métodos utilizados para remoção do sulfureto de hidrogénio, disponíveis comercialmente são:

- Oxidação pela adição de ar ou oxigénio ao biogás;
- Adição de cloreto férrico na digestão anaeróbia;
- Biofiltro;
- Filtro de limalha ou granulado de ferro
- Filtro de carvão ativado
- Lavagem com água ou hidróxido de sódio

3.3.2 Remoção de dióxido de carbono

A presença de dióxido de carbono na composição do biogás provoca um efeito de diluição, consecutivamente reduz o seu poder calorífico. Quanto maior as pressões, juntamente com a presença de água, maior possibilidade de se formar ácido carbónico, que provoca a corrosão dos equipamentos.

Atualmente existem quatro métodos de remoção de dióxido de carbono a nível comercial.

A lavagem com água, além de remover principalmente dióxido de carbono, remove também sulfureto de hidrogénio, devido a estes dois gases terem uma solubilidade superior à do metano (Quadro 11) (CCE, 2000).

Quadro 11 - Solubilidade na água, para diferentes temperaturas, dos principais, gases que compõem o biogás (CCE, 2000)

| Temperatura | Volume de gás dissolvido na água (cm ³ _{gás} /litro H ₂ O/atm) | | |
|-------------|--|------------------|-----------------|
| | CO ₂ | H ₂ S | CH ₄ |
| 20°C | 878 | 2582 | 33,8 |
| 25°C | 760 | 2282 | 30,0 |
| 35°C | 592 | 1831 | 25,4 |

Outro método de lavagem do biogás é a lavagem com polietileno glicol (Selexol), caracterizada pela absorção física do dióxido de carbono, também com contribuições na remoção de sulfureto de hidrogênio. Este método distingue-se da lavagem a água, devido aos gases terem uma solubilidade maior no polietileno glicol (CCE, 2000).

Os crivos moleculares em carbono são outro dos métodos utilizados para remoção de dióxido de carbono, onde as moléculas são adsorvidas nas cavidades do crivo e não ficando ligadas definitivamente. A adsorção é seletiva dependendo do tamanho das cavidades e da pressão aplicada, pressão essa que quando é reduzida, permite que os compostos adsorvidos se libertem (CCE, 2000).

Por fim, o último método de remoção de dióxido de carbono disponível comercialmente é a separação por membranas. Este método divide-se em dois sistemas, a separação gasosa a alta pressão, em que as fases em ambos os lados da membrana são gasosas e a separação por absorção gás líquido a baixa pressão, em que as moléculas se difundem através da membrana e são removidas por um líquido absorvente. Este método além de remover dióxido de carbono permite também a remoção de sulfureto de hidrogênio (CCE, 2000).

3.3.3 Remoção de vapor de água e partículas

Um dos principais problemas no transporte e utilização do biogás é causado pelo vapor de água e pelas partículas.

Quanto ao transporte do biogás, quando este sai do digestor está saturado em vapor de água e ao entrar nas tubagens, geralmente com temperaturas inferiores à digestão, provoca a condensação do vapor de água, que pode bloquear a passagem do biogás pelas tubagens.

Na utilização do biogás, quando o biogás entra no equipamento de valorização, a presença do vapor de água irá diminuir a energia libertada na combustão e pode ainda acelerar o processo de corrosão. Para resolver este problema são instalados condensadores e pontos de purga nos

pontos baixos do circuito de transporte do biogás. Estes condensadores podem ser arrefecidos a 4 °C, com o objetivo de ter uma maior eficiência.

Relativamente às partículas, o biogás pode conter quantidades vestigiais que são removidas também no equipamento de separação de condensados ou em filtros de malha fina. A redução de partículas é importante, mesmo que presentes em quantidades reduzidas para evitar a abrasão no equipamento de valorização do biogás (CCE, 2000).

3.3.4 Remoção de siloxanos

Os siloxanos são compostos orgânicos com composição essencialmente formada por carbono, hidrogénio, oxigénio e silício. Encontram-se concentrados nas lamas e durante o processo de digestão anaeróbia de lamas não são decompostos, mas sim volatilizam e passam a fazer parte da composição do biogás.

O grande problema da presença dos siloxanos ocorre na combustão do biogás, onde se vai formar dióxido de silício, que se deposita e acumula nos componentes interiores das tecnologias de produção de energia. Estes depósitos são extremamente abrasivos, provocando um desgaste prematuro dos equipamentos. Consequentemente os efeitos que trás para os equipamentos são a redução do tempo de vida útil, aproximadamente de 50 a 75%, devido à abrasão provocada, redução da eficiência e aumento da frequência de manutenções, o que implica maiores custos de operação e manutenção (Schweigkofler e Niessner, 2001).

Existem vários métodos de remoção de siloxanos, sendo os principais descritos em seguida. A adsorção por carvão ativado, com o inconveniente de serem dificilmente separados do adsorvente, o que reduz rapidamente a eficiência do sistema, necessitando duma reposição do meio regular. A absorção por solventes orgânicos, a desvantagem deste método é devida aos siloxanos serem altamente voláteis, o que os liberta facilmente do solvente caso haja um elevado fluxo de biogás. A condensação por azoto líquido, aquando da baixa de temperatura do biogás, há formação de condensados que contêm parte dos siloxanos presentes no biogás, tendo como desvantagem o elevado custo deste método. A hidrólise química por utilização de um ácido ou base forte a elevada temperatura, tem o inconveniente de levar à produção de compostos corrosivos (Dewil *et al.*, 2005).

3.4 Armazenamento

Normalmente as instalações com digestores anaeróbios cobertos têm também um sistema de armazenamento para o biogás, designado por gasómetro, que pode estar, ou não, acoplado ao digestor. Este sistema serve de equalização dos caudais de biogás produzidos, homogeneidade da sua qualidade e possibilita uma alimentação regulada de biogás ao sistema de queima.

O biogás pode ser armazenado a baixa, média ou alta pressão, consoante a pressão necessária ao sistema de utilização, sendo a adequação da pressão feita normalmente à cabeça do equipamento. No armazenamento a baixa pressão, o biogás é armazenado a uma pressão inferior a 50 mbar (0,05 atm). No armazenamento a média ou alta pressão é necessário uma prévia limpeza de H_2S do biogás, devido à corrosão causada por este constituinte. Em média pressão o biogás é armazenado a pressões entre 10 e 20 bar, enquanto em alta pressão é armazenado a pressões que podem atingir os 350 bar, mas o valor mais indicado é de 200 bar (CCE, 2000).

4 INTRODUÇÃO ÀS TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE ENERGIA

O aproveitamento do biogás produzido na digestão anaeróbia pode ser realizado recorrendo a várias tecnologias, possibilitando a produção de calor e/ou energia. Segundo EPA (2007) as tecnologias mais utilizadas para esse efeito, são as turbinas a vapor, os motores de combustão interna alternativos, as turbinas e microturbinas a gás, e as células de combustível, ainda em introdução no mercado. No Quadro 12 são apresentados alguns dados destas tecnologias, após o que serão descritas as suas componentes e modo de funcionamento. Como os custos de instalação e operação/manutenção podem variar, indicam-se primeiro os valores de 2008 e depois os de 2007.

4.1 Turbina a vapor

A turbina a vapor é um dispositivo termodinâmico que converte energia de um fluido pressurizado em energia mecânica, ou seja, por vapor a alta temperatura e pressão para mover as pás da turbina, que por sua vez está ligada a um gerador, produzindo, deste modo, eletricidade. Ao contrário das turbinas a gás e dos motores de combustão interna, em que o calor é um subproduto da produção de energia, nas turbinas a vapor normalmente, a produção de eletricidade é classificada um subproduto da geração de calor. A turbina a vapor requer uma fonte separada de calor e não converte diretamente combustível em eletricidade. A energia é transferida duma caldeira ou calor residual para a turbina através de vapor em pressão. Esta separação de funções permite que a turbina opere com uma grande variedade de combustíveis, desde gás natural a resíduos sólidos, incluindo todos os tipos de carvão, madeira e subprodutos agrícolas (EPA, 2007).

Quadro 12 - Dados padrão das tecnologias de produção de energia abordadas (Adaptado de EPA, 2007 e 2008)

| Propriedades / Motor | Turbina a vapor | Turbina a gás | Microturbina | Motor de combustão interna alternativo | Células de combustível |
|--|---|---|----------------------------------|---|--|
| Potência comuns disponíveis | 50 kW – 250 MW | 500 kW – 250 MW | 30 kW – 250 kW | 10 kW – 5 MW | <2 MW |
| Eficiência elétrica | 15 – 38 % | 22 – 36 % | 22 – 30 % | 22 – 45 % | 30 – 63 % |
| Tempo de arranque | 1 hora – 1 dia | 10 minutos – 1 hora | 1 minuto | 10 segundos | 3 horas – 2 dias |
| Características | Alta fiabilidade e longa duração de vida útil, arranque lento | Alta fiabilidade, elevada eficiência térmica, refrigeração desnecessária, baixas emissões e baixa eficiência a menor carga de combustível | Arranque rápido, custos elevados | Arranque rápido, necessita de refrigeração quando não é aproveitado o calor, elevado ruído, elevadas emissões e custos de manutenção elevados | Baixo ruído, baixas emissões, baixa durabilidade e custos elevados |
| Custo de Instalação (€/kW) | 330 – 850 270 – 580 | 750 – 1000 540 – 1540 | 1850 – 2310 850 – 1540 | 850 – 1700 620 – 1160 | 3860 – 5020 2320 – 3860 |
| Custo de operação e manutenção (¢/kW) | <0,39 <0,31 | 0,31 – 0,85 0,46 – 0,85 | 0,93 – 1,9 0,62 – 1,55 | 0,7 – 1,7 0,62 – 1,9 | 2,47 – 3 0,77 – 3,09 |

No ciclo termodinâmico da turbina a vapor, de nome Ciclo de Rankine, a água no estado líquido é aquecida, por exemplo dentro duma caldeira, até atingir um estado de vapor em pressão. Este vapor alimenta a turbina e causa a rotação das suas pás, sendo possível produzir eletricidade através da ligação do eixo da turbina a um gerador. Depois do vapor passar pela turbina, existe um condensador que recolhe o vapor, passando a estado líquido e uma bomba que recircula a água condensada novamente para a fonte de calor, fechando o ciclo. Existem diferentes tipos de turbinas a vapor, o tipo apresentado na Figura 13 é de uma turbina a vapor de condensação (EPA, 2008).

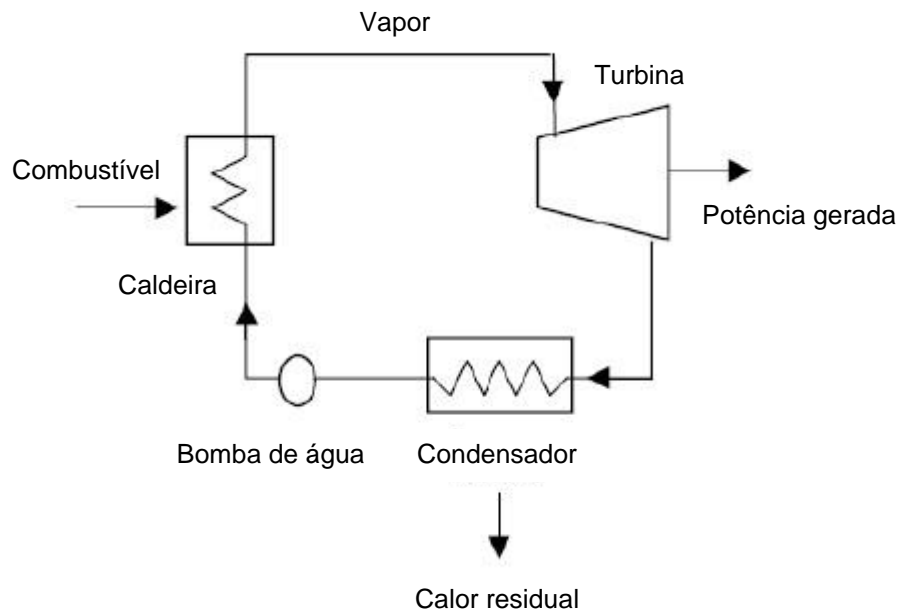


Figura 13 - Ciclo simples de uma turbina a vapor (EPA, 2007)

4.2 Turbinas e microturbinas a gás

As turbinas a gás são muito utilizadas para a produção de energia, principalmente elétrica, devido ao seu baixo custo de capital de investimento, baixa manutenção, devido a ter poucas partes móveis e alta fiabilidade, e baixos níveis de emissões de gases, particularmente NO_x . A turbina a gás é um motor de combustão interna que opera com rotação em vez de movimento alternativo e pode ser alimentada por combustíveis líquidos ou gasosos, como gasolina, gás natural ou biogás previamente tratado. Para injetar o combustível no interior da câmara de combustão pressurizada, o combustível tem de ser também pressurizado (EPA, 2007).

Segundo EPA (2007) as turbinas a gás podem ser utilizadas em várias configurações:

- Operações de ciclo simples – uma única turbina a gás produzindo eletricidade

- Operações de cogeração – uma turbina a gás com um recuperador/trocador de calor que recupera o calor dos gases de escape e o torna em energia térmica útil, geralmente na forma de vapor ou água quente.
- Operações em ciclo combinado – através da recuperação de calor dos gases de escape duma turbina a gás é possível gerar vapor de água em pressão e utilizado para gerar energia adicional através de uma turbina a vapor.

Na Figura 14 são ilustrados os principais componentes de uma turbina a gás.

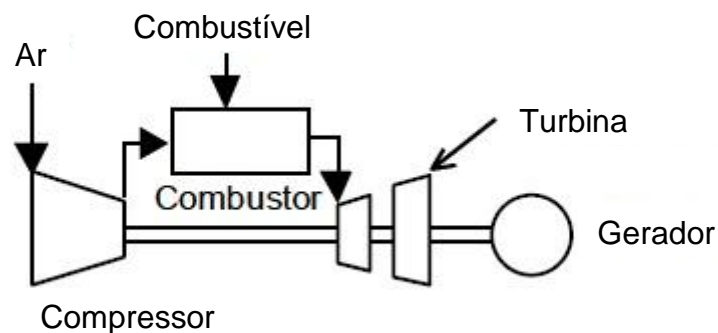


Figura 14 - Componentes de uma turbina a gás (EPA, 2007)

Os sistemas de geração de energia de turbinas a gás utilizam o Ciclo de Brayton. Este ciclo consiste num compressor para comprimir o ar, uma câmara de combustão, a turbina e o gerador. A secção da turbina compreende um ou mais conjuntos de pás que extraem energia mecânica a partir dos gases quentes da combustão. Parte dessa energia serve para alimentar o compressor e a restante energia fica disponível para acionar o gerador ou qualquer outra carga mecânica. Normalmente, o compressor e a turbina pertencem ao mesmo eixo, que está ligado ao eixo do gerador mediante um sistema que transmita a rotação do eixo da turbina, independentemente da sua velocidade de rotação, ao eixo do gerador, funcionando este último obrigatoriamente a uma frequência de 50 Hz (50 rotações por segundo) (EPA, 2008). A eficiência teórica da turbina a gás é uma função da temperatura de admissão do ar à câmara de combustão, da temperatura dos gases de combustão à entrada da turbina e da razão de pressão da turbina, portanto a eficiência da turbina a gás aumenta quanto menor a temperatura do ar à entrada da câmara de combustão, maior a temperatura dos gases de combustão e maior a razão de pressão, maior a eficiência. Contudo, a temperatura dos gases de combustão é limitada pelo ponto de capacidade máximo, ou seja, mesmo que a temperatura aumente a cima deste valor, a eficiência será constante e pela capacidade das pás da turbina funcionarem a essa mesma temperatura durante o tempo de vida da turbina (EPA, 2007). Na Figura 15 é ilustrado o funcionamento duma turbina a gás.

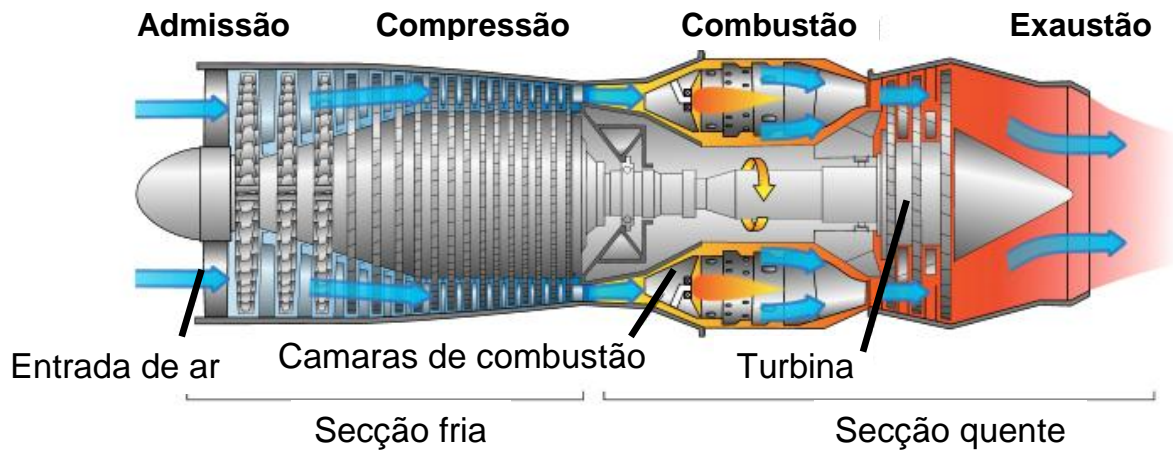


Figura 15 - Funcionamento de uma turbina a gás

(http://cset.mnsu.edu/engagethermo/components_gasturbine.html)

Uma turbina a gás convencional, funcionando a gás natural, é dimensionada para lidar com cerca de 10% mais de fluxo do que o compressor de ar, por razões de segurança do equipamento. Por outro lado, uma turbina a gás fabricada para um gás com menor poder calorífico inferior, como é o caso do biogás, deve ser dimensionada para lidar com cerca de duas vezes o fluxo do compressor de ar. Além disso, a relação de ar/combustível é menor para um gás de baixo poder calorífico inferior, portanto nem todo o ar comprimido é necessário e essa relação é maior para um gás com alto poder calorífico inferior. Quanto menor o poder calorífico inferior, maior vai ser o custo por unidade de potência numa turbina a gás e também maiores vão ser os custos de operação e manutenção, com maior necessidade de limpeza e intervalos de manutenção mais frequentes (EPA, 2007). Para concluir apresenta-se a Figura 16 que mostra o interior duma turbina a gás.

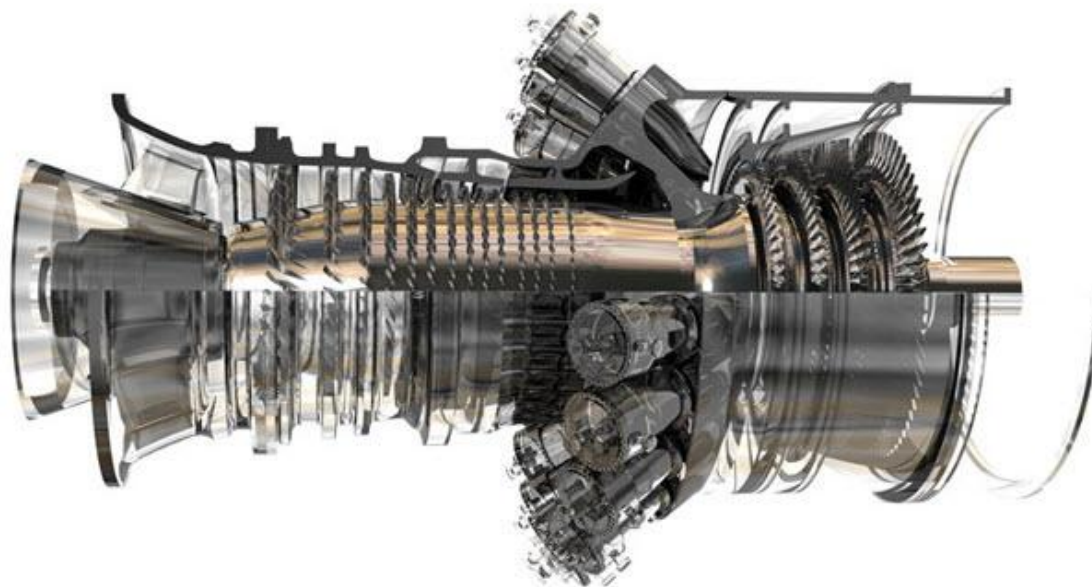


Figura 16 - Corte de uma turbina a gás

(<http://www.districtenergy.org/blog/wp-content/uploads/2012/09/GE-9FB-gas-turbine.jpg>)

4.3 Motor de combustão interna alternativo

Os motores de combustão interna alternativos são uma tecnologia bem conhecida e desenvolvida, sendo utilizados em automóveis, caminhões, máquinas de construção, barcos e um diverso conjunto de aplicações de produção de energia elétrica e térmica. Esta tecnologia está disponível para aplicações geralmente entre 10 kW até mais de 5 MW de potência e funcionam com combustíveis líquidos ou gasosos (EPA, 2007).

Existem dois tipos de motores de combustão interna alternativos, o motor Otto e motor Diesel. O motor Otto tem ignição por faísca desencadeada por velas de ignição, o que provoca a combustão da mistura ar/combustível, designando-se este processo pelo Ciclo de Otto. O motor Diesel tem ignição por compressão, cuja combustão se dá através da compressão do ar, que eleva a sua temperatura e a posterior injeção do combustível no ar em elevada pressão e temperatura faz desencadear a combustão, designando-se este processo pelo Ciclo de Diesel (EPA, 2008). Na Figura17 é mostrado o interior do mecanismo de um motor Otto.

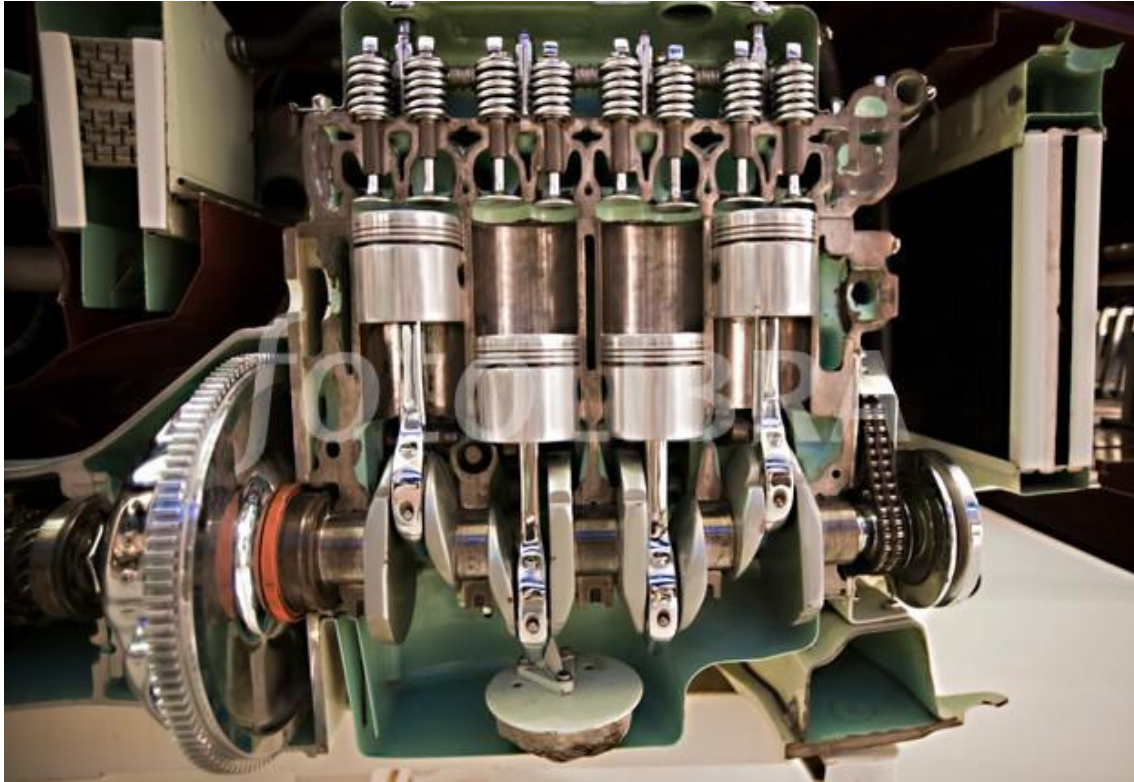


Figura 17 - Vista do interior de um motor de combustão interna alternativo

(<http://gb.fotolibra.com/images/previews/706112-internal-combustion-engine-cutaway.jpeg>)

Historicamente os motores Diesel foram os motores de combustão interna alternativos mais utilizados para aplicações de produção de energia, mas a sua utilização tem sido cada vez mais restrita, por exemplo a geradores de emergência. Atualmente para produção de energia, em substituição do motor Diesel, o motor de Otto é o que tipicamente se utiliza. Esta troca deve-se à diferença de emissões de gases, principalmente de NO_x e partículas, entre os motores e tipos de combustíveis, sendo o motor Diesel mais poluente (EPA, 2007).

A tecnologia dos motores de combustão interna alternativos tem melhorado ao longo das últimas décadas, sofrendo pressões económicas e ambientais, para maior eficiência no consumo de combustível e menores emissões, contribuindo muito, para isso, os sistemas computacionais no controlo eletrónico dos motores.

Um motor de combustão interna alternativo converte energia química do combustível em energia mecânica e térmica. Os principais componentes básicos do motor a quatro tempos são a câmara de combustão (cilindros), o êmbolo (pistões), eixo do motor (cambota) e válvulas de admissão e escape operadas através da árvore de cames (ou uma ou duas). Existem quatro fases designadas por admissão, compressão, explosão e exaustão, descritas em seguida para o funcionamento dum motor Otto. A admissão inicia-se com o pistão no ponto morto superior, abrem-se as válvulas de admissão e é injetado ar e combustível dentro da câmara de

combustão, designada de cilindro, até o pistão se encontrar no ponto morto inferior. A compressão dá-se desde que o pistão atinge o ponto morto inferior e sobe até ao ponto morto superior com as válvulas fechadas, comprimindo desde modo a mistura de ar e combustível. A explosão ocorre mediante a ignição da mistura de ar e combustível, por velas de ignição que produzem uma faísca, nesta fase, em cada ciclo. A energia libertada empurra novamente o pistão para baixo, atingindo o ponto morto inferior. Atingido este ponto, dá-se a exaustão, abrem-se as válvulas de escape e o pistão volta a subir ao ponto morto superior, expelindo os gases de escape, fechando o ciclo (EPA, 2007). A Figura 18 ilustra as fases de funcionamento num motor Otto.

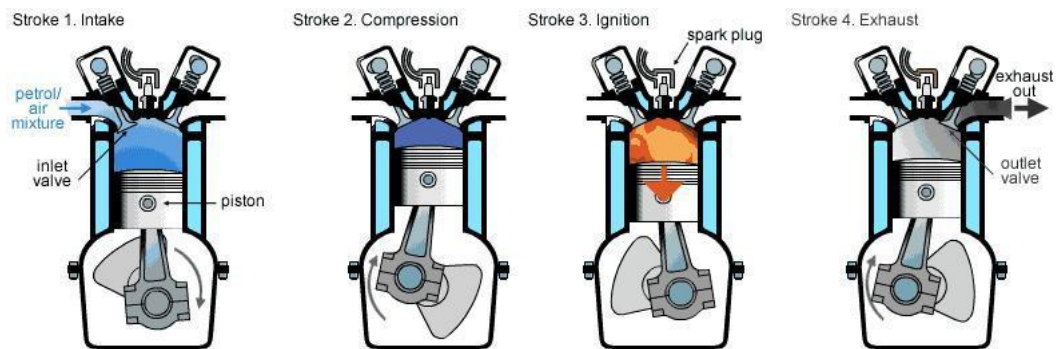


Figura 18 - Fases de funcionamento de um motor de ciclo Otto

(<http://jayantkumar.in/2006/10/petrol-engine-versus-diesel-engine-3/>)

Os motores de combustão interna alternativos devem o seu nome aos pistões que, durante as várias fases do motor, executam movimentos lineares repetitivos, geralmente na vertical ou diagonal, que estão ligados ao eixo de rotação do motor, através de bielas, e realizam trabalho, sobre este, proveniente da energia libertada pela combustão dentro dos cilindros. Esta rotação é transmitida ao eixo gerador mediante um acoplamento ao volante do motor que por sua vez está ligado ao eixo do motor (EPA, 2007).

Geralmente os motores de combustão interna alternativos são programados para trabalharem a rotações múltiplas dos 50 Hz, como a 1000, 1500 ou 3000 rotações por minuto. Sendo 50 Hz a frequência obrigatória para injetar eletricidade na rede a nível europeu, o gerador é dimensionado especificamente para a rotação de funcionamento do motor, fazendo a conversão de rotação transmitida do motor para os 50 Hz através dum número específico de pólos próprio para essa rotação (EPA, 2008).

4.4 Célula de combustível

As células de combustível são uma tecnologia de geração de energia em pequena escala, com alta eficiência energética e muito baixas emissões de gases, ainda a surgir no mercado. Nas células de combustível, o combustível sofre uma reformação e é transformado em hidrogénio, que posteriormente é quimicamente combinado com oxigénio para produzir eletricidade e também calor possível de ser aproveitado. Como não ocorre combustão, nem têm partes móveis, é uma tecnologia cujo funcionamento não origina ruídos elevados e pode alcançar uma eficiência elétrica até duas vezes superior ao motor de combustão interna. Pode ser dimensionada para uma ampla variedade de aplicações, como computadores portáteis (50 a 100 W), a veículos (50 a 85 kW), e mesmo a centrais de produção de energia (0,2 a 2 MW) (EPA, 2008). A Figura 19 ilustra os componentes e o funcionamento de uma célula de combustível.

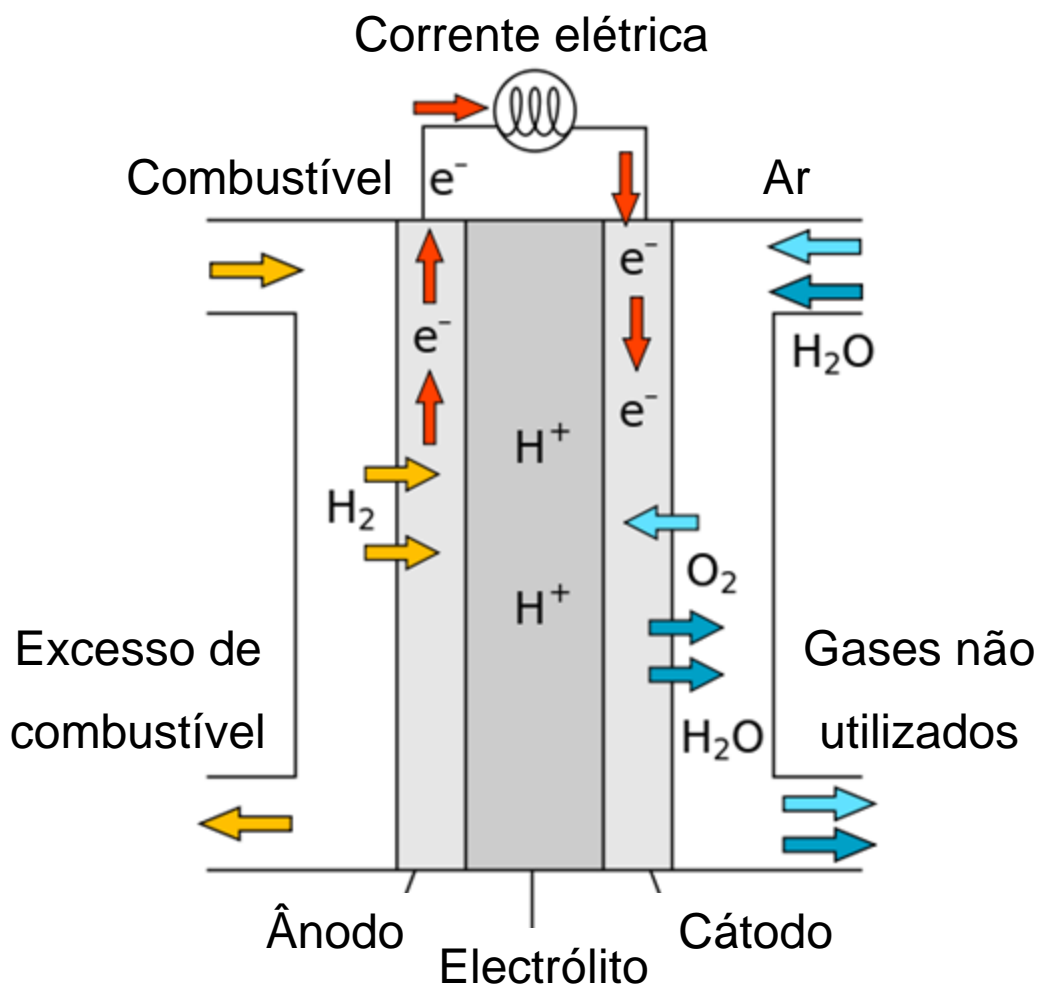


Figura 19 - Ilustração dos componentes e funcionamento de uma célula de combustível
(http://cset.mnsu.edu/engagethermo/components_fuelcell.html)

Os custos de instalação, de manutenção e a fiabilidade, são os principais problemas associados a esta tecnologia para que seja comercializada em maior escala. As células de combustível são mais dispendiosas que os motores de combustão interna e têm dificuldade em manter o mesmo desempenho ao longo do seu tempo de vida útil de serviço. O elevado tamanho e peso, difícil gestão térmica e gestão da água das células de combustível, são também mais algumas das desvantagens desta tecnologia (EPA, 2007).

5 METODOLOGIA

A presente dissertação visa avaliar a viabilidade do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para produção de energia elétrica, através da instalação duma tecnologia de produção de energia. A tecnologia escolhida para isso foram os motores de combustão interna alternativos. Esta escolha deve-se a esta ser a tecnologia sobre a qual se tem maior conhecimento e experiência de utilização, ter a segunda maior eficiência elétrica, sendo apenas superada pelas células de combustível. No entanto os motores de combustão interna alternativos têm custos de instalação e operação/manutenção menores, e também, uma maior fiabilidade do equipamento, do que as células de combustível.

Pretende-se realizar este estudo para as ETAR de Fernão Ferro e ZIA, ambas sob gestão da SIMARSUL. Interessa também determinar o valor de caudal de biogás produzido para o qual todo o investimento é amortizado perante a instalação de um motor de combustão interna alternativo.

Pretende-se ainda, proceder à comparação de vários parâmetros de funcionamento e desempenho da digestão anaeróbia a quente e a frio. Para esse efeito serão avaliados os parâmetros produção de biogás total por quantidade de matéria orgânica volátil afluyente, carga volúmica, T_{RH} , entre outros. A análise será realizada tendo em consideração as condições atuais de funcionamento da digestão em cada uma das instalações em estudo.

Por fim, pretende-se também propor uma folha de cálculo para dimensionar e avaliar da viabilidade de aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para a produção de energia elétrica, tal como a elaborada para o caso de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa, mas agora com uma estrutura generalizada, para poder ser aplicada e realizar rapidamente a simulação de venda de energia elétrica ou de consumo interno, para outros casos de digestão anaeróbia a frio.

Para responder aos objetivos apresentados procedeu-se por fases, de acordo com o seguinte esquema (Figura 20).

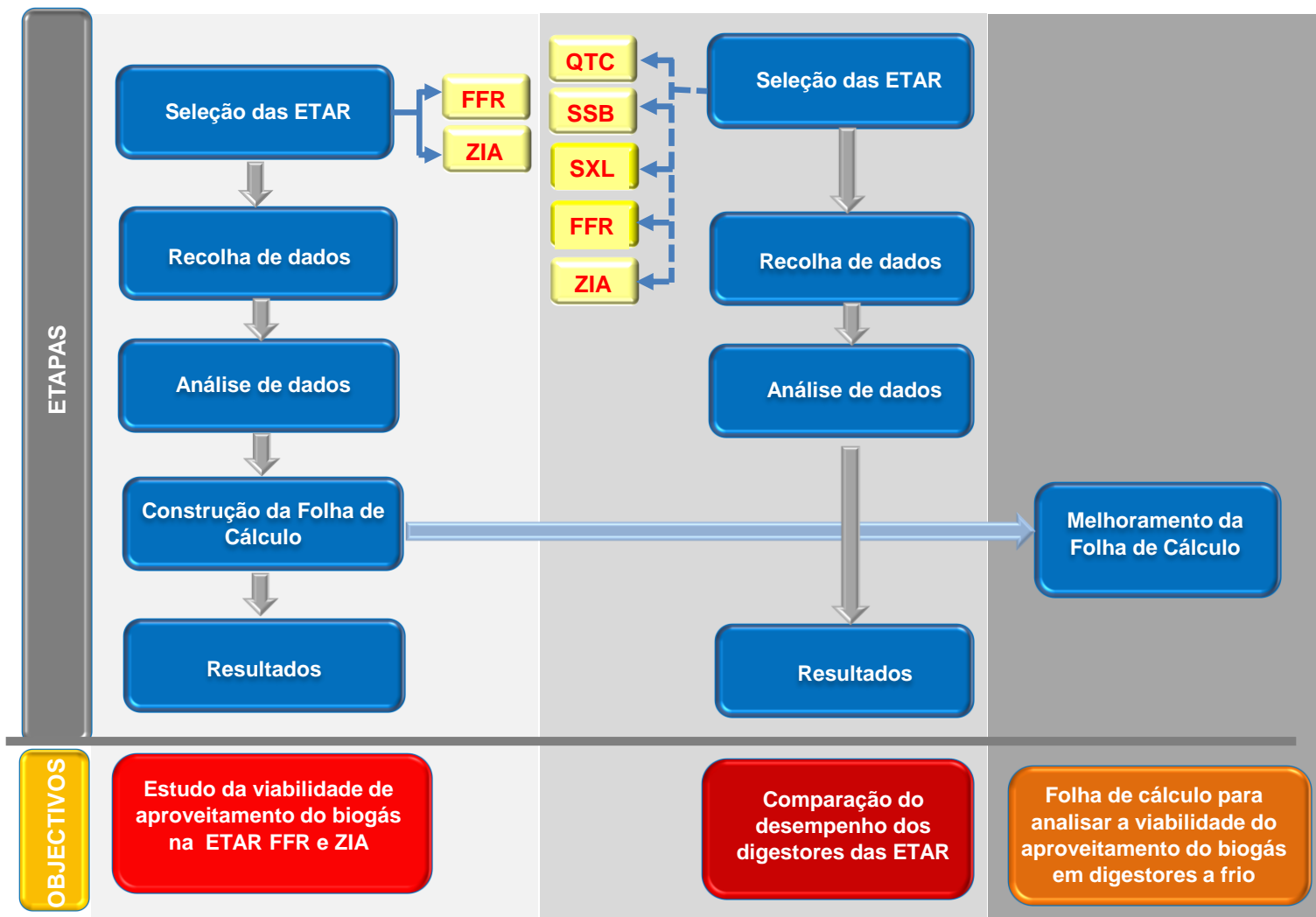


Figura 20 - Esquema da metodologia utilizada

Seleção

Primeiro selecionaram-se as ETAR que iriam ser o objeto de estudo, tentando abranger a maior quantidade de dados disponíveis. De todas as ETAR com funcionamento em média carga, conseqüentemente com uma fase de digestão anaeróbia de lamas, selecionaram-se as ETAR de Fernão Ferro e da Zona Industrial da Autoeuropa, com digestão anaeróbia a frio e sem aproveitamento do biogás, para as quais se estudará a viabilidade da instalação dum motor de combustão interna alternativo para produção de energia elétrica. Selecionaram-se também as ETAR da Quinta do Conde, Seixal e Sesimbra, com digestão anaeróbia a quente com aproveitamento do biogás através de um motor de cogeração, para consumo interno da energia elétrica produzida e recuperação da energia térmica para aquecimento das lamas na digestão anaeróbia, sendo o biogás em excesso queimado numa tocha. Deste modo é possível comparar vários parâmetros de funcionamento entre a digestão anaeróbia a quente e a frio.

De modo a caracterizar as várias ETAR em estudo, elaborou-se uma descrição da linha de tratamento da fase sólida apresentada em seguida.

- ETAR de Fernão Ferro

A fase sólida da ETAR de Fernão Ferro é composta por uma etapa de espessamento efetuada num espessador gravítico que recebe as lamas primárias e secundárias produzidas na fase líquida. As lamas espessadas são depois enviadas para dois digestores anaeróbios com funcionamento na gama de temperatura psicrófila e sem agitação. Por fim, as lamas digeridas são desidratadas por duas centrífugas e armazenadas num silo. O biogás produzido na digestão anaeróbia das lamas é recolhido e armazenado com recurso a um gasómetro com funcionamento em baixa pressão e posteriormente encaminhado para queima numa tocha (Figura 21) (DHVFB0, 2006).

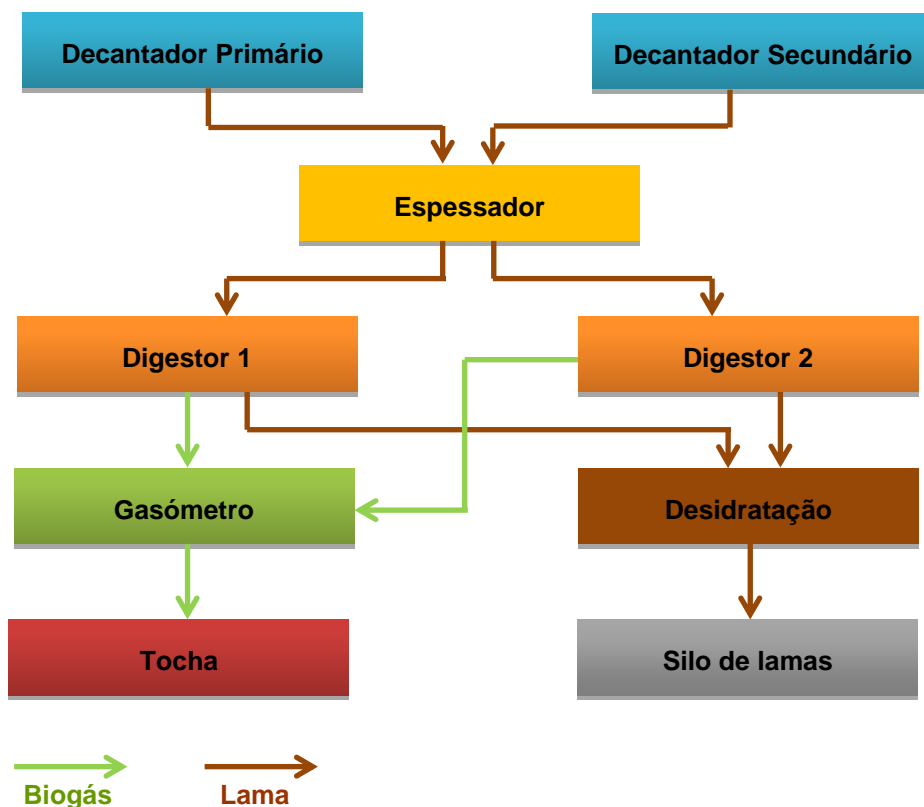


Figura 21 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR de Fernão Ferro

- ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa

A fase sólida da ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa é composta por uma etapa de espessamento, que recebe as lamas primárias e secundárias, sendo estas misturadas previamente antes da entrada num espessador gravítico. As lamas espessadas são depois enviadas para um digestor anaeróbio com funcionamento na gama de temperatura psicrófila e com sistema de agitação. O digestor anaeróbio recebe também, diretamente lamas provenientes de empresas de queijarias situadas na presente zona industrial. Por fim, as lamas digeridas são desidratadas por duas centrífugas e armazenadas num silo. Devido a esta ETAR não ter gasómetro, o biogás produzido na digestão anaeróbia das lamas é encaminhado diretamente para queima numa tocha (Degrémont e Graviner, 2006).

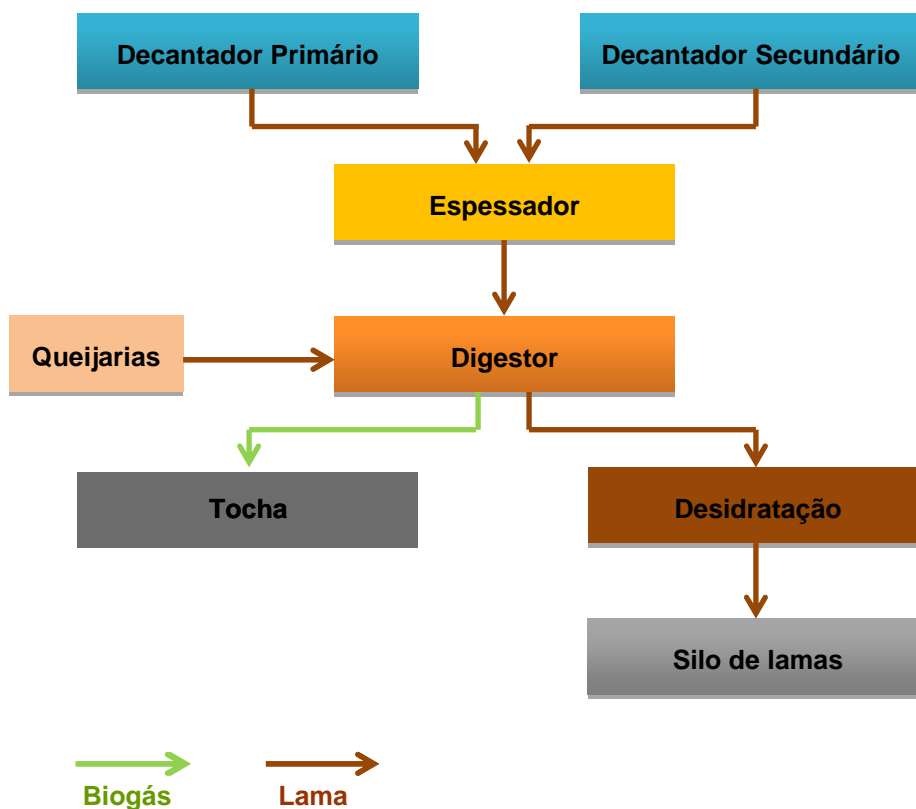


Figura 22 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa

- ETAR da Quinta do Conde

A fase sólida da ETAR da Quinta do Conde é composta por uma etapa de espessamento, onde as lamas primárias são espessadas num espessador gravítico e as lamas secundárias em duas mesas de espessamento. As lamas primárias e secundárias espessadas são posteriormente misturadas e homogeneizadas, encaminhando-se as lamas mistas para uma digestão anaeróbia mesófila com dois digestores. Atualmente apenas está um digestor em funcionamento. As lamas digeridas são depois encaminhadas para desidratação mecânica efetuada por duas centrífugas e, por fim, armazenadas em dois silos. O biogás produzido na digestão anaeróbia é recolhido e armazenado num gasómetro com funcionamento em baixa pressão e enviado para os motores de cogeração, previamente passando por um sistema de depuração do biogás, com vista a remover os constituintes agressivos para o motor, sendo o excesso de biogás encaminhado para queima numa tocha (ISOLUX, 2013).

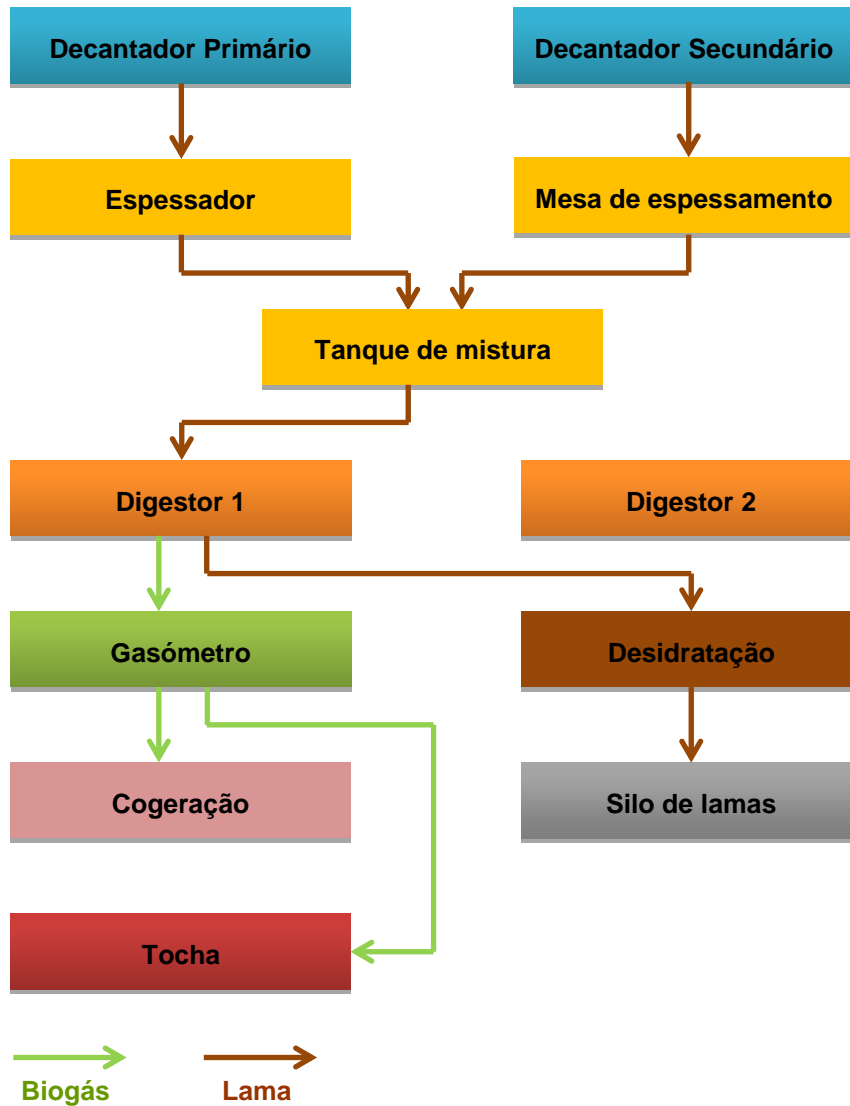


Figura 23 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR da Quinta do Conde

- ETAR do Seixal

A fase sólida da ETAR do Seixal é composta por uma fase de espessamento, onde as lamas secundárias passam por este processo num espessador mecânico de tambor, seguindo depois para um tanque de mistura de lamas e as lamas primárias passam diretamente duma decantação primária lamelar para esse tanque de mistura de lamas. De seguida, as lamas mistas são enviadas para uma digestão anaeróbia mesófila com dois digestores. Atualmente está apenas um digestor em funcionamento. As lamas digeridas são depois encaminhadas para desidratação mecânica efetuada por duas centrífugas e, por fim, armazenadas em dois silos. Relativamente ao biogás produzido na digestão anaeróbia, é recolhido e armazenado num gasómetro com funcionamento em baixa pressão e enviado para o motor de cogeração,

passando previamente por um sistema de depuração do biogás, com vista a remover os constituintes agressivos para o motor, sendo o excesso de biogás encaminhado para queima numa tocha (Ferrovial e Cadagua, 2007).

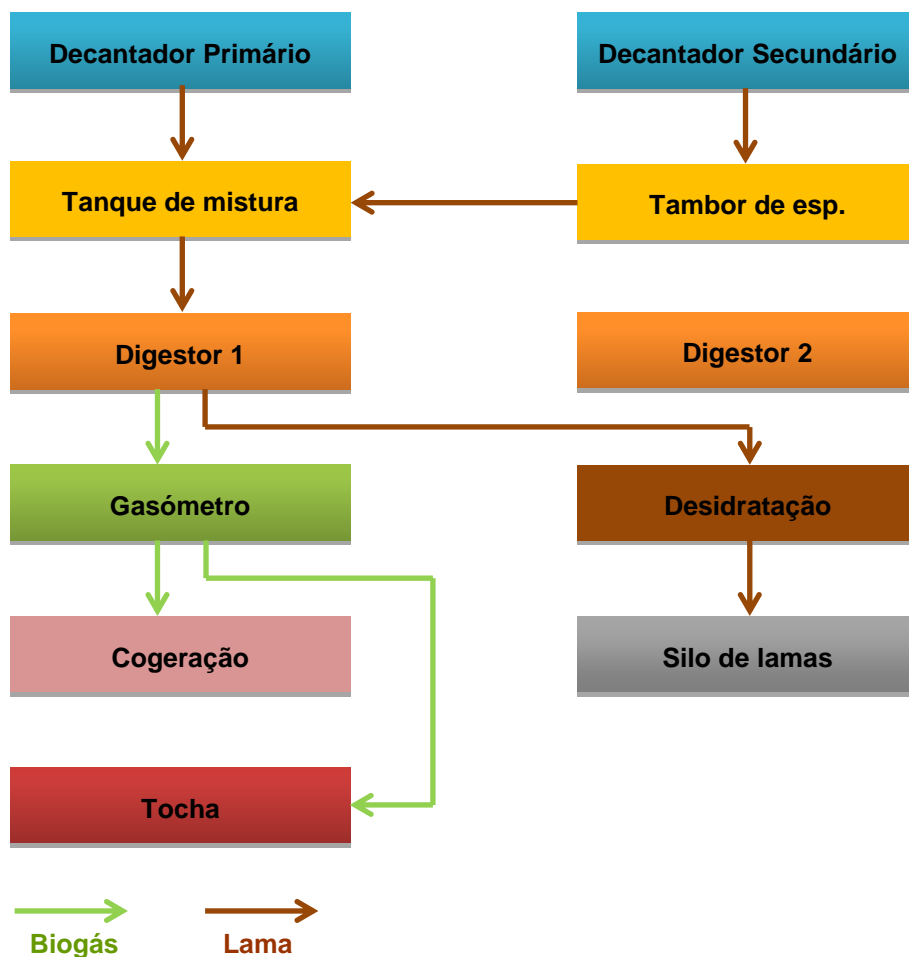


Figura 24 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR do Seixal

- ETAR de Sesimbra

A fase sólida da ETAR de Sesimbra é composta por uma fase de espessamento, que recebe num espessador gravítico, as lamas provenientes da decantação conjunta do efluente bruto e da água de lavagem dos biofiltros na fase líquida, seguindo depois para uma digestão anaeróbia mesófila com dois digestores, atualmente apenas com um digestor em funcionamento. As lamas digeridas são depois encaminhadas para desidratação mecânica efetuada por uma centrífuga e, por fim, armazenadas em dois silos. Relativamente ao biogás produzido na digestão anaeróbia, é recolhido e armazenado num gasómetro com funcionamento em baixa pressão e enviado para o motor de cogeração, previamente passando

por um sistema de depuração do biogás, com vista a remover os constituintes agressivos para o motor, sendo o excesso de biogás encaminhado para queima numa tocha (Degrémont, 2001).

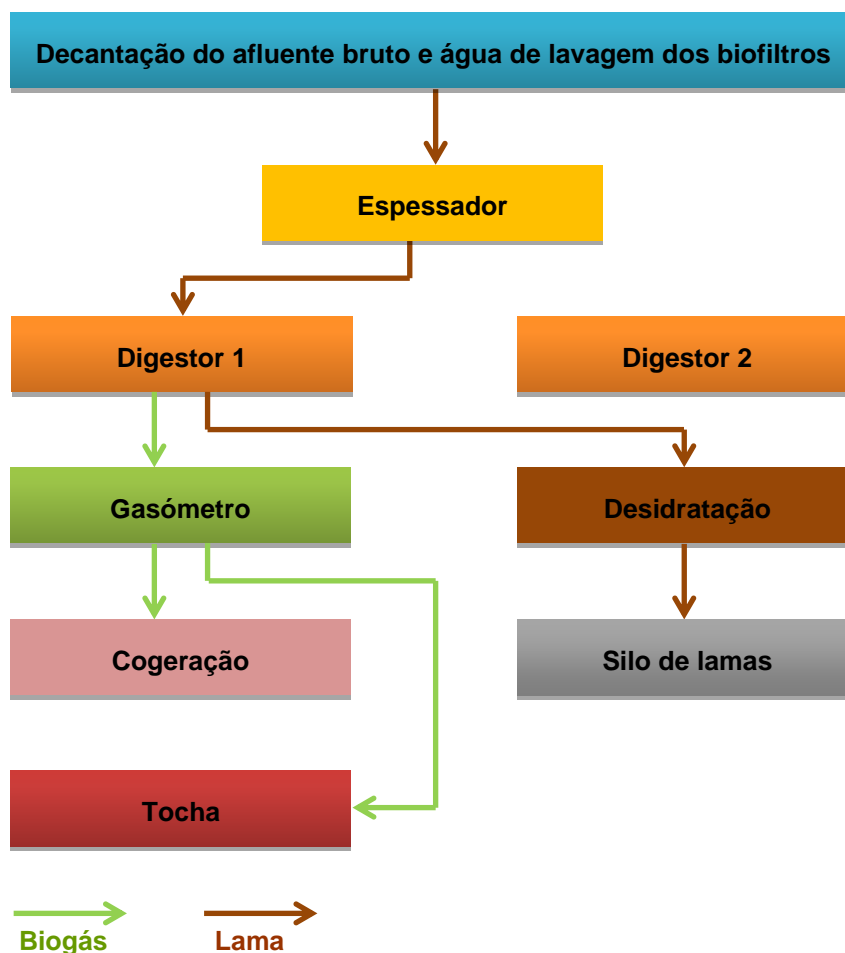


Figura 25 - Diagrama do tratamento da Linha da Fase sólida da ETAR de Sesimbra

Recolha de dados

Para as ETAR de Fernão Ferro, Seixal e Zona Industrial da Autoeuropa foram recolhidos dados relativos aos anos de 2012 e 2013, para a ETAR da Quinta do Conde apenas dados de 2013, por ser uma ETAR recente e não haver dados anteriores e por fim, para a ETAR de Sesimbra, dados de 2010 a 2013, inclusive, devido à falta de dados relativamente aos anos mais recentes. A recolha de dados foi feita principalmente com recurso a ficheiros de dados sobre a digestão anaeróbia e biogás, compilados pela SIMARSUL. Nestes ficheiros foram fornecidos o caudal afluente bruto, concentração de CBO_5 obtida por análise de amostra composta, caudal de lamas afluente à digestão e à desidratação, concentrações de sólidos totais e sólidos voláteis, relativas a ambos os caudais de lamas e obtidas por análise pontual, quantidade de sólidos

totais e voláteis afluentes à digestão e à desidratação, eficiência de remoção de sólidos voláteis, tempo de retenção hidráulico, carga volúmica, pH das lamas espessadas e digeridas, temperatura das lamas digeridas, concentração de AGV e alcalinidade por amostra pontual, assim como o rácio entre os AGV e alcalinidade, concentração de azoto amoniacal também por amostra pontual, caudal de biogás produzido, caudal de biogás para cogeração e para tocha. Os ficheiros de dados foram completados recorrendo a registos em suporte papel que existem para cada ETAR. Recorreu-se também a dados diários armazenados na supervisão de algumas ETAR, como os de temperatura, caudais de lama e biogás, com os quais se fizeram também médias mensais. Também foram revistos alguns dados diários registados manualmente, nomeadamente de caudalímetros de lamas e biogás. Por fim, para recolher dados de projeto de funcionamento e sobre órgãos das ETAR em estudo, recorreu-se às respetivas Memórias Descritivas e Justificativas e também aos Manuais de Exploração.

Elaborou-se também uma compilação de dados de projeto de cada uma das ETAR e recolha de alguns valores de dimensionamento apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 - Dados de projecto da fase sólida das ETAR

| | Q afl. dig. ano 0 (m ³ /dia) | Q afl. dig. ano HP (m ³ /dia) | Nº digestores | Volume unitário do digestor (m ³) | T _{RH} ano 0 (dias) | T _{RH} ano HP (dias) | Sistema de agitação | Volume do gasómetro (m ³) | Q biogás ano 0 (m ³ /dia) | Q biogás ano HP (m ³ /dia) | Potência do motor de cogeração (kW) |
|-----------------|---|--|------------------|---|------------------------------------|-------------------------------------|---|---|--|---|---|
| ETAR FFR | 24 | 51 | 2 | 1400 | 58 | 55 | Não tem | 272 | 131 | 266 | Não tem |
| ETAR ZIA | - | - | 1 | 1600 | 28 | 17 | Agitação por compressão do biogás | Não tem | 150 | 648 | Não tem |
| ETAR QTC | 160 | 216 | 2 | 1990 | 25 | 15 | Agitador submersível com pás | 1040 | 1697 | 2289 | 260 e 142 kW |
| ETAR SXL | 152 | 253 | 2 | 1963 | 21 | 15,5 | Agitação por compressão do biogás | 1000 | 2400 e.b. 2950 e.a. | 3400 e.b. 4000 e.a. | 345 kW |
| ETAR SSB | - | 57,5 | 2 | 600 | - | 21 | Agitação por compressão do biogás | 100 | 400 | 689 | 60 e 60 kW |

Análise de dados

Depois dos dados recolhidos foi necessário fazer o tratamento dos mesmos, eliminando alguns *outliers* provenientes de amostras não representativas. Os valores a eliminar referem-se a valores de tempo de retenção muito elevados devido a caudais de lama afluentes aos digestores muito baixos. Existem também valores de biogás sem significado devido a avarias nas ETAR, sendo necessário a sua eliminação. Para efetuar a análise dos dados recolhidos fez-se uma listagem das gamas de funcionamento ótimo relativas a vários parâmetros, divididas essencialmente pelo funcionamento em alta e baixa carga.

Avaliação da viabilidade do aproveitamento do biogás para produção de energia elétrica para as ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa

Para avaliar a viabilidade do aproveitamento do biogás produzido mediante instalação de um motor de combustão interna alternativo para a produção de energia elétrica nas ETAR de Fernão Ferro e da Zona Industrial da Autoeuropa foi necessário efetuar um balanço económico com os ganhos monetários cumulativos de vender energia elétrica à rede, os custos de instalação dos equipamentos e de construção civil, os custos de manutenção de um motor de combustão interna alternativo e os custos purificação do biogás.

Os ganhos monetários cumulativos foram calculados com base na produção de biogás, sendo necessário, aferir inicialmente a potência elétrica necessária e energia produzida onde se assumiram vários parâmetros de cálculo. Os parâmetros assumidos foram a percentagem de metano presente no biogás, assumida em 65%, o que implica que o poder calorífico inferior do biogás será cerca de 6,2 kWh/m³ segundo CCE (2000), a eficiência elétrica dos motores de combustão interna alternativos, que depende da sua potência, assumida em 30% segundo EPA (2008), o tempo de funcionamento por dia, assumido em 12 horas/dia, para haver margem face a um posterior aumento de produção de biogás e, por fim, o preço de venda da energia elétrica, assumido em 0,115 €/kWh durante os primeiros 15 anos, com base num valor médio apresentado pela Direção Geral de Energia e Geologia.

Os custos de instalação dos equipamentos e de construção civil necessária foram definidos com recurso a uma análise dos preços correspondentes de outras empreitadas da SIMARSUL, onde se retiraram os valores das listas de preços unitários e também com recurso à consulta de fornecedores.

Os custos de manutenção do motor de combustão interna alternativo foram calculados com base na energia produzida, assumindo-se o custo por unidade de energia produzida em 0,025 €/kWh, segundo EPA (2008). Relativamente aos custos de purificação do biogás, dos sistemas possíveis, foi selecionado um sistema por injeção de cloreto férrico nas lamas afluentes à digestão, por ser o mais económico para remoção de H₂S, com uma adição de

9,6 kg Cloreto Férrico / kg H₂S e um custo de 0,275 €/kg de Cloreto Férrico. Foi ainda necessário para o cálculo dos custos assumir a concentração de H₂S a tratar no biogás, em 2000 ppm H₂S segundo análises efetuadas ao biogás das ETAR em questão.

Para haver alguma margem de segurança, visto a concessão da gestão destas ETAR pela SIMARSUL prolongar-se por mais vinte anos e como o período de vida útil dos equipamentos é de 15 anos, calcularam-se os ganhos de venda de energia elétrica à rede, ano a ano, durante um período de 15 anos, aferindo-se deste modo se é viável, ou não, proceder-se ao aproveitamento energético do biogás. No caso de não se mostrar viável nas atuais condições, estimar qual o caudal necessário para que tal aconteça.

Comparação de desempenho das ETAR

Para poder avaliar o desempenho da digestão anaeróbia de cada ETAR, depois de validados os dados, calcularam-se as relações de biogás produzido por quantidade de sólidos voláteis afluentes à digestão, biogás produzido por caudal de água residual afluente e biogás produzido por caudal de lamas afluentes à digestão. Fizeram-se depois vários gráficos, com as relações calculadas e com os vários dados validados, para uma melhor percepção da evolução dos dados e melhor aferir conclusões, mostrando o funcionamento da digestão entre os vários parâmetros.

Construção duma folha de cálculo para avaliação do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para produção de energia elétrica

As instalações de digestão anaeróbia de lamas podem variar muito na sua estrutura e funcionamento, portanto poderá ser interessante e vantajoso proceder também à elaboração de uma folha de cálculo idêntica à utilizada anteriormente para as ETAR de Fernão Ferro e da Zona Industrial da Autoeuropa, mas com o propósito de ter uma estrutura capaz de especificar as condições de funcionamento e custos necessários ao aproveitamento energético do biogás para qualquer caso de digestão anaeróbia a frio, quer para vender a energia produzida ou para consumo interno na própria estação. Assim a construção da folha de cálculo está estruturada primeiramente por Condições de Exploração, onde se determina a produção de biogás, potência elétrica necessária e os ganhos monetários de venda da energia elétrica à rede por ano. Seguem-se os Custos de Investimento, onde se selecionam os equipamentos necessários e trabalhos a realizar para cada caso, com várias opções para o sistema de purificação do biogás. Depois os Custos de Operação/Manutenção, onde são calculados os custos de manutenção do motor por ano e os custos de purificação do biogás por ano. Para os custos de purificação do biogás, é acrescentado a título de auxílio três sistemas de purificação, sendo estes o cloreto férrico, que se adiciona nas lamas afluentes à digestão e remove H₂S, o

hidróxido de ferro, que também se adiciona nas lamas alfontes à digestão e remove H₂S e, por fim, o SOXSIA®, que é um meio filtrante, que remove H₂S e siloxanos. Por último, o Balanço Económico, onde se retiram os custos aos ganhos monetários e se calcula a margem de lucro, ou perdas, ano a ano com um horizonte de 15 anos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão estão separados em três partes: primeiro são apresentados os valores obtidos de ganhos, custos e o balanço entre estes, relativos à avaliação da viabilidade de aproveitamento do biogás produzido nos digestores anaeróbios das ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa para produção de energia eléctrica; de seguida é apresentada a comparação do funcionamento das ETAR de Fernão Ferro, Zona Industrial da Autoeuropa, Quinta do Conde, Seixal e Sesimbra e, por fim, é apresentada uma folha de cálculo também focada na avaliação da viabilidade de aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para produção de energia eléctrica, com versatilidade suficiente para especificar qualquer caso de digestão anaeróbia a frio.

6.1 Avaliação da viabilidade de aproveitamento do biogás produzido nos digestores anaeróbios das ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa para produção de energia eléctrica

Esta avaliação foi realizada para um horizonte projeto de 15 anos, devido ao tempo de vida útil dos equipamentos e também devido à concessão da gestão destas ETAR pela SIMARSUL durar mais 20 anos, até 2034, para ter alguma margem de segurança e verificar se se geram lucros, face aos custos de instalação, operação e manutenção.

Para elaborar esta avaliação procedeu-se à compilação de dados de produção de biogás nas ETAR de Fernão Ferro e da Zona Industrial da Autoeuropa. Nestas ETAR devido a avarias na linha de biogás, não se registaram valores de caudal de biogás produzido. Para aferir as produções de 2012 e 2013 houve necessidade de recorrer às produções de 2011, tendo presente que as condições de funcionamento de 2012 e 2013, calculou-se uma média mensal da produção de biogás para cada uma das ETAR, que servem como base de cálculo para a potência a instalar, apresentadas no Quadro 14.

Quadro 14 - Produção de biogás e potência necessária a instalar

| | ETAR de Fernão Ferro | ETAR da ZIA |
|--|----------------------|-------------|
| Média de produção de biogás (Nm ³ /mês) | 3650 | 700 |
| Potência eléctrica (kW) | 18,6 | 4 |

Como se verifica no Quadro 14 com as produções de biogás de cada ETAR, chegou-se a um valor de potência elétrica de 18,6 kW para Fernão Ferro e de 4 kW para a Zona Industrial da Autoeuropa. Estas potências segundo o Decreto-Lei nº. 34/2011, de 8 de Março, correspondem a mini produção, o que significa potências de 4 a 250 kW. Para proceder à avaliação, calcularam-se os ganhos de venda da energia à rede elétrica, com base na produção de biogás, selecionaram-se os equipamentos necessários a cada uma das ETAR para calcular deste modo os custos de instalação, calcularam-se os custos de manutenção do motor, definiu-se um sistema de purificação de biogás por cloreto férrico por ser o que implica menores custos de operação. A sequência dos cálculos anteriores para a ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa encontra-se no Anexo I. Feitos estes cálculos, foi possível efetuar uma análise económica de custos benefícios com os ganhos e custos cumulativos, para avaliar o tempo de retorno e a viabilidade do investimento, sendo a totalidade dos cálculos apresentados no Anexo II. Os resultados relativamente à ETAR de Fernão Ferro são apresentados no Quadro 15.

Quadro 15 - Resultados da avaliação de investimento na ETAR de Fernão Ferro

| Anos | Ganhos cumulativos de venda da energia elétrica | Custos de Investimento | Custo de Exploração Anual | Custos cumulativos de Exploração | Balço Económico | Margem de lucro |
|------|---|------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1º | 9 369 € | 163 100 € | 2268 € | 2 268 € | -155 999 € | -1665% |
| 2º | 18 738 € | | 2336 € | 4 604 € | -148 966 € | -795% |
| 3º | 28 106 € | | 2406 € | 7 010 € | -142 004 € | -505% |
| 4º | 37 475 € | | 2478 € | 9 488 € | -135 113 € | -361% |
| 5º | 46 844 € | | 2553 € | 12 041 € | -128 297 € | -274% |
| 6º | 56 213 € | | 2629 € | 14 670 € | -121557 € | -216% |
| 7º | 65 582 € | | 2708 € | 17 378 € | -114 896 € | -175% |
| 8º | 74 951 € | | 2789 € | 20 167 € | -108 317 € | -145% |
| 9º | 84 319 € | | 2873 € | 23 040 € | -101821 € | -121% |
| 10º | 93 688 € | | 2959 € | 26 000 € | -95 411 € | -102% |
| 11º | 103 057 € | | 3048 € | 29 048 € | -89 091 € | -86% |
| 12º | 112 426 € | | 3139 € | 32 187 € | -82 861 € | -74% |
| 13º | 121 795 € | | 3234 € | 35 421 € | -76 726 € | -63% |
| 14º | 131 163 € | | 3331 € | 38 751 € | -70 688 € | -54% |
| 15º | 140 532 € | | 3430 € | 42 182 € | -64 749 € | -46% |

Verifica-se pelo Quadro 15 que não é viável avançar com este investimento, devido à baixa produção de biogás desta instalação face aos custos de instalação e exploração. Pelo que ao fim do horizonte projeto de 15 anos se teria um prejuízo de -46 % do total investido. Face a este resultado avaliou-se tendo em consideração os custos de instalação, a quantidade de

biogás que seria necessária produzir para cobrir a totalidade do investimento, apresentando-se os resultados no Quadro 16.

Quadro 16 - Resultados do investimento caso houvesse produção de biogás na ETAR de Fernão Ferro para cobrir investimento

| Anos | Ganhos cumulativos de venda da energia elétrica | Custos de Investimento | Custo de Exploração Anual | Custos cumulativos de Exploração | Balço Económico | Margem de lucro |
|------|---|------------------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|
| 1º | 21 174 € | 221 690 € | 5126 € | 5 126 € | -205 642 € | -971% |
| 2º | 42 347 € | | 5279 € | 10 405 € | -189 748 € | -448% |
| 3º | 63 521 € | | 5438 € | 15 843 € | -174 012 € | -274% |
| 4º | 84 694 € | | 5601 € | 21 444 € | -158 439 € | -187% |
| 5º | 105 868 € | | 5769 € | 27 212 € | -143 035 € | -135% |
| 6º | 127 041 € | | 5942 € | 33 154 € | -127 803 € | -101% |
| 7º | 148 215 € | | 6120 € | 39 275 € | -112 750 € | -76% |
| 8º | 169 388 € | | 6304 € | 45 579 € | -97 880 € | -58% |
| 9º | 190 562 € | | 6493 € | 52 072 € | -83 200 € | -44% |
| 10º | 211 735 € | | 6688 € | 58 759 € | -68 714 € | -32% |
| 11º | 232 909 € | | 6888 € | 65 648 € | -54 429 € | -23% |
| 12º | 254 082 € | | 7095 € | 72 743 € | -40 350 € | -16% |
| 13º | 275 256 € | | 7308 € | 80 051 € | -26 485 € | -10% |
| 14º | 296 429 € | | 7527 € | 87 578 € | -12 838 € | -4% |
| 15º | 317 603 € | | 7753 € | 95 331 € | 582 € | 0% |

Para que ao fim dos 15 anos de horizonte projeto o investimento ficar pago na totalidade, chegou-se a um valor de produção de biogás de 8250 m³/mês, que representa um pouco mais do dobro da produção atual.

Para o caso da ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa os resultados obtidos são apresentados no Quadro 17.

Quadro 17 - Resultados da avaliação de investimento para a ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa

| Anos | Ganhos cumulativos de venda da energia elétrica | Custos de Investimento | Custo de Exploração Anual | Custos cumulativos de Exploração | Balanço Económico | Margem de lucro |
|------|---|------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|
| 1º | 1 499 € | 131 520 € | 370 € | 370 € | -130 391 € | -8698% |
| 2º | 2 998 € | | 381 € | 752 € | -129 274 € | -4312% |
| 3º | 4 497 € | | 393 € | 1 144 € | -128 167 € | -2850% |
| 4º | 5 996 € | | 405 € | 1 549 € | -127 073 € | -2119% |
| 5º | 7 495 € | | 417 € | 1 966 € | -125 991 € | -1681% |
| 6º | 8 994 € | | 429 € | 2 395 € | -124 921 € | -1389% |
| 7º | 10 493 € | | 442 € | 2 837 € | -123 864 € | -1180% |
| 8º | 11 992 € | | 455 € | 3 293 € | -122 821 € | -1024% |
| 9º | 13 491 € | | 469 € | 3 762 € | -121 791 € | -903% |
| 10º | 14 990 € | | 483 € | 4 245 € | -120 775 € | -806% |
| 11º | 16 489 € | | 498 € | 4 742 € | -119 773 € | -726% |
| 12º | 17 988 € | | 513 € | 5 255 € | -118 787 € | -660% |
| 13º | 19 487 € | | 528 € | 5 783 € | -117 816 € | -605% |
| 14º | 20 986 € | | 544 € | 6 327 € | -116 860 € | -557% |
| 15º | 22 485 € | | 560 € | 6 887 € | -115 922 € | -516% |

Verifica-se para esta ETAR que ainda é menos rentável o investimento do que para a ETAR de Fernão Ferro, devido à produção de biogás ser menor e devido aos custos de instalação mais altos, pelo que ao final dos 15 anos se teria um prejuízo de -516 % do total investido. Tal como elaborado para a ETAR de Fernão Ferro, também se estimou o caudal de biogás produzido que cobriria na totalidade o investimento ao fim dos 15 anos de horizonte projeto, sendo que o valor de biogás produzido teria de ser de 11570 m³/mês. O resultado dos ganhos e custos ao longo dos 15 anos é apresentado no Quadro 18:

Quadro 18 - Resultados do investimento caso houvesse produção de biogás na ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa para cobrir o investimento

| Anos | Ganhos cumulativos de venda da energia elétrica | Custos de Investimento | Custo de Exploração Anual | Custos cumulativos de Exploração | Balanço Económico | Margem de lucro |
|------|---|------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|
| 1º | 24 749 € | 257 438 € | 6113 € | 6 113 € | -238 802 € | -965% |
| 2º | 49 499 € | | 6297 € | 12 410 € | -220 349 € | -445% |
| 3º | 74 248 € | | 6486 € | 18 896 € | -202 085 € | -272% |
| 4º | 98 997 € | | 6680 € | 25 576 € | -184 016 € | -186% |
| 5º | 123 746 € | | 6881 € | 32 457 € | -166 148 € | -134% |
| 6º | 148 496 € | | 7087 € | 39 544 € | -148 486 € | -100% |
| 7º | 173 245 € | | 7300 € | 46 844 € | -131 036 € | -76% |
| 8º | 197 994 € | | 7519 € | 54 362 € | -113 805 € | -57% |
| 9º | 222 744 € | | 7744 € | 62 107 € | -96 800 € | -43% |
| 10º | 247 493 € | | 7977 € | 70 083 € | -80 028 € | -32% |
| 11º | 272 242 € | | 8216 € | 78 299 € | -63 494 € | -23% |
| 12º | 296 992 € | | 8462 € | 86 761 € | -47 207 € | -16% |
| 13º | 321 741 € | | 8716 € | 95 478 € | -31 174 € | -10% |
| 14º | 346 490 € | | 8978 € | 104 455 € | -15 403 € | -4% |
| 15º | 371 239 € | | 9247 € | 113 702 € | 100 € | 0% |

6.2 Comparação de desempenho entre as ETAR em estudo

A digestão anaeróbia a quente é um processo já amplamente estudado e é mais vantajoso economicamente do que digestão anaeróbia a frio.

Ao elaborar esta comparação entre as várias ETAR, Fernão Ferro, Zona Industrial da Autoeuropa, Quinta do Conde, Seixal e Sesimbra, verifica-se como os vários parâmetros e relações variam ao longo do tempo, mostrando como nem sempre é possível manter, dentro do digestor, as condições de dimensionamento previstas. A operação da digestão está muito condicionada pela quantidade e qualidade de lama afluyente aos digestores, bem como pelos equipamentos que lhe estão associados e que são passíveis de sofrer avarias, não permitindo manter as condições ideais, inicialmente previstas.

Para uma melhor percepção da análise comparativa das várias ETAR prepararam-se as Figuras 26 a 40 que são apresentadas numa sequência das diferentes variáveis observadas.

Caudal de água residual vs Caudal lama afluyente à digestão

A Figura 26 mostra o caudal de água residual e o caudal de lama afluyente à digestão, ao longo do tempo. Não é possível verificar uma tendência idêntica destas duas variáveis em todas as ETAR, com excepção de alguns curtos períodos de tempo. A principal causa desta diferença deve-se à variação na composição da água residual, devido à presença de águas pluviais, por existirem redes de drenagem unitárias em todos os sistemas, ou devido a variações de descargas de industriais, fossas sépticas e factores associados a fenómenos sazonais.

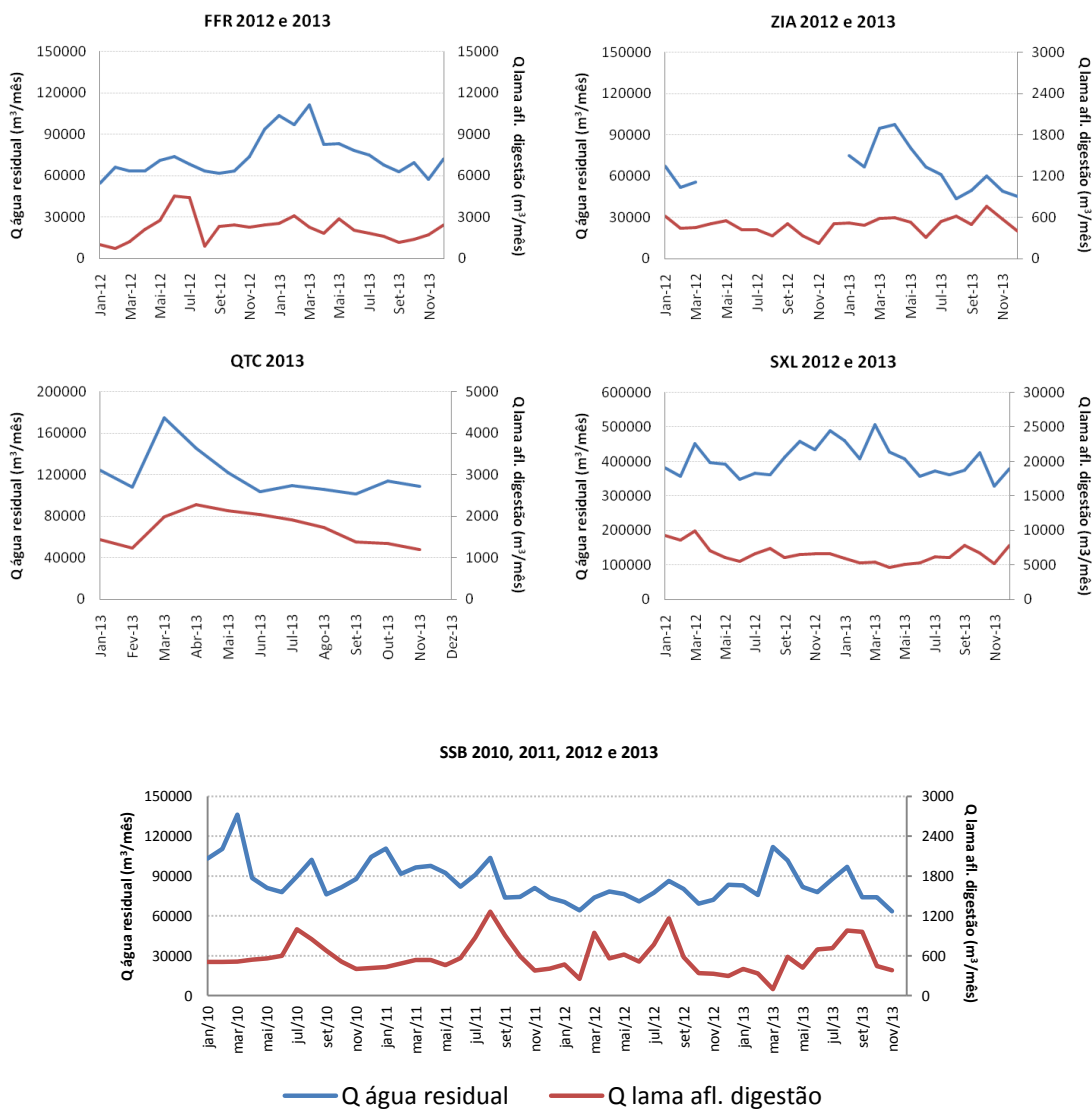


Figura 26 - Evolução do caudal de água residual e caudal de lama afluyente à digestão

Caudal de lama afluente à digestão vs Caudal de biogás vs Carga Volúmica

A Figura 27 mostra o caudal de lama afluente à digestão, caudal de biogás e a carga volúmica, ao longo do tempo. É possível verificar em todas as ETAR, exceto na ETAR do Seixal, uma tendência para a carga volúmica variar de igual forma que o caudal de lama afluente à digestão, cujas variações podem ser maiores ou menores devido às concentrações das lamas. Quanto ao caudal de biogás, é possível verificar uma variação idêntica à do caudal de lama afluente à digestão nas ETAR de Fernão Ferro e ZIA. Na ETAR da Quinta do Conde não foi possível obter dados de caudal de biogás. Quanto à relação do caudal de biogás e da carga volúmica, na ETAR de Fernão Ferro e ZIA os caudais de biogás seguem uma tendência idêntica. O mesmo acontece também na ETAR de Sesimbra, onde se vêem três picos de produção de biogás, dois dos quais em Janeiro e Agosto de 2013, em que as temperaturas de digestão atingiram os 30 °C. Relativamente ao maior pico de produção de biogás em Sesimbra, verifica-se que houve um decréscimo na carga volúmica, o que levaria a um decréscimo na produção de biogás, sendo este valor elevado devido a perturbações causadas por água circulante presente na tubagem de biogás. Na ETAR do Seixal há uma produção de biogás muito baixa até Julho de 2012, devido à paragem do equipamento de agitação das lamas no digestor e do motor de cogeração. Desta data em diante, a agitação foi retomada, mas o motor de cogeração foi pouco utilizado, exceto onde se verificam dois picos de produção de biogás, onde as temperaturas foram maiores. A pouca utilização do motor de cogeração deve-se às elevadas concentrações de H₂S e siloxanos no biogás.



Figura 27 - Evolução do caudal de lama afluyente à digestão, caudal de biogás e carga volúmica

Caudal de biogás vs pH

Quanto ao pH, na Figura 28 verifica-se em todas as ETAR que o pH da lama espessada é inferior ao da lama digerida, exceto na ETAR de Fernão Ferro, verificando-se que a lama entra ligeiramente ácida no digestor. Este facto ocorre devido a elevados tempos de retenção das lamas nos decantadores secundários ou espessador, nos quais há condições anaeróbias e que podem desencadear alguma produção de AGV, consequentemente diminuir o pH, entrando a lama no digestor ligeiramente ácida. No digestor, há produção e consumo de AGV, mas também é gerada alcalinidade em quantidade suficiente para fazer o pH subir ligeiramente para valores mais favoráveis. Portanto nestas ETAR não é expectável que haja inibição da produção de biogás devido ao pH.

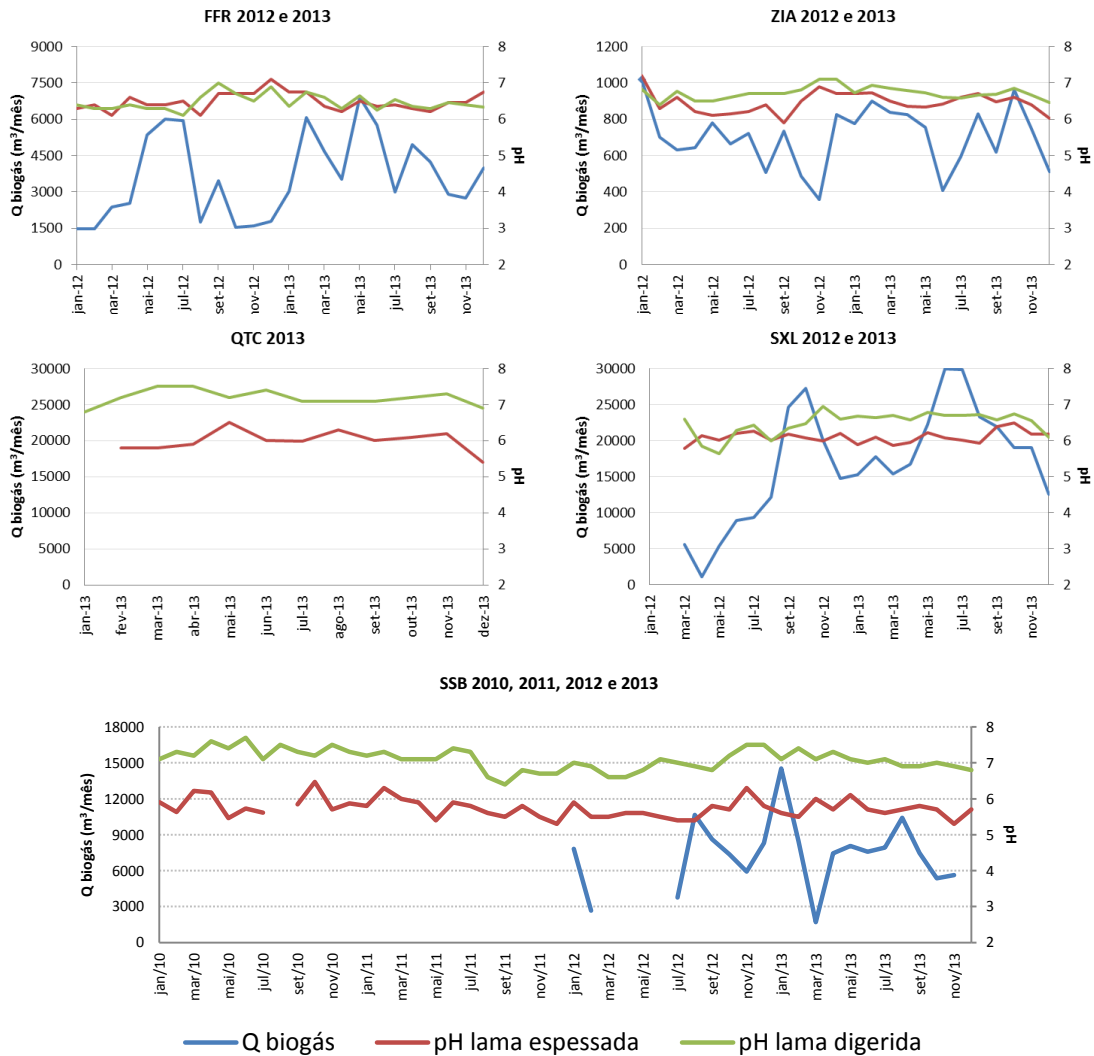


Figura 28 - Evolução do caudal de biogás, pH da lama espessada e digerida

Caudal de biogás vs Sólidos voláteis afluentes

Entre a quantidade de sólidos voláteis afluentes ou destruídos, decidiu-se comparar a produção de biogás com a quantidade de sólidos voláteis afluentes ao digestor, apesar das amostras serem feitas pontualmente, devido aos valores de sólidos afluentes serem mais fiáveis para o estudo. Feita esta comparação, a Figura 29 mostra que, para as ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa é possível encontrar uma relação com uma tendência de variação próxima entre estas duas variáveis. Quando às restantes ETAR esta não se verifica nenhuma relação entre estas duas variáveis, pelo que este facto pode ocorrer devido aos erros de amostragem, à variação das condições de funcionamento possibilitarem melhor, ou pior, a conversão dos sólidos voláteis em biogás ou também do potencial de volatilização dos sólidos voláteis afluentes ao digestor.

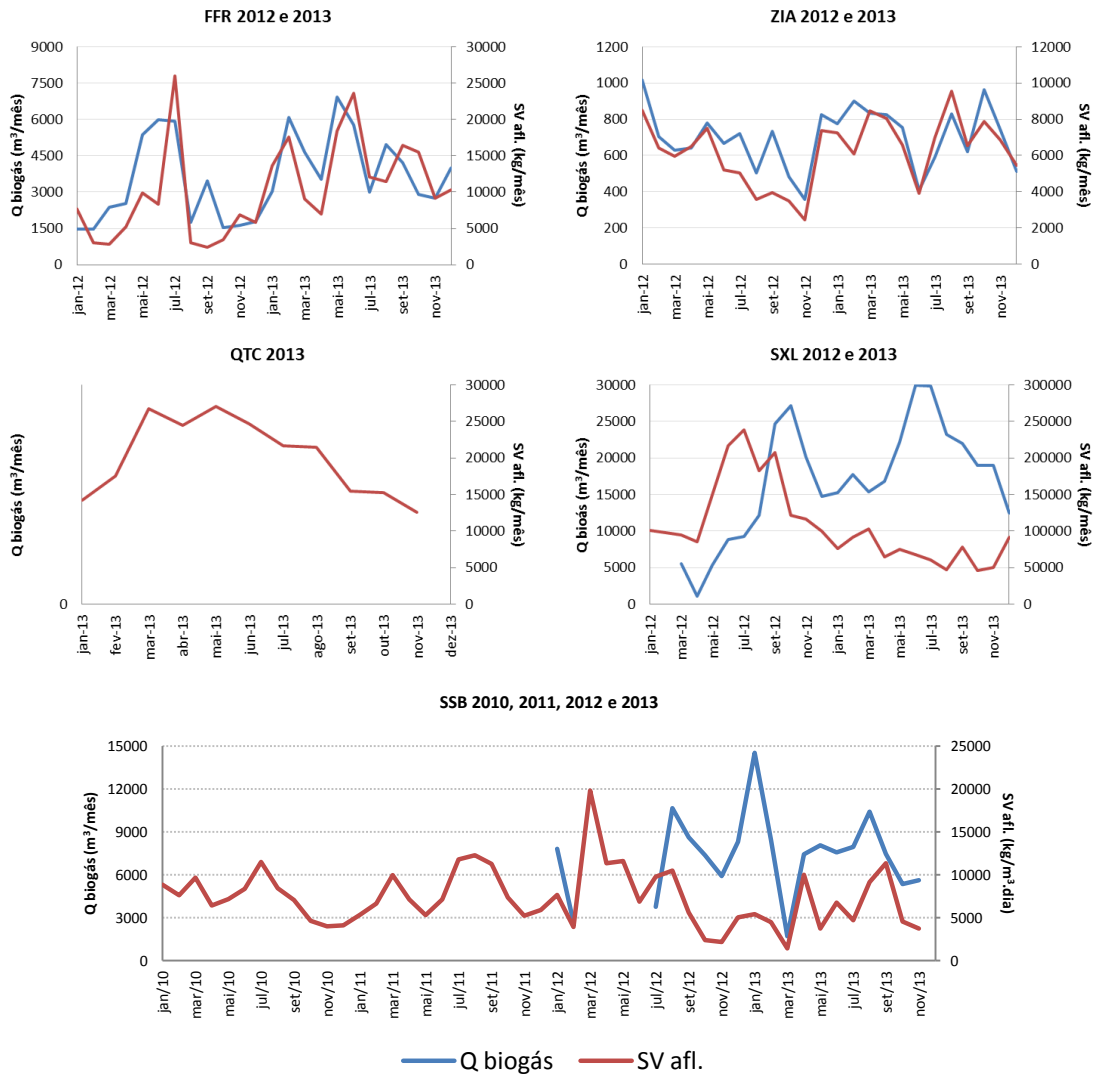


Figura 29 - Evolução do caudal de biogás e dos sólidos voláteis afluentes

Caudal de biogás vs Temperatura de digestão

Como anteriormente referido, os digestores das ETAR de Fernão Ferro e da Zona Industrial da Autoeuropa são a frio. Relativamente à ETAR do Seixal o período em estudo ocorreu durante a diversas avarias inseridas no âmbito do período das garantias. Relativamente à ETAR de Sesimbra parte do período em estudo coincidiu com a paragem da cogeração com a reparação do gasómetro. Para esta relação, nas ETAR em que se tem ambos os valores de biogás produzido e temperatura de digestão, é possível visualizar que a produção de biogás varia face à temperatura de digestão com uma tendência idêntica, tendo a produção de biogás variações mais abruptas que a temperatura, como se verifica na Figura 30.

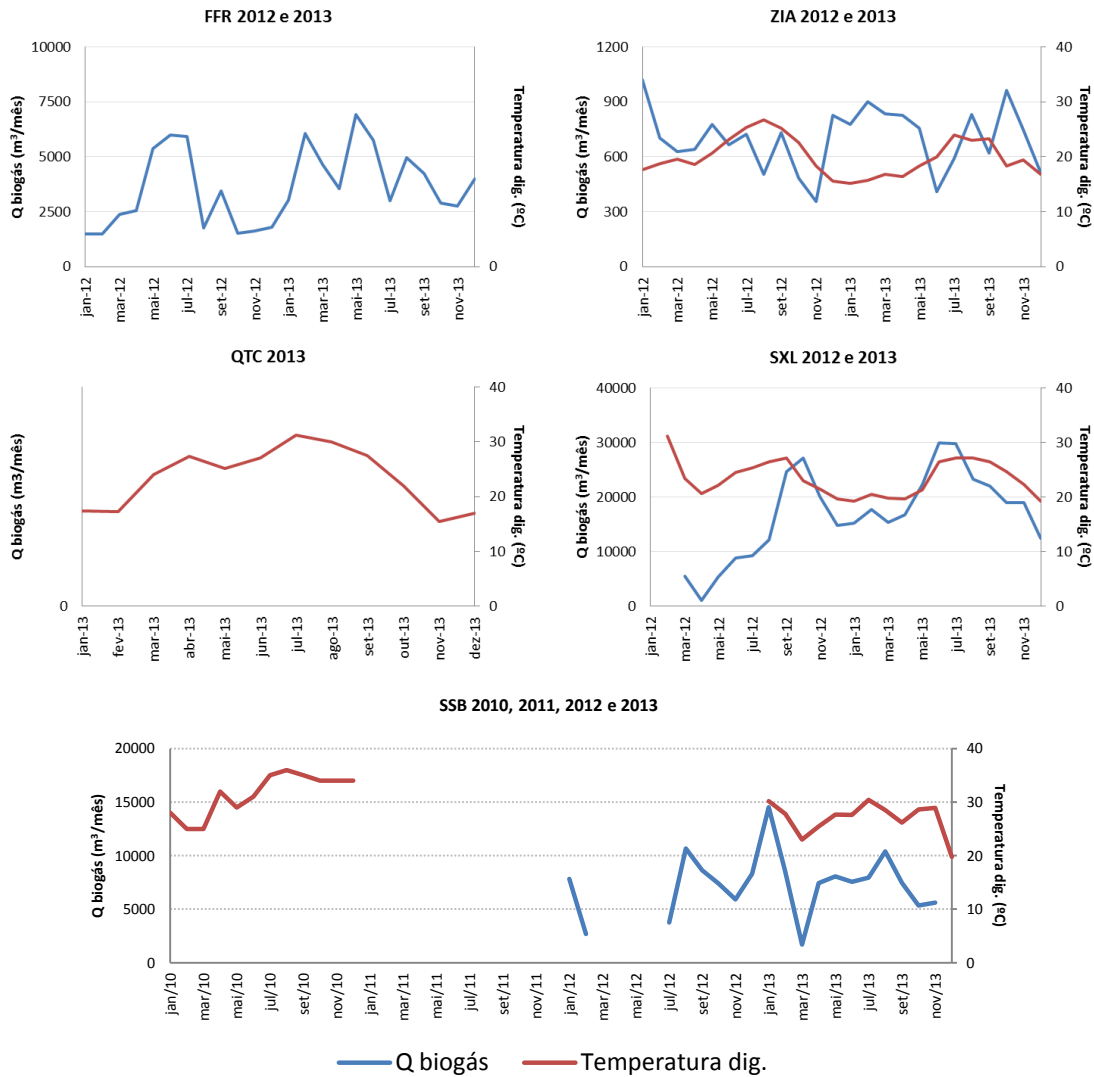


Figura 30 - Evolução do caudal de biogás e da temperatura de digestão

Caudal de biogás vs T_{RH}

Na Figura 31 é analisado o biogás produzido com o T_{RH} ao longo do tempo e verifica-se, em nenhuma ETAR é encontrada alguma tendência entre estas variáveis. Seria de esperar que quando o T_{RH} fosse maior, a produção de biogás também aumentasse, mas no cruzamento dos dados verifica-se o oposto. Este resultado deve-se aos outros parâmetros de influenciam o processo de digestão, por exemplo a temperatura, como foi mostrado anteriormente, quando a temperatura aumenta, a produção de biogás também. Portanto mesmo que o T_{RH} diminua, é possível que a produção de biogás aumente.

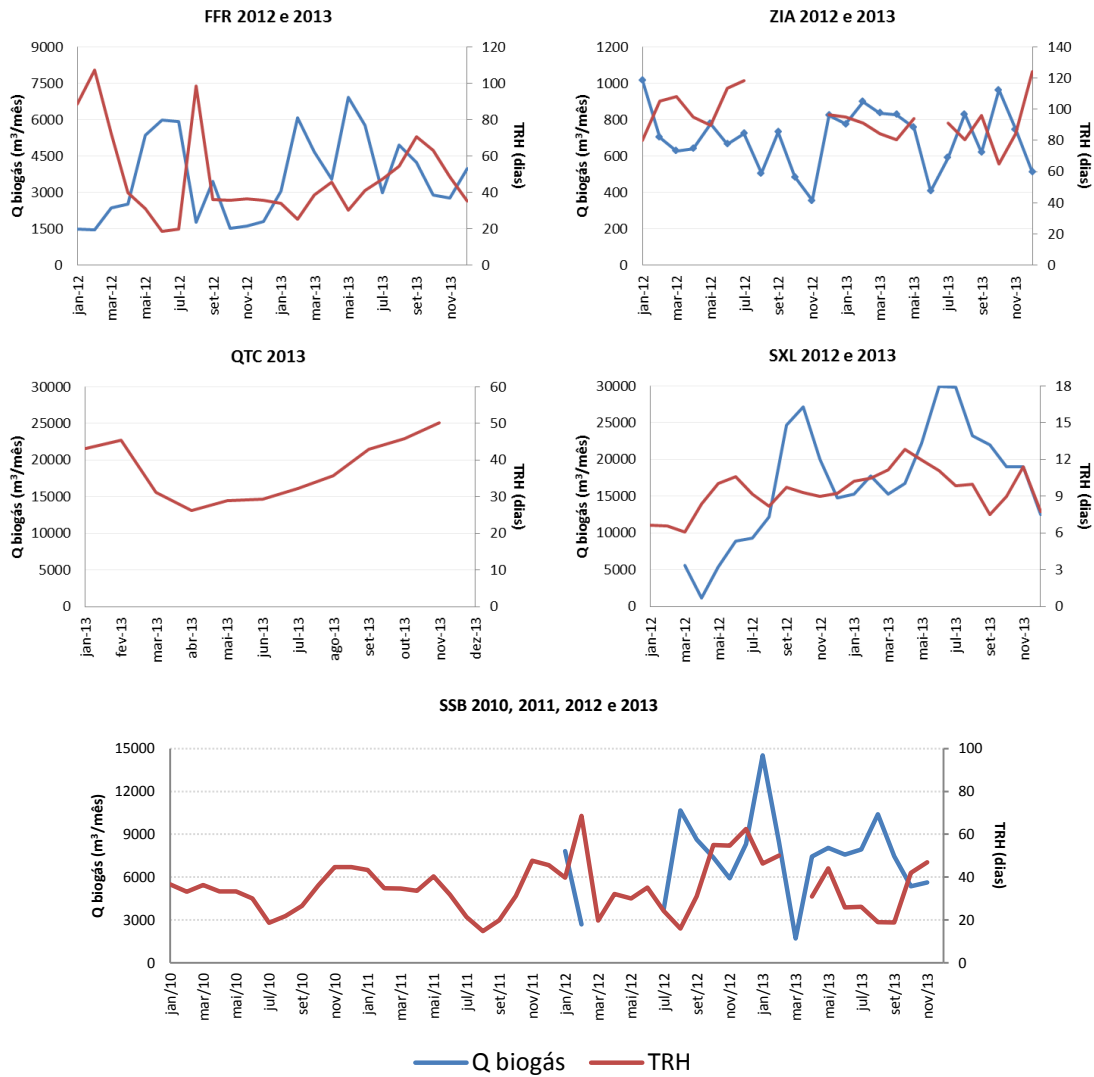


Figura 31 - Evolução do caudal de biogás e do T_{RH}

AGV vs Alcalinidade

Na Figura 32, que mostra a tendência dos AGV e da alcalinidade ao longo do tempo, não é possível verificar uma relação definida entre eles. Ocorrem grandes variações nas ETAR de Fernão Ferro, ZIA, Seixal e Sesimbra, enquanto Na ETAR da Quinta do Conde têm uma evolução ao longo do tempo mais estável. Seria de esperar que tivessem uma tendência oposta, ou seja, se os AGV aumentam, a alcalinidade diminuiria e se os AGV diminuíssem, a alcalinidade aumentaria.

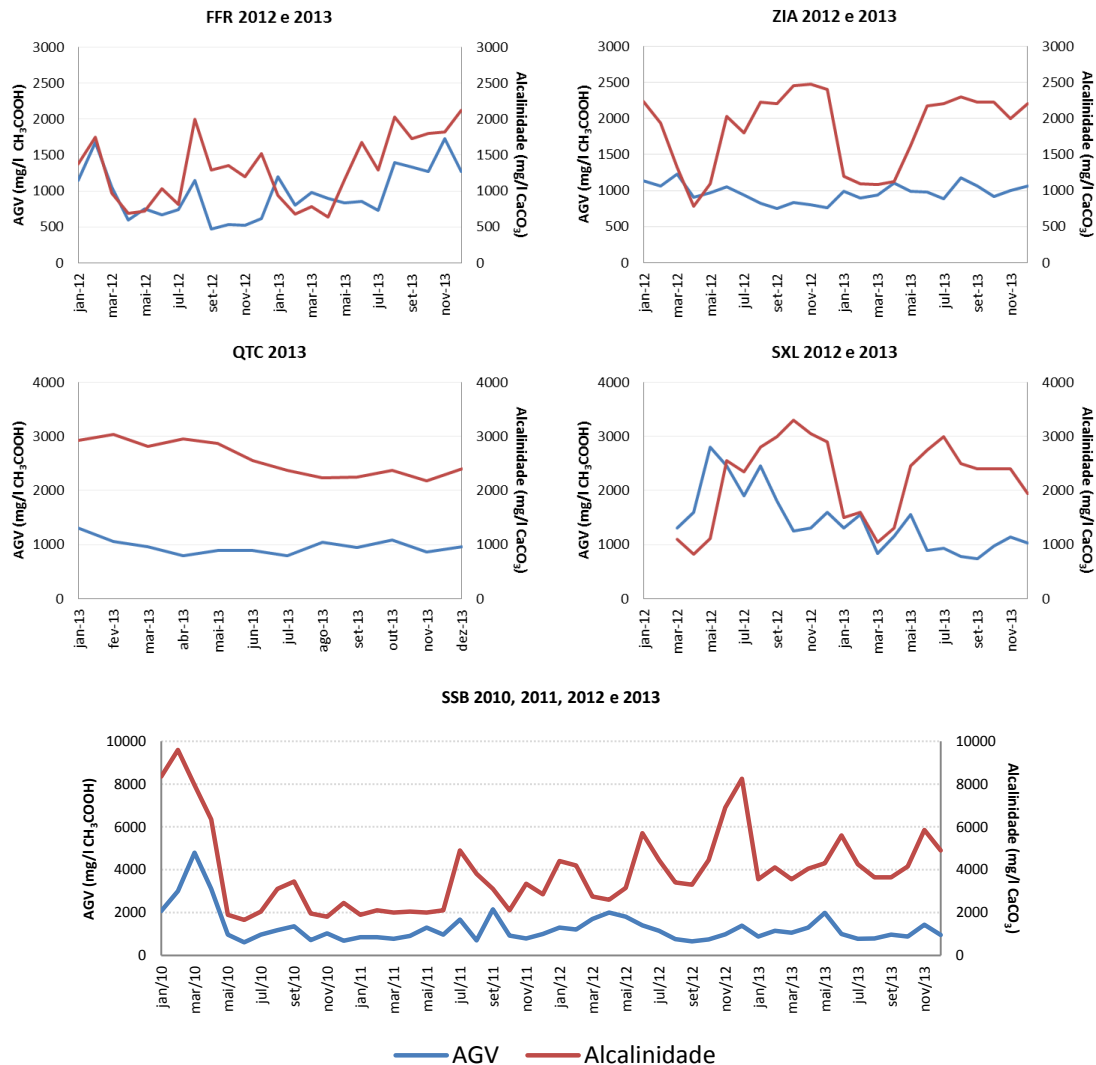


Figura 32 - Evolução dos AGV e Alcalinidade

Caudal de biogás/Caudal de água residual vs Caudal de biogás/Caudal de lamas afluentes à digestão

A Figura 33 mostra ao longo do tempo, a relação caudal de biogás por caudal de água residual, com o caudal de biogás produzido por caudal de lama afluente à digestão. Verifica-se que para a ETAR de Fernão Ferro não parece haver uma tendência semelhante entre estas variáveis, até Setembro de 2012, que daí em diante com os poucos valores que há, já seguem a mesma tendência. Na ETAR do Seixal as relações seguem tendências muito idênticas. Quanto às ETAR da ZIA e de Sesimbra, seguem tendências idênticas em alguns meses e diferentes noutros. Nestas relações para a ETAR de Sesimbra só é possível obter valores de 2012 e 2013. Estes são valores que se prevê variarem de igual forma excepto quando ocorrem as razões enunciadas na Figura 26. Em todas as ETAR é verificado que estas relações têm grandes variações, portanto não se mostram fiáveis para aferir uma relação com a produção de biogás.

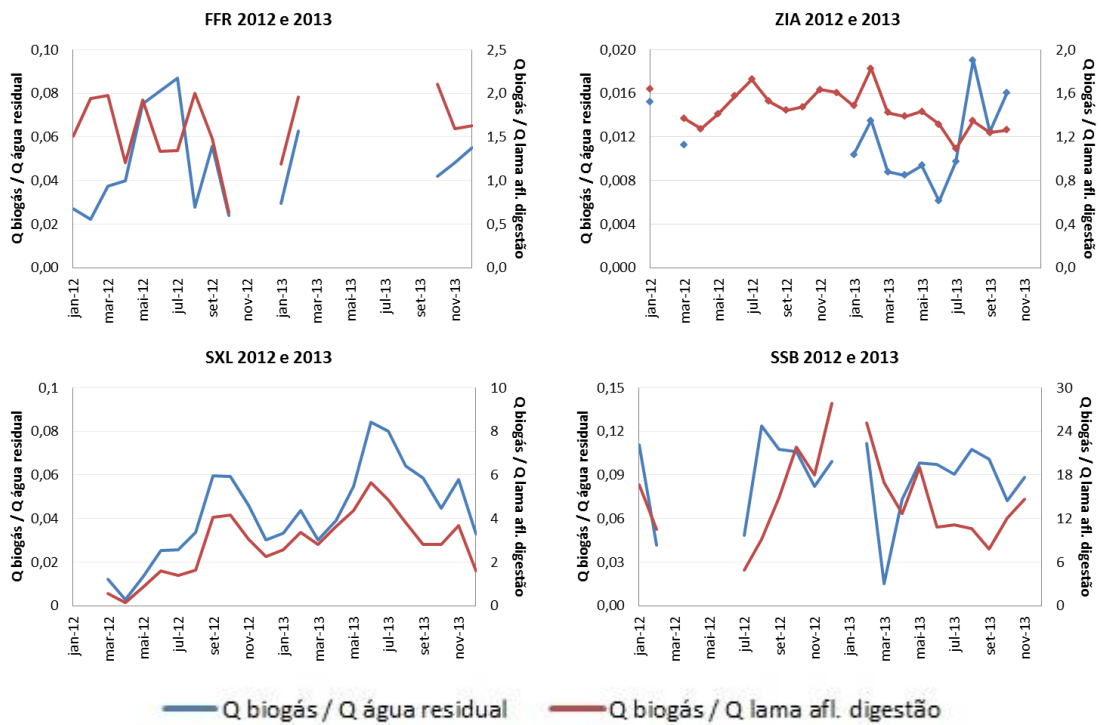


Figura 33 - Evolução da relação caudal de biogás / caudal de água residual e caudal de biogás / caudal de lama afluente à digestão

Caudal de lama afluente à digestão vs Sólidos voláteis afluentes

A Figura 34 compara o Q lama afl. à digestão com a quantidade de SV afl., em que no caso de a tendência ao longo do tempo ser idêntica entre estas duas variáveis, representa uma concentração de lamas constante. Para as ETAR de Fernão Ferro, Seixal, Sesimbra e ZIA é visível que existe uma relação entre eles, mas com grandes variações na sua tendência, o que implica que a concentração de lamas afluentes também é muito variável, principalmente na ETAR do Seixal. Por outro lado, para a ETAR da Quinta do Conde, a tendência é muito próxima e a sua evolução ao longo do tempo não apresenta desfasamentos acentuados, o que pressupõe uma concentração de lamas afluentes relativamente constante.

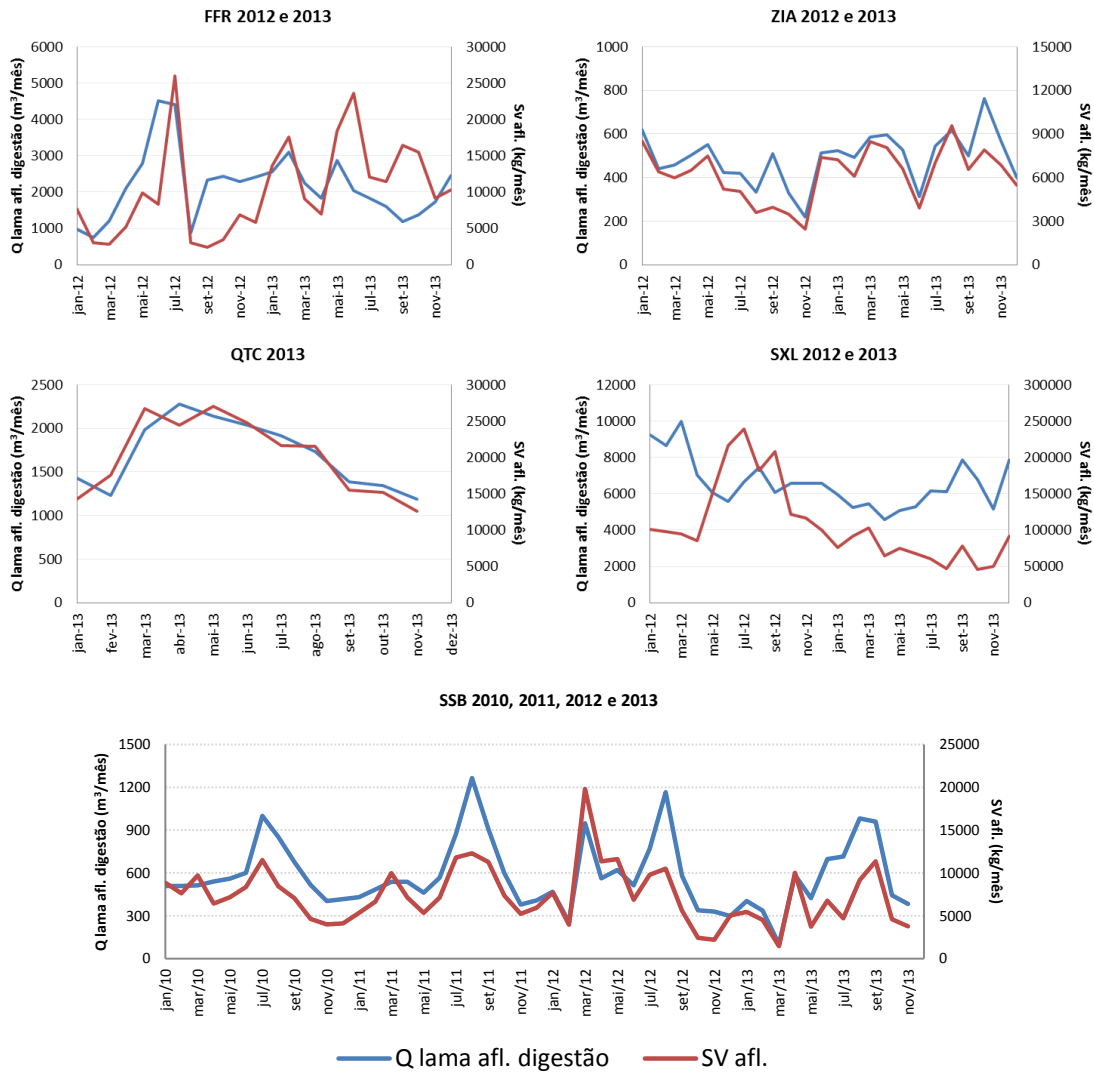


Figura 34 - Evolução do caudal de lama afluente à digestão e da quantidade de sólidos voláteis afluentes

(CV vs Caudal de biogás/Sólidos voláteis afluentes) vs T_{RH}

A Figura 35 mostra a carga volúmica e a produtividade de biogás em função do T_{RH} para cada ETAR. Verifica-se que os valores apresentados têm uma grande dispersão, ainda assim é possível visualizar um decréscimo da carga volúmica e um aumento da produtividade de biogás à medida que o T_{RH} aumenta. Relativamente à produtividade de biogás este aumento é verificado devido a haver um maior tempo para ocorrer a digestão anaeróbia da lama, esse tempo é maior quanto menor a carga volúmica, devido a estar a ser introduzido uma menor quantidade em massa de lama.

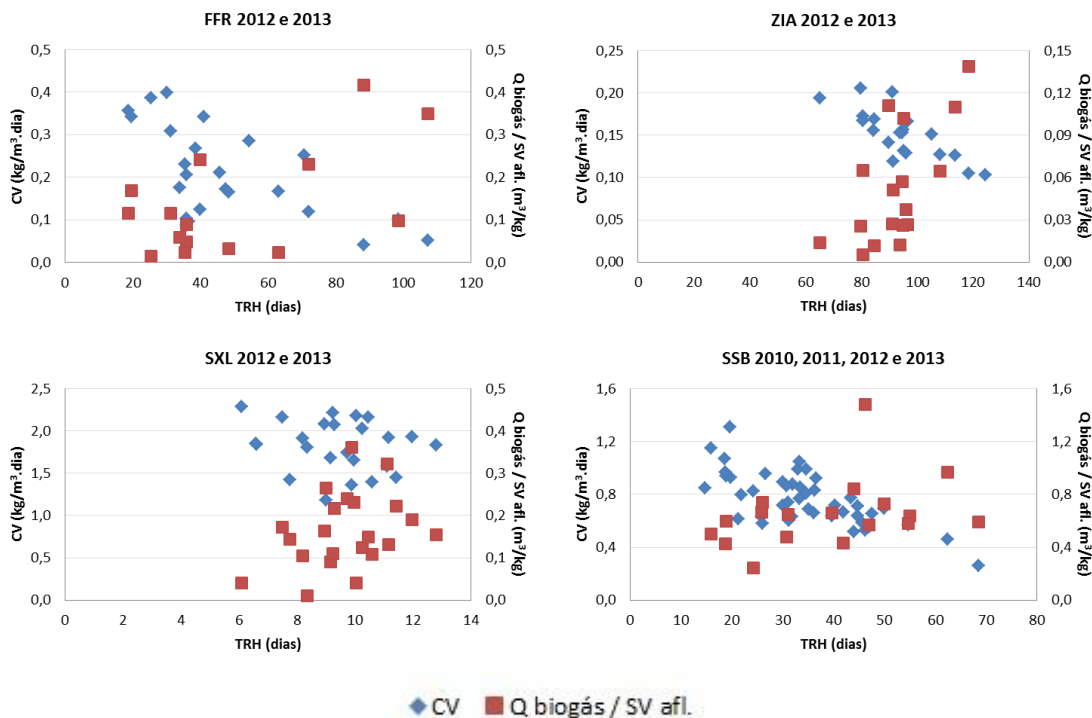


Figura 35 - Evolução da carga volúmica e da produtividade de biogás face ao T_{RH}

CV vs Tempo

Conforme foi referido anteriormente, as cargas volúmicas ideais em digestão psicrófila situam-se entre 0,64 a 1,6 kg/m³.dia, segundo Metcalf & Eddy e também Qasim, em digestão mesófila entre 1,6 a 3,2 kg/m³.dia segundo Metcalf & Eddy e entre 2,4 a 6,41 kg/m³.dia segundo Qasim. Pela Figura 36 verifica-se que ambas as ETAR com digestão anaeróbia psicrófila estão a funcionar com cargas volúmicas abaixo do seu ideal. Das ETAR com digestão anaeróbia mesófila, a Quinta do Conde tem valores abaixo do seu funcionamento ótimo previsto, mas dada a temperatura de funcionamento se situar entre os 15 e os 30 °C, a carga volúmica de funcionamento é apropriada. Quanto à ETAR de Sesimbra, a carga volúmica também apresenta valores baixos, exceto em dois meses separados onde é possível visualizar este aumento, ainda assim, como a temperatura de funcionamento se situa maioritariamente entre os 25 e os 30 °C, a carga volúmica deve ser mais baixa do que a prevista. Por fim, na ETAR do Seixal, segundo Metcalf & Eddy, a carga volúmica apresenta valores ótimos para a gama mesófila, mas baixos segundo Qasim, como as temperaturas de digestão variaram entre 19 e 31 °C, mantendo-se maioritariamente perto dos 24 °C, a carga volúmica ideal seria a sugerida para a digestão psicrófila e um T_{RH} maior. No caso da carga volúmica ser demasiado elevada, o digestor irá começar a acidificar, o que já é notório através de pH da lama digerida com valores aproximadamente de 6,5.

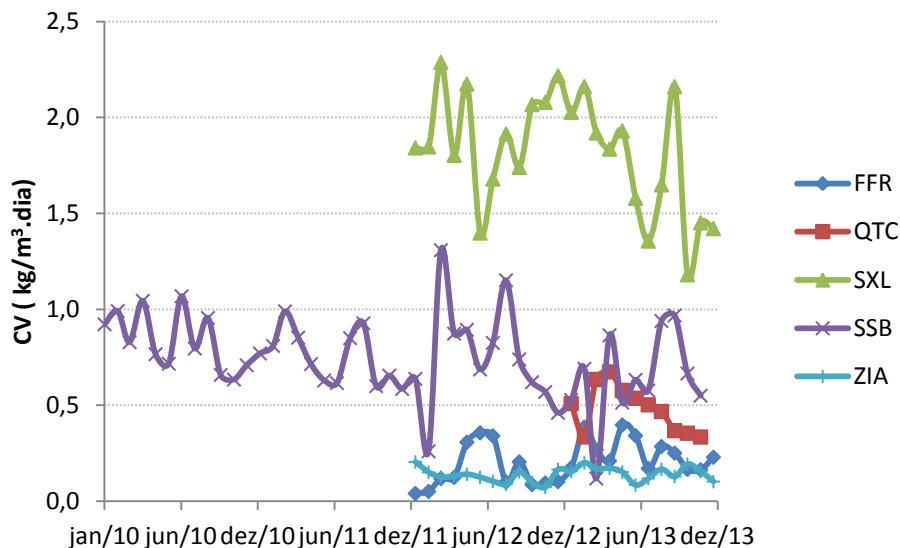


Figura 36 - Evolução da CV nos digestores anaeróbios

Caudal de biogás/Sólidos voláteis afluentes vs T_{RH}

A relação entre a produtividade específica de biogás (m^3 de biogás / kg sólidos voláteis afluentes) e o T_{RH} é evidenciada na Figura 37. Apesar da dispersão de pontos, em todas as ETAR onde foi possível calcular os valores de produtividade de biogás por massa de sólidos, pode verificar-se uma tendência para quando o T_{RH} aumenta, a produtividade de biogás também aumentar, como seria de esperar.

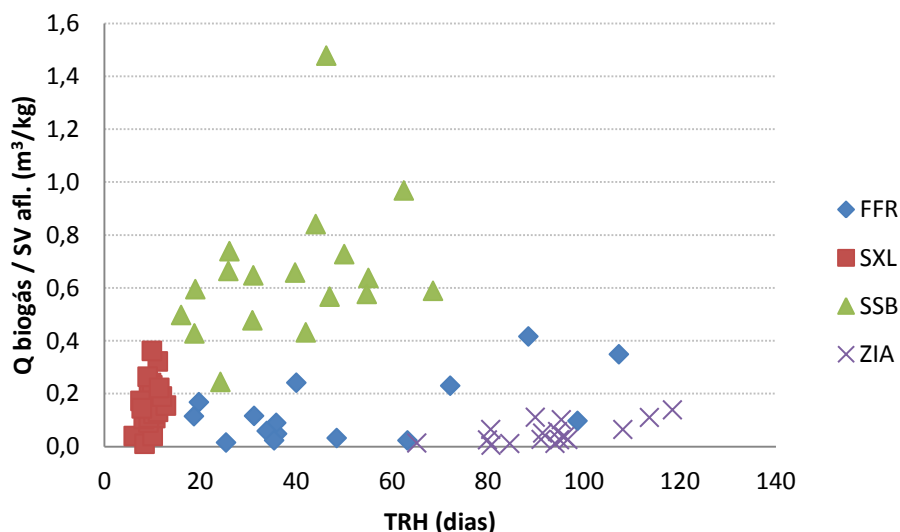


Figura 37 - Relação entre a Produtividade específica de biogás e o T_{RH}

CV vs T_{RH}

Na Figura 38 é possível ver a relação da carga volúmica com o T_{RH} , formando uma linha de tendência no conjunto de todas as ETAR. Verifica-se como seria expectável que para menores cargas volúmicas o T_{RH} aumenta, por se introduzir menor quantidade de sólidos voláteis no digestor, considerando uma concentração de sólidos voláteis sem grandes variações.

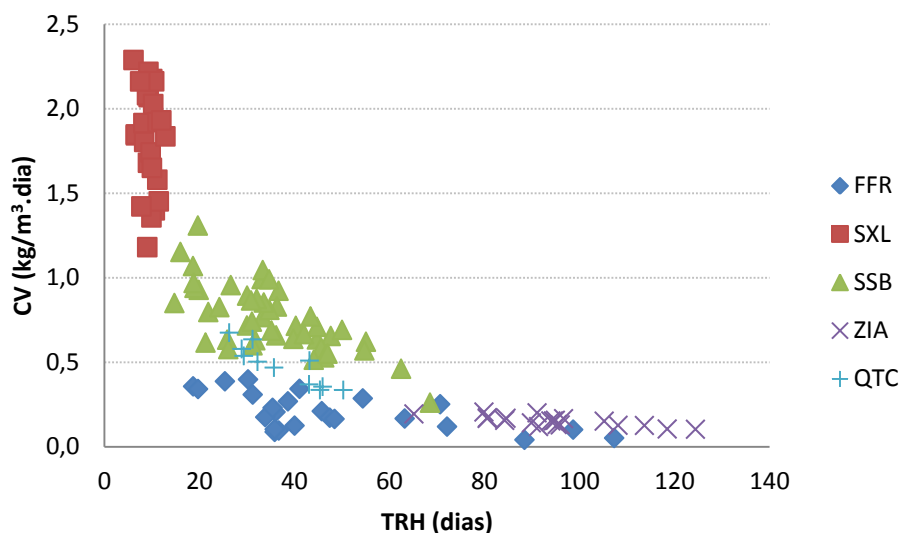


Figura 38 - Relação entre a Carga volúmica e o T_{RH}

Caudal de biogás/Sólidos voláteis afluentes vs CV

A Figura 39 mostra a produtividade específica de biogás vs carga volúmica onde se pode verificar que com o aumento da carga volúmica a produtividade específica de biogás decresce, o que está de acordo com o observado nas Figuras 37 e 38. Com o aumento da carga volúmica o T_{RH} diminui, portanto a lama como permanece menos tempo no digestor, menor será a produtividade específica do biogás.

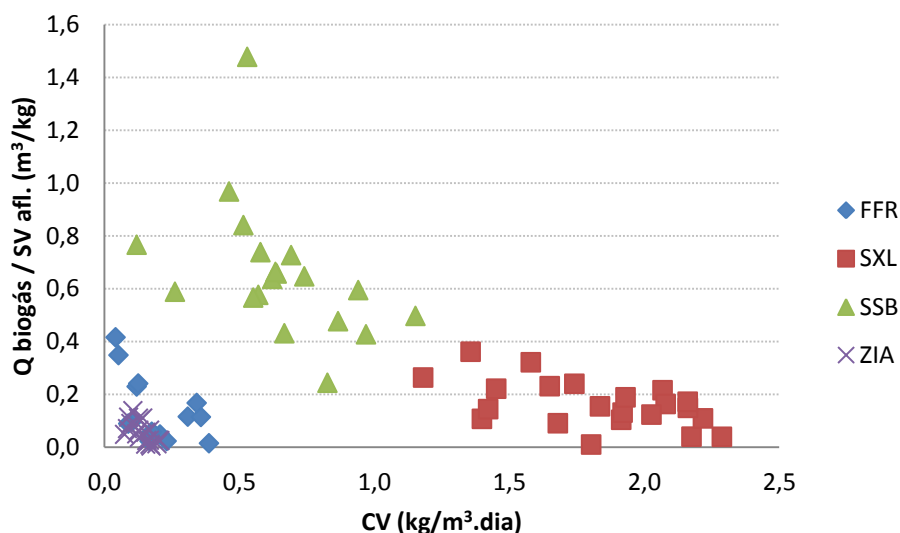


Figura 39 - Produtividade de biogás face à carga volúmica

Caudal de biogás/Sólidos voláteis afluentes vs Tempo

Conforme referido anteriormente, a produção de biogás por quantidade de sólidos voláteis afluentes deve encontrar-se entre os 0,5 e 0,75 m³/kg. Na Figura 40 é possível verificar a variação da produtividade específica de biogás ao longo do tempo. Como é visível a ETAR com maior produtividade específica de biogás é a ETAR de Sesimbra, com períodos de produtividade dentro dos mínimos que seriam expectáveis. Existe um período onde os dados mostram que houve uma elevada produtividade que realmente não aconteceu como mencionando anteriormente, devendo-se este valor à água circulante detetada na tubagem de biogás e que fez o caudalímetro registar valores de biogás muito acima dos reais. Verifica-se ainda que as restantes ETAR apresentam valores abaixo do mínimo expectável de produtividade de biogás.

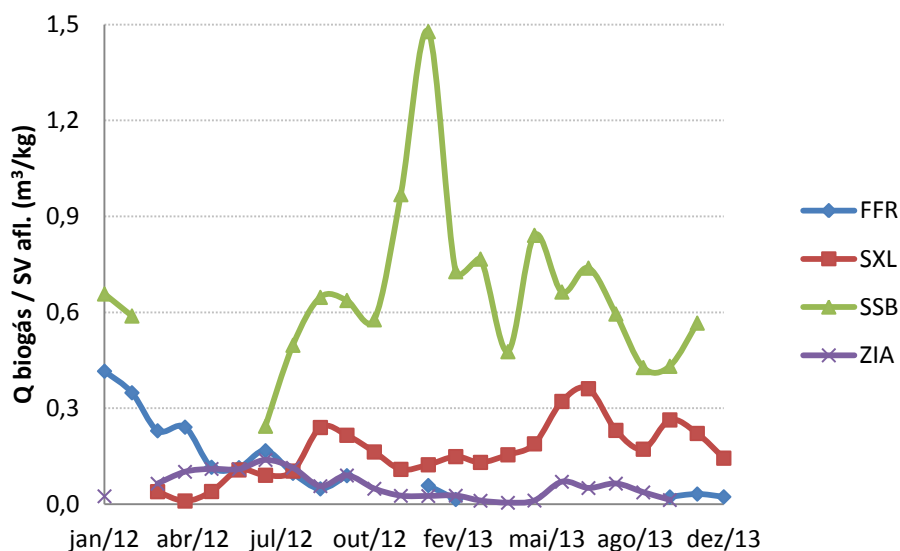


Figura 40 - Evolução da produtividade específica de biogás

6.3 Construção de uma folha de cálculo para avaliação do aproveitamento do biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para produção de energia elétrica

A utilização da digestão anaeróbia num processo de tratamento de lamas tem inúmeras vantagens, entre as quais, a produção de biogás. Uma das principais dificuldades de elaborar um estudo de avaliação do aproveitamento do biogás é ter informação sobre os custos de investimento e manutenção, assim como sobre os ganhos monetários da venda da energia. Portanto é necessário uma compilação de dados, que compreenda os custos de investimento com os equipamentos e construção civil e ainda custos de manutenção cujos contêm a quantidade e custo de reagentes no tratamento do biogás incluindo as revisões do motor de combustão. Com a compilação destes dados é possível elaborar um balanço económico para verificar a viabilidade do investimento. A construção da folha de cálculo foi feita com o objetivo de fornecer uma ferramenta versátil para poder ser aplicada a qualquer instalação com digestão anaeróbia a frio, servindo de guia para a avaliação do aproveitamento de biogás para produção de energia elétrica. Assim a folha de cálculo proposta ajuda a simular resultados de modo rápido, tal como se pode ver nas Figuras 41, 42, 43 e 44.

Na Figura 41 é apresentada a 1ª parte, ou seja, as Condições de Exploração, que começam pelo cálculo da produção de biogás, caso não haja valores registados da produção, seguindo-se condições de funcionamento, tais como o tempo de armazenamento do biogás, o tempo de funcionamento do motor por dia, a eficiência do motor e qualidade do biogás, o cálculo da

potência elétrica necessária e o ganho de venda da energia elétrica, tendo em consideração um preço por unidade de energia.

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

Inserir dados adquiridos nas células a amarelo

CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO

| | | | |
|--|--|--|---|
| Caudal de lamas afluente à digestão | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | m ³ /h | |
| Concentração de SV | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | kg/m ³ | |
| Quantidade de SV | <input type="text"/> | kg/h | |
| Produtividade de biogás | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | m ³ /kgSV afluentes ao digestor | Sugestão: 0,2 m ³ /kgSV afluentes ao digestor para uma digestão psicrófila |
| Produção de biogás | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | m ³ /h | |
| Tempo de armazenamento no gasómetro | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | h | |
| Volume do gasómetro | <input type="text"/> | m ³ | |
| Horas de funcionamento | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | h/dia | |
| Poder calorífico inferior | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | kWh/m ³ | Sugestão: 6,2 kWh/m ³ (65% metano) |
| Potência | <input type="text"/> | kW | |
| Eficiência elétrica | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | % | Sugestão: 30% Ef. Elétrica |
| Potência elétrica | <input type="text"/> | kW | |
| Preço de venda por kWh | <input style="background-color: yellow;" type="text"/> | €/kWh | Sugestão: 0,115 €/kWh para venda da energia produzida(DGEG.pt) |
| Ganhos de venda da energia elétrica | <input type="text"/> | €/ano | |

Figura 41 - Reprodução da folha de cálculo. 1ª parte - Condições de Exploração

Na Figura 42 é apresentada a 2ª parte, ou seja, os Custos de Investimento para o aproveitamento do biogás e posterior venda. Nesta parte foi efetuada uma listagem de equipamentos e trabalhos necessários, assim como os seus custos unitários associados por forma a calcular os custos de investimento. Os custos unitários foram definidos com recurso a dados de várias empreitadas da SIMARSUL e com recurso a consulta de fornecedores. São

também apresentados três sistemas de purificação do biogás, devido à diversidade de características e custos destes sistemas no mercado, uma das células possibilita a introdução de um outro sistema à escolha.

CUSTOS DE INVESTIMENTO

NOTA: Assume-se que os preços estipulados incluem o fornecimento e a montagem de cada equipamento

| Descrição | Quantidade | Preço Unitário | Preço |
|---|------------|----------------|-------|
| Motor de aproveitamento do biogás e gerador de energia elétrica (Preço unitário em função da potência do motor) | | 2500 € | |
| Gasómetro | | | |
| Tocha para $Q_{min} = 20 \text{ Nm}^3/\text{h}$ (incluindo quadro eléctrico, piloto, válvulas e acessórios) | | 10000 € | |
| Sistema de secagem do biogás por um refrigerador de águas industriais | | 26000 € | |
| Sistema de compressão do biogás por um booster, elevando a pressão a 50 mbar, para caudais entre 0 e 40 m ³ /h | | 4800 € | |
| Sistema de purificação do biogás por Cloreto Férrico | | 2000 € | |
| Sistema de purificação do biogás por Hidróxido de Ferro | | 2000 € | |
| Sistema de purificação do biogás por SOXSIA® | | 20000 € | |
| Sistema de purificação do biogás (a definir pelo utilizador) | | | |
| Pote de purga de baixa pressão | | 5050 € | |
| Pote de purga de média pressão | | 2000 € | |
| Válvula anti-detonação | | 2000 € | |
| Válvula anti-deflagrante | | 1000 € | |
| Medidor de pressão | | 1025 € | |
| Válvula de segurança de pressão | | 7200 € | |
| Válvula de borboleta | | 250 € | |
| Projecto e execução da rede de biogás após o digestor | | | |
| Custos de construção civil (Edifício do motor, lajes para tocha, valas, estaleiro, etc) | | 30000 € | |
| Trabalhos eléctricos e posto de seccionamento | | | |
| Outros trabalhos | | | |

| | |
|---------|--|
| Total € | |
|---------|--|

Figura 42 - Reprodução da folha de cálculo. 2ª parte - Custos de Investimento

Na Figura 43 são apresentados os Custos de Exploração, divididos entre a manutenção do motor de combustão e a purificação do biogás. Como estes custos são variáveis ao longo do tempo, utiliza-se uma taxa de atualização dos seus valores em 3% por ano para a elaboração

do balanço económico. Os motores de combustão precisam de manutenção consoante o seu número de horas de funcionamento, mas devido a esse método de cálculo dos custos de manutenção ser muito variável, recorreu-se a um valor de custo por unidade de energia produzida, que também obtém um resultado credível. Relativamente aos sistemas de purificação, estes são essenciais para a remoção do H₂S presente no biogás e nesta parte são utilizados os mesmos sistemas de purificação apresentados na Figura 42. As vantagens da utilização de cloreto férrico são o facto de os custos de investimento e de reagente serem reduzidos, mas tem a desvantagem de corroer as tubagens de aço inox. As vantagens da utilização de hidróxido de sódio são também os reduzidos custos de investimento e o de reagente, embora superior do cloreto férrico, tendo como vantagem não corroer as tubagens. Por último, o Soxsia[®], marca registada, é essencialmente um meio filtrante/adsorvente, tem a vantagem de remover H₂S e também siloxanos, outro constituinte do biogás cuja presença danifica gravemente os componentes do motor de combustão, mas têm como desvantagem os elevados custos de investimento e de reagente.

CUSTOS DE EXPLORAÇÃO (OPERAÇÃO/MANUTENÇÃO)

Manutenção do motor

Custo de manutenção do motor €/kWh sugestão: 0,025 €/kWh
 Custo anual de manutenção do motor €/ano

Contaminação do biogás

Concentração de H₂S ppm H₂S Sugestão: Caso não haja nenhuma medição e não seja possível realizá-la, sugere-se 2000 a 3000 ppm H₂S
 Quantidade de H₂S no biogás m³ H₂S/m³ biogás
 Quantidade anual de H₂S a remover m³ H₂S/ano

| Sistemas de tratamento do biogás | Quantidade de purificador por unidade de H ₂ S (kg /kg H ₂ S) | Custo por unidade de purificador (€/kg) |
|----------------------------------|---|---|
| Cloreto férrico | 9,6 | 0,275 |
| Hidróxido de ferro | 8,3 | 2,75 |
| Soxsia [®] | 3,8 | 17,25 |

Custo anual de purificação do biogás €/ano

Taxa de atualização %

Figura 43 - Reprodução da folha de cálculo. 3ª parte - Custos de Manutenção

Na Figura 44 é apresenta-se o Balanço Económico para um horizonte de 15 anos que corresponde ao tempo de vida útil dos equipamentos. Para elaborar o Balanço Económico utilizam-se os Ganhos cumulativos de venda da energia elétrica subtraindo os Custos de Investimento e Custos cumulativos de Exploração, aferindo a viabilidade, ou não, de proceder ao aproveitamento do biogás na instalação. O tempo de retorno do investimento definido para o investimento ser viável varia consoante a opinião de cada produtor de energia, mas atualmente considera-se um investimento viável quando o tempo de retorno é no máximo cinco anos. Os Quadros 15, 16, 17 e 18 mostram exemplos de aplicação desta folha de cálculo para as ETAR de Fernão Ferro e Zona Industrial da Autoeuropa .

| BALANÇO ECONÓMICO | | | | | | |
|--------------------------|--|-------------------------------|-----------------------------------|---|--------------------------|------------------------|
| Anos | Ganhos cumulativos de venda da energia elétrica | Custos de Investimento | Custos de Exploração Anual | Custos cumulativos de Exploração | Balanço Económico | Margem de lucro |
| 1º | | | | | | |
| 2º | | | | | | |
| 3º | | | | | | |
| 4º | | | | | | |
| 5º | | | | | | |
| 6º | | | | | | |
| 7º | | | | | | |
| 8º | | | | | | |
| 9º | | | | | | |
| 10º | | | | | | |
| 11º | | | | | | |
| 12º | | | | | | |
| 13º | | | | | | |
| 14º | | | | | | |
| 15º | | | | | | |

Figura 44 - Reprodução da folha de cálculo. 4ª parte - Balanço Económico

7 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS

Em tempos em que a principal fonte de energia ainda são os combustíveis fósseis e se realizam esforços para transitar para as energias renováveis, esta dissertação pretende contribuir com mais um incentivo para o uso de energias renováveis e para a demonstração de importância da eficiência e da valorização energética. A digestão anaeróbia de lamas das ETAR produzem biogás que, sendo um recurso renovável, deve ser aproveitado tendo em consideração o seu elevado potencial energético, o que é uma mais valia face à necessidade de reduzir a utilização de combustíveis fósseis para produção de energia elétrica.

Nas ETAR com digestão anaeróbia a frio, normalmente o biogás é libertado diretamente para a atmosfera ou queimado numa tocha. Há que ter em conta que uma ETAR com o processo de digestão anaeróbia a frio, apesar de ter como principal objetivo tratar a água residual, está a produzir um gás com valor energético e posteriormente a “desperdiçá-lo”. Portanto é necessário avaliar a quantidade deste biogás rejeitado, pois é um combustível com potencial para ser utilizado na produção de energia elétrica ou térmica, tendo muito interesse economicamente e ambientalmente, contribuindo também para a redução da utilização de combustíveis fósseis.

Quanto à avaliação da viabilidade do aproveitamento do biogás proveniente de digestores anaeróbios a frio, verificou-se relativamente tanto à ETAR de Fernão Ferro como à ETAR da Zona Industrial da Autoeuropa que não se mostra viável, não sendo ainda vantajoso proceder a este investimento para aproveitamento do biogás para estas duas ETAR, devido à baixa produção de biogás face aos custos de instalação.

Relativamente à análise de desempenho da etapa de digestão das ETAR de Fernão Ferro, Zona Industrial da Autoeuropa, Seixal, Quinta de Conde e Sesimbra conclui-se que os dados disponíveis relativos às concentrações de sólidos à entrada e saída da digestão anaeróbia, se apresentam como não totalmente fiáveis. Esta fragilidade tinha já sido identificada pela própria entidade gestora, acreditando-se que o problema da robustez dos dados se prenda com aspectos de amostragem, essencialmente por estas amostragens serem pontuais e nem sempre estarem garantidas as condições de mistura ou de homogeneidade da amostra relativamente ao conteúdo dos respectivos digestores. É sugerido, como proposta de melhoramento da fiabilidade das análises, fazer amostras compostas de lama. Embora todas as ETAR, com exceção da ETAR de Fernão Ferro, tenham sistema de agitação e supostamente haver condições de mistura completa, ao fazer uma análise composta, a amostra vai ser mais homogénea, amortecendo variações que possam existir ao longo do dia de recolha da amostra. Com esta possível melhoria de qualidade das amostras de lama, na determinação da concentração de sólidos, poderão ser obtidos valores de produtividade do biogás mais fiáveis.

A folha de cálculo para avaliar a viabilidade do aproveitamento de biogás produzido em digestores anaeróbios a frio para produção de energia elétrica constitui uma ferramenta guia para qualquer potencial utilizador que pretenda elaborar a avaliação para qualquer caso de estudo.

Como proposta de continuação deste trabalho, no que diz respeito à viabilidade de aproveitamento do biogás das ETAR de Fernão Ferro e da Zona Industrial da Autoeuropa, depois das reparações necessárias, e tendo em consideração os custos de instalação e operação/manutenção já definidos, seria útil fazer uma pesquisa de medidas para aumentar a produção de biogás que poderia contemplar diversas situações incluindo uma diversificação das fontes de alimentação dos digestores. A análise dos caudais de biogás produzido, quer em termos de quantidade como de qualidade deverá continuar a ser efectuada, como base robusta para cenários futuros de valorização do biogás. Seria igualmente pertinente estudar o aproveitamento do biogás para produção de energia elétrica para consumo interno.

Ainda como proposta de continuação desta dissertação, seria a avaliação de outros usos do biogás produzido, como a possibilidade de venda do biogás injetando-o na rede de gás natural, condicionado por elevados parâmetros de qualidade, ou injetando-o numa micro rede de gás, por exemplo fazendo a ligação a uma indústria nas imediações da ETAR que utilize um combustível apenas para produção de energia térmica. Um outro potencial uso seria pressurização e armazenamento em botijas para posterior venda. Por fim, como última proposta de utilização do biogás, seria como combustível para veículos, como os transportes públicos rodoviários, em substituição dos que utilizam diesel, que gera um maior nível de poluição.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APPELS, Lise; BAEYENS, Jan; DEGRÈVE, Jan; DEWIL, Raf(2008) Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy and Combustion Science*, 34, 755 – 781.

CCE – Centro para a Conservação de Energia (2000) Guia Técnico de Biogás.

Decreto-Lei n.º 34/2011, de 8 de Março, Diário da República 1.ª série – N.º 47 – 8 de Março de 2011

DEWIL, Raf; APPELS, Lise; BAEYENS, Jan(2006) Energy use of biogas hampered by presence of siloxanes. *Energy Conversion & Management*, 47, 1711 –1722.

EN 12255-8 (2001) Wastewater Treatment Plants – Part 8: Sludge Treatment and Storage. CEN.

Environmental Protection Agency (2007) Biomass Combined Heat and Power: Catalog of Technologies, Combined Heat and Power Partnership.

Environmental Protection Agency (2008) Catalog of CHP Technologies, Combined Heat and Power Partnership.

IEA - International Energy Agency (2000), *Biogas upgrading and utilisation*, IEA Bioenergy, Task 24: Energy from biological conversion of organic waste

International Council for Local Environmental Initiatives (2009) Manual para Aproveitamento de Biogás: Volume 1 – Aterros Sanitários.

LETTINGA, Gatzke; REBAC, Salih; GRIETJE, Zeeman (2001) Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment. *Trends in Biotechnology*, Vol. 9, N°19, 363 – 370

MALINA, Joseph F.; POHLAND, Frederick G. (1992) Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes. Lancaster: Technomic, Vol. 7

McCARTY, Perry L. (1964) Anaerobic Waste Treatment Fundamentals. Part II – Environmental Requirements and Control. *Public Works*, 95, 123 – 126.

METCALF& EDDY (1991) Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse. 3ª Edição. EUA: McGraw Hill.

METCALF & EDDY (2003)Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4ª Edição. EUA: McGraw Hill.

O'ROURKE, J. (1968) Kinetics of Anaerobic Waste Treatment at Reduced Temperatures. Stanford: Stanford University. Tese de doutoramento.

QASIM, Syed R. (1999) Wastewater Treatment Plants: Planning, Design and Operation. 2ª Edição. EUA: CRC Press.

SCHWEIGKOFER, Martin; NIESSNER, Reinhard (2001) Removal of siloxanes in biogases. *Journal Hazardous Materials*, B83, 183 – 196.

TUROVSKIY, Izrail; MATHAI, P. (2006) Wastewater Sludge Processing, New Jersey: John Wiley & Sons.

VAN HAANDEL, Adrianus C.; LETTINGA, Gatzé (1994) Anaerobic Sewage Treatment: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate. New York: John Wiley & Sons.

VESILIND, P; ROOKE, R (2003) Wastewater Treatment Plant Design, London: Water Environment Federation.

WIEGEL, J. (1990) Temperature spans for growth: hypothesis and discussion. *FEMS Microbiology. Rev.* Vol. 75, 155 - 169.

Endereços eletrônicos

http://cset.mnsu.edu/engagethermo/components_gasturbine.html

<http://www.districtenergy.org/blog/wp-content/uploads/2012/09/GE-9FB-gas-turbine.jpg>

<http://www.dgeg.pt/>

<http://web.mit.edu/16.unified/www/SPRING/thermodynamics/notes/node25.html>

SPAKOVSKY, Z. S. (2006) Unified: Thermodynamics and Propulsion – The Internal Combustion Engine (Otto Cycle). Acedido em Junho de 20014, no web site do: Massachusetts InstituteofTechnology

Outras fontes

DHVFBO CONSULTORES, SA (2006) Memória Descritiva e Justificativa da ETAR de Fernão Ferro

FERROVIAL; CADAGUA (2007) Memória Descritiva e Justificativa da ETAR do Seixal

ISOLUX (2013) Memória Descritiva e Justificativa da ETAR da Quinta do conde

ISOLUX (2013) Manual de Funcionamento da ETAR da Quinta do Conde

DEGRÉMONT (2001) Manual de Funcionamento da ETAR de Sesimbra

DEGRÉMONT; GRAVINER (2006) Memória Descritiva e Justificativa da ETAR da Zona Industrial da Auto Europa

9 ANEXOS

Anexo I

| | | Q água residual (m3/mês) | CBO5 (mg/l) | Q lama alf. digestão (m3/mês) | Q água residual/Q lama alf. digestão |
|-------------|--------|-----------------------------|----------------|----------------------------------|---|
| FFR 2012 | Jan-12 | 54579 | 153 | 982 | 56 |
| | Fev-12 | 66130 | 205 | 757 | 87 |
| | Mar-12 | 63620 | 240 | 1204 | 53 |
| | Abr-12 | 63574 | 193 | 2100 | 30 |
| | Mai-12 | 71299 | 267 | 2783 | 26 |
| | Jun-12 | 73952 | 306 | 4504 | 16 |
| | Jul-12 | 68054 | 259 | 4410 | 15 |
| | Ago-12 | 63318 | 279 | 880 | 72 |
| | Set-12 | 61962 | 285 | 2334 | 27 |
| | Out-12 | 63258 | 251 | 2424 | 26 |
| | Nov-12 | 73919 | 168 | 2291 | 32 |
| | Dez-12 | 93842 | 213 | 2423 | 39 |
| FFR 2013 | Jan-13 | 103225 | 182 | 2566 | 40 |
| | Fev-13 | 96760 | 159 | 3094 | 31 |
| | Mar-13 | 111370 | 60 | 2249 | 50 |
| | Abr-13 | 82794 | 113 | 1837 | 45 |
| | Mai-13 | 82962 | 241 | 2874 | 29 |
| | Jun-13 | 78441 | 223 | 2047 | 38 |
| | Jul-13 | 74792 | 250 | 1831 | 41 |
| | Ago-13 | 67995 | 298 | 1597 | 43 |
| | Set-13 | 62853 | 240 | 1189 | 53 |
| | Out-13 | 69187 | 161 | 1374 | 50 |
| | Nov-13 | 57157 | 258 | 1735 | 33 |
| | Dez-13 | 72396 | 317 | 2454 | 30 |

| | | Quantidade lama afl. digestão (kg SSV/mês) | Quantidade lama afl. desidratação (kg SSV/mês) | Eficiência remoção matéria volátil (%) | T _{RH} (dias) | Carga volúmica (kg SSV/m3.dia) |
|-------------|--------|--|--|--|---------------------------|--------------------------------------|
| FFR 2012 | Jan-12 | 3555 | 7684 | -116% | 88 | 0,04 |
| | Fev-12 | 4201 | 3065 | 27% | 107 | 0,05 |
| | Mar-12 | 10335 | 2813 | 73% | 72 | 0,12 |
| | Abr-12 | 10490 | 5162 | 51% | 40 | 0,12 |
| | Mai-12 | 26772 | 9897 | 63% | 31 | 0,31 |
| | Jun-12 | 29997 | 8315 | 72% | 19 | 0,36 |
| | Jul-12 | 29632 | 25944 | 12% | 20 | 0,34 |
| | Ago-12 | 8791 | 3059 | 65% | 99 | 0,10 |
| | Set-12 | 17272 | 2451 | 86% | 36 | 0,21 |
| | Out-12 | 7623 | 3450 | 55% | 36 | 0,09 |
| | Nov-12 | 8053 | 6847 | 15% | 37 | 0,10 |
| | Dez-12 | 8965 | 5852 | 35% | 36 | 0,10 |
| FFR 2013 | Jan-13 | 15191 | 13641 | 10% | 34 | 0,18 |
| | Fev-13 | 30337 | 17567 | 42% | 25 | 0,39 |
| | Mar-13 | 23300 | 9023 | 61% | 39 | 0,27 |
| | Abr-13 | 17672 | 7025 | 60% | 46 | 0,21 |
| | Mai-13 | 34560 | 18397 | 47% | 30 | 0,40 |
| | Jun-13 | 28781 | 23598 | 18% | 41 | 0,34 |
| | Jul-13 | 14904 | 12084 | 19% | 47 | 0,17 |
| | Ago-13 | 24817 | 11455 | 54% | 54 | 0,29 |
| | Set-13 | 21117 | 16472 | 22% | 71 | 0,25 |
| | Out-13 | 14489 | 15450 | -7% | 63 | 0,17 |
| | Nov-13 | 13802 | 9160 | 34% | 48 | 0,16 |
| | Dez-13 | 19976 | 10336 | 48% | 35 | 0,23 |

| | | pH lama espessada | pH lama digerida | Temperatura (°C) | AGV lama digerida (mg/l CH ₃ COOH) | Alcalinidade lama digerida (mg/l CaCO ₃) | AGV/Alcalinidade |
|-------------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|--|---|------------------|
| FFR 2012 | Jan-12 | 6,3 | 6,4 | | 1148 | 1375 | 0,83 |
| | Fev-12 | 6,4 | 6,3 | | 1680 | 1750 | 0,96 |
| | Mar-12 | 6,1 | 6,3 | | 1052 | 965 | 1,09 |
| | Abr-12 | 6,6 | 6,4 | | 595 | 688 | 0,86 |
| | Mai-12 | 6,4 | 6,3 | | 755 | 725 | 1,04 |
| | Jun-12 | 6,4 | 6,3 | | 670 | 1030 | 0,65 |
| | Jul-12 | 6,5 | 6,1 | | 743 | 810 | 0,92 |
| | Ago-12 | 6,1 | 6,6 | | 1145 | 2000 | 0,57 |
| | Set-12 | 6,7 | 7,0 | | 468 | 1288 | 0,36 |
| | Out-12 | 6,7 | 6,7 | | 535 | 1350 | 0,40 |
| | Nov-12 | 6,7 | 6,5 | | 528 | 1198 | 0,44 |
| | Dez-12 | 7,1 | 6,9 | | 620 | 1515 | 0,41 |
| FFR 2013 | Jan-13 | 6,8 | 6,4 | | 1200 | 940 | 1,28 |
| | Fev-13 | 6,8 | 6,8 | | 803 | 675 | 1,19 |
| | Mar-13 | 6,4 | 6,6 | | 983 | 783 | 1,26 |
| | Abr-13 | 6,2 | 6,3 | | 895 | 635 | 1,41 |
| | Mai-13 | 6,5 | 6,7 | | 835 | 1153 | 0,72 |
| | Jun-13 | 6,4 | 6,3 | | 860 | 1675 | 0,51 |
| | Jul-13 | 6,4 | 6,6 | | 735 | 1288 | 0,57 |
| | Ago-13 | 6,3 | 6,4 | | 1400 | 2025 | 0,69 |
| | Set-13 | 6,2 | 6,3 | | 1338 | 1725 | 0,78 |
| | Out-13 | 6,5 | 6,5 | | 1275 | 1800 | 0,71 |
| | Nov-13 | 6,5 | 6,4 | | 1725 | 1825 | 0,95 |
| | Dez-13 | 6,7 | 6,3 | | 1270 | 2125 | 0,60 |

| | | kg SV removidos | m3/Kg SV destruídos | m3/Kg SV afl. digestão |
|----------|--------|-----------------|---------------------|------------------------|
| FFR 2012 | Jan-12 | -4130 | -0,36 | 0,42 |
| | Fev-12 | 1136 | 1,29 | 0,35 |
| | Mar-12 | 7522 | 0,32 | 0,23 |
| | Abr-12 | 5328 | 0,48 | 0,24 |
| | Mai-12 | 16876 | 0,32 | 0,20 |
| | Jun-12 | 21682 | 0,28 | 0,20 |
| | Jul-12 | 3687 | 1,61 | 0,20 |
| | Ago-12 | 5732 | 0,31 | 0,20 |
| | Set-12 | 14821 | 0,23 | 0,20 |
| | Out-12 | 4173 | 0,37 | 0,20 |
| | Nov-12 | 1206 | 1,34 | 0,20 |
| | Dez-12 | 3113 | 0,58 | 0,20 |
| FFR 2013 | Jan-13 | 1550 | 1,96 | 0,20 |
| | Fev-13 | 12769 | 0,48 | 0,20 |
| | Mar-13 | 14277 | 0,33 | 0,20 |
| | Abr-13 | 10647 | 0,33 | 0,20 |
| | Mai-13 | 16163 | 0,43 | 0,20 |
| | Jun-13 | 5183 | 1,11 | 0,20 |
| | Jul-13 | 2820 | 1,06 | 0,20 |
| | Ago-13 | 13362 | 0,37 | 0,20 |
| | Set-13 | 4645 | 0,91 | 0,20 |
| | Out-13 | -961 | -3,02 | 0,20 |
| | Nov-13 | 4642 | 0,59 | 0,20 |
| | Dez-13 | 9639 | 0,41 | 0,20 |

| | | Biogás produzido (Nm3/mês) | Biogás para cogeração (m3/mês) | Biogás para flare (m3/mês) | Biogás produzido/Q água residual | Biogás produzido/Q lama alf. digestão |
|-------------|--------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|--|
| FFR 2012 | Jan-12 | 1480 | | 1480 | 0,03 | 1,51 |
| | Fev-12 | 1466 | | 1466 | 0,02 | 1,94 |
| | Mar-12 | 2378 | | 2378 | 0,04 | 1,98 |
| | Abr-12 | 2533 | | 2533 | 0,04 | 1,21 |
| | Mai-12 | 5354 | | 5354 | 0,08 | 1,92 |
| | Jun-12 | 5999 | | 5999 | 0,08 | 1,33 |
| | Jul-12 | 5926 | | 5926 | 0,09 | 1,34 |
| | Ago-12 | 1758 | | 1758 | 0,03 | 2,00 |
| | Set-12 | 3454 | | 3454 | 0,06 | 1,48 |
| | Out-12 | 1525 | | 1525 | 0,02 | 0,63 |
| | Nov-12 | 1611 | | 1611 | 0,02 | 0,70 |
| | Dez-12 | 1793 | | 1793 | 0,02 | 0,74 |
| FFR 2013 | Jan-13 | 3038 | | 3038 | 0,03 | 1,18 |
| | Fev-13 | 6067 | | 6067 | 0,06 | 1,96 |
| | Mar-13 | 4660 | | 4660 | 0,04 | 2,07 |
| | Abr-13 | 3534 | | 3534 | 0,04 | 1,92 |
| | Mai-13 | 6912 | | 6912 | 0,08 | 2,41 |
| | Jun-13 | 5756 | | 5756 | 0,07 | 2,81 |
| | Jul-13 | 2981 | | 2981 | 0,04 | 1,63 |
| | Ago-13 | 4963 | | 4963 | 0,07 | 3,11 |
| | Set-13 | 4223 | | 4223 | 0,07 | 3,55 |
| | Out-13 | 2898 | | 2898 | 0,04 | 2,11 |
| | Nov-13 | 2760 | | 2760 | 0,05 | 1,59 |
| | Dez-13 | 3995 | | 3995 | 0,06 | 1,63 |

| | | Caudal afl. de água residual (m3/mês) | CBO5 (mg/l) | Caudal de lamas afl. à digestão (m3/mês) | Caudal afluente de água residual/Caudal de lamas afluente à digestão |
|-------------|--------|---------------------------------------|-------------|--|--|
| QTC 2013 | Jan-13 | 123884 | 384 | 1430 | 87 |
| | Fev-13 | 108148 | 383 | 1229 | 88 |
| | Mar-13 | 174618 | 397 | 1980 | 88 |
| | Abr-13 | 145161 | 338 | 2276 | 64 |
| | Mai-13 | 122071 | 420 | 2137 | 57 |
| | Jun-13 | 103592 | 560 | 2037 | 51 |
| | Jul-13 | 109358 | 613 | 1916 | 57 |
| | Ago-13 | 105783 | 450 | 1730 | 61 |
| | Set-13 | 101284 | 582,5 | 1387 | 73 |
| | Out-13 | 113860 | 422 | 1344 | 85 |
| | Nov-13 | 109002 | 370 | 1188 | 92 |
| | Dez-13 | | 468 | | |

| | | Quantidade lamas afluentes digestão (kg SSV/mês) | Quantidade lamas afluentes desidratação (kg SSV/mês) | Eficiência remoção matéria volátil (%) | Tempo retenção digestão (dias) | Carga volúmica digestão (kg SSV/m3.dia) |
|-------------|--------|--|--|--|--------------------------------|---|
| QTC 2013 | Jan-13 | 31424 | 14204 | 55% | 43 | 0,51 |
| | Fev-13 | 18722 | 17554 | 6% | 45 | 0,34 |
| | Mar-13 | 39188 | 26700 | 32% | 31 | 0,64 |
| | Abr-13 | 40285 | 24426 | 39% | 26 | 0,67 |
| | Mai-13 | 35688 | 27030 | 24% | 29 | 0,58 |
| | Jun-13 | 32083 | 24704 | 23% | 29 | 0,54 |
| | Jul-13 | 31039 | 21651 | 30% | 32 | 0,50 |
| | Ago-13 | 28891 | 21497 | 26% | 36 | 0,47 |
| | Set-13 | 22019 | 15500 | 30% | 43 | 0,37 |
| | Out-13 | 21921 | 15214 | 31% | 46 | 0,36 |
| | Nov-13 | 20033 | 12563 | 37% | 50 | 0,34 |
| | Dez-13 | | | | | |

| | | pH lamas espesadas | pH lamas digeridas | Temperatura (°C) | Ácidos gordos voláteis (mg/l CH ₃ COOH) | Alcalinidade (mg/l CaCO ₃) | AGV/Alcalinidade |
|-------------|--------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---|---|------------------|
| QTC 2013 | Jan-13 | | 6,8 | 17,4 | 1303 | 2932 | 0,44 |
| | Fev-13 | 5,8 | 7,2 | 17,3 | 1063 | 3031 | 0,35 |
| | Mar-13 | 5,8 | 7,5 | 24,0 | 958 | 2812 | 0,34 |
| | Abr-13 | 5,9 | 7,5 | 27,4 | 793 | 2955 | 0,27 |
| | Mai-13 | 6,5 | 7,2 | 25,1 | 895 | 2876 | 0,31 |
| | Jun-13 | 6,0 | 7,4 | 27,1 | 885 | 2550 | 0,35 |
| | Jul-13 | 6,0 | 7,1 | 31,2 | 791 | 2367 | 0,33 |
| | Ago-13 | 6,3 | 7,1 | 30,0 | 1046 | 2233 | 0,47 |
| | Set-13 | 6,0 | 7,1 | 27,5 | 947 | 2241 | 0,42 |
| | Out-13 | 6,1 | 7,2 | 22,0 | 1090 | 2370 | 0,46 |
| | Nov-13 | 6,2 | 7,3 | 15,5 | 859 | 2180 | 0,39 |
| | Dez-13 | 5,4 | 6,9 | 16,9 | 966 | 2403 | 0,40 |

| | | kg SSV removidos | m ³ /Kg SV destruídos | m ³ /Kg SV afluentes ao digestor |
|-------------|--------|------------------|----------------------------------|---|
| QTC 2013 | Jan-13 | 17220 | | |
| | Fev-13 | 1167 | | |
| | Mar-13 | 12488 | | |
| | Abr-13 | 15859 | | |
| | Mai-13 | 8658 | | |
| | Jun-13 | 7379 | | |
| | Jul-13 | 9388 | | |
| | Ago-13 | 7394 | | |
| | Set-13 | 6519 | | |
| | Out-13 | 6707 | | |
| | Nov-13 | 7470 | | |
| | Dez-13 | | | |

| | | Biogás produzido (Nm ³ /mês) | Biogás para cogeração (m ³ /mês) | Biogás para flare (m ³ /mês) |
|-------------|--------|--|--|--|
| QTC 2013 | Jan-13 | | | |
| | Fev-13 | | 5958 | |
| | Mar-13 | | 9467 | |
| | Abr-13 | | 10793 | |
| | Mai-13 | | 4573 | |
| | Jun-13 | | 10824 | |
| | Jul-13 | | 15186 | |
| | Ago-13 | | 20528 | |
| | Set-13 | | 23339 | |
| | Out-13 | | 26401 | |
| | Nov-13 | | 13889 | |
| | Dez-13 | | | |

| | | Q afl. água residual (m ³ /mês) | CBO5 (mg/l) | Q lama afl. digestão (m ³ /mês) | Q afl. água residual / Q lama afl. digestão |
|-------------|--------|---|----------------|---|--|
| SXL 2012 | Jan-12 | 380217 | 386 | 9219 | 41 |
| | Fev-12 | 356551 | 425 | 8649 | 41 |
| | Mar-12 | 450481 | 406 | 9978 | 45 |
| | Abr-12 | 397066 | 343 | 7049 | 56 |
| | Mai-12 | 392901 | 416 | 6057 | 65 |
| | Jun-12 | 348221 | 423 | 5564 | 63 |
| | Jul-12 | 364868 | 410 | 6653 | 55 |
| | Ago-12 | 361692 | 370 | 7432 | 49 |
| | Set-12 | 412153 | 403 | 6060 | 68 |
| | Out-12 | 458213 | 385 | 6553 | 70 |
| | Nov-12 | 433756 | 393 | 6577 | 66 |
| | Dez-12 | 487784 | 380 | 6586 | 74 |
| SXL 2013 | Jan-13 | 460423 | 468 | 5936 | 78 |
| | Fev-13 | 406814 | 344 | 5258 | 77 |
| | Mar-13 | 505938 | 323 | 5452 | 93 |
| | Abr-13 | 426289 | 380 | 4597 | 93 |
| | Mai-13 | 406695 | 427 | 5089 | 80 |
| | Jun-13 | 356274 | 463 | 5300 | 67 |
| | Jul-13 | 372588 | 425 | 6160 | 60 |
| | Ago-13 | 362201 | 388 | 6102 | 59 |
| | Set-13 | 373786 | 415 | 7849 | 48 |
| | Out-13 | 424665 | 352 | 6764 | 63 |
| | Nov-13 | 328021 | 338 | 5158 | 64 |
| | Dez-13 | 378613 | 385 | 7840 | 48 |

| | | Quantidade lama afl. digestão (kg SSV/mês) | Quantidade lama afl. desidratação (kg SSV/mês) | Eficiência remoção matéria volátil (%) | T _{RH} (dias) | Carga volúmica (kg SSV/m ³ .dia) |
|-------------|--------|--|--|--|---------------------------|---|
| SXL 2012 | Jan-12 | 112085 | 100865 | 10% | 7 | 1,84 |
| | Fev-12 | 105163 | 97662 | 7% | 7 | 1,85 |
| | Mar-12 | 139193 | 94463 | 32% | 6 | 2,29 |
| | Abr-12 | 106179 | 84951 | 20% | 8 | 1,80 |
| | Mai-12 | 132345 | 149916 | -13% | 10 | 2,17 |
| | Jun-12 | 82347 | 216702 | -163% | 11 | 1,40 |
| | Jul-12 | 102210 | 238678 | -134% | 9 | 1,68 |
| | Ago-12 | 116497 | 182319 | -57% | 8 | 1,91 |
| | Set-12 | 102517 | 207565 | -102% | 10 | 1,74 |
| | Out-12 | 125818 | 121850 | 3% | 9 | 2,07 |
| | Nov-12 | 122444 | 116356 | 5% | 9 | 2,08 |
| | Dez-12 | 134934 | 100000 | 26% | 9 | 2,22 |
| SXL 2013 | Jan-13 | 123320 | 75981 | 38% | 10 | 2,03 |
| | Fev-13 | 118799 | 91884 | 23% | 10 | 2,16 |
| | Mar-13 | 116809 | 102907 | 12% | 11 | 1,92 |
| | Abr-13 | 108106 | 64664 | 40% | 13 | 1,84 |
| | Mai-13 | 117471 | 75232 | 36% | 12 | 1,93 |
| | Jun-13 | 93015 | 67376 | 28% | 11 | 1,58 |
| | Jul-13 | 82544 | 60676 | 26% | 10 | 1,36 |
| | Ago-13 | 100378 | 47291 | 53% | 10 | 1,65 |
| | Set-13 | 127252 | 77705 | 39% | 8 | 2,16 |
| | Out-13 | 71839 | 45826 | 36% | 9 | 1,18 |
| | Nov-13 | 85462 | 50487 | 41% | 11 | 1,45 |
| | Dez-13 | 86501 | 91859 | -6% | 8 | 1,42 |

| | | pH lama espesada | pH lama digerida | Temperatura (°C) | AGV lama digerida (mg/l CH3COOH) | Alcalinidade lama digerida (mg/l CaCO3) | AGV/Alcalinidade |
|-------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------|--|------------------|
| SXL 2012 | Jan-12 | | | | | | |
| | Fev-12 | | | 31,2 | | | |
| | Mar-12 | 5,8 | 6,6 | 23,4 | 1300 | 1100 | 1,18 |
| | Abr-12 | 6,1 | 5,9 | 20,6 | 1600 | 825 | 1,94 |
| | Mai-12 | 6,0 | 5,6 | 22,2 | 2800 | 1115 | 2,51 |
| | Jun-12 | 6,2 | 6,3 | 24,5 | 2450 | 2550 | 0,96 |
| | Jul-12 | 6,3 | 6,4 | 25,4 | 1900 | 2350 | 0,81 |
| | Ago-12 | 6,0 | 6,0 | 26,4 | 2450 | 2800 | 0,88 |
| | Set-12 | 6,2 | 6,3 | 27,1 | 1800 | 3000 | 0,60 |
| | Out-12 | 6,1 | 6,5 | 23 | 1250 | 3300 | 0,38 |
| | Nov-12 | 6,0 | 7,0 | 21,5 | 1300 | 3050 | 0,43 |
| | Dez-12 | 6,2 | 6,6 | 19,6 | 1600 | 2900 | 0,55 |
| SXL 2013 | Jan-13 | 5,9 | 6,7 | 19,2 | 1300 | 1500 | 0,87 |
| | Fev-13 | 6,1 | 6,6 | 20,5 | 1550 | 1600 | 0,97 |
| | Mar-13 | 5,9 | 6,7 | 19,8 | 835 | 1050 | 0,80 |
| | Abr-13 | 6,0 | 6,6 | 19,7 | 1150 | 1300 | 0,88 |
| | Mai-13 | 6,2 | 6,8 | 21,4 | 1550 | 2450 | 0,63 |
| | Jun-13 | 6,1 | 6,7 | 26,4 | 890 | 2750 | 0,32 |
| | Jul-13 | 6,0 | 6,7 | 27,2 | 935 | 3000 | 0,31 |
| | Ago-13 | 5,9 | 6,7 | 27,2 | 775 | 2500 | 0,31 |
| | Set-13 | 6,4 | 6,6 | 26,5 | 735 | 2400 | 0,31 |
| | Out-13 | 6,5 | 6,7 | 24,6 | 980 | 2400 | 0,41 |
| | Nov-13 | 6,2 | 6,5 | 22,3 | 1145 | 2400 | 0,48 |
| | Dez-13 | 6,2 | 6,1 | 19,3 | 1035 | 1950 | 0,53 |

| | | kg SSV removidos | m3/Kg SV destruídos | m3/Kg SV afl. digestão |
|-------------|--------|------------------|---------------------|------------------------|
| SXL 2012 | Jan-12 | 11219 | | |
| | Fev-12 | 7501 | | |
| | Mar-12 | 44731 | 0,12 | 0,04 |
| | Abr-12 | 21228 | 0,05 | 0,01 |
| | Mai-12 | -17570 | -0,30 | 0,04 |
| | Jun-12 | -134355 | -0,07 | 0,11 |
| | Jul-12 | -136468 | -0,07 | 0,09 |
| | Ago-12 | -65822 | -0,18 | 0,10 |
| | Set-12 | -105048 | -0,23 | 0,24 |
| | Out-12 | 3968 | 6,85 | 0,22 |
| | Nov-12 | 6088 | 3,30 | 0,16 |
| | Dez-12 | 34933 | 0,42 | 0,11 |
| SXL 2013 | Jan-13 | 47340 | 0,32 | 0,12 |
| | Fev-13 | 26916 | 0,66 | 0,15 |
| | Mar-13 | 13903 | 1,10 | 0,13 |
| | Abr-13 | 43442 | 0,39 | 0,16 |
| | Mai-13 | 42239 | 0,53 | 0,19 |
| | Jun-13 | 25639 | 1,17 | 0,32 |
| | Jul-13 | 21868 | 1,37 | 0,36 |
| | Ago-13 | 53087 | 0,44 | 0,23 |
| | Set-13 | 49547 | 0,44 | 0,17 |
| | Out-13 | 26013 | 0,73 | 0,26 |
| | Nov-13 | 34975 | 0,54 | 0,22 |
| | Dez-13 | -5357 | -2,33 | 0,14 |

| | | Biogás produzido (Nm3/mês) | Biogás para cogeração (m3/mês) | Biogás para flare (m3/mês) | Biogás produzido / Q afl. água residual | Biogás produzido / Q lama alf. digestão |
|-------------|--------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|--|
| SXL 2012 | Jan-12 | | | | | |
| | Fev-12 | | | | | |
| | Mar-12 | 5533 | 0 | 5533 | 0,0122821 | 0,554506 |
| | Abr-12 | 1121 | 0,44 | 1121 | 0,0028234 | 0,159042 |
| | Mai-12 | 5328 | 0,03 | 5328 | 0,0135596 | 0,879576 |
| | Jun-12 | 8871 | 0 | 8871 | 0,0254744 | 1,594306 |
| | Jul-12 | 9310 | 6,13 | 9306 | 0,0255158 | 1,399354 |
| | Ago-12 | 12139 | 0,07 | 12139 | 0,0335606 | 1,63329 |
| | Set-12 | 24640 | 8473 | 16167 | 0,0597833 | 4,065983 |
| | Out-12 | 27186 | 3025 | 24160 | 0,0593294 | 4,148561 |
| | Nov-12 | 20071 | 1572 | 18498 | 0,0462716 | 3,05163 |
| | Dez-12 | 14779 | 109 | 14670 | 0,0302984 | 2,244016 |
| SXL 2013 | Jan-13 | 15276 | 6963 | 8313 | 0,0331782 | 2,57345 |
| | Fev-13 | 17740 | 4021 | 13719 | 0,0436072 | 3,373906 |
| | Mar-13 | 15335 | 5230 | 10105 | 0,03031 | 2,812729 |
| | Abr-13 | 16762 | 1618 | 15144 | 0,0393207 | 3,646291 |
| | Mai-13 | 22235 | 3953 | 18282 | 0,0546724 | 4,369228 |
| | Jun-13 | 29940 | 9012 | 20928 | 0,0840364 | 5,649057 |
| | Jul-13 | 29858 | 17457 | 12401 | 0,0801368 | 4,847078 |
| | Ago-13 | 23225 | 4439 | 18786 | 0,0641219 | 3,806129 |
| | Set-13 | 21955 | 122 | 21833 | 0,0587368 | 2,797172 |
| | Out-13 | 18971 | 0 | 18971 | 0,0446729 | 2,804701 |
| | Nov-13 | 18952 | 0 | 18952 | 0,0577768 | 3,674292 |
| | Dez-13 | 12502 | 0 | 12502 | 0,0330205 | 1,594643 |

| | | Q afl. água residual (m3/mês) | CBO5 (mg/l) | Q lama afl. digestão (m3/mês) | Q afl. água residual / Q lama afl. digestão |
|-------------|--------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|---|
| SSB 2010 | Jan-10 | 103279 | 229 | 508 | 203 |
| | Fev-10 | 110427 | 178 | 508 | 217 |
| | Mar-10 | 136246 | 121 | 513 | 266 |
| | Abr-10 | 88541 | 219 | 541 | 164 |
| | Mai-10 | 80949 | 299 | 559 | 145 |
| | Jun-10 | 77886 | 253 | 601 | 130 |
| | Jul-10 | 89721 | 343 | 999 | 90 |
| | Ago-10 | 102220 | 362 | 852 | 120 |
| | Set-10 | 76277 | 266 | 677 | 113 |
| | Out-10 | 81507 | 255 | 515 | 158 |
| | Nov-10 | 87782 | 190 | 403 | 218 |
| | Dez-10 | 104502 | 187 | 416 | 251 |
| SSB 2011 | Jan-11 | 110754 | 178 | 429 | 258 |
| | Fev-11 | 91726 | 237 | 484 | 190 |
| | Mar-11 | 96590 | 239 | 537 | 180 |
| | Abr-11 | 97704 | 291 | 537 | 182 |
| | Mai-11 | 92288 | 192 | 462 | 200 |
| | Jun-11 | 82087 | 322 | 567 | 145 |
| | Jul-11 | 90974 | 358 | 875 | 104 |
| | Ago-11 | 103677 | 353 | 1265 | 82 |
| | Set-11 | 73738 | 378 | 908 | 81 |
| | Out-11 | 74417 | 301 | 597 | 125 |
| | Nov-11 | 81163 | 246 | 378 | 215 |
| | Dez-11 | 73483 | 423 | 408 | 180 |

| | | Quantidade lama afl. digestão (kg SSV/mês) | Quantidade lama afl. desidratação (kg SSV/mês) | Eficiência remoção matéria volátil (%) | T _{RH} (dias) | Carga volúmica (kg SSV/m ³ .dia) |
|-------------|--------|--|--|--|---------------------------|---|
| SSB 2010 | Jan-10 | 17162 | 8835 | 49% | 37 | 0,92 |
| | Fev-10 | 16664 | 7621 | 54% | 33 | 0,99 |
| | Mar-10 | 15427 | 9687 | 37% | 36 | 0,83 |
| | Abr-10 | 18810 | 6432 | 66% | 33 | 1,05 |
| | Mai-10 | 14263 | 7160 | 50% | 33 | 0,77 |
| | Jun-10 | 12911 | 8347 | 35% | 30 | 0,72 |
| | Jul-10 | 19879 | 11488 | 42% | 19 | 1,07 |
| | Ago-10 | 14820 | 8432 | 43% | 22 | 0,80 |
| | Set-10 | 17207 | 7046 | 59% | 27 | 0,96 |
| | Out-10 | 12254 | 4634 | 62% | 36 | 0,66 |
| | Nov-10 | 11427 | 3982 | 65% | 45 | 0,63 |
| | Dez-10 | 13187 | 4113 | 69% | 45 | 0,71 |
| SSB 2011 | Jan-11 | 14334 | 5335 | 63% | 43 | 0,77 |
| | Fev-11 | 13606 | 6655 | 51% | 35 | 0,81 |
| | Mar-11 | 18419 | 9975 | 46% | 35 | 0,99 |
| | Abr-11 | 15358 | 7142 | 53% | 34 | 0,85 |
| | Mai-11 | 13306 | 5313 | 60% | 40 | 0,72 |
| | Jun-11 | 11340 | 7144 | 37% | 32 | 0,63 |
| | Jul-11 | 11463 | 11813 | -3% | 21 | 0,62 |
| | Ago-11 | 15813 | 12271 | 22% | 15 | 0,85 |
| | Set-11 | 16707 | 11259 | 33% | 20 | 0,93 |
| | Out-11 | 11164 | 7343 | 34% | 31 | 0,60 |
| | Nov-11 | 11794 | 5216 | 56% | 48 | 0,66 |
| | Dez-11 | 10894 | 5916 | 46% | 46 | 0,59 |

| | | pH lama espessada | pH lama digerida | Temperatura (°C) | AGV lama digerida (mg/l CH ₃ COOH) | Alcalinidade lama digerida (mg/l CaCO ₃) | AGV/Alcalinidade |
|-------------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|--|---|------------------|
| SSB 2010 | Jan-10 | 5,9 | 7,1 | 28 | 2070 | 8350 | 0,25 |
| | Fev-10 | 5,6 | 7,3 | 25 | 3000 | 9600 | 0,31 |
| | Mar-10 | 6,2 | 7,2 | 25 | 4800 | 7950 | 0,60 |
| | Abr-10 | 6,2 | 7,6 | 32 | 3100 | 6350 | 0,49 |
| | Mai-10 | 5,5 | 7,4 | 29 | 970 | 1900 | 0,51 |
| | Jun-10 | 5,7 | 7,7 | 31 | 610 | 1650 | 0,37 |
| | Jul-10 | 5,6 | 7,1 | 35 | 960 | 2050 | 0,47 |
| | Ago-10 | | 7,5 | 36 | 1170 | 3100 | 0,38 |
| | Set-10 | 5,8 | 7,3 | 35 | 1350 | 3450 | 0,39 |
| | Out-10 | 6,5 | 7,2 | 34 | 710 | 1950 | 0,36 |
| | Nov-10 | 5,7 | 7,5 | 34 | 1020 | 1800 | 0,57 |
| | Dez-10 | 5,9 | 7,3 | 34 | 680 | 2450 | 0,28 |
| SSB 2011 | Jan-11 | 5,8 | 7,2 | | 840 | 1900 | 0,44 |
| | Fev-11 | 6,3 | 7,3 | | 840 | 2100 | 0,40 |
| | Mar-11 | 6,0 | 7,1 | | 770 | 2000 | 0,39 |
| | Abr-11 | 5,9 | 7,1 | | 910 | 2050 | 0,44 |
| | Mai-11 | 5,4 | 7,1 | | 1300 | 2000 | 0,65 |
| | Jun-11 | 5,9 | 7,4 | | 960 | 2100 | 0,46 |
| | Jul-11 | 5,8 | 7,3 | | 1672 | 4900 | 0,34 |
| | Ago-11 | 5,6 | 6,6 | | 700 | 3800 | 0,18 |
| | Set-11 | 5,5 | 6,4 | | 2150 | 3100 | 0,69 |
| | Out-11 | 5,8 | 6,8 | | 920 | 2100 | 0,44 |
| | Nov-11 | 5,5 | 6,7 | | 785 | 3350 | 0,23 |
| | Dez-11 | 5,3 | 6,7 | | 990 | 2850 | 0,35 |

| | | kg SSV removidos | m3/Kg SV destruídos | m3/Kg SV afl. digestão | Biogás produzido (Nm3/mês) | Biogás para cogeração (m3/mês) | Biogás para flare (m3/mês) |
|-------------|--------|---------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| SSB 2010 | Jan-10 | 8327 | | | | 3920 | |
| | Fev-10 | 9043 | | | | 1560 | |
| | Mar-10 | 5740 | | | | 4040 | |
| | Abr-10 | 12378 | | | | 5640 | |
| | Mai-10 | 7104 | | | | 2280 | |
| | Jun-10 | 4564 | | | | 3060 | |
| | Jul-10 | 8391 | | | | 7360 | |
| | Ago-10 | 6388 | | | | 5960 | |
| | Set-10 | 10162 | | | | 6920 | |
| | Out-10 | 7620 | | | | 5600 | |
| | Nov-10 | 7445 | | | | 5160 | |
| | Dez-10 | 9074 | | | | 4560 | |
| SSB 2011 | Jan-11 | 8998 | | | | 2320 | |
| | Fev-11 | 6951 | | | | 40 | |
| | Mar-11 | 8444 | | | | 0 | |
| | Abr-11 | 8216 | | | | 40 | |
| | Mai-11 | 7993 | | | | 0 | |
| | Jun-11 | 4196 | | | | 0 | |
| | Jul-11 | -350 | | | | 0 | |
| | Ago-11 | 3542 | | | | 0 | |
| | Set-11 | 5448 | | | | 0 | |
| | Out-11 | 3821 | | | | 0 | |
| | Nov-11 | 6577 | | | | 0 | |
| | Dez-11 | 4978 | | | | 0 | |

| | | Q afl. água residual (m3/mês) | CBO5 (mg/l) | Q lama afl. digestão (m3/mês) | Q afl. água residual / Q lama afl. digestão |
|----------|--------|--------------------------------------|--------------------|--------------------------------------|--|
| SSB 2012 | Jan-12 | 70408 | 699 | 468 | 150 |
| | Fev-12 | 64171 | 274 | 254 | 253 |
| | Mar-12 | 73917 | 345 | 947 | 78 |
| | Abr-12 | 78439 | 339 | 562 | 140 |
| | Mai-12 | 76383 | 285 | 620 | 123 |
| | Jun-12 | 70908 | 338 | 512 | 138 |
| | Jul-12 | 77340 | 398 | 769 | 101 |
| | Ago-12 | 86257 | 343 | 1165 | 74 |
| | Set-12 | 80335 | 310 | 580 | 138 |
| | Out-12 | 69284 | 268 | 338 | 205 |
| | Nov-12 | 72145 | 284 | 329 | 219 |
| | Dez-12 | 83497 | 254 | 298 | 280 |
| SSB 2013 | Jan-13 | 83019 | 243 | 402 | 206 |
| | Fev-13 | 75643 | 212 | 336 | 225 |
| | Mar-13 | 111901 | 173 | 100 | 1116 |
| | Abr-13 | 101673 | 458 | 584 | 174 |
| | Mai-13 | 81859 | 301 | 422 | 194 |
| | Jun-13 | 77864 | 538 | 697 | 112 |
| | Jul-13 | 87901 | 445 | 714 | 123 |
| | Ago-13 | 96901 | 388 | 982 | 99 |
| | Set-13 | 74095 | 508 | 960 | 77 |
| | Out-13 | 74096 | 312 | 443 | 167 |
| | Nov-13 | 63560 | 493 | 383 | 166 |
| | Dez-13 | | 960 | | |

| | | Quantidade lama afl. digestão (kg SSV/mês) | Quantidade lama afl. desidratação (kg SSV/mês) | Eficiência remoção matéria volátil (%) | T _{RH} (dias) | Carga volúmica (kg SSV/m ³ .dia) |
|-------------|--------|--|--|--|---------------------------|---|
| SSB 2012 | Jan-12 | 11870 | 7669 | 35% | 40 | 0,64 |
| | Fev-12 | 4540 | 3943 | 13% | 69 | 0,26 |
| | Mar-12 | 24338 | 19804 | 19% | 20 | 1,31 |
| | Abr-12 | 15736 | 11335 | 28% | 32 | 0,87 |
| | Mai-12 | 16628 | 11615 | 30% | 30 | 0,89 |
| | Jun-12 | 12374 | 6874 | 44% | 35 | 0,69 |
| | Jul-12 | 15361 | 9762 | 36% | 24 | 0,83 |
| | Ago-12 | 21428 | 10495 | 51% | 16 | 1,15 |
| | Set-12 | 13323 | 5603 | 58% | 31 | 0,74 |
| | Out-12 | 11552 | 2406 | 79% | 55 | 0,62 |
| | Nov-12 | 10257 | 2184 | 79% | 55 | 0,57 |
| | Dez-12 | 8582 | 5036 | 41% | 62 | 0,46 |
| SSB 2013 | Jan-13 | 9834 | 5427 | 45% | 46 | 0,53 |
| | Fev-13 | 11615 | 4495 | 61% | 50 | 0,69 |
| | Mar-13 | 2217 | 1427 | 36% | | 0,12 |
| | Abr-13 | 15573 | 10009 | 36% | 31 | 0,87 |
| | Mai-13 | 9571 | 3738 | 61% | 44 | 0,51 |
| | Jun-13 | 11398 | 6745 | 41% | 26 | 0,63 |
| | Jul-13 | 10746 | 4695 | 56% | 26 | 0,58 |
| | Ago-13 | 17484 | 9160 | 48% | 19 | 0,94 |
| | Set-13 | 17437 | 11341 | 35% | 19 | 0,97 |
| | Out-13 | 12393 | 4565 | 63% | 42 | 0,67 |
| | Nov-13 | 9916 | 3748 | 62% | 47 | 0,55 |
| | Dez-13 | | | 47% | | |

| | | pH lama espessada | pH lama digerida | Temperatura (°C) | AGV lama digerida (mg/l CH ₃ COOH) | Alcalinidade lama digerida (mg/l CaCO ₃) | AGV/Alcalinidade |
|-------------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|--|---|------------------|
| SSB 2012 | Jan-12 | 5,9 | 7,0 | | 1300 | 4400 | 0,30 |
| | Fev-12 | 5,5 | 6,9 | | 1200 | 4200 | 0,29 |
| | Mar-12 | 5,5 | 6,6 | | 1700 | 2750 | 0,62 |
| | Abr-12 | 5,6 | 6,6 | | 2000 | 2600 | 0,77 |
| | Mai-12 | 5,6 | 6,8 | | 1800 | 3150 | 0,57 |
| | Jun-12 | 5,5 | 7,1 | | 1400 | 5700 | 0,25 |
| | Jul-12 | 5,4 | 7,0 | | 1150 | 4450 | 0,26 |
| | Ago-12 | 5,4 | 6,9 | | 760 | 3400 | 0,22 |
| | Set-12 | 5,8 | 6,8 | | 645 | 3300 | 0,20 |
| | Out-12 | 5,7 | 7,2 | | 745 | 4450 | 0,17 |
| | Nov-12 | 6,3 | 7,5 | | 980 | 6900 | 0,14 |
| | Dez-12 | 5,8 | 7,5 | | 1380 | 8250 | 0,17 |
| SSB 2013 | Jan-13 | 5,6 | 7,1 | 30,2 | 880 | 3550 | 0,25 |
| | Fev-13 | 5,5 | 7,4 | 27,8 | 1150 | 4100 | 0,28 |
| | Mar-13 | 6,0 | 7,1 | 23,0 | 1050 | 3550 | 0,30 |
| | Abr-13 | 5,7 | 7,3 | 25,5 | 1300 | 4050 | 0,32 |
| | Mai-13 | 6,1 | 7,1 | 27,7 | 1985 | 4300 | 0,46 |
| | Jun-13 | 5,7 | 7,0 | 27,6 | 1000 | 5600 | 0,18 |
| | Jul-13 | 5,6 | 7,1 | 30,4 | 775 | 4250 | 0,18 |
| | Ago-13 | 5,7 | 6,9 | 28,5 | 785 | 3650 | 0,22 |
| | Set-13 | 5,8 | 6,9 | 26,2 | 965 | 3646 | 0,26 |
| | Out-13 | 5,7 | 7,0 | 28,6 | 875 | 4150 | 0,21 |
| | Nov-13 | 5,3 | 6,9 | 28,9 | 1430 | 5850 | 0,24 |
| | Dez-13 | 5,7 | 6,8 | 19,8 | 950 | 4900 | 0,19 |

| | | kg SSV removidos | m3/Kg SV destruídos | m3/Kg SV afl. digestão |
|-------------|--------|------------------|---------------------|------------------------|
| SSB 2012 | Jan-12 | 4201 | 1,86 | 0,66 |
| | Fev-12 | 597 | 4,48 | 0,59 |
| | Mar-12 | 4534 | | |
| | Abr-12 | 4401 | | |
| | Mai-12 | 5014 | | |
| | Jun-12 | 5500 | | |
| | Jul-12 | 5598 | 0,67 | 0,24 |
| | Ago-12 | 10933 | 0,98 | 0,50 |
| | Set-12 | 7721 | 1,12 | 0,65 |
| | Out-12 | 9146 | 0,81 | 0,64 |
| | Nov-12 | 8073 | 0,73 | 0,58 |
| | Dez-12 | 3546 | 2,34 | 0,97 |
| SSB 2013 | Jan-13 | 4406 | 3,30 | 1,48 |
| | Fev-13 | 7120 | 1,19 | 0,73 |
| | Mar-13 | 790 | 2,15 | 0,77 |
| | Abr-13 | 5564 | 1,34 | 0,48 |
| | Mai-13 | 5833 | 1,38 | 0,84 |
| | Jun-13 | 4653 | 1,63 | 0,66 |
| | Jul-13 | 6051 | 1,31 | 0,74 |
| | Ago-13 | 8325 | 1,25 | 0,60 |
| | Set-13 | 6097 | 1,22 | 0,43 |
| | Out-13 | 7828 | 0,68 | 0,43 |
| | Nov-13 | 6168 | 0,91 | 0,57 |
| | Dez-13 | | | |

| | | Biogás produzido (Nm3/mês) | Biogás para cogeração (m3/mês) | Biogás para flare (m3/mês) | Biogás produzido / Q afl. água residual | Biogás produzido / Q lama alf. digestão |
|-------------|--------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|--|
| SSB 2012 | Jan-12 | 7809 | 0 | 7809 | 0,11 | 16,69 |
| | Fev-12 | 2674 | 0,7 | 2673 | 0,04 | 10,53 |
| | Mar-12 | | | | | |
| | Abr-12 | | | | | |
| | Mai-12 | | | | | |
| | Jun-12 | | | | | |
| | Jul-12 | 3755 | 0 | 3755 | 0,05 | 4,88 |
| | Ago-12 | 10660 | 0 | 10660 | 0,12 | 9,15 |
| | Set-12 | 8624 | 15 | 8609 | 0,11 | 14,87 |
| | Out-12 | 7365 | 3159 | 4206 | 0,11 | 21,79 |
| | Nov-12 | 5920 | 3860 | 2060 | 0,08 | 17,99 |
| | Dez-12 | 8311 | 4181 | 4130 | 0,10 | 27,89 |
| SSB 2013 | Jan-13 | 14535 | 5088 | 9448 | | |
| | Fev-13 | 8450 | 3105 | 5345 | 0,11 | 25,14 |
| | Mar-13 | 1700 | 1460 | 240 | 0,02 | 16,96 |
| | Abr-13 | 7435 | 3211 | 4224 | 0,07 | 12,74 |
| | Mai-13 | 8051 | 4378 | 3673 | 0,10 | 19,06 |
| | Jun-13 | 7568 | 3556 | 4012 | 0,10 | 10,86 |
| | Jul-13 | 7938 | 2694 | 5244 | 0,09 | 11,12 |
| | Ago-13 | 10405 | 1017 | 9388 | 0,11 | 10,59 |
| | Set-13 | 7460 | 601 | 6860 | 0,10 | 7,77 |
| | Out-13 | 5351 | 2877 | 2474 | 0,07 | 12,07 |
| | Nov-13 | 5621 | 2767 | 2854 | 0,09 | 14,66 |
| | Dez-13 | | | | | |

| | | Q afl. água residual (m3/mês) | CBO5 (mg/l) | Q lama afl. digestão (m3/mês) | Q afl. água residual / Q lama afl. digestão |
|-------------|--------|-------------------------------|-------------|-------------------------------|---|
| ZIA 2012 | Jan-12 | 66946 | 357 | 621 | 108 |
| | Fev-12 | 51825 | 277 | 441 | 117 |
| | Mar-12 | 55841 | 309 | 459 | 122 |
| | Abr-12 | | 402 | 504 | |
| | Mai-12 | | 391 | 552 | |
| | Jun-12 | | 286 | 422 | |
| | Jul-12 | | 613 | 419 | |
| | Ago-12 | | 445 | 331 | |
| | Set-12 | | 353 | 508 | |
| | Out-12 | | 345 | 329 | |
| | Nov-12 | | 339 | 218 | |
| | Dez-12 | | 248 | 513 | |
| ZIA 2013 | Jan-13 | 74675 | 295 | 523 | 143 |
| | Fev-13 | 66577 | 246 | 492 | 135 |
| | Mar-13 | 94970 | 390 | 587 | 162 |
| | Abr-13 | 97663 | 353 | 596 | 164 |
| | Mai-13 | 80545 | 540 | 528 | 153 |
| | Jun-13 | 66854 | 503 | 311 | 215 |
| | Jul-13 | 60972 | 468 | 543 | 112 |
| | Ago-13 | 43519 | 368 | 616 | 71 |
| | Set-13 | 49637 | 997 | 500 | 99 |
| | Out-13 | 59942 | 710 | 762 | 79 |
| | Nov-13 | 49260 | 655 | 570 | 86 |
| | Dez-13 | 45071 | 508 | 399 | 113 |

| | | Quantidade lama afl. digestão (kg SSV/mês) | Quantidade lama afl. desidratação (kg SSV/mês) | Eficiência remoção matéria volátil (%) | T _{RH} (dias) | Carga volúmica (kg SSV/m ³ .dia) |
|-------------|--------|--|--|--|---------------------------|---|
| ZIA 2012 | Jan-12 | 10184 | 8525 | 16% | 80 | 0,21 |
| | Fev-12 | 7026 | 6421 | 9% | 105 | 0,15 |
| | Mar-12 | 6288 | 5977 | 5% | 108 | 0,13 |
| | Abr-12 | 6302 | 6499 | -3% | 95 | 0,13 |
| | Mai-12 | 7016 | 7509 | -7% | 90 | 0,14 |
| | Jun-12 | 6040 | 5196 | 14% | 114 | 0,13 |
| | Jul-12 | 5207 | 5026 | 3% | 118 | 0,10 |
| | Ago-12 | 4428 | 3577 | 19% | | 0,09 |
| | Set-12 | 7329 | 3963 | 46% | 94 | 0,15 |
| | Out-12 | 4845 | 3487 | 28% | | 0,10 |
| | Nov-12 | 3558 | 2438 | 31% | | 0,07 |
| | Dez-12 | 8250 | 7392 | 10% | 97 | 0,17 |
| ZIA 2013 | Jan-13 | 7763 | 7239 | 7% | 95 | 0,16 |
| | Fev-13 | 8991 | 6096 | 32% | 91 | 0,20 |
| | Mar-13 | 8356 | 8459 | -1% | 85 | 0,17 |
| | Abr-13 | 8272 | 8049 | 3% | 81 | 0,17 |
| | Mai-13 | 7564 | 6598 | 13% | 94 | 0,15 |
| | Jun-13 | 4085 | 3926 | 4% | | 0,09 |
| | Jul-13 | 5919 | 7021 | -19% | 91 | 0,12 |
| | Ago-13 | 8292 | 9546 | -15% | 81 | 0,17 |
| | Set-13 | 6198 | 6549 | -6% | 96 | 0,13 |
| | Out-13 | 9628 | 7884 | 18% | 65 | 0,19 |
| | Nov-13 | 7478 | 6867 | 8% | 84 | 0,16 |
| | Dez-13 | 5122 | 5444 | -6% | 124 | 0,10 |

| | | pH lama espessada | pH lama digerida | Temperatura (°C) | AGV lama digerida (mg/l CH ₃ COOH) | Alcalinidade lama digerida (mg/l CaCO ₃) | AGV/Alcalinidade |
|-------------|--------|----------------------|---------------------|---------------------|--|---|------------------|
| ZIA 2012 | Jan-12 | 7,2 | 6,8 | 17,7 | 1133 | 2233 | 0,51 |
| | Fev-12 | 6,3 | 6,4 | 18,7 | 1063 | 1933 | 0,55 |
| | Mar-12 | 6,6 | 6,8 | 19,5 | 1225 | 1325 | 0,92 |
| | Abr-12 | 6,2 | 6,5 | 18,6 | 908 | 778 | 1,17 |
| | Mai-12 | 6,1 | 6,5 | 20,6 | 970 | 1098 | 0,88 |
| | Jun-12 | 6,2 | 6,6 | 23,1 | 1050 | 2025 | 0,52 |
| | Jul-12 | 6,2 | 6,7 | 25,4 | 940 | 1800 | 0,52 |
| | Ago-12 | 6,4 | 6,7 | 26,7 | 825 | 2225 | 0,37 |
| | Set-12 | 5,9 | 6,7 | 25,2 | 750 | 2200 | 0,34 |
| | Out-12 | 6,5 | 6,8 | 22,6 | 840 | 2450 | 0,34 |
| | Nov-12 | 6,9 | 7,1 | 18,3 | 808 | 2475 | 0,33 |
| | Dez-12 | 6,7 | 7,1 | 15,6 | 763 | 2400 | 0,32 |
| ZIA 2013 | Jan-13 | 6,7 | 6,7 | 15,2 | 988 | 1200 | 0,82 |
| | Fev-13 | 6,7 | 6,9 | 15,7 | 898 | 1095 | 0,82 |
| | Mar-13 | 6,5 | 6,9 | 16,9 | 943 | 1080 | 0,87 |
| | Abr-13 | 6,4 | 6,8 | 16,3 | 1108 | 1125 | 0,98 |
| | Mai-13 | 6,3 | 6,7 | 18,4 | 995 | 1625 | 0,61 |
| | Jun-13 | 6,4 | 6,6 | 20,0 | 980 | 2175 | 0,45 |
| | Jul-13 | 6,6 | 6,6 | 24,0 | 883 | 2200 | 0,40 |
| | Ago-13 | 6,7 | 6,7 | 23,0 | 1180 | 2300 | 0,51 |
| | Set-13 | 6,5 | 6,7 | 23,2 | 1063 | 2225 | 0,48 |
| | Out-13 | 6,6 | 6,9 | 18,3 | 913 | 2225 | 0,41 |
| | Nov-13 | 6,4 | 6,7 | 19,5 | 1003 | 2000 | 0,50 |
| | Dez-13 | 6,0 | 6,5 | 16,8 | 1067 | 2200 | 0,49 |

| | | kg SSV removidos | m3/Kg SV destruídos | m3/Kg SV afl. digestão |
|-------------|--------|------------------|---------------------|------------------------|
| ZIA 2012 | Jan-12 | 1659 | 0,16 | 0,03 |
| | Fev-12 | 604 | | |
| | Mar-12 | 311 | 1,31 | 0,06 |
| | Abr-12 | -198 | -3,24 | 0,10 |
| | Mai-12 | -493 | -1,58 | 0,11 |
| | Jun-12 | 844 | 0,79 | 0,11 |
| | Jul-12 | 181 | 4,00 | 0,14 |
| | Ago-12 | 851 | 0,59 | 0,11 |
| | Set-12 | 3366 | 0,12 | 0,06 |
| | Out-12 | 1358 | 0,32 | 0,09 |
| | Nov-12 | 1120 | 0,16 | 0,05 |
| | Dez-12 | 857 | 0,26 | 0,03 |
| ZIA 2013 | Jan-13 | 524 | 0,38 | 0,03 |
| | Fev-13 | 2895 | 0,08 | 0,03 |
| | Mar-13 | -103 | -0,92 | 0,01 |
| | Abr-13 | 223 | 0,18 | 0,00 |
| | Mai-13 | 966 | 0,09 | 0,01 |
| | Jun-13 | 159 | 1,82 | 0,07 |
| | Jul-13 | -1103 | -0,27 | 0,05 |
| | Ago-13 | -1254 | -0,43 | 0,06 |
| | Set-13 | -351 | -0,66 | 0,04 |
| | Out-13 | 1745 | 0,07 | 0,01 |
| | Nov-13 | 611 | | |
| | Dez-13 | -322 | | |

| | | Biogás produzido (Nm3/mês) | Biogás para cogeração (m3/mês) | Biogás para flare (m3/mês) | Biogás produzido / Q afl. água residual | Biogás produzido / Q lama alf. digestão |
|-------------|--------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|--|
| ZIA 2012 | Jan-12 | 1018 | | 1018 | 0,02 | 1,64 |
| | Fev-12 | 703 | | 703 | | |
| | Mar-12 | 629 | | 629 | 0,01 | 1,37 |
| | Abr-12 | 641 | | 641 | | 1,27 |
| | Mai-12 | 778 | | 778 | | 1,41 |
| | Jun-12 | 665 | | 665 | | 1,57 |
| | Jul-12 | 723 | | 723 | | 1,73 |
| | Ago-12 | 506 | | 506 | | 1,53 |
| | Set-12 | 733 | | 733 | | 1,44 |
| | Out-12 | 484 | | 484 | | 1,47 |
| | Nov-12 | 356 | | 356 | | 1,63 |
| | Dez-12 | 825 | | 825 | | 1,61 |
| ZIA 2013 | Jan-13 | 776 | | 776 | 0,01 | 1,49 |
| | Fev-13 | 899 | | 899 | 0,01 | 1,83 |
| | Mar-13 | 836 | | 836 | 0,01 | 1,42 |
| | Abr-13 | 827 | | 827 | 0,01 | 1,39 |
| | Mai-13 | 756 | | 756 | 0,01 | 1,43 |
| | Jun-13 | 409 | | 409 | 0,01 | 1,31 |
| | Jul-13 | 592 | | 592 | 0,01 | 1,09 |
| | Ago-13 | 829 | | 829 | 0,02 | 1,35 |
| | Set-13 | 620 | | 620 | 0,01 | 1,24 |
| | Out-13 | 963 | | 963 | 0,02 | 1,26 |
| | Nov-13 | 748 | | 748 | | |
| | Dez-13 | 512 | | 512 | | |

Anexo II

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS - ETAR DE FERNÃO FERRO

CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO

| | | | |
|--|-------|--------------------|---|
| Produção de biogás | 5 | m ³ /h | |
| Tempo de armazenamento no gasómetro | 60 | h | |
| Volume do gasómetro | 300 | m ³ | |
| Horas de funcionamento | 12 | h/dia | |
| Poder calorífico | 6,2 | kWh/m ³ | Sugestão: 6,2 kWh/m ³ (65% metano) |
| Potência | 62 | kW | |
| Eficiência elétrica | 30 | % | Sugestão: 30% Ef. Elétrica |
| Potência elétrica | 18,6 | kW | |
| Preço de venda por kWh | 0,115 | €/kWh | Sugestão: 0,115 €/kWh para venda da energia produzida (DGEG.pt) |
| Ganhos de venda da energia elétrica | 9369 | €/ano | |

CUSTOS DE INVESTIMENTO

NOTA: Assume-se que os preços estipulados incluem o fornecimento e a montagem de cada equipamento

| Descrição | Quantidade | Preço Unitário | Preço |
|---|------------|----------------|-------|
| Motor de aproveitamento do biogás e gerador de energia elétrica (Preço unitário em função da potência do motor) | 1 | 2500 | 46500 |
| Gasómetro | 0 | 16000 | 0 |
| Tocha para Qmin = 20 Nm3/h (incluindo quadro eléctrico, piloto, válvulas e acessórios) | 0 | 10000 | 0 |
| Sistema de secagem do biogás por um refrigerador de águas industriais | 1 | 26000 | 26000 |
| Sistema de compressão do biogás por um booster, elevando a pressão a 50 mbar, para caudais entre 0 e 40 m3/h | 1 | 4800 | 4800 |
| Sistema de purificação do biogás por Cloreto Férrico | 1 | 2000 | 2000 |
| Pote de purga de baixa pressão | 1 | 5050 | 5050 |
| Pote de purga de média pressão | 0 | 2000 | 0 |
| Válvula anti-detonação | 1 | 2000 | 2000 |
| Válvula anti-deflagrante | 1 | 1000 | 1000 |
| Medidor de pressão | 2 | 1025 | 2050 |
| Válvula de segurança de pressão | 1 | 7200 | 7200 |
| Válvula de borboleta | 6 | 250 | 1500 |
| Projecto e execução da rede de biogás após o digestor | 1 | 15000 | 15000 |
| Custos de construção civil (Edifício do motor, lajes para tocha, valas, estaleiro, etc) | 1 | 30000 | 30000 |
| Trabalhos eléctricos e posto de seccionamento | 1 | 20000 | 20000 |
| Outros trabalhos | 0 | | 0 |

| | |
|---------|--------|
| Total € | 163100 |
|---------|--------|

CUSTOS DE EXPLORAÇÃO (OPERAÇÃO/MANUTENÇÃO)

Manutenção do motor

| | | |
|---|-------|-------|
| Custo de operação/manutenção do motor | 0,025 | €/kWh |
| Custo anual de operação/manutenção do motor | 2037 | €/ano |

Contaminação do biogás

| | | |
|-----------------------------------|-------|------------------|
| Concentração de H2S | 2000 | ppm H2S |
| Quantidade de H2S no biogás | 0,002 | m3 H2S/m3 biogás |
| Quantidade anual de H2S a remover | 87,6 | m3 H2S/ano |

| Sistemas de tratamento do biogás | Quantidade de purificador por unidade de H2S (kg /kg H2S) | Custo por unidade de purificador (€/kg) |
|----------------------------------|---|---|
| Cloreto férrico | 9,6 | 0,275 |
| Hidróxido de ferro | 8,3 | 2,75 |
| Soxsia® | 3,8 | 17,25 |

| | | |
|--------------------------------------|-----|-------|
| Custo anual de purificação do biogás | 231 | €/ano |
|--------------------------------------|-----|-------|

| | | |
|----------------------|---|---|
| Taxa de actualização | 3 | % |
|----------------------|---|---|

BALANÇO ECONÓMICO

| Anos | Ganhos cumulativos de venda da energia elétrica | Custos de Investimento | Custo de Exploração Anual | Custos cumulativos de Exploração | Balanço Económico | Margem de lucro |
|------|---|------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|
| 1º | 9.369 € | 163.100 € | 2268 | 2.268 € | -155.999 € | -1665% |
| 2º | 18.738 € | | 2336 | 4.604 € | -148.966 € | -795% |
| 3º | 28.106 € | | 2406 | 7.010 € | -142.004 € | -505% |
| 4º | 37.475 € | | 2478 | 9.488 € | -135.113 € | -361% |
| 5º | 46.844 € | | 2553 | 12.041 € | -128.297 € | -274% |
| 6º | 56.213 € | | 2629 | 14.670 € | -121.557 € | -216% |
| 7º | 65.582 € | | 2708 | 17.378 € | -114.896 € | -175% |
| 8º | 74.951 € | | 2789 | 20.167 € | -108.317 € | -145% |
| 9º | 84.319 € | | 2873 | 23.040 € | -101.821 € | -121% |
| 10º | 93.688 € | | 2959 | 26.000 € | -95.411 € | -102% |
| 11º | 103.057 € | | 3048 | 29.048 € | -89.091 € | -86% |
| 12º | 112.426 € | | 3139 | 32.187 € | -82.861 € | -74% |
| 13º | 121.795 € | | 3234 | 35.421 € | -76.726 € | -63% |
| 14º | 131.163 € | | 3331 | 38.751 € | -70.688 € | -54% |
| 15º | 140.532 € | | 3430 | 42.182 € | -64.749 € | -46% |

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DO APROVEITAMENTO DO BIOGÁS - ETAR DA ZONA INDUSTRIAL DA AUTOEUROPA

CONDIÇÕES DE EXPLORAÇÃO

| | | |
|--|--------|--------------------|
| Produção de biogás | 0,96 | m ³ /h |
| Tempo de armazenamento no gasómetro | 52 | h |
| Volume do gasómetro | 50 | m ³ |
| Horas de funcionamento | 9 | h/dia |
| Poder calorífico | 6,2 | kWh/m ³ |
| Potência | 15,872 | kW |
| Eficiência elétrica | 25 | % |
| Potência elétrica | 4,0 | kW |
| Preço de venda por kWh | 0,115 | €/kWh |
| Ganhos de venda da energia elétrica | 1499 | €/ano |

CUSTOS DE INVESTIMENTO

NOTA: Assume-se que os preços estipulados incluem o fornecimento e a montagem de cada equipamento

| Descrição | Quantidade | Preço Unitário | Preço |
|---|------------|----------------|-------|
| Motor de aproveitamento do biogás e gerador de energia elétrica (Preço unitário em função da potência do motor) | 1 | 2500 | 9920 |
| Gasómetro | 1 | 5000 | 5000 |
| Tocha para Qmin = 20 Nm3/h (incluindo quadro eléctrico, piloto, válvulas e acessórios) | 0 | 10000 | 0 |
| Sistema de secagem do biogás por um refrigerador de águas industriais | 1 | 26000 | 26000 |
| Sistema de compressão do biogás por um booster, elevando a pressão a 50 mbar, para caudais entre 0 e 40 m3/h | 1 | 4800 | 4800 |
| Sistema de purificação do biogás por Cloreto Férrico | 1 | 2000 | 2000 |
| Pote de purga de baixa pressão | 1 | 5050 | 5050 |
| Pote de purga de média pressão | 0 | 2000 | 0 |
| Válvula anti-detonção | 1 | 2000 | 2000 |
| Válvula anti-deflagrante | 1 | 1000 | 1000 |
| Medidor de pressão | 2 | 1025 | 2050 |
| Válvula de segurança de pressão | 1 | 7200 | 7200 |
| Válvula de borboleta | 6 | 250 | 1500 |
| Projecto e execução da rede de biogás após o digestor | 1 | 15000 | 15000 |
| Custos de construção civil (Edifício do motor, lajes para tocha, valas, estaleiro, etc) | 1 | 30000 | 30000 |
| Trabalhos eléctricos e posto de seccionamento | 1 | 20000 | 20000 |
| Outros trabalhos | 0 | | 0 |

| | |
|---------|--------|
| Total € | 131520 |
|---------|--------|

CUSTOS DE EXPLORAÇÃO (OPERAÇÃO/MANUTENÇÃO)

Manutenção do motor

| | | |
|---|-------|-------|
| Custo de operação/manutenção do motor | 0,025 | €/kWh |
| Custo anual de operação/manutenção do motor | 326 | €/ano |

Contaminação do biogás

| | | |
|-----------------------------------|---------|------------------|
| Concentração de H2S | 2000 | ppm H2S |
| Quantidade de H2S no biogás | 0,002 | m3 H2S/m3 biogás |
| Quantidade anual de H2S a remover | 16,8192 | m3 H2S/ano |

| Sistemas de tratamento do biogás | Quantidade de purificador por unidade de H2S (kg /kg H2S) | Custo por unidade de purificador (€/kg) |
|----------------------------------|---|---|
| Cloreto férrico | 9,6 | 0,275 |
| Hidróxido de ferro | 8,3 | 2,75 |
| Soxsia® | 3,8 | 17,25 |

| | | |
|--------------------------------------|----|-------|
| Custo anual de purificação do biogás | 44 | €/ano |
|--------------------------------------|----|-------|

| | | |
|----------------------|---|---|
| Taxa de actualização | 3 | % |
|----------------------|---|---|

BALANÇO ECONÓMICO

| Anos | Ganhos cumulativos de venda da energia elétrica | Custos de Investimento | Custo de Exploração Anual | Custos cumulativos de Exploração | Balanço Económico | Margem de lucro |
|------|---|------------------------|---------------------------|----------------------------------|-------------------|-----------------|
| 1º | 1.499 € | 131.520 € | 370 | 370 € | -130.391 € | -8698% |
| 2º | 2.998 € | | 381 | 752 € | -129.274 € | -4312% |
| 3º | 4.497 € | | 393 | 1.144 € | -128.167 € | -2850% |
| 4º | 5.996 € | | 405 | 1.549 € | -127.073 € | -2119% |
| 5º | 7.495 € | | 417 | 1.966 € | -125.991 € | -1681% |
| 6º | 8.994 € | | 429 | 2.395 € | -124.921 € | -1389% |
| 7º | 10.493 € | | 442 | 2.837 € | -123.864 € | -1180% |
| 8º | 11.992 € | | 455 | 3.293 € | -122.821 € | -1024% |
| 9º | 13.491 € | | 469 | 3.762 € | -121.791 € | -903% |
| 10º | 14.990 € | | 483 | 4.245 € | -120.775 € | -806% |
| 11º | 16.489 € | | 498 | 4.742 € | -119.773 € | -726% |
| 12º | 17.988 € | | 513 | 5.255 € | -118.787 € | -660% |
| 13º | 19.487 € | | 528 | 5.783 € | -117.816 € | -605% |
| 14º | 20.986 € | | 544 | 6.327 € | -116.860 € | -557% |
| 15º | 22.485 € | | 560 | 6.887 € | -115.922 € | -516% |