



Instituto Politécnico de Tomar

Escola Superior de Tecnologia de Tomar

Eunice Alexandra dos Santos Moço

**Projeto de uma unidade produtora de
biogás**

Projeto

Orientado por:
Doutor Henrique Pinho
Instituto Politécnico de Tomar

Projecto apresentado ao Instituto Politécnico de Tomar
para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção
do grau de Mestre em Tecnologia Química

Dedico este projeto...

Aos meus pais, Manuel Moço e Olinda Ribeiro, ao namorado Márcio Cravo, amigos, principalmente à Ana Carvalheiro, Sara Rua e a Susana Marques e ao orientador, pelo apoio, força, incentivo, companheirismo, paciência, compreensão e amizade que todos tiveram. Sem eles nada disso seria possível.

RESUMO

Começa-se a acreditar que a sociedade poderá colapsar, caso não se resolvam alguns problemas de foro estrutural e de comportamento, em particular os problemas associados à sustentabilidade, ou falta dela, dos recursos energéticos. Num momento em que Portugal se encontra numa crise económica profunda, as alternativas que possam reduzir a nossa dependência de combustíveis fósseis são cada vez mais determinantes para o nosso futuro.

É verdade que as fontes de energia renovável estão a ganhar grande relevo, particularmente em Portugal. Mas, as bioenergias estão ainda em segundo plano, face à energia hídrica, solar e eólica. Entre as bioenergias, uma das formas com elevado potencial, mas ainda pouco aproveitado é o biogás. O biogás é principalmente obtido de resíduos (agropecuários, aterros sanitários, estações de tratamento de águas residuais): a transformação desses resíduos através de digestão anaeróbia, representa uma forma atrativa de os valorizar, e simultaneamente reduzir os impactos ambientais gerados pelo despejo direto desses resíduos na natureza.

Neste projecto avaliou-se a possibilidade de implementar uma unidade de produção de biogás, e da sua conversão em electricidade, a partir das lamas residuais do saneamento da região de Cantanhade, nos casos em que estas não são convertidas em biogás nas próprias ETAR da região.

Procederam-se aos balanços de massa e de energia, e ao dimensionamento dos equipamentos principais, apesar de forma simplificada, para uma capacidade de digestão de 600 toneladas por ano. Determinou-se que seria possível produzir cerca de 1200 MWh de energia anualmente.

Porém, verificou-se que a capacidade é demasiado pequena para viabilizar economicamente a instalação. Mas aumentando a capacidade para cerca do dobro, a instalação já poderia ser viável num horizonte de 20 anos.

Palavras-chave: biogás, lamas, digestão anaeróbia, energias renováveis, digestor.

ABSTRACT

It is more and more common knowledge that our society will collapse if we do not solve structural and behavioral problems, in particular those related with the lack of sustainability of energy resources. At a time when Portugal undergoes a profound economical crisis, the alternatives that may reduce our dependence on fossil fuels present themselves as increasingly decisive for our future.

It is true that renewable energy sources are gaining importance, particularly in Portugal. However, bio-energies are still of a lesser importance when compared to hydropower, solar energy and wind power. Amongst the several types of bio-energies, biogas seems to be a powerful alternative that has as yet been scarcely explored. Biogas is mainly obtained from waste (farming and livestock waste, landfills, wastewater treatment plants): the transformation of this waste through anaerobic digestion constitutes an interesting way to give good use to this waste and simultaneously diminishes the environmental impacts generated by direct dumping of this waste in nature.

In this project we have assessed the possibility of implementing a biogas plant, and the conversion into electricity of the biogas obtained from the residual sludge obtained from the sanitation systems of the region of *Cantanhade*, in cases where such sludge was not converted in biogas by the sanitation plants of the area.

We, then, proceed to measuring mass and energy and sized the necessary equipment accordingly, although in a simplified manner, to a digestion capacity of 600 tons per year. It was determined that it would be possible to produce approximately 1200 MWh of energy annually.

Notwithstanding, we have determined that the capacity of the plant is too small to make it economically viable. However, should the capacity of the project be doubled, the facility would be cost-effective within twenty years time.

Key words: sludge, anaerobic digestion, biogas, renewable energy, digester.

AGRADECIMENTOS

A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e empenho de diversas pessoas, mas principalmente do orientador, Professor Henrique Pinho, para o qual não há agradecimentos que cheguem. As notas dominantes da sua orientação foram essenciais e a cordialidade com que sempre me recebeu. Tomo como reconhecido a oportunidade de realizar este trabalho ao lado de alguém que transpira sabedoria; meu respeito e admiração pela sua serenidade e paciência para comigo.

Ao Milton A. Pires Fontes, Responsável do Centro Operacional II (ETAR Sul de Aveiro) pela disponibilidade e atenção em fornecer-me os dados que necessitei.

A INOVA, entidade das águas em Cantanhede, que prestou esclarecimentos e informações que foram muitos úteis para a realização deste projeto.

“As dificuldades não passam de oportunidades para demonstrar o que sabemos e o que podemos fazer”

Duke Ellington

“O séc. XIX foi o século do carvão, o séc. XX foi o século do petróleo, ... terá de surgir uma alternativa para sustentar a economia do séc. XXI.”

Tim Flannery em “We are the weather makers”

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS.....	iii
ÍNDICE DE TABELAS.....	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	v
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1.O tratamento de águas residuais urbanas e a gestão de lamas em Portugal.....	2
1.1.1. Tratamento preliminar.....	4
1.1.2.Tratamento primário	4
1.1.3. Tratamento secundário	4
1.1.4. Tratamento terciário.....	6
1.2. Tratamento das lamas nas ETAR´s.....	8
1.2.1. Processo para tratamento de lamas	9
1.2.2. Caracterização geral do biogás	10
1.2.3.Situação em Portugal	11
1.2.4. Vantagens e Desvantagens do Biogás.....	17
1.3. Objetivo do estudo	18
2. DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO A USAR, FACE ÀS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS.....	19
2.1. Tipos de digestores.....	20
2.1.1.Caraterização geral.....	20
2.1.2. Condições necessárias às bactérias para a produção de Biogás.....	26
3. BALANÇOS DE MASSA E DE ENERGIA.....	29
3.1. Balanços de massa	29

3.2 Balanços de Energia.....	32
4. DIMENSIONAMENTO.....	35
4.1 Dimensionamento do digestor	36
4.2 Dimensionamento do tanque de recepção das lamas.....	36
4.3 Dimensionamento do permutador de aquecimento das lamas.....	37
4.4 Dimensionamento do condensador de humidade	38
4.5 Dimensionamento do gasómetro	39
4.6 Dimensionamento do cogeração	39
4.7 Layout da instalação	40
5. ANÁLISE FINANCEIRA	41
6. CONCLUSÕES.....	45
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema geral do tratamento das águas residuais numa ETAR com produção e valorização energética do biogás.	8
Figura 2 Evolução da Energia Produzida a Partir de Fontes Renováveis (TWh). ...	12
Figura 3 Evolução da Produção de Energia Elétrica a partir de Renováveis (GWh).	12
Figura 4 Potência Instalada das Centrais de Produção de Energia Elétrica a partir de fontes renováveis (MW).	13
Figura 5 Crescimento da potencia instalada da Energias Renováveis.	13
Figura 6 Evolução histórica da potência total instalada em renováveis (MW) Portugal Continental.	14
Figura 7 Peso da produção de energia elétrica a partir de energias renováveis na produção bruta + saldo importador, em 2010.	14
Figura 8 Produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis por distrito em 2011 (GWh) Portugal Continental.	15
Figura 9 Produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis - Ano Móvel (GWh) Portugal Continental	16
Figura 10 Comparação internacional entre países da OCDE.	16
Figura 11 - Diagrama esquemático de uma linha de tratamento convencional de águas residuais-	19
Figura 12- Diagrama esquemático de um digestor de baixa carga.	23
Figura 13 Diagrama esquemático de um digestor de alta carga.	24
Figura 14 - Diagrama esquemático de um digestor de duas fases.	25
Figura 15 - Formato dos digestores anaeróbios mais comuns	25
Figura 16 – Diagrama de blocos simplificado da unidade de produção de biogás. .	35
Figura 17 Layout da instalação da unidade de produção de biogás.	40
Figura 19 – Evolução da Taxa interna de rentabilidade do projecto (TIR) com o aumenta da capacidade instalada, em termos da quantidade de lamas processadas (m3/dia).	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Composição típica do Biogás.....	11
Tabela 2 - Caracterização dos principais tipos de digestores.	21
Tabela 3 - Características dos reatores de biomassa suspensa.....	22
Tabela 4 - Resultados do balanço de massa ao digestor, considerando a abordagem simples descrita no texto (valores em kg/dia).	31
Tabela 5 – Total do investimento previsto, discriminado pelos principais equipamentos (valores em euros)	41
Tabela 6 – Estimativa do valor anual dos custos de produção.	42
Tabela 7 – Cálculo do valor de venda da energia eléctrica, segundo a portaria nº 140/2012.	42
Tabela 8 – Simulação dos indicadores financeiros do projecto, para diferentes capacidades de produção..	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CE – Comissão Europeia

CEE – Comunidade Económica Europeia

DGEG – Direção-Geral de Energia e Geologia

DGGE- Direção-Geral de Geologia e Energia

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

FER- Fontes de Energia Renováveis

pH- Medida de Actividade do Ião de Hidrogénio

SV – sólidos voláteis

TCMA – Taxa de crescimento de média anual

TIR – Taxa Interna de Rentabilidade

TRH - Tempo de Retenção Hidráulico

TRS- Tempo de Retenção de Sólidos

UE15 – União Europeia dos 15 países.

LISTA DE SÍMBOLOS

C_p – capacidade calorífica

$C_{p,B}$ - capacidade calorífica do biogás

$C_{p,do}$ – capacidade calorífica do dióxido de carbono

$C_{p,m}$ – capacidade calorífica do metano

M_B – massa molar média do biogás

M_d – percentagem de massa degradável

m_L – massa de lamas de entrada

M_s – matéria seca

n_A –caudal de água

n_B - caudal do biogás

Q_1 – calor necessário para arrefecer o biogás

Q_2 – calor necessário para condensar o vapor de água

Q_d – caudal diário de lamas

$T_{alim.}$ – temperatura de alimentação

$T_{dig.}$ – temperatura de digestão

ton- toneladas

T_r . tempo de retenção

V_B – volume de biogás

V_{b/M_s} – volume de biogás por materia seca

1. INTRODUÇÃO

As alterações climáticas e a situação de independência energética a que estamos expostos, tanto a nível Mundial como Nacional, têm criado a consciência que o futuro da humanidade passa pelo recurso a fontes renováveis de energia. Devido à subida constante dos preços dos produtos petrolíferos, e aos problemas provocados pelas emissões resultantes da utilização dos mesmos, as energias renováveis são cada vez mais o centro das atenções mundiais.

No período de realização deste projecto, Portugal encontra-se numa situação, como à muito não se via, de grande crise económica. Esta crise veio sobrepor-se a outra, que não é só de âmbito Nacional: a subida dos custos de energia, devido ao aumento de carência de recursos energéticos e ao contínuo aumento da população mundial e intensificação do consumo *per capita*. As energias renováveis têm vindo a ser apontadas como uma solução, mas o seu grau de penetração no *mix* das alternativas energéticas é ainda pequeno.

Em Portugal tem-se vindo a verificar um grande investimento na energia eólica e solar, além da tradicional energia hídrica, e já existem unidades de grande dimensão a produzir biodiesel. O bioetanol não tem sido uma aposta, face ao facto do consumo de gasolina ter vindo, constantemente, a decrescer.

A partir de 2015 será obrigatório incorporar biocombustíveis na gasolina, o que representa uma oportunidade para este sector, mas que será sempre de pequena dimensão visto o poder que o crude representa mundialmente.

O sector da bioenergia, onde se insere o biodiesel e o bioetanol, tem ainda duas outras vertentes: a geração de energia por queima de biomassa e a geração de energia a partir do biogás.

O biogás resulta da digestão anaeróbia de materiais orgânicos, e pode ser obtido de uma forma económica e tecnicamente viável em estações de tratamento de águas residuais (ETAR) ou em aterros sanitários. Em Portugal, além de já estarem a funcionar várias centrais eléctricas a biomassa, existem também exemplos de produção de energia eléctrica em ETAR municipais e industriais, e em aterros.

A produção e a utilização do biogás para produzir energia, representa uma alternativa muito atraente para utilizar certas categorias de biomassa, cuja transformação noutros biocombustíveis não é técnica ou economicamente viável. O biogás é produzido

pela digestão anaeróbia de compostos orgânicos. É um processo natural, mas que pode ser controlado e aplicado industrialmente. O que distingue o biogás de outras energias renováveis tem a ver com o facto de se poderem usar uma grande variedade de “matérias-primas”, incluindo resíduos industriais ou domésticos. A produção integrada de biogás em ETAR, por exemplo, melhora o processo global de tratamento ao se conseguir ao mesmo tempo tratar os resíduos, produzir energia, e ainda, eventualmente, produzir fertilizantes para a agricultura e água para utilização em rega agrícola. Ao contrário de outras formas de energia renovável, o biogás nem tem quaisquer limitações geográficas nem de tecnologia necessária para a produção de energia.

A situação da produção de biogás em ETAR municipais em Portugal foi objecto de um estudo recente (Monte, 2010), onde se verifica que o grau de penetração desta tecnologia é ainda reduzido. Neste estudo foram identificadas doze ETAR onde se produz biogás, e energia eléctrica por cogeração. Neste momento já existe mais uma, na ETAR Sul de Aveiro. A cogeração representa a produção conjunta de energia eléctrica e de energia térmica. Permite melhorar globalmente a eficiência de conversão do combustível em energia, sendo vantajosa quando existe um destino para a energia térmica produzida. Ora, no caso da produção de biogás, a energia térmica é usada para aquecer o digestor, e assim melhorar a produtividade em termos de biogás – uma forma de “realimentação” positiva (Lebre, 2011).

A nível industrial são conhecidos também alguns casos, apesar de não existirem estudos sistemáticos: o grupo Altri possui um dos maiores digestores da Península Ibérica, onde se produz biogás que é alimentado a uma central de produção de energia, junto com biomassa florestal (André e Gonçalves, 2012); a Sociedade Lusitana de Destilação, noutra dimensão, também produz biogás por digestão dos seus efluentes industriais, e que também converte em electricidade (Reis, 2012).

1.1.O tratamento de águas residuais urbanas e a gestão de lamas em Portugal

Com a população a aumentar, cada vez mais foi preciso fazer um controlo das descargas de águas domésticas e urbanas realizadas pela população nas suas atividades habituais, para se poder manter um bom estado das águas superficiais e subterrâneas.

Segundo a União Europeia entendeu-se a necessidade urgente de defender os recursos naturais de forma a evitar que mais depressa ocorra a destruição dos mesmos, tendo sendo assim criada a Diretiva 91/271/CEE do Conselho de 21 de Maio, mecanismos legislativos com vista à harmonização das leis internas dos vários Estados-Membros.

A transposição desta diretiva para o direito interno português foi realizada através do Decreto-Lei n.º 152/97 de 19 de Junho, cujas disposições se aplicam à recolha, tratamento e descarga de águas residuais urbanas em meio aquático. Ai se encontram definidas as metas temporais e os níveis de tratamento que deverão orientar a ação das entidades responsáveis na melhoria dos níveis de atendimento e qualidade de serviço dos sistemas de drenagem pública e tratamento de águas residuais. Este Decreto-Lei identifica ainda zonas sensíveis e zonas menos sensíveis, diferenciando os graus de exigência no nível de tratamento que é necessário fazer.

Com a União Europeia a fazer muita pressão, em se cumprir a legislação em vigor tem resultado, nos últimos anos, num aumento significativo da população servida por Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR's), o que associado ao acréscimo das exigências do nível de tratamento, por sua vez tem originado um aumento significativo da produção de lamas nas ETAR's, que são um produto inevitável dos sistemas de tratamento.

O primeiro diploma legal europeu relativo a lamas de depuração foi a Diretiva n.º 86/278/CEE, de 12 de Junho, que foi transferida para a ordem jurídica nacional cinco anos depois, através do Decreto-Lei n.º 446/91, tendo as respetivas portarias sido publicadas em 1996. O Decreto-Lei n.º 118/2006 de 21 de Junho anulou, entretanto, o Decreto-Lei n.º 446/91.

Estes Decretos-Lei referem-se à gestão das lamas residuais e à sua utilização agrícola, de modo que se evite utilizações incorretas deste produto das ETAR's e os efeitos nocivos sobre o homem, os solos, a vegetação, os animais e o ambiente no seu geral.

Visto que no presente projecto se vai utilizar como matéria-prima para a produção de biogás, considerou-se relevante apresentar as principais operações que decorrem numa ETAR, e que permitem obter as lamas em causa. As secções seguintes servem para esse efeito.

1.1.1. Tratamento preliminar

Numa ETAR as águas residuais passam por vários processos de tratamento com o objetivo de separar a matéria poluente da água. No primeiro conjunto de tratamentos, designado por tratamento preliminar, a água residual é sujeita a processos de separação dos sólidos e poluentes mais grosseiros ou mais simples de remover, como sejam a gradagem, o desarenamento e o desengorduramento.

A operação unitária de gradagem tem o objetivo de remover sólidos grosseiros, flutuantes e sedimentáveis, de maiores dimensões que as aberturas dos equipamentos utilizados (grades), impedindo ainda a flutuação de detritos nos equipamentos a jusante, o entupimento de canalizações e o desgaste ou bloqueamento de equipamentos mecânicos. As operações unitárias de desarenação e desengorduramento têm como finalidade remover as areias e gorduras existentes na água residual (Azevedo, 2003).

Nesta fase, o efluente também é preparado para as fases de tratamento subsequentes, podendo ser sujeito a um pré-arejamento e a uma equalização tanto de caudais como de cargas poluentes.

1.1.2. Tratamento primário

A primeira fase de tratamento é designada por tratamento primário, onde a matéria poluente é separada da água por sedimentação em sedimentadores primários.

Este processo exclusivamente de ação física pode, em alguns casos, ser ajudado pela adição de agentes químicos que através de uma coagulação/floculação possibilitam a obtenção de flocos de matéria poluente de maiores dimensões e assim mais facilmente decantáveis. Após o tratamento primário, a matéria poluente que permanece no efluente tem dimensões reduzidas sendo normalmente constituída por colóides, não sendo por isso passível de ser removida por processos exclusivamente físico-químicos.

1.1.3. Tratamento secundário

Na etapa designada por tratamento secundário são normalmente implementados processos de tratamento biológicos, onde os materiais orgânicos presentes nas águas residuais são degradados por microrganismos, em reatores biológicos.

Estes reatores são normalmente constituídos por microrganismos aeróbios, sendo por isso arejados por meios forçados, mecânicos. Entre as alternativas de tratamento secundário destacam-se: os sistemas aeróbios intensivos, quer por biomassa suspensa (lamas ativadas), quer por biomassa fixa (leitos percoladores e biodiscos ou discos biológicos), e os sistemas aquáticos por biomassa suspensa – lagunagem.

No sistema de lamas ativadas o efluente do tratamento preliminar é encaminhado para o decantador primário, seguindo para o tanque de arejamento, geralmente com recirculação permanente. O efluente é então conduzido para o decantador secundário e a partir daí parte do efluente é descarregado numa linha de água e outra parte constitui a recirculação ao tanque de arejamento. A eficiência do tratamento é otimizada, no caso da recirculação de lamas para o tanque de arejamento ser efetuada do fundo do decantador secundário, pois a matéria orgânica encontra-se concentrada e, assim, aumenta a concentração de biomassa no tanque de arejamento, possibilitando aos microrganismos uma nova oportunidade para degradarem o substrato (matéria orgânica).

O processo de injeção de ar ou oxigénio puro para misturar a lama a tratar com a água residual e fornecer o oxigénio suficiente para os microrganismos degradarem os compostos orgânicos é conhecido como arejamento. A adição de oxigénio é também importante como meio de remoção de alguns poluentes como ferro, manganês e dióxido de carbono, assim como na oxidação química, eliminando compostos orgânicos que resistem aos processos biológicos. Serve também como meio de repor os níveis de oxigénio na água residual antes de enviada para o meio recetor.

No sistema de leitos percoladores, após o tratamento preliminar, o efluente passa pelo decantador primário até chegar ao leito percolador de enchimento variável. Aqui o efluente entra num distribuidor rotativo e vai criar no leito um filme biológico constituído por um aglomerado de bactérias que fazem a decomposição da matéria orgânica. Quando o efluente é escoado pode ser feita a recirculação em torno do leito percolador ou a descarga no meio recetor. No entanto, a recirculação deve ser feita de preferência a partir do efluente tratado do decantador secundário, pois neste caso a matéria orgânica encontra-se diluída e, por conseguinte, não ocorre o risco de o leito percolador sofrer colmatação dos espaços vazios de enchimento.

Os biodiscos ou discos biológicos são a evolução natural dos leitos percoladores. Trata-se de um sistema que recorre também a processos biológicos aeróbios de degradação

da matéria orgânica, em filme fixo, à semelhança dos leitos percoladores. O filme está preso ao disco, mas, como é preciso uma grande área de contacto, juntam-se vários discos paralelos de reduzida espessura, com rugosidade, para permitir uma maior aderência dos microrganismos. Os discos mergulham parcialmente num canaleta com água residual, enquanto giram o que garante que os microrganismos estão alternadamente em contacto com o ar e com matéria orgânica.

A lagunagem é de todos os processos, o que mais se aproxima da simulação das condições naturais. A água residual atravessa uma série de lagoas (anaeróbias, facultativas, maturação – remoção de organismos patogénicos), onde os processos são parecidos aos que se dão nos meios aeróbios e anaeróbios. As lagoas arejadas são uma técnica intermédia que conjuga características da lagunagem e das lamas ativadas. No entanto, a técnica de lagunagem não é muito utilizada, o que se explica pelo facto de necessitar de grandes áreas e de estar muito dependente das condições naturais, saindo do controlo humano, além da emissão de odores. Como vantagens há a referir a simplicidade e economia da construção e manutenção da unidade.

O efluente saído do reator biológico é constituído por uma grande quantidade de microrganismos, sendo muito reduzida a matéria poluente remanescente. Os microrganismos sofrem seguidamente um processo de sedimentação nos designados sedimentadores secundários.

No final do tratamento secundário, as águas residuais tratadas apresentam um nível de poluição já muito reduzido, podendo na maioria dos casos, serem admitidas no meio ambiente recetor (Azevedo, 2003).

1.1.4. Tratamento terciário

O tratamento terciário torna-se indispensável quando é necessário proceder à desinfecção das águas residuais tratadas ou à remoção dos compostos usualmente designados por nutrientes (azoto e o fósforo), que podem potenciar, isoladamente ou em conjunto, a eutrofização das águas recetoras.

Entre as opções de desinfecção, aplicadas principalmente quando se pretende a reutilização das águas residuais, contam-se geralmente três tecnologias básicas: cloro, ozono e canal de ultravioletas.

A cloragem é o sistema de desinfecção mais vulgar, sendo também o mais económico. Eficaz com as bactérias, este método é, porém, bastante ineficaz na eliminação dos vírus e os resíduos da cloragem permanecem na corrente filtrada, com graves inconvenientes ambientais e de saúde pública.

Semelhantes desvantagens, embora a uma escala menor, apresenta a desinfecção por ozono, mais onerosa que a cloragem. O ozono não se mantém muito tempo na água, no entanto, formam-se no processo subprodutos contaminantes que se mantêm na água tratada.

O sistema de desinfecção por ultravioletas, igualmente mais oneroso que a cloragem, é uma tecnologia mais recente que não produz quaisquer resíduos tóxicos e obtém ótimos resultados na destruição de vírus e bactérias, apresentando-se a solução mais adequada para um tratamento terciário.

A remoção biológica de azoto compreende os processos de nitrificação e desnitrificação. A nitrificação biológica é o processo pelo qual as formas reduzidas de azoto são parcialmente convertidas a nitrato. Na desnitrificação biológica, os heterotróficos presentes nas lamas ativadas são capazes de reduzir os nitratos até ao estágio de azoto molecular, na ausência de oxigénio.

Na remoção biológica de fósforo os microrganismos são sujeitos a uma sequência que compreende uma zona anaeróbia seguida por uma zona aeróbia. Esta alternância permite a seleção de uma população de microrganismos capaz de acumular fósforo (Azevedo, 2003).

A remoção de nutriente pode ainda ser efectuada através de zonas húmidas construídas, uma solução muito favorável do ponto de vista económico e ambiental (Mateus et al., 2012).

Na figura 1 que se segue ilustra-se o processo geral de uma ETAR.

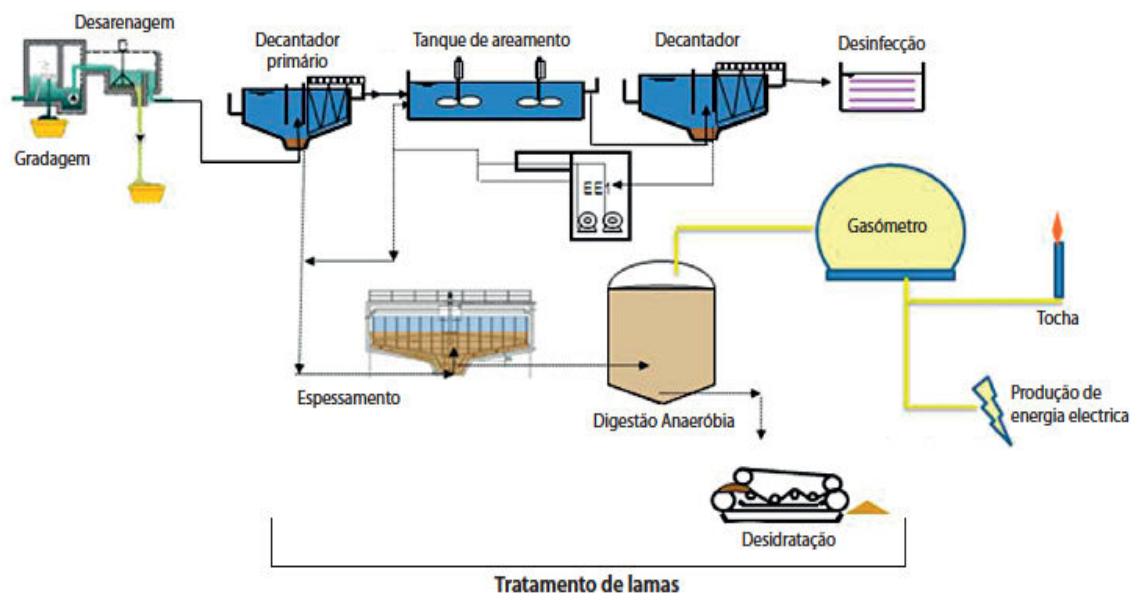


Figura 1 Esquema geral do tratamento das águas residuais numa ETAR com produção e valorização energética do biogás.

1.2. Tratamento das lamas nas ETAR's

Durante o processo de tratamento das águas residuais são produzidas lamas resultantes das diferentes operações. O aumento de sistemas de saneamento de águas residuais no nosso país levou também a um aumento de produção de lamas.

As lamas podem ter como utilidade a aplicação em solos agrícolas. Os elevados teores de matéria orgânica nas lamas, assim como a existência de macro e micro nutrientes essenciais para o crescimento adequado das culturas, atuam na correção e/ou na fertilização do solo. Quando as lamas não são estabilizadas de forma adequada, ou contém níveis elevados de compostos indesejáveis, como é o caso de metais pesados, não podem ser destinadas a fins agrícolas, e têm de ser depositadas em aterros.

Os solos nacionais apresentam níveis de matéria orgânica baixos, na grande parte, podendo a aplicação controlada de lamas contribuir para a reposição da matéria orgânica nestes solos. No entanto, as lamas podem conter compostos com concentrações potencialmente tóxicas para solos, animais e plantas, pelo que a sua gestão deve obedecer a um conjunto de procedimentos cuidados.

É assim necessário ponderarem-se alternativas de gestão e destino final para as lamas. As opções a considerar poderão passar pela redução da produção de lamas, com

recurso a tecnologias de redução/minimização de lamas e a tecnologias de desidratação das lamas mais eficazes, pela higienização das lamas nos processos de tratamento para uso na agricultura, e pela correta aplicação das lamas na agricultura, apostando nas regiões do país onde a prática pode ser viável (Gonçalves, 2001; Azevedo, 2003a).

1.2.1. Processo para tratamento de lamas

As lamas caracterizam-se por possuírem um elevado teor de matéria orgânica, nutrientes (azoto, fósforo e potássio), humidade e, muitas vezes, metais pesados (micropoluentes inorgânicos), bem como uma concentração importante de microrganismos patogénicos. Com estas características, as lamas têm que ser convenientemente tratadas, antes de serem enviadas para destino final, e sempre que possível valorizadas.

Em termos gerais, as lamas antes da sua aplicação final devem ser preferencialmente estabilizadas com o objetivo de se reduzir o seu poder de fermentação, responsável pela produção de gases e odores, reduzidas em volume para facilitar o seu manuseamento, transporte e armazenamento e purificadas para eliminar o máximo de microrganismos patogénicos e elementos tóxicos.

As principais técnicas utilizadas para o tratamento das lamas, tendo em vista a sua adequada aplicação final são a estabilização química com cal, a compostagem, a secagem térmica, a eliminação por incineração e a digestão anaeróbia (Azevedo, 2003a).

A estabilização química garante a higienização das lamas, embora a utilização de cal não produza uma redução de matéria orgânica das lamas. A sua ação de estabilização/desinfecção dos microrganismos presentes nas lamas é evidenciada quer através de simples elevação do pH das mesmas (para valores superiores a 12), com a utilização de cal hidratada $[Ca(OH)_2]$, quer através da conjugação deste fenómeno com o aumento de temperatura para valores superiores a 60 °C, quando utilizada sob a forma de cal viva (CaO).

A compostagem de lamas é um processo utilizado para transformar as lamas num produto de valor agronómico. Este método de tratamento das lamas em que os compostos orgânicos se decompõem biologicamente, em condições aeróbias controladas, até alcançar um estado que permita a sua manipulação, o seu armazenamento e a respetiva aplicação. É obtido então um fertilizante capaz de melhorar e de enriquecer as propriedades físico-químicas e biológicas dos solos de cultivo.

A secagem térmica consiste em reduzir o teor de humidade das lamas por adição de calor, através da evaporação da água. Consegue-se desta forma um produto quase sólido com cerca de 75 a 95 % de matéria seca, de textura geralmente granular, adequado a vários destinos finais. Permite ainda estabilizar e higienizar as lamas, facilitar a sua valorização orgânica ou a sua incineração, bem como reduzir os custos associados ao tratamento das lamas.

A incineração tem como objetivo a queima dos componentes orgânicos combustíveis das lamas, para que os produtos resultantes (gases e cinzas) sejam relativamente inertes. Com esta técnica conseguem-se obter reduções de cerca de 95% em volume e peso sólido das lamas e a destruição de compostos tóxicos e patogénicos. Também se poderá ser efetuada aproveitando o poder calorífico das mesmas, em equipamentos específicos para o efeito, com ou sem prévia secagem térmica.

A digestão anaeróbia das lamas é um processo bioquímico com várias etapas que são aplicadas para a estabilização de vários tipos de materiais orgânicos. Com este processo é produzido um composto orgânico estabilizado e o biogás. Este último composto veio dar valorização energética às lamas.

1.2.2. Caracterização geral do biogás

O biogás, uma forma limpa e renovável de energia, poderia muito bem ser um substituto na produção de energia. O biogás apresenta normalmente a seguinte composição (Tabela 1): metano (55-65%), dióxido de carbono (35-45%), azoto (0-3%), hidrogénio (0-1%), e sulfureto de hidrogénio (0-1%), Coelho et al., 2006.

Tabela 1 Composição típica do Biogás.

Composto	Análise típica (% em volume)
Metano (CH₄)	55-65
Dióxido de carbono (CO₂)	35-45
Sulfureto de Hidrogénio (H₂S)	0-1
Azoto (N₂)	0-3
Hidrogénio (H₂)	0-1
Oxigénio (O₂)	0-2
Amoníaco (NH₃)	0-1

Devido ao seu elevado teor de metano, resultante da degradação biológica na ausência de oxigénio molecular, o biogás é uma fonte atraente de energia, apesar de ter um teor energético inferior ao gás natural, que é constituído por cerca de 90-95% de metano.

A composição do biogás é variável, dependendo da composição das lamas, sendo a sua caracterização importante porque permite definir o sistema de purificação adequado, em particular para eliminar o sulfureto de hidrogénio, e para diminuir a quantidade de vapor de água. A redução do teor em sulfureto de hidrogénio diminui a agressividade do biogás, em termos de detioração do equipamento de queima. A redução do teor em água que contribui para melhorar a combustão. O biogás tem um poder calorífico de cerca de 5,0-7,5 kWh/m³.

1.2.3.Situação em Portugal

Portugal foi, em 2010, o terceiro país da União Europeia (UE15) com maior incorporação de energias renováveis. A posição de Portugal reforçou-se relativamente a 2009, devido ao forte aumento na produção hídrica (86%) e ao acréscimo de 21% na produção eólica.

Em geral, tem vindo a promover a produção de energias renováveis, de forma a combater o efeito de estufa e a reduzir a sua dependência em face de países terceiros, equilibrando simultaneamente a sua balança de pagamentos (Figura 2).

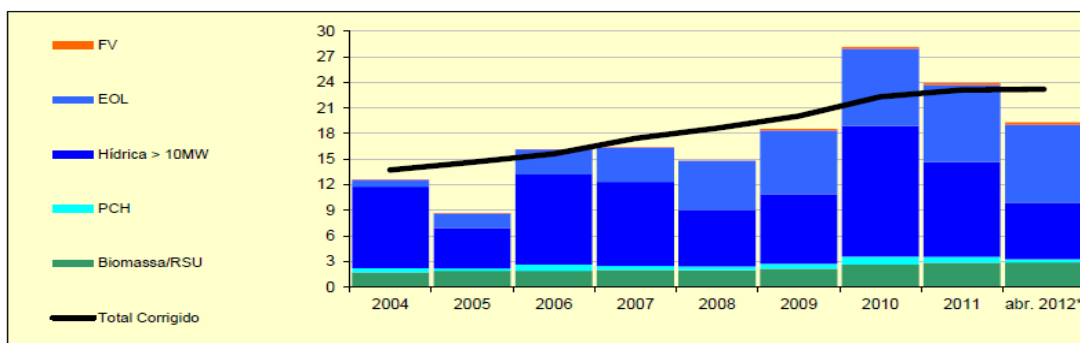


Figura 2 Evolução da Energia Produzida a Partir de Fontes Renováveis (TWh). Fonte: DGEG - Renováveis Estatísticas Rápidas, Abril 2012.

Ao contrário do que se tem vindo a verificar com a energia eólica, fazendo a análise da Figura 2, verifica-se um crescimento moderado do contributo das bioenergias, onde se inclui o biogás, no contexto da produção elétrica através de fontes renováveis.

Atualmente em Portugal, o biogás é visto como uma forma de complementar os atuais sistemas de tratamento de resíduos em ETAR'S, de tratamento de águas residuais ou apenas de responder às exigências legais de funcionamento de unidades agrícolas ou industriais.

Face aos importantes objetivos a atingir para as áreas do ambiente, agricultura e energia renovável a produção de biogás ajuda a complementar essas exigências, como solução privilegiada para a promoção do desenvolvimento sustentável. No entanto, o número de estações em funcionamento com produção de biogás só cresceu a partir de 2010.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	abr. 2012*
Hídrica Total	10 053	5 000	11 323	10 351	7 102	8 717	16 249	11 827	7 030
Grande Hídrica (>30MW)	9 065	4 454	9 897	9 406	6 190	7 547	14 306	10 495	6 324
em bombagem	278	387	465	357	498	725	399	575	788
PCH (>10 e <=30 MW)	487	265	702	504	478	618	1 045	646	335
PCH (<= 10 MW)	501	281	724	441	434	552	898	686	370
Eólica	787	1 741	2 892	4 007	5 720	7 506	9 078	9 003	9 139
Biomassa (c/ cogeração)	1 206	1 286	1 302	1 361	1 381	1 390	1 579	1 669	1 681
Biomassa (s/ cogeração)	52	64	78	149	146	311	612	688	708
Resíduos Sólidos Urbanos	475	545	532	498	441	458	455	486	487
Biogás	14	31	33	55	67	80	97	152	174
Fotovoltaica	3	4	4	24	41	160	213	265	295
microprodução								75	95
Total	12 590	8 671	16 164	16 445	14 898	18 622	28 283	24 089	19 514
Hídrica Total Corrigida (Diretiva 2009/28/CE)	11 120	10 995	10 761	11 129	10 931	10 644	11 154	10 776	10 224
Eólica Total Corrigida (Diretiva 2009/28/CE)	865	1 712	2 908	4 221	5 639	7 000	8 204	9 091	9 622
Total Corrigido	13 734	14 637	15 618	17 436	18 647	20 043	22 315	23 127	23 191
Produção Bruta + Saldo Imp. (GWh)	50 017	51 729	52 749	52 952	53 558	53 134	54 865	53 109	52 507
% de renováveis (Real)	25,2%	16,8%	30,6%	31,1%	27,8%	35,0%	51,6%	45,4%	37,2%
% de renováveis (Diretiva)	27,5%	28,3%	29,6%	32,9%	34,8%	37,7%	40,7%	43,5%	44,2%

* Ano Móvel de maio de 2011 a abril de 2012. A Produção Bruta + Saldo Importador é provisória para 2011 e 2012

Figura 3 Evolução da Produção de Energia Elétrica a partir de Renováveis (GWh).

Segundo as Estatísticas Rápidas de Março de 2010, “no final de Dezembro de 2009, Portugal tinha 9 055 MW de capacidade instalada para produção de energia eléctrica a partir de fontes de energia renováveis (FER). O acréscimo de potência instalada verificado no final do mês de Dezembro, relativamente a Outubro, deveu-se à entrada em funcionamento de treze novas centrais sendo quatro eólicas, três de biogás, duas de biomassa sem cogeração, duas fotovoltaicas e duas minihídricas. Verificaram-se, ainda, reforços de potência numa eólica e numa fotovoltaica.”

Ano	Hídrica > 10MW	Hídrica ≤ 10MW	Biomassa	Eólica	Geotérmica	Fotovoltaica	Total Renováveis	Energia Eléctrica Total
1995	4 032,42	246,38	359,00	8,28	8,80	0,34	4 655,22	9 689,00
1996	4 036,00	248,00	345,00	18,41	8,80	0,43	4 656,64	9 810,00
1997	4 130,00	245,00	351,00	29,16	8,80	0,53	4 764,49	9 865,00
1998	4 051,00	247,00	351,00	53,00	18,00	0,65	4 720,65	10 989,00
1999	4 035,00	257,00	441,00	57,00	18,00	0,93	4 808,93	11 167,00
2000	4 037,00	266,00	441,00	83,00	18,00	1,17	4 846,17	11 280,00
2001	4 050,00	281,00	441,00	125,00	18,00	1,34	4 916,34	11 405,00
2002	4 061,00	294,00	479,00	190,00	18,00	1,51	5 043,51	11 620,00
2003	4 061,00	298,00	459,00	268,00	18,00	2,07	5 106,07	12 018,00
2004	4 321,00	307,00	475,00	553,00	18,00	2,70	5 676,70	13 114,00
2005	4 493,00	323,00	476,00	1 063,00	18,00	2,99	6 375,99	13 899,00
2006	4 524,00	324,00	488,00	1 699,00	30,00	3,40	7 068,40	14 962,00
2007	4 524,00	329,00	492,00	2 201,00	30,00	14,50	7 590,50	15 531,00
2008	4 524,00	333,00	492,00	2 977,00	30,00	58,50	8 414,50	16 359,00

Figura 4 Potência Instalada das Centrais de Produção de Energia Eléctrica a partir de fontes renováveis (MW). Fonte: Direção Geral da Energia e Geologia, Divisão de Planeamento e Estatística. Estatísticas - Energias renováveis (Produção de Energia Eléctrica).

Verificou-se que as energias renováveis que registaram um maior crescimento em média anual entre 2002 e 2008 foram a Eólica, o Biogás e a Fotovoltaica.

Embora estas energias tenham apresentado acréscimos significativos na sua potência instalada, o seu peso na produção bruta de energia não se alterou, com exceção da energia eólica, que passou de 0% em 2001 para 12,6% em 2009.

Renovável	TCMA	Potência instalada (Out.2009)
Eólica	60%	3 566,0 MW
Biogás	45%	20,0 MW
Fotovoltaica	75%	96,3 MW (incluindo a microprodução)

Figura 5 Crescimento da potencia instalada da Energias Renováveis. Fonte: DGGE Renováveis.

Na figura seguinte podemos fazer uma análise do biogás em relação à categoria da biomassa. O biogás já possui uma taxa de 28,4% em crescimento anual enquanto a biomassa apresenta um crescimento próximo de 37%.

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	abr. 2012*	TCMA
Hídrica Total	4 561	4 752	4 784	4 787	4 792	4 821	4 837	5 280	5 283	2,1%
Grande Hídrica (>30MW)	4 043	4 234	4 234	4 234	4 234	4 234	4 234	4 662	4 662	2,1%
PCH (>10 e <=30 MW)	251	232	263	263	263	263	263	275	275	1,3%
PCH (<= 10 MW)	267	286	287	290	295	324	340	344	346	3,7%
Eólica	537	1 047	1 681	2 446	3 037	3 519	3 863	4 301	4 310	34,6%
offshore								2,0	2,0	
microprodução							0,6	0,6	0,6	
Biomassa (c/ cogeração)	357	357	357	357	357	359	360	367	367	0,4%
Biomassa (s/ cogeração)	12	12	24	24	24	101	106	105	105	36,3%
Resíduos Sólidos Urbanos	88	88	88	88	88	88	88	88	88	0,0%
Biogás	7,0	8,2	8,2	12,4	12,4	20,0	28,0	40,2	53,3	28,4%
Fotovoltaica	2,7	2,9	3,4	14,5	58,5	104,1	122,9	155,3	161,4	78,4%
microprodução								60,4	66,4	
Total	5 564	6 267	6 945	7 729	8 369	9 011	9 405	10 336	10 367	9,2%

Figura 6 Evolução histórica da potência total instalada em renováveis (MW) Portugal Continental. TCMA – Taxa de Crescimento Media Anual

Segundo a Diretiva 2009/28/CE, Portugal atingiu uma taxa 45% em 2009, ao incorporar nas FER no consumo bruto de energia elétrica. Sendo em 2007, o terceiro país da UE15 com maior incorporação de energias renováveis, apenas com a Áustria e a Suécia a cima.

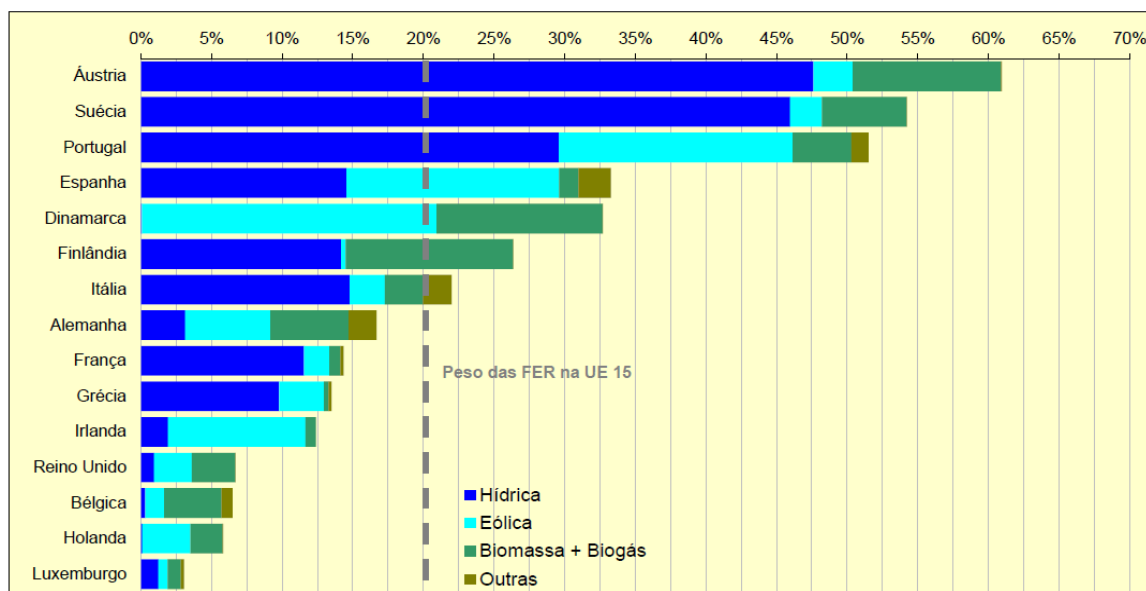


Figura 7 Peso da produção de energia elétrica a partir de energias renováveis na produção bruta + saldo importador, em 2010. Fonte: DGGE Renováveis Estatísticas Rápidas Abril 2012.

No entanto, o biogás tem vindo a contribuir de forma crescente, embora em valores modestos para atingir as metas definidas.

Pode verificar-se que a Dinamarca e a Finlândia são os países que mais cresceram nesta área de produção elétrica a partir de biogás.

No entanto a nível nacional verifica-se que se a produção de energia elétrica a partir de energias renováveis está concentrada no norte do país, mas é a hídrica que mais tem contribuído para o crescimento de produção de energia elétrica, logo seguida da eólica. A tecnologia do biogás também começa a fazer notar nesse aumento de produção, mas tendo como base essencialmente ajuda local, resíduos das ETAR (Figuras 8 e 9).

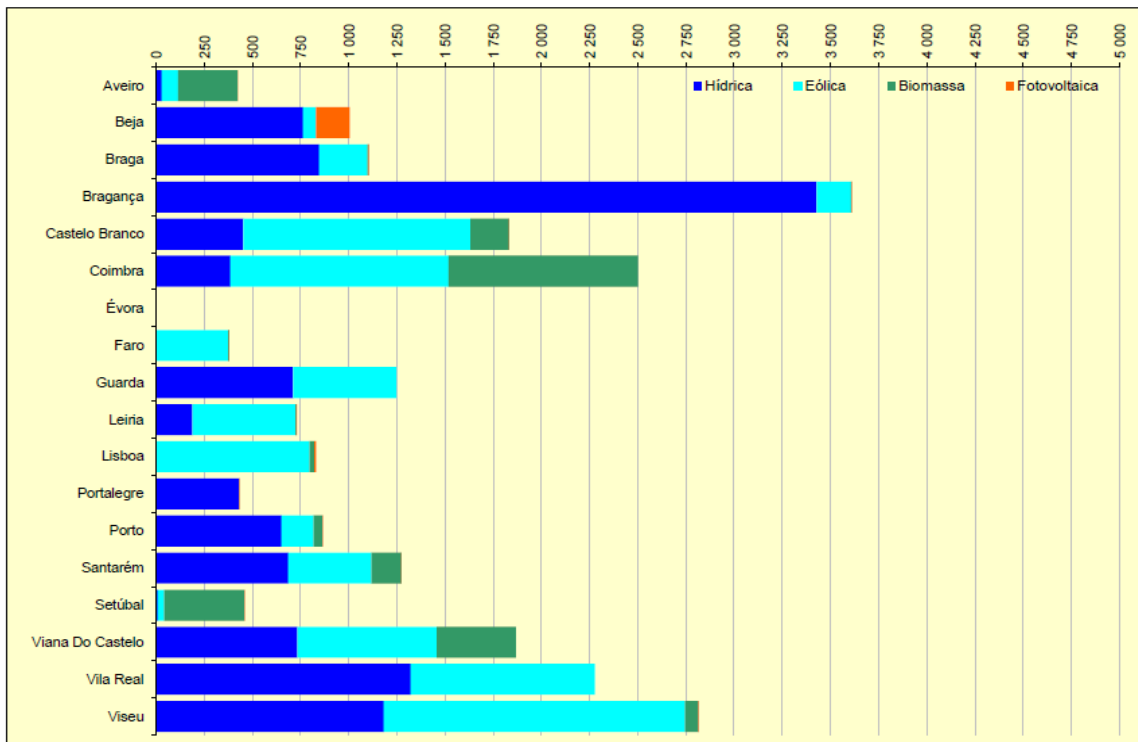


Figura 8 Produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis por distrito em 2011 (GWh) Portugal Continental.

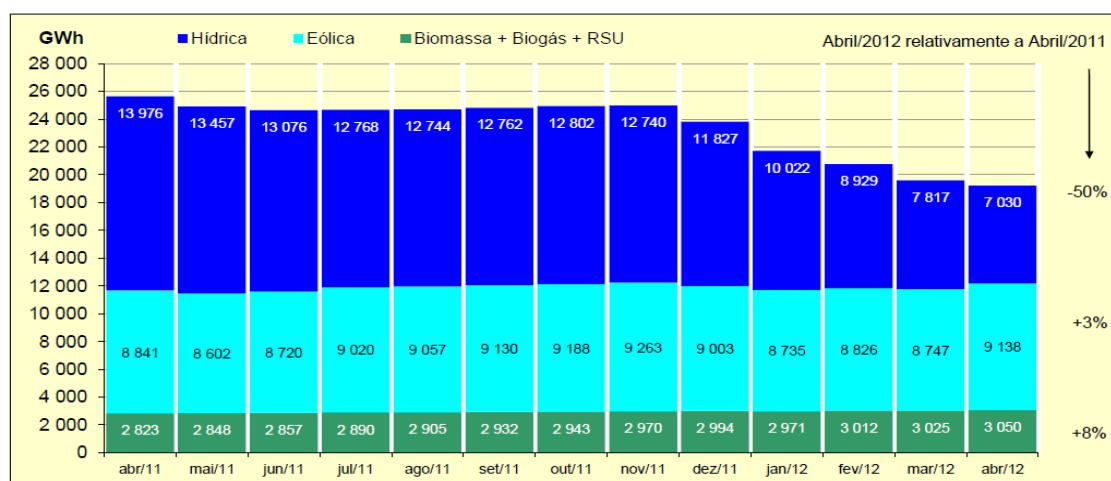


Figura 9 Produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renováveis - Ano Móvel (GWh) Portugal Continental

Em comparação com os outros países, Portugal até possui em 2010 uma boa percentagem de produção de biogás, mais Biomassa, mas é a Bélgica que lidera.

	Total 2010	FER 1999	FER 2010	% FER 1999	% FER 2010	Peso (%) em 2010				Δ% FER 10/99					
						TWh	GWh	GWh	1999		2010	Hídrica	Eólica	Biomassa + Biogás	Outras
						Áustria	73,0	43 823	44 501		74,9	61,0	78,1	4,5	17,2
Suécia	155,1	74 953	84 115	50,8	54,2	84,8	4,1	11,1	0,0	12,2					
Portugal	54,9	8 717	28 283	21,1	51,5	57,5	32,1	8,1	2,4	224,5					
Espanha	290,1	30 660	96 499	14,3	33,3	43,7	45,3	4,1	6,9	214,7					
Dinamarca	37,4	4 860	12 232	13,3	32,7	0,2	63,8	36,0	0,0	151,7					
Finlândia	90,9	21 525	23 947	26,7	26,3	53,8	1,2	45,0	0,0	11,3					
Itália	342,2	58 423	75 270	19,0	22,0	67,2	11,2	12,3	9,2	28,8					
Alemanha	606,0	37 211	101 125	6,7	16,7	18,8	36,1	33,2	11,9	171,8					
França	543,4	80 827	77 912	17,5	14,3	80,6	12,4	5,5	1,5	-3,6					
Grécia	67,6	5 187	9 112	10,4	13,5	72,6	23,4	2,5	1,4	75,7					
Irlanda	28,9	1 368	3 583	6,1	12,4	15,5	78,3	6,1	0,0	161,9					
Reino Unido	379,1	13 076	25 334	3,4	6,7	14,0	39,6	46,3	0,1	93,7					
Bélgica	97,0	2 703	6 293	3,2	6,5	5,0	20,2	62,8	12,0	132,8					
Holanda	117,5	4 873	6 839	4,6	5,8	1,5	58,4	39,3	0,7	40,3					
Luxemburgo	8,7	816	266	12,6	3,1	40,6	20,7	31,2	7,5	-67,4					
Total UE 15	2 892	389 022	595 311	15,2	20,6	53,9	23,7	17,5	4,8	53,0					
Nova Zelândia	44,8	26 747	32 846	70,2	73,3	75,2	5,0	1,9	17,9	22,8					
Canadá	571,9	353 538	364 385	64,5	63,7	96,5	1,6	1,9	0,0	3,1					
Turquia	210,4	34 930	55 713	29,5	26,5	93,0	5,2	0,6	1,2	59,5					
México	267,5	38 955	46 852	20,2	17,5	79,2	0,8	5,8	14,2	20,3					
Estados Unidos	4 353,1	389 079	434 255	9,8	10,0	59,7	21,9	13,9	4,5	11,6					
Japão	1 079,8	121 972	101 084	11,4	9,4	73,4	3,7	17,5	5,4	-17,1					
Austrália	256,3	18 118	18 650	8,9	7,3	66,8	20,4	11,3	1,5	2,9					
Coreia	480,8	6 470	6 221	2,4	1,3	59,2	13,1	10,5	17,2	-3,8					

Figura 10 Comparação internacional entre países da OCDE.

1.2.4. Vantagens e Desvantagens do Biogás

Indica-se um resumo das vantagens e desvantagens atribuídas ao biogás.

- **Vantagens:**

- Em termos de tratamento de resíduos:
 - É um processo natural para tratar resíduos orgânicos.
 - Requer menos espaço que aterros sanitários ou compostagem.
 - Diminui o volume de resíduo a ser descartado.
- Em termos de energia:
 - É uma fonte de energia renovável.
 - Produz um combustível de alta qualidade, através deste processo evita-se a libertação de metano para a atmosfera que provoca um aumento do efeito estufa.
- Em termos ambientais:
 - Reaproveitamento da matéria orgânica.
 - Produz como resíduo um biofertilizante, rico em nutrientes e livres de microrganismos patogénicos.
 - Reduz significativamente a quantidade emitida para a atmosfera de metano.
- Em termos económicos:
 - Apesar do elevado custo inicial, numa perspetiva a longo prazo resulta uma grande economia, pois reduz, gastos com eletricidade, esgotos descarte de resíduos, etc.

- **Desvantagens:**

- Caso a biodigestão não esteja a funcionar corretamente, produz-se gás sulfídrico (H_2S), um gás tóxico.
- Escolha mais cuidada do material a utilizar na construção do biodigestor, pois há formação de gases altamente corrosivos durante a formação do gás.
- Custo inicial e possível manutenção de equipamentos.

1.3. Objetivo do estudo

O presente estudo teve como objectivo avaliar a viabilidade de se implementar uma instalação industrial autónoma, para produzir energia eléctrica para venda à rede Nacional, a partir de biogás. O biogás será obtido por digestão anaeróbia de lamas recolhidas nas ETAR municipais e industriais da região de Cantanhede. A autora escolheu esta região apenas por proximidade da sua residência, não devendo ser o principal critério que afecte a viabilidade do empreendimento.

Não se conseguiu proceder a uma análise de mercado detalhada, que neste caso visava a avaliação da quantidade de lamas disponíveis na região. As lamas de interesse são aquelas que actualmente não são valorizadas, para fins energéticos ou para fins agrícolas, e que por tal teriam como destino um aterro sanitário.

A região de Cantanhede tem uma área de 391 km², e cerca de 37 000 de habitantes. Na região existem 10 ETAR, sendo algumas geridas pelo município e outras pela empresa “SIMRIA – Grupo de Águas de Portugal”. Duas das ETAR produzem biogás.

Não se conseguiu apurar a quantidade de lamas produzidas por ETAR industriais, sendo que existem diversas e numerosas empresas no Concelho. Relativamente às ETAR municipais sem valorização das lamas produzidas, foi possível averiguar que existe a disponibilidade média de 400 toneladas de lamas residuais por mês.

Apesar de reconhecer que esta quantidade é reduzida, o projecto foi desenvolvido a partir deste valor acrescido de 50%, para prever eventuais flutuações.

A ideia de base consiste em apresentar uma alternativa à instalação nas ETAR, municipais ou industriais, de sistemas de digestão de pequena capacidade, e questionável viabilidade. Um sistema dedicado apresenta a vantagem de poder usufruir de economia de escala, e de critérios de optimização de funcionamento.

2. DESCRIÇÃO GERAL DO PROCESSO A USAR, FACE ÀS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS

No tratamento de águas residuais ocorre a produção de lamas como subprodutos dos processos físicos, químicos e biológicos que ocorrem numa ETAR. Na Figura 11 apresenta-se um diagrama esquemático de uma linha de tratamento convencional de águas residuais urbanas, destacando-se as operações das quais resulta a produção de lamas, bem como a sequência de etapas de tratamento da fase sólida.

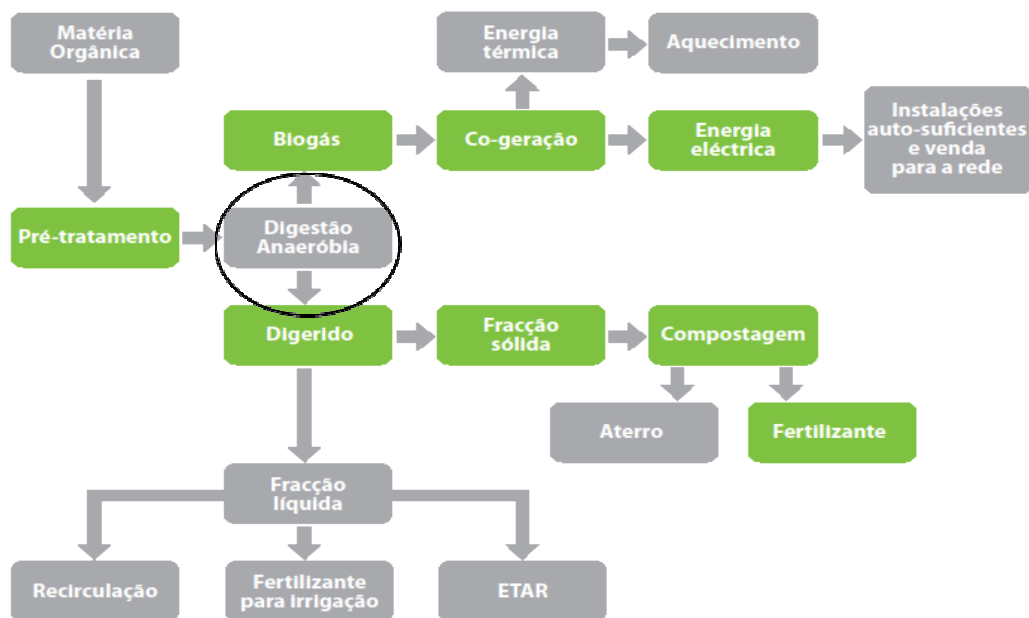


Figura 11 - Diagrama esquemático de uma linha de tratamento convencional de águas residuais-

A digestão anaeróbia baseia-se em três processos, através de diversos tipos de bactérias na total ausência de oxigénio, sendo estes:

1- Hidrólise e Acidogénese

A matéria orgânica é convertida em moléculas menores pela ação de bactérias:

- Fermentativas – transformam produtos anteriores, em ácidos solúveis e álcoois.
- Hidrolíticas – transformam proteínas em peptídios e aminoácidos; polissacarídeos em monossacarídeos

2- Acetogénese

Nesta etapa, bactérias acetogénicas transformam os produtos do processo 1 em:

- Ácido acético (CH_3COOH);
- Hidrogénio (H_2);
- Hidróxido de Carbono (CO_2).

3- Metanogénese

As bactérias metanogénicas transformam o hidrogénio (H_2), o ácido acético e o dióxido de carbono em metano (CH_4). Estas bactérias são extremamente sensíveis a mudanças do meio tais como pH ou temperatura.

Existem dois tipos de processos de digestão anaeróbica:

- Digestão mesofílica - O digestor é aquecido entre 30 a 35°C e os resíduos ficam tipicamente no digestor durante 15 a 30 dias. A digestão mesofílica tende a ser mais robusta e tolerante que o processo termofílico, mas a produção de gás é menor, são necessários grandes tanques de digestão e a desinfecção, se necessária, e um processo separado.

- Digestão termofílica - O digestor é aquecido até 55°C durante 12 a 14 dias. Este sistema proporciona uma maior produção de metano, maior rendimento, melhor desinfecção de elementos patogénicos, mas requer tecnologia mais cara, maior quantidade de energia fornecida, e um mais sofisticado grau de controlo e monitorização.

2.1. Tipos de digestores

2.1.1. Caracterização geral

O processo de estabilização anaeróbia das lamas realiza-se em reatores designados por digestores, onde os microrganismos (biomassa) entram em contacto com a matéria orgânica a estabilizar (substrato) em condições de ausência de oxigénio molecular.

Contudo, este processo encontra-se em constante evolução, adaptando-se sempre as exigências ambientais da união europeia. Nas últimas décadas verificou-se um grande

avanço dos processos de tratamento anaeróbio, levando a uma nova geração de digestores, com elevadas concentrações de biomassa e tempos de retenção relativamente reduzidos.

Existem dois tipos de classificação de digestores, os contínuos ou descontínuos, quanto ao modo de alimentação ao digestor e de extração dos resíduos digeridos.

Nos digestores contínuos são qualificados por manterem uma quantidade constante de resíduo em digestão e por cada quantidade de resíduo introduzido ser em igual quantidade ao resíduo digerido. Já nos digestores descontínuos, a alimentação é feita em instantes alternados com a descarga do resíduo digerido. Este sistema tem vindo a cair em desuso, sendo apenas utilizado em digestão simplificadas, com um ou mais digestores.

Os principais tipos de digestores estão caracterizados na tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos principais tipos de digestores.

	Reatores anaeróbicos		
	Biomassa Suspensa	Biomassa Fixa	Híbridos
Tipos	<p>Reator de mistura completa (CSTR - <i>continuously stirred tank reactor</i>);</p> <p>Reator de leito de lamas de fluxo ascendente (UASB - <i>upflow anaerobic sludge blanket</i>);</p> <p>Reator de contacto;</p> <p>Reator de fluxo pistão (<i>plug-flow</i>)</p>	<p>Filtro anaeróbio de fluxo ascendente ou descendente;</p> <p>Reator de leito fluidizado ou expandido;</p>	<p>Filtro híbrido</p>
Funcionamento	Os microrganismos encontram-se suspensos no material em digestão, formando grânulos. A sua permanência no reator depende da capacidade de sedimentação desses agregados de microrganismos.	A retenção dos microrganismos é promovida através de meios de suporte inertes nos quais se fixam, formando uma fina película (biofilme) conservada no interior do reator.	
Vantagens	Tratamento de lamas ou de águas residuais com elevadas concentrações de matéria orgânica biodegradável em suspensão	Águas residuais cuja matéria orgânica se encontra maioritariamente na forma solúvel, por forma a evitar a sua colmatação.	Tratamento de águas residuais com teores de sólidos em suspensão numa faixa relativamente ampla, se bem que a sua eficiência seja mais elevada para cargas orgânicas solúveis.

Do conjunto de digestores referido, destacam-se os reatores de biomassa suspensa, em geral, e os reatores de mistura completa, em particular, por serem os mais aplicados na

estabilização de lamas em ETAR. As suas principais características estão indicadas na tabela 3:

Tabela 3 - Características dos reatores de biomassa suspensa.

Reatores de biomassa suspensa			
Reator de mistura completa (CSTR)	Reator de leito de lamas de fluxo ascendente (UASB)	Reator de contacto	Reator de fluxo pistão (plug-flow)
<ul style="list-style-type: none"> ✓ As lamas a digerir são misturadas com o conteúdo do digestor; ✓ O tempo de retenção tem que ser superior a velocidade da população microbiana. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Os microrganismos formam densos agregados; ✓ Possibilidade de sedimentar no interior do reator; ✓ Os grânulos de biomassa de maior dimensão formam um manto de lamas na zona inferior do digestor; ✓ No topo do digestor encontra-se um separador gás-sólido-líquido para separar a fase líquida. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ O controlo da perda de biomassa através da sua separação da fase líquida e recirculação ao digestor; ✓ Concentração de biomassa elevada no reator; ✓ Possibilidade de ocorrer uma redução da atividade metanogénica da biomassa. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ O substrato, ao ser introduzido numa das extremidades do reator, provoca a deslocação de toda a massa no interior do digestor; ✓ A saída de lama digerida é igual à quantidade da lama introduzida. ✓ As zonas segmentadas no interior do reator contribuem para que o tempo de retenção da biomassa seja superior ao tempo de retenção hidráulico do resíduo; ✓ Possuem um agitador de eixo horizontal.

Os digestores anaeróbios podem ser ainda classificados de digestores de baixa carga e de alta carga.

Os digestores de baixa carga, também designados por digestores convencionais, são os de concepção mais simplificada, sendo necessário um período de digestão de 30 a 60 dias. Normalmente, as lamas em digestão não são aquecidas nem agitadas. Apesar de o biogás induzir alguma mistura, verifica-se a estratificação dos resíduos digeridos nas seguintes quatro zonas de diferentes densidades: camada superficial de escumas, sobrenadante que retorna à linha de tratamento da fase líquida da instalação de tratamento, lamas em digestão e lamas digeridas (ver Figura 12).

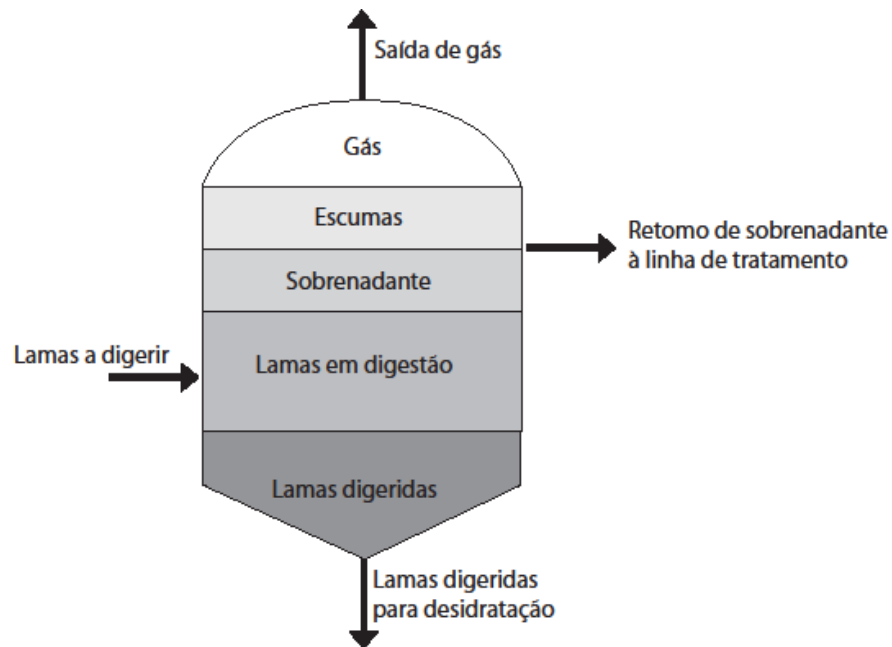


Figura 12- Diagrama esquemático de um digestor de baixa carga.

Os digestores de alta carga diferem dos anteriores pelo facto do substrato ser aquecido e completamente misturado, e de serem alimentados a um caudal constante. A combinação destes fatores concorre para a estabilidade das condições do processo de digestão, o que se repercute no aumento da sua eficiência e permite a construção de digestores de menores dimensões. Na Figura 13 apresenta-se um diagrama simplificado de um digestor de alta carga.

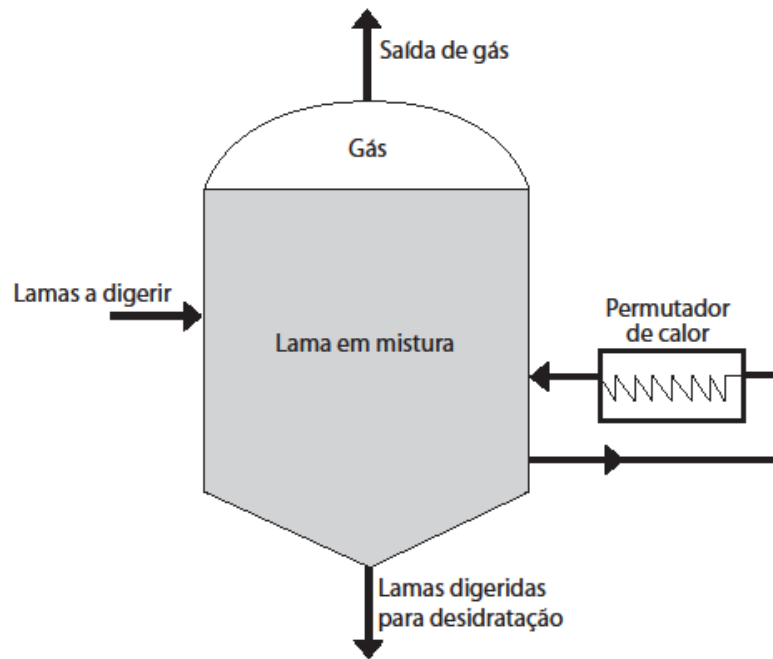


Figura 13 Diagrama esquemático de um digestor de alta carga.

Nos reatores de mistura completa, o tempo de retenção hidráulico (TRH) é idêntico ao tempo de retenção de sólidos (TRS). A mistura da lama em digestão pode ser assegurada pela recirculação do gás libertado no processo de digestão, pelo seu bombeamento ou por agitadores mecânicos. O aquecimento das lamas em digestão é efetuado por intermédio de permutadores de calor. A alimentação constante do reator é um aspeto que se reveste de particular importância, especialmente para as bactérias metanogénicas, de modo a manter na estabilidade do processo e a evitar choques de carga (WEF, 1998).

Os processos de digestão de alta carga são normalmente concebidos em dois estágios ou fases, materializados acoplando um digestor de alta carga a um segundo reator, comumente designado por digestor secundário, onde ocorrerá a separação sólido-líquido, permitindo, por um lado, a acumulação e posterior extração de lamas digeridas, e por outro, a saída do sobrenadante. Ao contrário do primeiro, o segundo reator não é aquecido nem agitado.

Na Figura 14 apresenta-se um diagrama esquemático de um processo de estabilização anaeróbia em dois estágios.

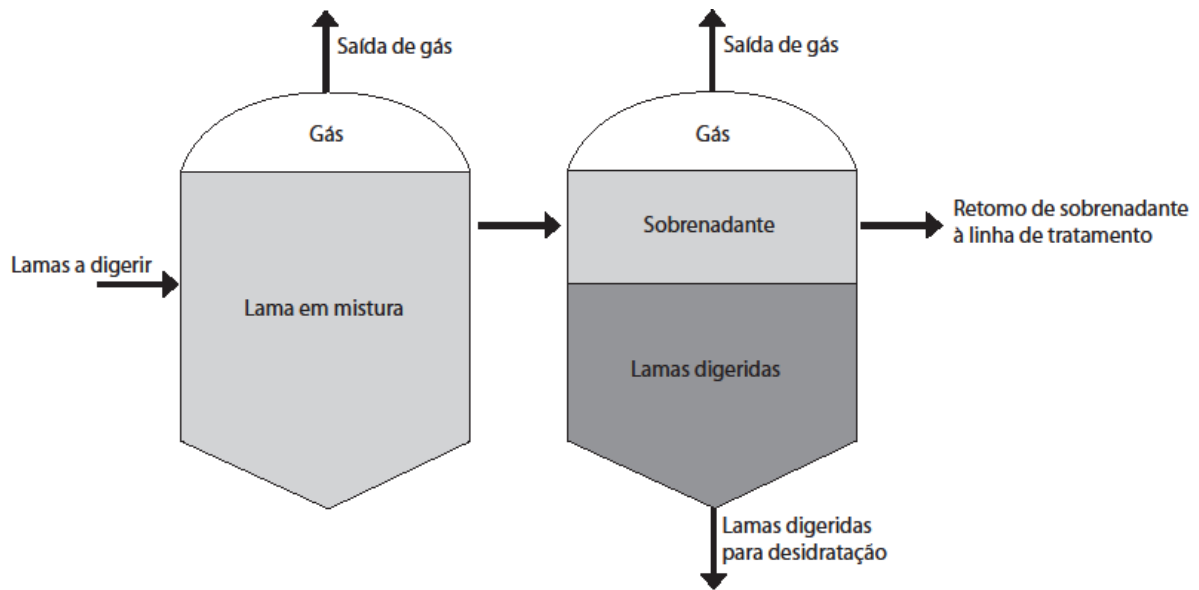


Figura 14 - Diagrama esquemático de um digestor de duas fases.

Os digestores podem apresentar diferentes formatos, sendo os formatos cilíndrico, convencional alemão e oval, os mais comuns. A Figura 15 ilustra os três formatos referidos.

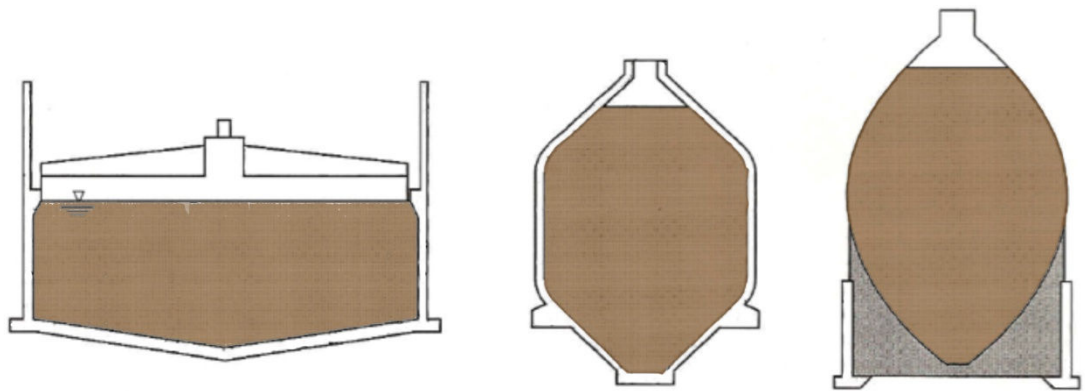


Figura 15 - Formato dos digestores anaeróbios mais comuns

A adoção do formato cilíndrico apresenta as seguintes vantagens:

- Permite armazenar um volume significativo de biogás;
- O reator pode ser equipado com cobertura para armazenamento de biogás;
- É facilmente enquadrável na paisagem envolvente;
- Permite a aplicação de técnicas construtivas convencionais, o que se traduz em custos de construção competitivos.

Em contrapartida o formato cilíndrico dificulta uma mistura eficiente, resultando na sedimentação e acumulação de areias e lamas. No entanto, maiores áreas superficiais são propícias à acumulação de escumas e à formação de espumas, que deverão ser removidas periodicamente.

Os digestores com formato oval, por apresentarem menor área superficial e serem mais eficientes na mistura, não favorecem a formação de sobrenadantes nem a acumulação de areias e permitem a obtenção de uma biomassa mais homogénea. No entanto, permitem o armazenamento de um volume muito reduzido de gás, o que obriga à instalação de um gasómetro exterior ao digestor. A sua forma exige cuidados adicionais com o projeto das fundações e com o dimensionamento anti-sísmico, estando a sua construção limitada a empresas especializadas. Os custos de construção destes digestores são claramente superiores aos dos digestores convencionais.

2.1.2. Condições necessárias às bactérias para a produção de Biogás

As condições de vida adequadas para as bactérias são:

- Impermeabilidade ao ar – A decomposição da matéria orgânica na presença de ar (oxigénio) irá produzir apenas dióxido de carbono, isto implica que o biodigestor seja totalmente vedado.
- Temperatura – As bactérias são muito sensíveis à variação da temperatura. A faixa ideal de temperatura para a produção de biogás é de 35°C a 45°C, sendo mais importante a não existência de variações bruscas da temperatura.
- Alcalinidade e pH – A alcalinidade é uma medida da quantidade de carbonato na solução (proveniente do dióxido de carbono (CO₂), produzido durante a digestão anaeróbia). Esta é importante pois a medida que se produzem ácidos no meio, o carbonato reage com estes, o que permite um controlo de acidez do meio. As bactérias sobrevivem numa faixa de pH entre 6,5 e 8,0.

- Teor de água - O teor de água dentro do biodigestor deve variar entre 60 % a 90 % do peso do conteúdo total.
- Nutrientes - Os principais nutrientes das bactérias são o carbono, nitrogênio e sais orgânicos.
- Tempo de retenção - Dado ser este o tempo necessário para que a matéria orgânica produza biogás, dentro do biodigestor (entre 10 a 30 dias).

Este processo de estabilização anaeróbia permite as lamas:

- A estabilização bioquímica;
- A destruição de parte significativa dos microrganismos patogênicos presentes nas lamas;
- A produção de biogás;
- A limitação da emissão de odores proveniente da matéria orgânica em decomposição;
- O favorecimento da eficiência da etapa de desidratação.

Contudo este processo de estabilização anaeróbia apresentar também algumas limitações, tais como:

- Decomposição parcial da matéria orgânica;
- As reações têm velocidades lentas, o que exige a construção de digestores volumosos e dispendiosos;
- Produção de sobrenadante com concentrações elevadas de sólidos voláteis (SV) e compostos azotados;
- Presença de humidade e de contaminantes no biogás, como dióxido de carbono e sulfureto de hidrogênio;
- Presença de siloxanos voláteis no biogás, que podem danificar os equipamentos de conversão energética (moto gerador, caldeira, *etc.*) pela formação de microcristais de sílica;
- Aumento da concentração de metais pesados nas lamas digeridas, em virtude da digestão reduzir significativamente a fração orgânica, não intervindo na fração mineral ou não degradável.

3. BALANÇOS DE MASSA E DE ENERGIA

3.1. Balanços de massa

A instalação de produção de biogás será dimensionada de forma a permitir a conversão da quantidade disponível de lamas no Concelho de Cantanhede, acrescida de 50% para prever a eventual expansão do mercado, e para ser possível dar resposta a possíveis picos de entrada de lamas. Na secção dois indicou-se que a quantidade disponível de lamas é de 400 toneladas de lamas por mês, pelo que acrescentando 50% se terá uma capacidade instalada de 600 toneladas/mês.

Considerando que o processo funciona em regime contínuo durante 340 dias/ano, prevendo 25 dias/ano para manutenção e eventuais paragens não programadas, o caudal diário de lamas é de 21,18 ton/dia. Arredondando este valor por excesso, irá considerar-se no seguimento o valor de 22 ton/dia.

A quantidade de biogás gerado depende de muitos e variados factores (Appels et al., 2008), mas considerando que o processo ocorre em contínuo, é possível obter até 0,5 m³ de biogás por kg de matéria seca biodegradável (sendo o volume referido às condições normais de pressão e temperatura, 25 °C e 1 atmosfera). Porém, este valor, segundo os mesmos autores, só se atinge quando o tempo de residência no digestor é de quase 100 dias. Quando os digestores possuem sistemas de agitação das lamas, por meios internos ou por recirculação, o tempo de residência é reduzido para entre 10 e 20 dias. No dimensionamento do digestor irá considerar-se um tempo de residência de 20 dias.

Não existindo dados disponíveis sobre as características das lamas a processar, consideraram-se os valores típicos referidos por Balat e Balat, 2009: cerca de 20% de matéria seca nas lamas, e desta, cerca de 90% corresponde a materiais biologicamente degradáveis. Assim, a combinação destes dois valores corresponde a 18% de matéria seca biodegradável nas lamas. Desta forma, a quantidade de matéria seca biodegradável pode ser estimada pela equação (1), em que M_s representa a quantidade diária de matéria seca (kg/dia), Q_d o caudal diário de lamas (Kg/dia) e M_d a percentagem de massa degradável.

$$M_s = Q_d \times M_d \quad (\text{Equação 1})$$

Considerando os dados indicados, a equação (1) resulta em:

$$M_s = 22\,000 \text{ kg/dia} \times 0,18 = 3960 \text{ kg/dia}$$

Tendo presente a produtividade em termos de biogás já referida, mas considerando que apenas se consegue 90% deste valor, estima-se a produção volumétrica de biogás pela equação (2), onde V_B representa o volume diário de biogás (m^3/dia), M_s a massa diária de matéria seca (kg/dia); V_{b/M_s} o factor teórico de conversão volume de biogás por matéria seca, e η o rendimento da conversão.

$$V_b = M_s \times V_{b/M_s} \times \eta \quad (\text{Equação 2})$$

Aplicando a equação (2), calcula-se a produção diária de biogás:

$$V_B = 3960 \text{ kg/dia} \times 0,5 \text{ m}^3/\text{kg} \times 0,90 = 1782 \text{ m}^3/\text{dia}$$

O valor calculado, face ao caudal de lamas considerado, está de acordo com os valores típicos reportados para algumas ETAR nacionais que produzem biogás (Monte, 2010), e com o valor médio obtido na ETAR de Aveiro Sul (comunicação pessoal).

Considerando a pressão de 1 atm e a temperatura de 25 °C, o caudal de biogás obtido pode ser estimado pela equação dos gases perfeitos (3):

$$n_B = PV/RT = 72,87 \text{ kmol/dia} \quad (\text{Equação 3})$$

A composição típica do biogás é, segundo Balat e Balat, 2009, de 55 a 65% de metano; 35 a 45% de dióxido de carbono, e vestígios de azoto (0-3%), de hidrogénio (0-1%) e (0-1%) de sulfureto de hidrogénio. Aceitando valores médios de 60% para o metano e 40% para o dióxido de carbono, e desprezando os outros constituintes, a massa molar média do biogás é dada por:

$$M_B = 0,60 \times 16 \text{ g/mol} + 0,40 \times 44 \text{ g/mol} = 27,2 \text{ g/mol} \quad (\text{Equação 4})$$

Através da massa molar média, é possível calcular o caudal mássico de biogás, tendo em conta o valor obtido pela equação (3):

$$m_B = 72,87 \text{ kmol/dia} \times 27,2 \text{ kg/kmol} = 1982 \text{ kg/dia} \quad (\text{Equação 5})$$

Além dos gases indicados, o biogás deve estar saturado, admitindo que este sai a uma temperatura igual à temperatura do digestor, de 35 °C. A esta temperatura a pressão de vapor da água é de 42,175 mmHG (Perry e Green, 1984), que, considerando a pressão igual a 1 atmosfera (760 mmHg), corresponde a 5,5% de água na fase gasosa. Considerando o caudal de biogás dado pela equação (2), em termos de base seca, o caudal molar de água resulta em:

$$n_A = (5,5/94,5) \times 72,87 \text{ kmol/dia} = 4,24 \text{ kmol/dia} \quad (\text{Equação 6})$$

Este caudal corresponde, em termos mássicos, a 76 kg/dia. Assim, em termos muito simplificados, o balanço de massa ao digestor está representado na tabela 4, considerando que a entrada é constituída pelas lamas, e as saídas pelo biogás saturado com água, e as lamas digeridas. O total de biogás está adicionado da quantidade de vapor de água. O caudal mássico de lamas digeridas foi obtido por diferença.

Tabela 4 - Resultados do balanço de massa ao digestor, considerando a abordagem simples descrita no texto (valores em kg/dia).

Entrada do digestor	Saída do digestor	
	Biogás	Lamas digeridas
22000	2058	19942
22000	22000	

A instalação deve incluir um condensador, para eliminar ou reduzir o teor de vapor de água no biogás, e que ao mesmo tempo também promove a redução da quantidade de

sulfureto de hidrogénio eventualmente presente. Os cálculos relativos ao condensador estão descritos na secção seguinte.

3.2 Balanços de Energia

Na instalação em projecto, os balanços de energia são relevantes no digestor, e no condensador da humidade do biogás. A energia transferida no digestor é a soma do calor necessário ao aquecimento da alimentação até à temperatura de funcionamento, de 35 °C (T_{dig}), com o calor perdido para o exterior. O calor perdido para o exterior é difícil de estimar, visto que depende das condições ambientais, principalmente a velocidade do vento e a temperatura do ar. Para ultrapassar esta situação, considera-se um sobredimensionamento de 20% do calor necessário ao aquecimento da alimentação.

Considerando a capacidade calorífica das lamas semelhante à da água (4200 J/kg °C, segundo Appels et al., 2008), e que a temperatura de entrada é em média igual a 15 °C (T_{alim}), obtém-se o calor a transferir pela equação (7). Na equação (7) m_L representa o caudal mássico de lamas à entrada do digestor (kg/dia), C_p representa a capacidade calorífica das lamas (J/kg °C), T_{dig} a temperatura dentro do digestor (°C) e T_{alim} a temperatura da alimentação (°C).

$$\begin{aligned} Q &= m_L C_p (T_{\text{dig}} - T_{\text{alim}}) = 22000 \times 4200 \times (35 - 15) \\ &= 1,848 \times 10^9 \text{ J/dia} \end{aligned} \quad (\text{Equação 7})$$

O valor obtido pela equação (7), após manipulação das unidades, corresponde a 21,4 kW. Considerando-se o sobredimensionamento de 20%, o calor a transferir no digestor é de 25,7 kW. Esta energia deve ser disponibilizada pelo sistema de cogeração a instalar.

A condensação parcial do vapor de água pode ser realizada através de água de arrefecimento, em circuito fechado com uma torre de arrefecimento. Se a água refrigerada estiver disponível a 15 °C, poder-se-á supor que a temperatura do biogás pode ser reduzida para 20 °C. À temperatura de 20 °C a pressão de vapor da água reduz-se para 17,535 mmHg, correspondendo a uma fracção molar de 2,3%. Por cálculo semelhante à equação (6), visto a conservação da quantidade de biogás, estima-se a quantidade de água

remanescente na fase gasosa pela equação (8), o que significa que se condensa $4,24 - 1,72 = 2,52$ kmol/dia.

$$n_A = (2,3/97,7) \times 72,87 \text{ kmol/dia} = 1,72 \text{ kmol/dia} \quad (\text{Equação 8})$$

O calor a remover no condensador é igual à soma da energia necessária para arrefecer o biogás, com o calor latente de vaporização da água. Considerando a composição do biogás usada como base para a equação (4), desprezando a presença da água, a capacidade calorífica do biogás ($C_{p,B}$) pode ser estimada a partir da equação do C_p do metano e do dióxido de carbono, obtidas de Felder e Rousseau, 2000 (C_p em J/mol °C e T em °C). Tendo em conta a composição do biogás, as equações (9) e (10) combinam-se na equação (11), obtendo-se a equação (12).

$$C_{p,m} = 34,31 + 5,469 \times 10^{-5} T + 3,661 \times 10^{-9} T^2 - 1,1 \times 10^{-11} T^3 \quad (\text{Equação 9})$$

$$C_{p,dc} = 36,11 + 4,233 \times 10^{-5} T - 2,887 \times 10^{-8} T^2 + 7,464 \times 10^{-12} T^3 \quad (\text{Equação 10})$$

$$C_{p,B} = 0,60 C_{p,m} + 0,40 C_{p,B} \quad (\text{Equação 11})$$

$$C_{p,B} = 35,03 + 4,975 \times 10^{-5} T - 9,351 \times 10^{-9} T^2 - 3,614 \times 10^{-12} T^3 \quad (\text{Equação 12})$$

Com a equação (12) e pela equação (13), estima-se o calor necessário remover para arrefecer o biogás, com T_1 igual a 35 °C e T_2 igual a 20 °C. Resolvendo a equação (13) obtém-se Q_1 de 38291 kJ/dia, que corresponde a 443 W. O valor calculado (13) é negativo, correspondendo o módulo ao calor a retirar.

$$Q_1 = n_B \int_{T_1}^{T_2} C_{p,B} dT \quad (\text{Equação 13})$$

O calor a remover para condensar o vapor de água é obtido tendo em conta a entalpia de vaporização da água, à temperatura de 28 °C, próxima da média entre 20 e 35 °C, de 2435,4 kJ/kg (Felder e Rousseau, 2000):

$$\begin{aligned} Q_2 &= 2,52 \text{ kmol/dia} \times 18 \text{ kg/kmol} \times 2435,4 \text{ kJ/kg} \\ &= 110470 \text{ kJ/dia} \end{aligned} \quad (\text{Equação 14})$$

O valor obtido de Q_2 , que corresponde a 1279 W, é suficientemente superior a Q_1 , o que valida a aproximação de não se ter considerado a variação de calor sensível devido à presença da água. O calor a retirar no condensador é assim de 1722 kW.

4. DIMENSIONAMENTO

A instalação de produção de biogás será constituída pelos seguintes equipamentos, cujos principais estão indicados no diagrama de blocos simplificado representado na figura 16:

- Um depósito de recepção das lamas;
- O digestor anaeróbio;
- O sistema de recirculação das lamas e de permuta de calor;
- O condensador de humidade e de remoção de sulfureto de hidrogénio;
- Um gasómetro para o armazenamento temporário do biogás;
- Um queimador, tipo tocha, para incinerar o biogás caso o seu volume exceda o volume do gasómetro;
- O motor de cogeração;
- Um sedimentador;
- Um depósito para recepção das lamas digeridas.

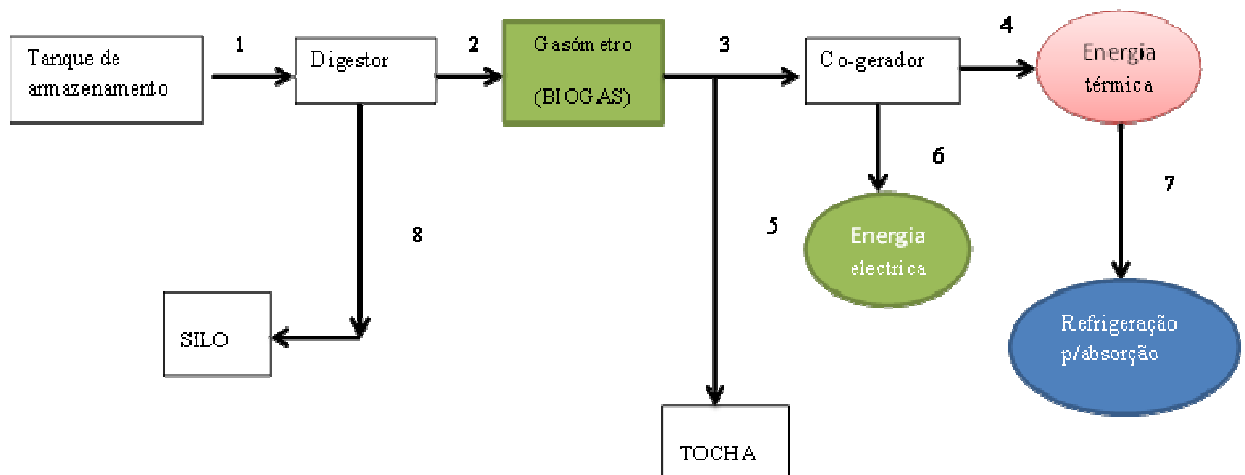


Figura 16 – Diagrama de blocos simplificado da unidade de produção de biogás. Não está representada a linha de recirculação de lamas no digestor, e a linha de circulação de água quente.

Além do equipamento referido, a instalação deve incluir um edifício de apoio, para os serviços administrativos, laboratório, vestiário e instalações sanitárias, e um edifício de protecção do motor de cogeração.

No seguimento procede-se ao dimensionamento do equipamento principal.

4.1 Dimensionamento do digestor

Para determinar as dimensões do digestor, o equipamento mais relevante da unidade de produção de biogás, irá considerar-se que o digestor é circular, com a altura igual a metade do diâmetro, com um volume de segurança de 20% do total.

Na secção 4 considerou-se que o caudal de lamas alimentado diariamente ao digestor é de 22 toneladas. A massa específica das lamas é superior à massa específica da água, e certamente variável. Considerando a massa específica igual 1 ton/m³ o caudal volumétrico das lamas é de 22 m³/dia, o que representa uma estimativa por excesso. Aceitando o tempo de residência de 20 dias, já referido na secção 4, o volume do digestor deverá ser 440 m³. Considerando a margem de segurança de 20%, o volume majorado é de 528 m³.

Considerando a relação indicada entre o diâmetro e a altura do digestor (D=2H), determina-se a geometria deste pela equação (15), usando o diâmetro com referência:

$$D = \sqrt[3]{\frac{8V}{\pi}} = 11,04 \text{ m} \quad (\text{Equação 15})$$

Considerando o diâmetro igual a 11 m, a altura do digestor é de 5,5 m.

4.2 Dimensionamento do tanque de receção das lamas

As lamas que chegam à unidade ficam armazenadas num tanque. Considerou-se um tempo de retenção de 2 dias, para efeitos de reserva para prever eventuais falhas de transporte ou disponibilidade das lamas. Tendo em conta que a instalação está a ser dimensionada para um caudal de lamas de 22 m³/dia, o volume do tanque é dado pela equação (16), onde T_r representa o tempo de residência, obtendo-se um volume é de 44 m³.

$$V = Q \times T_r \quad (\text{Equação 16})$$

Considerando que no caso deste depósito se define o diâmetro igual a metade da altura do tanque ($D=2H$), determina-se a geometria deste, obtendo-se o diâmetro igual a 11 m, a altura do tanque é de 5,5 m:

$$D = \sqrt[3]{\frac{8V}{\pi}} = 11,04 \text{ m} \quad (\text{Equação 17})$$

4.3 Dimensionamento do permutador de aquecimento das lammas

Considerando que é possível usar água quente para aquecer as lammas, vinda da unidade de cogeração à temperatura de 70 °C, e que deve regressar ao motor a 50 °C.

Optou-se por escolher um de tubos concêntricos, visto ser simples de instalar e de proceder à sua manutenção, ser pouco dispendioso, apesar de apresentar uma área reduzida de transferência de calor por unidade de volume

Para o cálculo da área, é necessário considerar o coeficiente global de transferência de calor que se pode retirar da literatura (Mateus, 2009), visto a gama ser de 1250-2500 W/m²K. Considerou-se o valor médio do intervalo:

$$U = 1875 \text{ W}/(\text{m}^2/\text{K})$$

A transferência de calor no permutador é motivada pelo gradiente de temperatura, que é representado pela média logarítmica da diferença de temperatura entre os fluidos, conforme equação (18):

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - T_1)}{\ln \frac{(T_1 - t_2)}{(T_2 - T_1)}} \quad (\text{Equação 18})$$

Sendo assim, a média da temperatura é de:

$$\Delta T_{ln} = 30,8 \text{ K}$$

A área de transferência de calor é dada pela equação (18), obtendo-se após substituição $A = 29,82 \text{ m}^2$. Se o tubo de recirculação de lamas tiver um diâmetro exterior de 5" (12,7 cm), o comprimento do permutador deve ser de 75 m. Este tipo de permutador costuma ser dividido em secções, pelo que ao se considerar um comprimento de 10 m, seria necessárias 8 secções.

$$Q = U \times A \times \Delta T \quad (\text{Equação 19})$$

4.4 Dimensionamento do condensador de humidade

Para o cálculo da área, é necessário considerar o coeficiente global de transferência de calor que se pode retirar da literatura (Incropera e DeWitt, 2000). Visto a gama ser de 1000-6000 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, para o caso de condensadores, optou-se por usar o valor médio:

$$U = 3500 \text{ (W}/\text{m}^2/\text{K})$$

Tal como no permutador já, a transferência de calor no condensador é motivada pelo gradiente de temperatura, que é representado pela média logarítima da diferença de temperatura entre os fluídos. Usando a equação (18), e tendo presente que se pretende diminuir a temperatura do biogás de 35 para 20 °C, usando-se água a 15°C e permitindo que esta aumente para 20 °C, a temperatura média é dada por:

$$\Delta T_{lm} = 2,90 \text{ K}$$

Utilizando-se a equação (19), obtém-se um valor de área igual a 170 m^2 . Este valor é muito elevado para se considerar um permutador de tubos concêntricos, pelo que se teria de considerar um permutador clássico de caixa e tubos, ou um permutador de placas. Caso se considerasse um permutador de placas, com dimensões de 1 × 2 m, o que corresponde a 2 m^2 por placa. Nesse caso, o permutador teria 85 placas. Caso cada elemento do permutador tenha 18 mm de espessura, a sua largura corresponde a 1,5 m, o que é um valor razoável.

4.5 Dimensionamento do gasómetro

O gasómetro servirá para reservar o biogás até dois dias (tempo de retenção considerado adequado). Aceitando que o biogás se comporta de forma ideal, e que se sobredimensiona o gasómetro por questões de segurança, pode-se considerar o volume dado pela equação, tendo em conta a equação 19, em que se corrigiu o volume para a temperatura para 35 °C. Se o volume do gasómetro não for suficiente, por exemplo devido a falha do motor de cogeração, existirá uma tocha para queima do excedente.

Supondo que o gasómetro é aproximadamente esférico, o seu diâmetro deverá ser de 9,6 m, assumindo-se 10 m.

$$V = 1782 \frac{m^3}{dia} \times \frac{308 K}{298 K} \times 2 \text{ dias} = 3683 m^3 \quad (\text{Equação 20})$$

4.6 Dimensionamento do cogrador

O poder calorífico inferior do biogás é referido como sendo de 6,5 kWh/m³ (Monte, 2010), obtendo-se tipicamente um rendimento de conversão em energia eléctrica de cerca de 30%, o que confere com valores típicos de algumas ETAR nacionais (Chelas, 2,27 kWh/m³; Beirolas, 1,74 kWh/m³; São João da Talha, 1,83 kWh/m³). Considerando a produção estimada de biogás, a energia eléctrica obtida é dada pela equação (21).

$$E = 6,5 \frac{kWh}{m^3} \times 0,30 \times 1782 \frac{m^3}{dia} = 3475 kWh/dia \quad (\text{Equação 21})$$

Convertendo as unidades para kW, o resultado da equação (20) é de 145 kW. Considerando uma margem de sobredimensionamento de 20%, a potência do motor de cogeração deve ser de pelo menos 174 kW. Este valor concorda razoavelmente com o valor obtido por acerto de escala da potência proposta por Akbulut (2012):

$$P_{\text{comparação}} = 289 \text{ kW} (1782 m^3/dia)/(2851 m^3/dia) = 181 \text{ kW}$$

4.7 Layout da instalação

Considerando as dimensões aproximadas dos equipamentos, representa-se na figura 17 um esboço do layout da instalação.

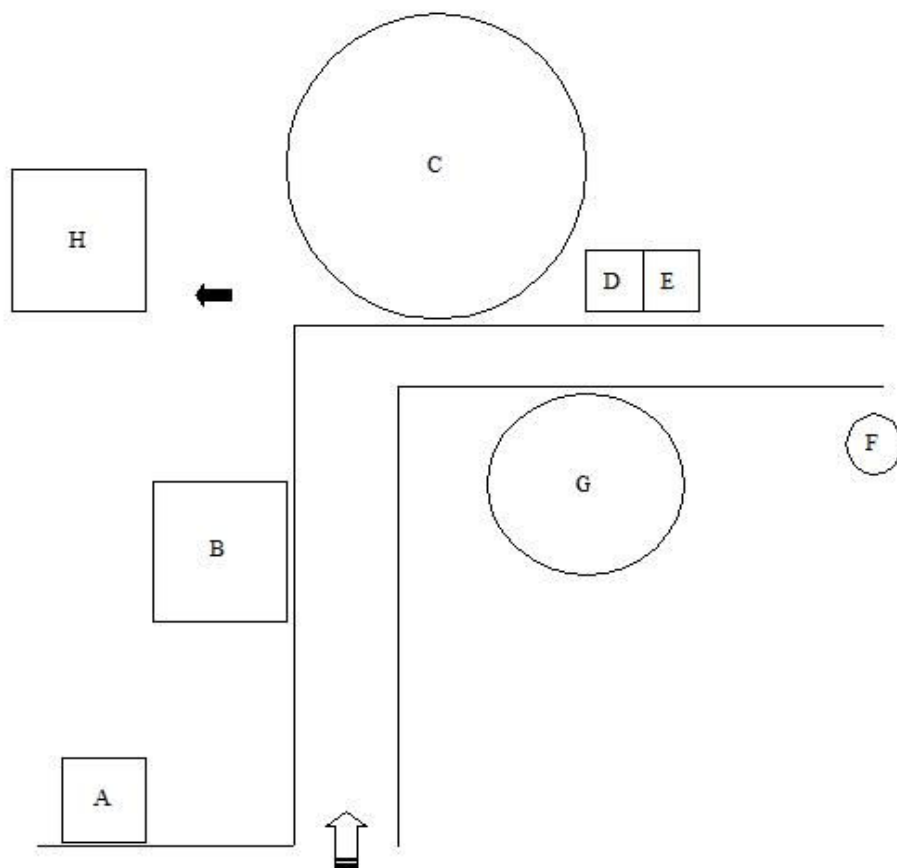


Figura 17 Layout da instalação da unidade de produção de biogás Não está representada a linha de recirculação de lamas no digester, e a linha de circulação de água quente. Entrada da matéria-prima (seta branca); Saída de lamas digeridas (seta negra); A - escritórios, sanitários, balneários e sala de refeição; B – tanque de armazenamento da matéria-prima; C – digester; D – condensador de umidade; E – cogenerador; F – TOCHA; G - gasômetro; H – silo de armazenamento das lamas digeridas.

5. ANÁLISE FINANCEIRA

Neste capítulo procede-se a uma análise financeira muito simplificada, em que são propostos alguns valores, e se utilizam outros de um trabalho semelhante publicado em 2012, já durante a elaboração deste projecto, em que se dimensiona uma instalação para usar excrementos da indústria da pecuária (Akbulut, 2012). O valor do investimento inicial foi obtido a partir do artigo referido, procedendo-se à correcção de escala pela regra dos 6/10. Os valores estão indicados na tabela 5. A título de exemplo, o custo do digestor foi estimado pela equação (22), sabendo que o custo do digestor indicado por Akbulut (2012) é de 119 200 €, sendo o seu volume de 2713 m³:

$$C_{\text{digestor}} = 119\,200 \text{ €} (528 \text{ m}^3)/(2713 \text{ m}^3) = 44\,646 \text{ €} \quad (\text{Equação 22})$$

Tabela 5 – Total do investimento previsto, discriminado pelos principais equipamentos (valores em euros)

Equipamentos	Preço(€)
Tanque de armazenamento	5 784
Digestor	44 646
Cogerador	263 981
Restantes equipamentos	452 729
Total do Investimento	767 141

Conforme se verifica na tabela 5, o total do investimento estimado é de 767 141€. A partir dos dados publicados por Monte (2010), é possível calcular que o valor médio do investimento em unidades de cogeração em Portugal é de 4336 €/kW, o que resulta no caso do presente projecto em 783 245 €, o que está muito próximo do valor da tabela.

Para estimar os custos anuais de produção, consideraram-se os valores indicados na tabela 6, onde os custos de transporte das lamas são estimados como sendo de 100 €/viagem, e que para transportar as 22 000 toneladas diárias de lama basta uma viagem (capacidade típica dos camiões de transporte). Considerou-se que o terreno será alugado, na Zona Industrial de Cantanhede, a um preço simbólico. Para calcular os custos de mão-de-obra supôs-se 5 pessoas, com um ordenado médio de 2000 €, incluindo todos os

impostos. Os custos gerais consistem em despesas várias: água, reagentes de laboratório, etc.

Tabela 6 – Estimativa do valor anual dos custos de produção.

Custo	Valor (€/ano)
Renda do terreno	4 000
Mão-de-obra	140 000
Custos gerais	5 000
Transporte das lamas	34 000
Total de custos anuais	183 000

Sendo assim os custos anuais, sem haver grandes contra-tempos, seriam de um total de 183 000€ por ano.

Para estimar as receitas de exploração do projecto considerou-se o regulado na Portaria n.º 140/2012, que prevê um valor base, um prémio de eficiência e um prémio especial para quando a cogeração utiliza combustíveis renováveis, como pode ser considerado no presente caso. O valor obtido pela venda da energia eléctrica à rede Nacional está indicado na tabela 7.

Tabela 7 – Cálculo do valor de venda da energia eléctrica, segundo a portaria nº 140/2012.

Componente	Valor (€/MWh)
Base	81,2
Prémio de eficiência	43,1
Prémio para fontes renováveis	8,1
Total	132,4

Tendo em conta a produção diária de 3475 kWh, a energia produzida anualmente pela instalação é de 1181 MWh, o que equivale a receitas no valor de 156 369 €. Este valor de receita não é suficiente sequer para cobrir o total de custos de exploração, que constam na tabela 6. Na capacidade projectada, a instalação não é viável. Nesta circunstância, procedeu-se a simulação para determinar a capacidade mínima para atingir um patamar de viabilidade.

Os resultados da simulação, em que se aumentou progressivamente o caudal diário de lamas tratado, estão representados na tabela 8, para um horizonte de funcionamento da

instalação de 20 anos. Os valores de produção de biogás e de energia eléctrica, e os custos de transporte, foram actualizados proporcionalmente ao caudal de lamas tratado. O Cash-Flow do projecto torna-se positivo quando o caudal de lamas é de 26 m³/dia, mas não é ainda suficiente para recuperar o investimento. O projecto permite recuperar o investimento, em 20 anos, mas sem ganhos financeiros, quando o caudal é de 31 m³/dia. Uma rentabilidade razoável (TIR = 10%), atinge-se quando o caudal de lamas é de 42 m³/dia.

Na figura18 Representa-se a evolução da TIR (Taxa interna de rentabilidade) com o aumento da capacidade de produção.

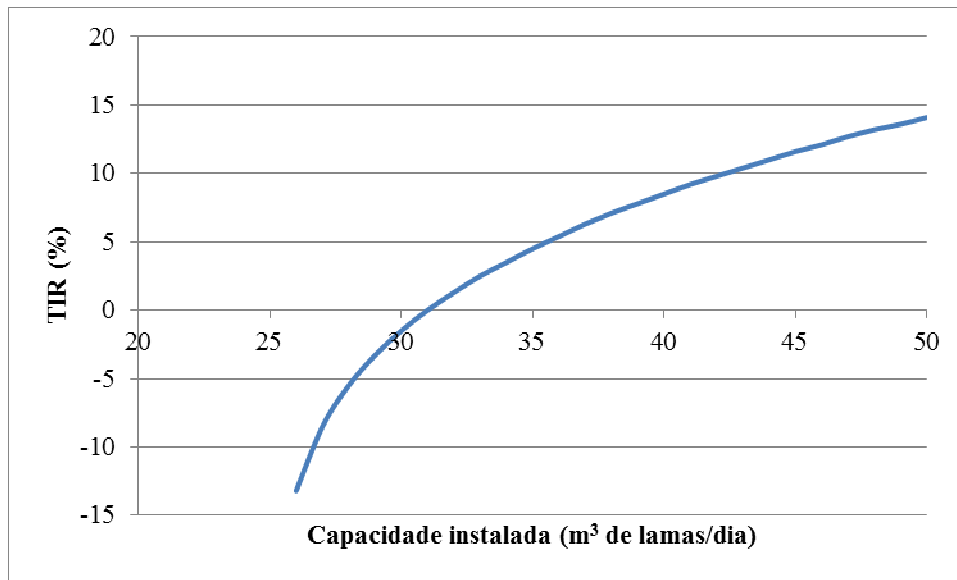


Figura 18 – Evolução da Taxa interna de rentabilidade do projecto (TIR) com o aumento da capacidade instalada, em termos da quantidade de lamas processadas (m³/dia).

Tabela 8 – Simulação dos indicadores financeiros do projecto, para diferentes capacidades de produção. Q = Caudal de lamas; V = Volume do digestor; T = Volume do tanque de recepção das lamas; INV = Investimento; P = Energia produzida; R = Receitas; C = Custos; RE = Resultados de exploração (= R-C); A = Amortizações (=INV/20); RAI = Resultados antes de impostos (=RE-A); IMP = Impostos (=RAI*0,25*1,10); RDI = Resultados depois de impostos (=RAI-IMP); CF = Cash Flow (=RDI+A); TIR = Taxa Interna de Rentabilidade.

Q (m³/dia)	V (m³)	T (m³)	INV (€)	P (kWh)	R (€)	C (€)	RE (€)	A (€)	RAI (€)	IMP (€)	RDI (€)	CF (€)	TIR (%)
22	528	44	767141	1181466	156369	183000	-26631	38357	-64988	0	-64988	-26631	ND
23	552	46	787877	1235169	163477	181521	-18045	39393	-57439	0	-57439	-18045	ND
24	576	48	808255	1288872	170584	180166	-9582	40412	-49995	0	-49995	-9582	ND
25	600	50	828296	1342575	177692	178920	-1228	41414	-42643	0	-42643	-1228	ND
26	624	52	848019	1396278	184800	177769	7030	42400	-35371	0	-35371	7030	-13,2
27	648	54	867441	1449981	191907	176703	15204	43372	-28168	0	-28168	15204	-8,5
28	672	56	886577	1503684	199015	175714	23301	44328	-21028	0	-21028	23301	-5,5
29	696	58	905441	1557387	206123	174793	31330	45272	-13942	0	-13942	31330	-3,3
30	720	60	924047	1611090	213230	173933	39297	46202	-6905	0	-6905	39297	-1,5
31	744	62	942407	1664793	220338	173129	47209	47120	89	24	113	47209	0
32	768	64	960531	1718496	227446	172375	55071	48026	7044	1937	8982	55071	1,3
33	792	66	978430	1772199	234554	171666	62887	48921	13965	3840	17806	62887	2,5
34	816	68	996114	1825902	241661	171000	70661	49805	20856	5735	26591	70661	3,5
35	840	70	1013590	1879605	248769	170371	78398	50679	27718	7622	35341	78398	4,5
36	864	72	1030868	1933308	255877	169777	86099	51543	34555	9502	44058	86099	5,4
37	888	74	1047955	1987011	262984	169216	93768	52397	41370	11376	52747	93768	6,3
38	912	76	1064858	2040714	270092	168684	101408	53242	48165	13245	61410	101408	7,1
39	936	78	1081584	2094417	277200	168179	109020	54079	54941	15108	70050	109020	7,8
40	960	80	1098140	2148120	284307	167700	116607	54907	61700	16967	78668	116607	8,5
41	984	82	1114530	2201823	291415	167243	124171	55726	68445	18822	87267	124171	9,2
42	1008	84	1130762	2255526	298523	166809	131713	56538	75175	20673	95849	131713	9,8
43	1032	86	1146840	2309229	305631	166395	139235	57342	81893	22520	104414	139235	10,4
44	1056	88	1162768	2362932	312738	166000	146738	58138	88600	24365	112965	146738	11
45	1080	90	1178553	2416635	319846	165622	154224	58927	95296	26206	121503	154224	11,6

6. CONCLUSÕES

O presente projecto tinha como objectivo dimensionar uma unidade de produção de biogás, e da sua conversão em electricidade, a partir de lamas de ETAR municipais, ou industriais, em que não existam condições de produção de biogás. Este objectivo decorreu da observação que ainda existem poucas ETAR em Portugal que produzem e aproveitam energeticamente o biogás. Numa actualidade em que cada vez mais se sente a necessidade de aumentar a produção de energia por fontes renováveis, considera-se que existe um potencial significativo no sector dos resíduos domésticos ou industriais.

Para atingir o objectivo proposto, dimensionou-se uma instalação capaz de produzir biogás a partir de lamas de ETAR, na região de Cantanhede. Segundo o que foi possível apurar, existem ETAR na região que já produzem biogás, mas a maioria ainda não aproveita esse potencial, principalmente por se tratarem de ETAR de pequenas dimensões. No conjunto dessas pequenas ETAR, estimou-se a disponibilidade de 400 toneladas de lamas por mês. Não se conseguiu apurar a quantidade de lamas produzidas em ETAR industriais da região.

Face à disponibilidade de lamas, definiu-se a capacidade da instalação com uma majoração de 50%, sendo assim de 600 toneladas por mês. A partir deste valor, resolveu-se os balanços de massa ao processo: correspondendo ao valor da capacidade instalada um caudal de lamas de 22 ton/dia, e assumindo um tempo de retenção de 20 dias no digestor, estimou-se o volume deste como sendo de 528 m³, e calculou-se uma produtividade em termos de energia eléctrica de cerca de 3500 kWh/dia.

Além do digestor, dimensionaram-se os principais equipamentos de processo, de forma simplificada, não se tendo entrado em detalhes de construção.

Através de uma análise financeira, também simplificada verificou-se que este projeto não será viável, não se conseguindo gerar receitas sequer para suportar os custos. Porém, através de simulação, em que se avaliou o impacte do aumento de capacidade, verificou-se que a instalação poderá ser viável, sendo possível recuperar o investimento, em 20 anos, mas sem ganhos financeiros, quando o caudal é de 31 m³/dia. Uma rentabilidade razoável (TIR > 10%), atinge-se quando o caudal de lamas é superior a 42 m³/dia.

Este resultado é interessante, visto que, apesar de ser lógica a verificação de que uma instalação de pequena dimensão não é viável – deve ser esta uma das principais razões para existirem poucas instalações a produzir biogás – aparentemente é possível viabilizar unidades que recolham e tratem de forma centralizada as lamas das ETAR de vários municípios, mesmo sem ser necessário um “mega” empreendimento. Esta observação pode representar um caminho para o futuro do biogás em Portugal.

O trabalho futuro poderá ser direccionado para melhorar o projecto, realizando-se cálculos mais aprofundados nos balanços de massa e de energia, no dimensionamento e na análise financeira. Apesar de se terem obtido informações junto dos serviços municipalizados da região, a recolha de informação mais pormenorizada, e junto de outras entidades, tais como os fornecedores de equipamentos, poderá contribuir para melhorar a qualidade das conclusões obtidas.

Outra possibilidade de trabalho futuro consiste na avaliação das potencialidades associadas à valorização das lamas digeridas, ou para obtenção de energia por queima directa, ou para aproveitamento como fertilizante.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akbulut, A.,(2012). Techno-economic analysis of electricity and heat generation from farm-scale biogas plant: Çiçekdağı case study”. *Energy*, 44, 381-390.
- André, A.A., Gonçalves, M. (2012). Auto-suficiência Energética na Indústria de Celulose. Apresentação no Seminário “Optimização Energética na Indústria”, Instituto Politécnico de Tomar.
- Appels, L., Dewil, R., Baeyens, J. e Degrève, J., (2008). Ultrasonically enhanced anaerobic digestion of waste activated sludge, *International Journal of Sustainable Engineering*, 1, 94-104.
- Azevedo, R. (2003). Tecnologias de tratamento de águas residuais urbanas. Consultado em 25/10/2012, em Portal Naturlink: <http://www.naturlink.pt>
- Balat, M, Balat, H. (2009). Biogas as a renewable energy source – a review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 31, 1280-1293.
- Coelho, S. T.; Velásquez, S. M. S. G.; Silva, O. C.; Pecora, V.; Abreu, F. C. (2006). Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. In: Congresso Brasileiro de Energia, 11, 2006, Rio de Janeiro.
- Decreto-Lei n.º 446/91 de 22 de Novembro, MINISTÉRIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS
- Decreto-Lei n.º 118/2006 de 21 de Junho, MINISTÉRIO DO AMBIENTE, DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL
- Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009 relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE

Directiva n.º 86/278/CEE, MINISTÉRIO AMBIENTE E RECURSOS NATURAIS

Directiva n.º 91/271/CEE, do Conselho, de 21 de Maio, relativamente ao tratamento de águas residuais urbanas que altera o Decreto-Lei n.º 152/97, de 19 de Junho

Felder, R. M., Rousseau, R. W. (2000). *Elementary Principles of Chemical Processes*, 3rd ed., New York: John Wiley & Sons.

Gonçalves, J., Leitão, J., Carvalho, M. & Matos, J. (2001). Produção e Destino Final de Lamas de ETAR em Portugal – Situação Actual e perspectiva de evolução. Consultado em 18 de Janeiro de 2007, em APDA- Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Águas: <http://www.apda.pt>

Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2002). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 5th ed., John Wiley and Sons.

Lebre, N. (2012). Cogeração e Biometanização em Digestão Anaeróbia na ETAR de Abrantes, Apresentação no âmbito da unidade de formação “Optimização dos Recursos Energéticos”, Instituto Politécnico de Tomar.

Mateus, D.M.R. (2009). *Fundamentos de Transferência de Calor*, Manuais do IPT, Instituto Politécnico de Tomar.

Mateus, D.M.R., Pinho, H.J.O., Vaz, M.M. (2012). Zonas Húmidas Construídas: Uma alternativa sustentável para tratamento de águas residuais. Apresentação no XIX Congresso da Ordem dos Engenheiros, 18 e 19 de Outubro, Lisboa.

Monte, M.M. (2010), “Contributo para o Estudo da Valorização Energética de Biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais”, Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Sanitária

Perry, R. H., Green, D. (1984). *Perry's Chemical Engineers Handbook*, McGraw-Hill, Singapore.

Reis, F.Z. (2012). Aproveitamento de Energia na Indústria de Destilação. Apresentação no Seminário “Optimização Energética na Indústria”, Instituto Politécnico de Tomar.

Santo, F., (2008), Editorial: “Na Natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma”, INGENIUM, pp. 5, Maio/Junho 2008.

WEF, (1998), Design of Municipal Wastewater Treatment Plants, Water Environment Federation Manual of Practice N.º 8, Volume 3, fourth edition, EUA