



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# **Estudo de Melhorias em ETAR com Produção de Biogás e Geração de Eletricidade ETAR Municipal de Abrantes**

**Cláudia Maria da Eira Costa**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia e Gestão Industrial**  
(2º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Alexandre Borges de Miranda  
Coorientador: Prof. Doutor Davide Sérgio Baptista da Fonseca

**Covilhã, Outubro de 2014**



Ao apoio recebido pela minha família.

Aos meus filhos, Celina e Luís.



# **Agradecimentos**

Ao Professor Doutor Alexandre Borges Miranda e ao Professor Doutor Davide Sérgio Baptista da Fonseca, do Departamento de Engenharia Eletromecânica da Universidade da Beira Interior, pela emoção com que orientaram o meu trabalho.

A Nelson Lebre e equipa da Abrantáqua pela receção nas suas instalações e pelo apoio técnico prestado.



## Resumo

A Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) da Fonte Quente, situada em Alferrarede, serve a Cidade de Abrantes do Distrito de Santarém. Anteriormente gerida pela Câmara Municipal passou em 2007 para a gestão de Abrantáqua Serviço de Águas Residuais Urbanas do Município de Abrantes, S.A.

Além de cumprir a sua função no tratamento das águas residuais, trata as poluentes águas ruças dos lagares de azeite da região, com o benefício no aumento da produção de biogás. A lama mista resultante da clarificação das águas residuais é misturada com as águas ruças (codigestão) prosseguindo para um digestor isolado onde ocorre a decomposição da matéria orgânica por microrganismos anaeróbios (digestão anaeróbia) cujo metabolismo produz metano e dióxido de carbono, os principais componentes do biogás.

Este trabalho pretende destacar a importância da melhoria contínua em instalações com produção de energia elétrica através de fontes de energia renovável e demonstrar a aplicabilidade de ferramentas simples do Pensamento *Lean*, como o mapeamento da cadeia de valor ou *Value Stream Mapping* (VSM) no diagnóstico e melhoria global de uma instalação.

Do estudo do mapa atual (*as-is*) ressaltam elevados consumos de energia elétrica de alguns processos, baixa disponibilidade dos equipamentos/processos, elevados custos de Manutenção, essencialmente Curativa. Através de um gráfico de Pareto das horas de paragem, foi priorizada a determinação da causa raiz para as atuais 4968 horas de paragem de um grupo motor-gerador, sem data esperada para resolução. A solução mais premente prende-se com a implementação de um programa de Manutenção Produtiva Total, onde a Manutenção autónoma é uma prioridade.

Outras melhorias sugeridas incluem a utilização de substratos disponíveis, nomeadamente das lamas das restantes 26 ETAR do Distrito; esgoto de suiniculturas e resíduos sólidos biodegradáveis de restaurantes, cooperativas e mercados de frutas e legumes para aumento da produção de biogás, rentabilizando a capacidade dos digestores e dos motores-geradores, como mencionado na memória descritiva do projeto da ETAR; restringir o esgoto de indústrias da área metalomecânica com elevados metais pesados, para que as lamas digeridas sejam rentabilizadas como fertilizante natural da área florestal e agrícola da região.

## Palavras-chave

Energia renovável, Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) Biogás, Digestor, Cogeração.



# Abstract

The Fonte Quente Waste Water Treatment Plant (WWTP) is located in Alferrarede and serves the City of Abrantes, from Santarém District. Originally it pertained to the City Council administration and, since 2007, was transferred to the Abrantáqua Serviço de Águas Residuais Urbanas do Município de Abrantes, S.A. management.

In addition to fulfill its role performing the municipality wastewater treatment, it also process olive mill effluents from the region, with the benefit in potentially increasing biogas production. The resulting sludge from wastewater clarification is mixed with olive mill wastewater (co-digestion) and proceeds to an insulated digester where the breakdown of organic matter occurs by anaerobic organisms (anaerobic digestion) whose metabolism produces methane and carbon dioxide, the main biogas components.

This Work aims to highlight the importance of continuous Improvement in facilities producing electric power from renewable energy sources and demonstrate the applicability of simple tools from Lean Thinking such as chain value or Value Stream Mapping (VSM) in diagnosis and the overall Improvement of a facility.

The study of the current map (as-is) emphasize high consumption of electricity for some processes, low availability of equipment and/or processes, high maintenance (essentially corrective) costs. Through a chart of stopping hours, it was prioritized to determine the root cause for the current 4968 stopping hours for one motor-generator set, with no expected date for resolution. The most compelling solution lies in implementing a Total Productive Maintenance program, where the autonomous maintenance is a priority.

Other suggested improvements include the use of available substrates, particularly sludge from the other 26 WWTP of the municipality, pig slurry and biodegradable solid waste from restaurants, cooperatives and fruit and vegetable markets to increase biogas production, thus maximizing the digester and engine generators capability, as mentioned in the descriptive document of the WWTP project. Also, it is of importance to restrict sewage from metallurgical industries with attendant high heavy metals content so that the digested sludge can be enhanced as natural fertilizer to the forest and agricultural municipality area.

## Keywords

Renewable Energy, Wastewater treatment plant (WWTP), Biogas, Digester, Combined Heat and Power (CHP).



# Índice

Agradecimentos .....	v
Resumo .....	vii
Palavras-chave .....	vii
Abstract .....	ix
Keywords .....	ix
Índice .....	xi
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas .....	xvii
Lista de Acrónimos .....	xix
Capítulo 1 Considerações Iniciais .....	1
1.1 Justificação e motivação .....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.3 Método seguido no projeto.....	3
1.4 Organização e temas abordados na dissertação .....	3
Capítulo 2 Energia renovável .....	5
2.1 Introdução .....	5
2.2 Caracterização energética nacional .....	5
2.3 Produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renovável .....	6
2.4 Produção de Eletricidade a partir do Biogás, em Portugal.....	8
Capítulo 3 Caracterização do sistema de digestão anaeróbia .....	12
3.1 Introdução .....	12
3.2 Digestão Anaeróbia.....	12
3.2.1 Digestão Anaeróbia descrita nas suas quatro etapas.....	14
3.2.2 Codigestão .....	15
3.3 Produção de fertilizante natural .....	16
3.3.1 Decreto-Lei N.º 276/2009 de 2 de Outubro .....	18
3.4 Visão Geral da Utilização de Biogás .....	18
3.5 Sistema de digestão anaeróbia .....	20
3.5.1 Armazenamento de substratos .....	21
3.5.2 Armazenamento e pré-tratamento de co-substratos.....	21
3.5.3 Bombas .....	22
3.5.4 Canalização para transporte de substratos .....	23
3.5.5 Equipamentos de agitação/mistura .....	23
3.5.6 Armazenamento das lamas digeridas.....	25
3.5.7 Armazenamento de biogás.....	25

3.5.8	Importância da purificação do biogás .....	26
3.6	Cogeração .....	27
3.6.1	O motor a biogás .....	27
3.6.2	Recuperação do calor da cogeração .....	28
3.7	Equipamento de medição e controlo .....	30
3.7.1	Equipamento de segurança.....	31
3.8	Layouts mais usuais num sistema de digestão anaeróbia .....	32
3.8.1	<i>Layout</i> quanto ao tamanho dos sistemas de digestão anaeróbia.....	32
3.8.2	<i>Layout</i> quanto ao processo de digestão anaeróbia .....	32
3.9	Tipos básicos de digestores .....	34
3.10	Digestores segundo outras características.....	35
3.10.1	Sistema de crescimento de bactérias .....	35
3.10.2	Temperatura .....	36
3.10.3	Configuração .....	38
Capítulo 4	Ferramentas Lean .....	40
4.1	Introdução.....	40
4.2	Técnicas e ferramentas de identificação dos desperdícios .....	41
4.3	Mapeamento da cadeia de valor .....	44
4.3.1	Desenho do Value Stream Mapping atual.....	45
4.3.2	Como definir o mapa de estado futuro? .....	48
4.4	Resolução de problemas com <i>A3 Report</i> .....	51
4.5	Total Productive Maintenance.....	51
4.5.1	Total Process Management .....	54
4.6	Single Minute Exchange of Die/Quick Changeover .....	55
Capítulo 5	Caso de Estudo .....	58
5.1	Introdução.....	58
5.2	Apresentação da ETAR Municipal de Abrantes.....	58
5.3	Três cenários da ETAR da Fonte Quente .....	62
5.3.1	Cenário teórico .....	62
5.3.2	Cenário atual .....	63
5.3.3	Mapeamento da cadeia de valor atual .....	66
5.3.4	Cenário Futuro.....	68
5.3.5	Melhorias que ressaltam do VSM atual .....	68
5.3.6	Priorização de um problema para determinar a causa raiz.....	69
Capítulo 6	Conclusões e trabalhos futuros.....	75
6.1	Conclusões.....	75
6.2	Trabalhos futuros .....	75

Referências Bibliográficas .....	77
Anexo I – VSM atual .....	80



## Lista de Figuras

Figura 2.1: Produção de Energia Elétrica e Potência Instalada em Portugal, baseadas na Produção de Biogás (2005-2012) .....	9
Figura 2.2: Comparação das emissões dos GEE, associados às diferentes opções de produção de eletricidade [9]. .....	9
Figura 3.1: Funções energéticas do biogás .....	20
Figura 3.2: Sistema de digestão anaeróbia [15] .....	21
Figura 3.3: Fluxo da matéria-prima no sistema de digestão [15] .....	22
Figura 3.4: Trituração e Alimentação de co-substratos [15] .....	22
Figura 3.5: Exemplos de diferentes tipos de bombas [15] .....	23
Figura 3.6: Princípios de agitação de digestores através de sistemas mecânicos, hidráulicos e de injeção de biogás [22] .....	24
Figura 3.7: a) Propulsor de parafuso, b) Misturador hidráulico [15] .....	24
Figura 3.8: Modos de mistura [24] .....	25
Figura 3.9: Motor de combustão interna [28] .....	28
Figura 3.10: Funcionamento de refrigerador por compressão e por absorção [30] .....	29
Figura 3.11: Vista geral de componentes de segurança existentes num sistema de biogás [15] .....	31
Figura 3.12: Sistema Suspenso de crescimento de bactérias [24] .....	35
Figura 3.13: Sistema de Crescimento de bactérias em mantas de lama [24] .....	36
Figura 3.14: Digestão de uma fase [24] .....	38
Figura 3.15: Digestão de duas fases [24] .....	39
Figura 4.1: Representação da casa Toyota Production System .....	41
Figura 4.2: Símbolos usados para o desenho do VSM .....	46
Figura 4.3: Exemplo de um VSM atual .....	48
Figura 4.4: <i>Ishikawa</i> e 5 porquês .....	50
Figura 5.1: Níveis de tratamento de águas residuais [40] .....	59
Figura 5.2: Diagrama linear da ETAR da Fonte Quente em Abrantes [39] .....	60
Figura 5.3: Balanço de massa no processo de codigestão patenteado pelo LNEG projetado para a ETAR de Abrantes em 2004 .....	62
Figura 5.4: Análise de Pareto dos consumidores de energia da ETAR Municipal de Abrantes .....	65
Figura 5.5: Análise de Pareto em horas de paragem entre Janeiro e Agosto 2014 .....	65



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Portugal e a taxa de dependência energética relativa ao exterior, em percentagem .....	5
Tabela 2.2: Fundos Comunitários [6] .....	7
Tabela 2.3: Instalações de Produção de eletricidade de origem renovável, em Portugal e Respetiva Potência Instalada [4].....	9
Tabela 3.1: Benefícios da Digestão Anaeróbia [12] .....	13
Tabela 3.2: Variação de composição de biogás e o respetivo rendimento para vários animais e plantas Fonte: Baseado em: a - [14]; b - [15] c - [13] .....	13
Tabela 3.3: Características complementares dos substratos a [17]; b [12].....	16
Tabela 3.4: Conteúdo de nutrientes segundo o tipo de lamas [16] .....	18
Tabela 3.5: Valores limite de concentração de metais pesados nas lamas destinadas à aplicação no solo agrícola [20] .....	19
Tabela 3.6: Valores limite de microrganismos nas lamas destinadas à agricultura [20]	19
Tabela 3.7: Composição química do biogás de acordo com os resíduos [21] .....	19
Tabela 3.8: Características químicas e físicas do biogás [21] .....	20
Tabela 3.9: Impurezas do biogás, possível impacto e tratamento [24].....	26
Tabela 3.10: Vantagens e desvantagens para o motor de combustão interna [7] .....	28
Tabela 3.11: Dimensão dos sistemas de digestão anaeróbia [15].....	33
Tabela 3.12: Tipos de Digestores Anaeróbios segundo três características [24].....	35
Tabela 3.13: Gamas de temperatura ideal para as bactérias formadoras de metano [24]	37
Tabela 3.14: Comparação entre Digestores Mesofílicos e Termofílicos [24] .....	37
Tabela 4.1: 5 M + Q + S [32].....	42
Tabela 4.2: Implementação de Total Productive Maintenance em doze etapas [38] .....	57
Tabela 5.1: Levantamento dos consumidores de energia elétrica na ETAR da Fonte Quente .....	63
Tabela 5.2: Balanço entre custos e proveitos.....	69
Tabela 5.3: Melhorias sugeridas .....	70
Tabela 5.4: A3 Report.....	74



## Lista de Acrónimos

APA	Agência Portuguesa do Ambiente
APREN	Associação Portuguesa de Energias Renováveis
COD	<i>Chemical Oxygen Demand</i>
CEP	Controlo Estatístico do Processo
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ETAR	Estação de Tratamento de Águas Residuais
FEADER	Fundo Europeu Agrícola de Desenvolvimento Rural
FC	Fundo de Coesão
FEDER	Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional
FEEI	Fundos Europeus Estruturais e de Investimento
FER	Fontes de Energia Renovável
GEE	Gases de Efeito Estufa
INEGI	Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
JIT	<i>Just-In-Time</i>
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
OT	Objetivo Temático
PNAEE	Plano Nacional de Ação Eficiência Energética
PNAER	Plano Nacional de Ação Energias Renováveis
PRE	Produção em Regime Especial
SMED	<i>Single Minute Exchange of Die/Quick Changeover</i>
SPC	<i>Statistical Process Control</i>
TPM	<i>Total Productive Maintenance</i> ou <i>Total Process Management</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>



# Capítulo 1

## Considerações Iniciais

### 1.1 Justificação e motivação

Uma Estação de tratamento de águas Residuais (ETAR) apresenta custos elevados em energia elétrica, pela especificidade de processos que requerem o seu funcionamento em contínuo. “A energia renovável que mais contribui para a eficiência energética da atividade de tratamento de águas residuais é a valorização do biogás proveniente do tratamento biológico das lamas das ETAR” [1], pelo que deve ser promovida a melhoria contínua destas instalações, rentabilizando a produção de biogás e de energia.

Os indicadores de avaliação de uma ETAR referem-se à qualidade da água, funcionamento dos órgãos e capacidade de remoção de sólidos, nutrientes orgânicos, substâncias tóxicas e poluentes patogénicos. Os sólidos totais são compostos por sólidos em suspensão<sup>1</sup>, sedimentáveis<sup>2</sup> ou não sedimentáveis e por sólidos filtráveis: coloidais<sup>3</sup> ou dissolvidos<sup>4</sup>. Os nutrientes a remover compreendem o fósforo e o nitrogénio. As substâncias tóxicas podem incluir metais pesados, amónia, sulfureto de hidrogénio, compostos de nitrogénio orgânico, etc. Os poluentes patogénicos incluem vírus, bactérias, etc.

Uma ETAR tem como função a despoluição de efluentes líquidos de origem doméstica, instituições e empreendimentos comerciais, industriais ou agrícolas, devolvendo-os ao meio hídrico em condições seguras para animais e plantas. As lamas resultantes são um resíduo que poderá ser aproveitado para a geração de biogás. Uma estação de tratamento inclui operações unitárias e processos unitários; nas operações predominam tratamentos por forças físicas como: gradagem, agitação e mistura, floculação, sedimentação, flutuação, filtração, transferência gasosa; nos processos unitários predominam os tratamentos químicos e biológicos; os químicos incluem precipitação, adsorção, desinfecção, osmose inversa e troca iónica, por sua vez, os biológicos incluem digestão aeróbia, anaeróbia e remoção de azoto e fósforo.

O tratamento deve processar-se em quatro fases sucessivas, designadamente: tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. A **fase preliminar** engloba a obra de entrada onde são retiradas as areias (desarenação por ponte raspadora de fundo) que causariam

---

<sup>1</sup> Mistura heterogénea com dimensão superior a  $1,2 \mu_m$  e corresponde à porção de sólidos retida num filtro. São constituídos por sólidos suspensos voláteis (matéria orgânica) e sólidos suspensos fixos (matéria inorgânica).

<sup>2</sup> Decantam após 60 minutos.

<sup>3</sup> Sólidos com dimensões entre  $1 \mu_m$  e  $1 \mu$

<sup>4</sup> Moléculas orgânicas e inorgânicas que estão em solução com a água; dimensões  $<1 \mu_m$

abrasão nas tubagens e os resíduos de maiores dimensões como papéis, trapos, madeira, plásticos, que causariam o entupimento de canalizações, através de duas grades (gradagem). As gorduras são retiradas por intermédio de um processo de desengorduramento por ponte raspadora de superfície. Nesta fase também se encontra um canal Parshall que permite controlar a velocidade a montante. **No tratamento primário** ainda se encontram sólidos de pequeno porte em suspensão, pelo que um decantador primário remove os flutuantes e sedimenta gradualmente os sólidos de maior densidade formando a lama primária bruta. Neste processo poderá ser necessário recorrer à adição de cloreto de ferro que se aglomera ao fósforo, precipitando-o em flocos de matéria orgânica poluente de maior dimensão. **O tratamento secundário** engloba um processo de tratamento biológico cuja finalidade é a eliminação do nitrogénio e um processo de decantação onde ocorre a remoção de sólidos, matéria orgânica não sedimentável e de fósforo. A remoção do nitrogénio ocorre através de um processo de nitrificação-desnitrificação<sup>5</sup> e decantação. Os microrganismos aeróbios alimentam-se da matéria orgânica, crescem e formam flocos de biomassa que sedimentam, facilitando a separação da água que sai límpida e sem cheiro. Esta é a separação das fases sólida e líquida. As chamadas lamas secundárias, biológicas ou ativadas, por serem compostas por uma massa de microrganismos, são em parte recirculadas novamente para o tratamento biológico onde se juntam às águas recebidas da decantação primária a fim de darem continuidade à presença de microrganismos aeróbios essenciais à agregação da matéria orgânica poluente, o excesso junta-se às lamas primárias, formando as lamas mistas. **O tratamento terciário** trata o efluente líquido, eliminando-lhe nutrientes não removidos no tratamento primário e secundário e microrganismos patogénicos; entre as opções de desinfecção encontram-se a aplicação de cloragem, ozono e canal de ultravioletas.

As lamas mistas seguem para um processo de **digestão anaeróbia** num digestor primário onde a matéria orgânica é decomposta em ambiente sem oxigénio pela ação de bactérias anaeróbias, do seu metabolismo é libertado o biogás que é composto essencialmente por metano com um elevado poder calorífico, pelo que a energia mecânica resultante da queima de biogás vai acionar um gerador, produzindo energia elétrica e calor. A energia elétrica abastece a própria instalação, podendo ser injetada na rede nacional. O calor pode ser aproveitado internamente para o processo de digestão anaeróbia ou para gerar frio ou fornecido a edifícios exteriores. Seria de todo o interesse, pois, que fosse feita uma análise mais aprofundada da instalação, detetando possíveis falhas, a determinação das suas causas e a elaboração de propostas de melhoria.

---

<sup>5</sup> Processo controlado a nível de temperatura, pH e oxigénio dissolvido que visa a remoção completa do nitrogénio proveniente de matéria orgânica em decomposição de produtos químicos, de óleo dos fritos, matéria fecal, urina, etc., cujo excesso pode provocar a proliferação de algas e a extinção da fauna em ambiente aquático. A Nitrificação processa-se em duas fases e consiste na oxidação (o oxigénio é fornecido por ventiladores) dos iões de amónia ( $\text{NH}_4^+$ ) formando nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e na posterior oxidação de nitrito, formando nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ). A Desnitrificação remove completamente o nitrogénio do sistema pela retenção do fornecimento de oxigénio (em câmaras anóxicas), pelo que as bactérias o vão buscar ao nitrato. Do seu metabolismo resulta nitrogénio gasoso que é libertado para a atmosfera.

## 1.2 Objetivos

Pretende-se caracterizar os processos globais de uma ETAR com produção de biogás, analisar as características do processo produtivo recorrendo a ferramentas simples de *Lean Manufacturing*, detetando “dores crónicas”, a fim de determinar melhorias conducentes à maximização da produção de eletricidade através de um processo de produção de biogás.

## 1.3 Método seguido no projeto

Numa pesquisa inicial, e tendo em conta o objetivo de caracterização de uma ETAR, procedeu-se à observação do processo da ETAR de S. Miguel na cidade da Guarda, por ser próxima. A escolha intencional da ETAR Municipal de Abrantes prendeu-se com a sua representação como projeto pioneiro na produção de biogás; a recolha de dados iniciou-se por observação sistemática em grupo, com um plano previamente elaborado e baseado no mapeamento da cadeia de valor. Realizaram-se entrevistas estruturadas para a representação do processo e conhecimento das suas características. Para complemento da pesquisa foram requeridas respostas a questionários. A análise dos dados prendeu-se com o mapa traçado e o recurso a tabelas, gráficos e diagramas. A pesquisa bibliográfica acompanhou o Caso de Estudo para fundamentar os conceitos e procedimentos técnicos.

## 1.4 Organização e temas abordados na dissertação

A dissertação está organizada em seis capítulos com os seguintes fundamentos:

**Capítulo 1** - É o corrente capítulo, onde se fazem as considerações iniciais referentes à dissertação.

**Capítulo 2** - É caracterizada a produção nacional de energia elétrica proveniente de fontes de energia renovável; em âmbito Europeu, referem-se os objetivos assumidos por Portugal quanto à sua integração. São apresentados dados de instalações com produção de energia elétrica através do biogás, nomeadamente de aterros e de ETAR. Refere-se à crescente potência instalada e aos benefícios ambientais.

**Capítulo 3** - Pretende caracterizar um sistema de digestão anaeróbia, com os seus componentes e características, evidenciando a importância da codigestão, cogeração, produção de fertilizante natural, purificação de biogás, equipamento de medição e controlo para garantir um funcionamento eficaz da instalação.

**Capítulo 4** - Apresenta a filosofia *Lean Thinking* como ferramenta de eliminação sistemática do desperdício e criação de valor.

**Capítulo 5** - Baseia o Caso de Estudo da ETAR Municipal de Abrantes, na análise do VSM para o estado atual e nos indicadores disponíveis, dando uma visão geral da instalação e de problemas recorrentes. Apresenta três cenários e descreve, com algum detalhe, os problemas da situação atual, nomeadamente o chamado *bottleneck* (gargalo ou ponto de estrangulamento) da instalação, indisponibilidade dos dois grupos de cogeração por avaria e por falta de manutenção, taxa de ocupação reduzida para o digestor primário e para a cogeração, elevados consumos de energia elétrica, elevado consumo de reagentes, custos elevados de Manutenção Curativa e defeitos como a deposição das lamas digeridas em aterro. Refere soluções imediatas baseadas na análise destes *Kaizen Burst*. Apresenta um problema atual com grande impacto na produção de energia elétrica, através do *A3 Report*, onde são determinadas as causas e sugeridas soluções.

**Capítulo 6** - Centra-se nas conclusões e perspetivas de trabalho futuro.

## Capítulo 2

### Energia renovável

#### 2.1 Introdução

A crescente produção de resíduos, o crescente custo de energia elétrica e a necessidade de redução da utilização de combustíveis de origem fóssil destacam o processo de digestão anaeróbia como uma solução que apresenta atualmente custos de produção reduzidos devido às novas tecnologias.

#### 2.2 Caracterização energética nacional

Portugal tem vindo a aumentar a produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renovável, nomeadamente, aproveitamentos eólicos, solares fotovoltaicos, mini-hídricos e também térmicos a partir da combustão de biomassa e biogás, quando antes, produzia energia elétrica de origem predominantemente térmica onde geralmente eram usados combustíveis fósseis para aquecer a água, sendo responsáveis por uma grande parte das emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera. De acordo com a Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), “Portugal foi em 2012, o quarto país da União Europeia (UE15) com maior incorporação de energias renováveis”. Com escassos recursos energéticos de origem fóssil, como carvão, gás e petróleo, o País importou em 2012, segundo dados da DGEG, 79,8% destes recursos, como mostra a Tabela 2.1. A taxa de dependência externa tem vindo a diminuir desde 2005 (ano de reduzida produtividade das centrais hídricas por ser muito seco, daí a maior percentagem de dependência verificada até hoje), embora agravada em 2008 (ano em que ocorreu um pico no preço do petróleo) relativamente a 2007. A descida acentuada de 2009 para 2010 em 5,1% foi proporcionada pela aposta nas energias renováveis, em especial hídrica e eólica e na aplicação de medidas de eficiência energética. A subida da dependência energética de 2011 para 2012 em 0,5% deveu-se sobretudo ao aumento da importação de carvão para produção de energia elétrica (para compensar a redução na produção hídrica, uma vez que o ano foi seco) e ao aumento do saldo importador de energia elétrica.

Tabela 2.1: Portugal e a taxa de dependência energética relativa ao exterior, em percentagem

	Taxa de dependência energética (%)							
Ano	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Taxa	88.8%	83.9%	82.5%	83.3%	81.2%	76.1%	79.3%	79.8%

## 2.3 Produção de energia elétrica a partir de fontes de energia renovável

A maior fonte de poluição atmosférica resulta da queima de combustíveis fósseis para geração de energia, sustentando as necessidades humanas e o crescimento económico, as modernas tecnologias de conversão promovem a utilização mais intensiva das fontes de energia renovável (FER). O seu potencial ainda não está totalmente explorado apesar da grande variedade de métodos, do nível baixo ou ausência de emissões poluentes; são ambiciosos os objetivos políticos que promovem o desenvolvimento de conversão de energia e a valorização de resíduos, a nível europeu, [2].

Segundo a diretiva 2009/28/CE que promove a utilização de energia proveniente de fontes renováveis e estabelece os objetivos a atingir em 2020, e referindo a Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), assumiu-se para 2020, no quadro das metas europeias «20-20-20» e no âmbito do pacote energia-clima aprovado em 2009, uma redução de pelo menos 20% das emissões de Gases de Efeito de Estufa, em relação a 1990. Foram ainda definidas metas de aumento de eficiência energética em 20% e um aumento em 20% na energia proveniente de fontes renováveis no consumo final de energia; Portugal assumiu uma meta de 31%, englobando a produção de eletricidade, o aquecimento, o arrefecimento e os transportes.

A integração em larga escala de eletricidade de fonte renovável provém da ambição de cumprimento dos objetivos, do aumento de preços dos recursos energéticos fósseis devido à sua escassez progressiva, das questões de segurança de abastecimento energético e da elevada competitividade das tecnologias de produção de energia de fonte renovável [3]. Esta ideia é reforçada referindo-se que “a evolução dos sistemas energéticos mundiais está diretamente associada à linha do tempo das alterações climáticas” [4].

O Plano Nacional de Ação Energias Renováveis (PNAER 2020) e o Plano Nacional de Ação Eficiência Energética (PNAEE 2016) são instrumentos de planeamento energético responsáveis pelo estabelecimento do modo de alcançar as metas e os compromissos internacionais assumidos por Portugal em matéria de utilização de energia proveniente de fontes renováveis e de eficiência energética. “A meta de FER no consumo final bruto de energia em 2020 será cumprida através da incorporação de 59,6% de energia renovável na eletricidade” [5].

No sentido de diminuir os impactos ambientais no sector elétrico, existem incentivos à produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, integrando a Produção em Regime Especial (PRE). Os mecanismos de apoio ao investimento na utilização de energias renováveis são estabelecidos através de:

**Fundos Europeus Estruturais e de investimento:** “No que se refere à prioridade de promoção da produção e distribuição de energia de fonte renovável, os apoios vão concentrar-se no desenvolvimento de novas tecnologias, através do recurso a projetos-piloto (e.g. desenvolvimento de energias renováveis marinhas, biomassa, geotérmica, biogás, entre outras)”. “Justifica-se o apoio dos Fundos Europeus Estruturais e de Investimento (FEEI) pela necessidade de garantir os compromissos internacionais de Portugal na integração de energias renováveis no *mix* energético” [6]. Estes fundos vieram colmatar a reforma aplicada à subsidiação da tarifa *Feed-in*.

Na Tabela 2.2 encontram-se os montantes de cada um dos fundos, nomeadamente Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), Fundo de Coesão (FC) e Fundo Europeu Agrícola de Desenvolvimento Rural (FEADER). Os fundos comunitários que integram o Acordo de Parceria que Portugal propõe à Comissão Europeia, denominado Portugal 2020 estão alocados por Objetivo Temático (OT).

Tabela 2.2: Fundos Comunitários [6]

OT	Objetivos	FEDER (€)	FC (€)	FEADER (€)	Total (€)
OT4	Apoiar a transição para uma economia com baixas emissões de carbono em todos os sectores	675.934.998	757.000.000	193.739.638	1.626.674.636
OT6	Proteger o ambiente e promover a eficiência dos recursos	530.699.999	1.000.000.000	731.006.194	2.261.706.193

O OT 4 foca-se no alcance das metas traçadas no quadro das metas europeias «20-20-20», nomeadamente a redução em 25% do consumo de energia primária; atingir 31% do consumo final bruto de energia associado a FER, atuando apenas no caso de tecnologias consideradas emergentes ou pouco disseminadas como biomassa, biogás e geotermia.

Um dos objetivos específicos mencionados pelo OT 6 é “valorizar os resíduos, reduzindo a produção e deposição em aterro, aumentando a recolha seletiva, a reciclagem e a sua valorização em geral, o que também auxilia a viabilidade económica bio digestão”. Em Portugal, Continente e Ilhas, no ano de 2012, a percentagem de deposição de resíduos urbanos biodegradáveis em aterro foi da ordem dos 63% relativamente ao valor de referência de 1995 (2.253 kt), prevendo-se para Julho de 2020 um objetivo de 35% [3].

#### O Fundo Português do Carbono

São apoiados os projetos ou grupos de projetos, em território nacional, que conduzam a uma redução de emissões de gases com efeito de estufa, nomeadamente nas áreas da eficiência

energética, energias renováveis, sumidouros de carbono, captação e sequestração geológica de CO<sub>2</sub> e adoção de novas tecnologias que evitem emissões.

## 2.4 Produção de Eletricidade a partir do Biogás, em Portugal

As tecnologias de produção de energia elétrica através do biogás têm já um histórico longo e bem-sucedido. Os elevados custos de energia elétrica justificam a sua produção por este meio. A energia é disponibilizada de imediato, pode ser exportada e vendida para a rede nacional, salientando a sua influência na redução dos preços das empresas concessionárias. A eletricidade gerada resulta de carbono biogénico, isto é, faz parte do ciclo de carbono global e é por isso neutra em carbono [7].

A Figura 2.1 reflete a produção de Energia Elétrica e a Potência Instalada em Portugal, a partir do biogás, desde 2005 até 2012, de acordo com os dados disponibilizados no sítio da internet da DGEG [8].

A Figura 2.2 compara as emissões de Gases de Efeito de Estufa-GEE (gCO<sub>2</sub>/kWh), associadas às diferentes opções de produção de eletricidade (combustíveis fósseis e fontes de energia renovável) durante o ciclo de vida. Segundo U. R. Fritsche, “as emissões negativas previstas para o biogás para instalações de cogeração, explicam-se pela substituição do petróleo pelo biogás” [9]; “o desenvolvimento da tecnologia do biogás contribuirá para a redução das emissões de Gases de Efeito de Estufa (GEE) e da poluição do ar, por ser uma energia verde, e por contribuir para a redução do uso de combustíveis fósseis” [10]. “Entre 2005 e 2010, deu-se um decréscimo de 18,4% nas emissões nacionais de CO<sub>2</sub> em virtude do aumento da produção energética de fonte renovável” [6].

O sítio e base de dados de fontes renováveis de energia, Energias Endógenas de Portugal-e<sup>2</sup>p, é um projeto gerido em parceria entre a Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN) e o Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial (INEGI) e referencia, segundo a Tabela 2.3, todos os centros electroprodutores de base renovável existentes de Norte a Sul de Portugal incluindo os Açores, as respetivas potências instaladas e o ano de entrada em funcionamento ou se já estão licenciadas. “Existem atualmente em Portugal cerca de uma centena de sistemas de produção de biogás” [4].

Como nota, refere-se que a ETAR Municipal de Abrantes não se encontrava mencionada por não ter contrato de fornecimento para a rede nacional, pelo que foi inserida na tabela para fins do Caso de Estudo apresentado.

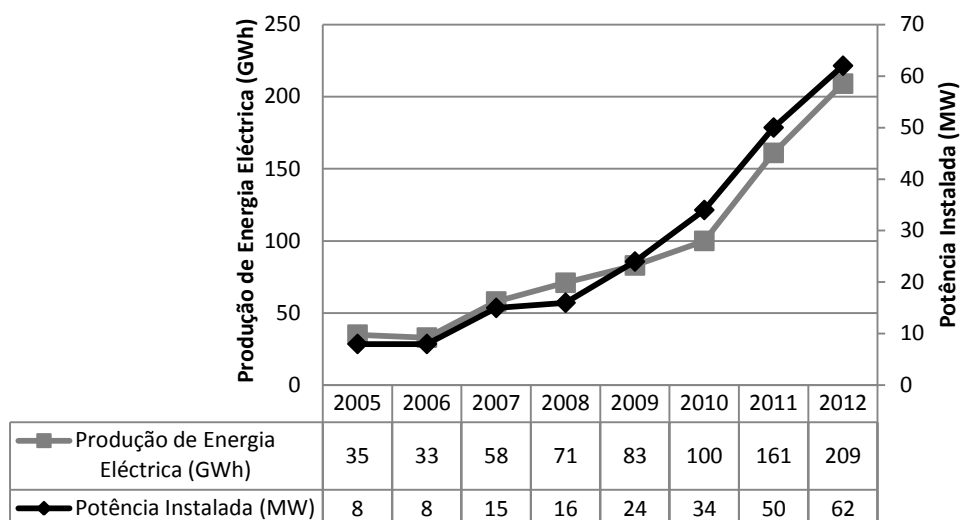


Figura 2.1: Produção de Energia Eléctrica e Potência Instalada em Portugal, baseadas na Produção de Biogás (2005-2012)

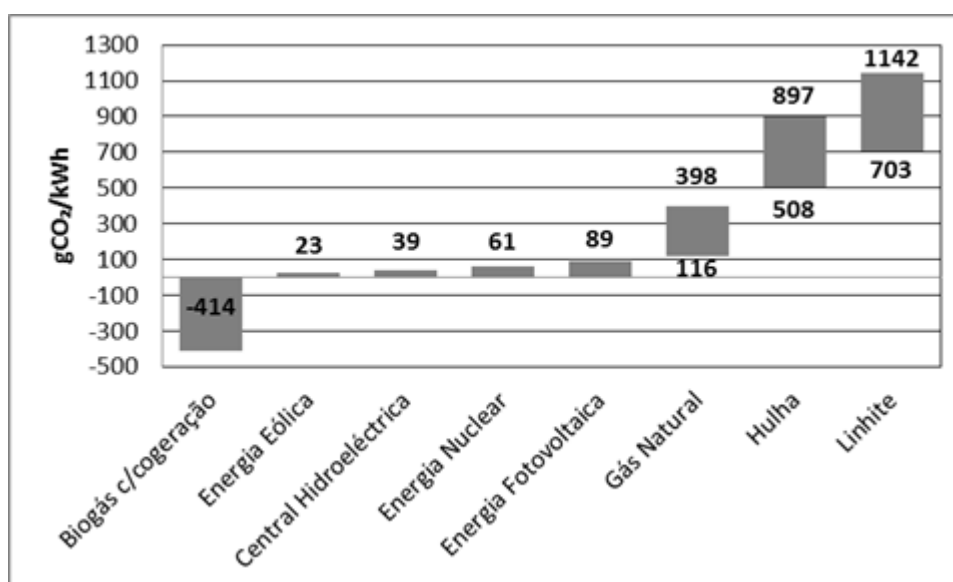


Figura 2.2: Comparação das emissões dos GEE, associados às diferentes opções de produção de eletricidade [10].

Tabela 2.3: Instalações de Produção de eletricidade de origem renovável, em Portugal e Respetiva Potência Instalada [4].

Localidade/Tipo de Instalação	Potência Instalada [MW]	Ano de entrada em Funcionamento ou estado atual
Aveiro		
Aveiro (Aterro Sanitário)	1,2	2007
Aveiro (CITVRSU)	3,2	2012
Braga		
Baixo Tâmega (Aterro Sanitário)	0,8	2007
Braval (Ecoparque)	1,1	2011

Tabela 2.3: Instalações de Produção de eletricidade de origem renovável, em Portugal e Respetiva Potência Instalada [4](Cont.).

Localidade/Tipo de Instalação	Potência Instalada [MW]	Ano de entrada em Funcionamento ou estado atual
Bragança		
Urjais (Aterro Sanitário)	0,8	2009
Castelo Branco		
Cova da Beira (Aterro Sanitário)	0,8	2011
Coimbra		
Coimbra (Aterro Sanitário)	0,9	2007
Coimbra (CITVRSU)	3,2	2012
Figueira da Foz (Aterro Sanitário)	0,8	2010
Faro		
Algarve (Central de Valorização Orgânica)	0,8	Licenciado
Barlavento (Aterro Sanitário)	1,7	2004
Sotavento (Aterro Sanitário)	1,2	2011
Leiria		
Leiria (Aterro Sanitário)	0,9	2004
Leiria (Central de Valorização Orgânica)	1,7	2011
Norte (ETAR)	1,4	2009
Lisboa		
Abrunheira (Ecoparque)	2,8	2012
Mato da Cruz (Aterro Sanitário)	1,7	2011
Oeste (Aterro Sanitário)	1,1	2011
Trajouce (Ecoparque)	0,8	2009
Valorsul (Central de Valorização Orgânica)	1,7	2005
Vila Franca de Xira (ETAR)	0,3	2007
Portalegre		
Avis (Central de Valorização Orgânica)	0,5	2011
Porto		
Ave (ETAR)	0,9	2011
Lipor (Matosinhos)	0,6	2009
Lipor (Valongo)	2,6	2009
Lustosa (Aterro Sanitário)	0,9	2007
Parada (ETAR)	0,5	2006
Penafiel (Aterro Sanitário)	1	2009
Sermonde (Aterro Sanitário)	4,5	2004
Sermonde (Central de Valorização Orgânica)	1,1	Licenciado
Santarém		
Abrantes (Aterro Sanitário)	0,8	2012
Abrantes (ETAR)	0,12	2004
Raposa (Aterro Sanitário)	1,1	2011
Setúbal		
Palmela (Ecoparque)	2,4	2011
Seixal (Central de Valorização Orgânica)	2,4	Licenciado
Seixal (Ecoparque)	1,9	2007
Viana do Castelo		
Valença (Aterro Sanitário)	0,5	2010
Viseu		
Planalto Beirão (Aterro Sanitário)	3,9	2010
R.A. Açores		
Agraçor	0,76	-

Pelo registo da Tabela 2.3, “o biogás produzido é na sua maior parte proveniente do tratamento de efluentes agropecuários (cerca de 85% e destas cerca de 85% são suiniculturas) e de alguns aterros de grande porte[4]”. Também verificamos a produção de biogás em algumas ETAR e em instalações de cogeração centralizadas [11]. Todas as centrais de produção de eletricidade através do biogás produzido em ETAR, mencionadas na Tabela 2.3 são enquadradas em PRE: produção de energia elétrica baseada em energias renováveis, resíduos, processos de cogeração, microprodução (potência instalada inferior a 5,75 kW).

## Capítulo 3

# Caracterização do sistema de digestão anaeróbia

### 3.1 Introdução

Em contexto histórico, há registos que provam a aplicação do biogás resultante da digestão anaeróbia no aquecimento das águas do banho, na Assíria no século X a.C., posteriormente, no século XVII, Jan Baptista Van Helmont percebeu que se formavam gases inflamáveis durante a decomposição da matéria orgânica e Sir Humphrey Davy, em 1808, concluiu que a digestão anaeróbia de dejetos bovinos produzia metano. Em 1930, Buswell identificou as bactérias e as condições de operação que promovem a produção de metano. A segunda guerra mundial na década de 40 levou a uma forte procura de energia e a produção de biogás registou um grande crescimento na Europa. Este processo foi esquecido nas décadas de 50 e 60 devido à relativa abundância de combustíveis fósseis. A crise energética dos anos 70 conduziu a um novo interesse por esta tecnologia de tratamento de resíduos orgânicos, produção de energia elétrica, calor, frio, combustíveis para automóveis e para uso doméstico [12]. Atualmente em contexto mundial, a produção de biogás é auxiliada pelo objetivo de tratamento de resíduos a baixo custo, produção de energia elétrica através de fontes renováveis e por tecnologia comprovada.

### 3.2 Digestão Anaeróbia

O princípio básico de todos os processos de digestão anaeróbia é o mesmo. A digestão anaeróbia processa-se no interior de um grande contentor estanque sem a presença de oxigénio, usualmente chamado de digestor, biodigestor ou reator, onde se mistura uma matéria-prima principal (também substrato ou biomassa) contendo matéria orgânica com outros resíduos orgânicos chamados co-substratos, de maior densidade energética com o propósito de se complementarem nas suas características, aumentando consideravelmente o rendimento em biogás. A matéria orgânica biodegradável é submetida a uma série de etapas bioquímicas, sem a presença de oxigénio, onde os microrganismos anaeróbios atuam na decomposição dos compostos orgânicos complexos até a obtenção de compostos mais simples. Do processo resultam dois subprodutos, o biogás e um composto estabilizado que poderá ser utilizado como fertilizante natural. A digestão anaeróbia é considerada uma solução económica no tratamento de resíduos orgânicos pelo baixo consumo de energia. São referidas vantagens ambientais na medida em que se diminui a fuga de metano e dióxido de carbono resultante da degradação natural da matéria orgânica, para a atmosfera. A Tabela 3.1 resume os benefícios da digestão anaeróbia.

Tabela 3.1: Benefícios da Digestão Anaeróbia [13]

Benefício para a Sociedade	Benefício para a Agricultura
Redução na utilização de combustíveis fósseis	Utilização ótima dos nutrientes contidos nos esgotos e resíduos
Economia no destino final das lamas	Reciclagem de matéria orgânica e nutrientes para as terras
Economia de energia no tratamento de esgotos e resíduos	Economia de nutrientes e água
Redução das emissões de metano (CH <sub>4</sub> ) e dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Proteção dos recursos hídricos
Redução de tratamentos complementares	Prevenção da lixiviação <sup>6</sup> de nitratos

Outros benefícios são a redução significativa da carga de sólidos, elevada estabilização das lamas digeridas com significativa redução de parasitas, vírus e bactérias patogênicas. O efluente líquido resultante pode ser usado para irrigação e o sólido como fertilizante natural.

O rendimento de biogás e a sua composição depende fortemente do substrato utilizado [14]. Na Tabela 3.2 estão indicados os valores de produção de biogás segundo resíduos de animais ou de plantas.

Tabela 3.2: Variação de composição de biogás e o respetivo rendimento para vários animais e plantas Fonte: Baseado em: a - [15]; b - [16] c - [14]

Substratos	MS (%) no substrato	Rendimento de biogás (m <sup>3</sup> /t MS)	Conteúdo de Metano (%)	Conteúdo de energia (GJ/t MS)
Estrume de vaca	8a, (7-15) b	297a, (200-400) b	55 a, 60 c	5,9 a
Estrume de porco	(3-13) b	(350-550) b	-	-
Estrume de galinha	(10-20) b	(350-550) b,	-	-
Palha	86 a	341 a	51 a	6,2 a
Milho Ensilagem	35 a, (15-40) b	576 a, (500-900) b	52 a, (48,75-56,19) c	10,8 a
Erva Ensilagem	25 a, (30-50) b	492 a, (500-700) b	54 a	9,5 a
Resíduos Sólidos Urbanos	40 a	308 a	60 a	6,6 a
Resíduos de comida	16 a	592 a	60 a	12,7 a
Bagaço	22 a	510 a	52 a	9,5 a
Resíduos de matadouros (estômago e intestino)	15 a	403 a	55 a	8 a
Gordura do esgoto	5 a, (8-50) b	900 a, (600-1300) b	68 a	22 a

<sup>6</sup> Os nitratos dos fertilizantes químicos são dissolvidos pela água de rega ou pelas chuvas e infiltram-se nos solos, atingindo os lençóis freáticos causando danos ao homem e ao ambiente.

O milho de ensilagem é um substrato rico em hidratos de carbono com um conteúdo baixo em metano (48,75-56,19%) mas, com um elevado rendimento de biogás, em contraste com o estrume de vaca que atinge cerca de 60% de metano com um rendimento de biogás comparativamente mais baixo [14]. “Quando os resíduos da agricultura são recuperados e utilizados na produção de biogás há benefícios ambientais evitando a sua decomposição ao ar livre com a consequente lixiviação (solubilização) de azoto em excesso nos solos e nos cursos de água” [17].

### 3.2.1 Digestão Anaeróbia descrita nas suas quatro etapas

As bactérias anaeróbias decompõem a matéria orgânica para produzirem a energia necessária ao seu metabolismo. Deste metabolismo resulta o metano como um subproduto. Esta degradação baseia-se em quatro etapas sequenciais, teóricas: Hidrólise, Fermentação ou Acidogénese, Acetogénese ou Desidrogenação e Metanogénese. Em cada uma delas atuam diferentes grupos de bactérias que se mantêm inter-relacionados, atuando praticamente em simultâneo no processo, fornecendo ao grupo de bactérias da etapa seguinte o alimento necessário ao seu metabolismo.

Na etapa de Hidrólise, ocorre uma reação química onde as bactérias hidrófilas quebram as ligações dos polímeros que são compostos orgânicos complexos (proteínas, hidratos de carbono e lípidos), transformando-os nos seus monómeros que são compostos orgânicos mais simples, respetivamente em aminoácidos, açúcares e ácidos gordos.

Na etapa de Fermentação ou Acidogénese, os produtos resultantes da Hidrólise são utilizados por outro grupo de bactérias, continuando a quebra das ligações, resultando em compostos de baixo peso molecular (ácidos gordos voláteis, ex.: ácido acético), em gases com teores reduzidos de monóxido de carbono (CO) e de hidrogénio (H<sub>2</sub>). Como subprodutos resultam o sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S) que tem um poder corrosivo e a amónia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) que pode ter efeitos tóxicos quando em excesso.

A etapa de Acetogénese consiste numa reação endotérmica, pelo que deve ser adicionado calor ao processo nesta fase. Os ácidos gordos voláteis, da etapa da fermentação, são convertidos em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrogénio (H<sub>2</sub>) pela ação das bactérias sintróficas também designadas de produtoras obrigatórias de hidrogénio. O dióxido de carbono e o hidrogénio são transformados em ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH) pela ação das bactérias homoacetogénicas conforme (1).



Na etapa da Metanogénese, as bactérias acetoclásticas convertem o ácido acético (CH<sub>3</sub>COOH), da etapa anterior, em metano (CH<sub>4</sub>) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) que são os principais

constituintes do biogás (2). As bactérias hidrogenotróficas convertem o dióxido de carbono e o hidrogénio em metano (3). Na maior parte dos ambientes, é o passo final na decomposição da matéria orgânica.



As bactérias acetoclásticas são responsáveis pela produção de 60 a 70% de metano ( $CH_4$ ). Têm de ser cumpridas algumas condições para que as bactérias produzam metano, nomeadamente: inexistência de oxigénio; o substrato tem de ter, no mínimo, uma percentagem de 50% de humidade, a presença de água favorece a movimentação das bactérias; a temperatura do meio tem de ser adequada à escala do digestor, resultando um maior ou menor tempo de retenção do substrato de acordo com a mesma; a carga orgânica mínima por  $m^3$  do digestor, por dia, deve situar-se idealmente entre um e três quilogramas; é necessária a presença de substâncias de auxílio ao seu metabolismo como compostos nitrogenados solúveis (o nitrogénio é um dos elementos essenciais ao metabolismo das bactérias, além de ajudar a manter o pH, neutraliza os ácidos quando é convertido em amónia), minerais e oligoelementos (minerais em pequenas quantidades como o zinco); é fundamental a ausência de substâncias inibidoras como desinfetantes e antibióticos provenientes da limpeza de estábulos e medicamentos dos animais no caso de utilização do estrume dos mesmos como substrato; o tamanho das partículas de substrato deve ser reduzido para que as bactérias tenham superfície suficiente para as atacar; o substrato tem de ser homogeneizado dentro do biodigestor para que não haja acumulação de pressão do biogás; a alimentação de substrato fresco deve ser feita gradualmente [16].

### 3.2.2 Codigestão

“O princípio geral da codigestão anaeróbia baseia-se no tratamento simultâneo de diferentes tipos de resíduos num reator, de modo a maximizar o rendimento de biogás” [18]. Ao substrato principal adicionam-se co-substratos.

Para que ocorra uma eficiente produção de biogás, entre o substrato e o cosubstrato, tem de existir um equilíbrio adequado de compostos de carbono que forneçam a energia e de compostos nitrogenados que forneçam o nitrogénio cuja presença é essencial para o metabolismo das bactérias, ajudando a manter o pH (quando convertido em amónia, neutraliza os ácidos), no entanto, demasiado nitrogénio no substrato, pode levar a uma formação excessiva de amónia, resultando em efeitos tóxicos para as bactérias. “A proporção saudável de carbono e nitrogénio (C:N) encontra-se entre 20:1 ou 40:1, embora outros valores mais extremos possam continuar a resultar numa digestão eficiente” [16], valorizam-se as

características dos dejetos animais como fontes ricas em nitrogénio e os restos das culturas vegetais como fontes ricas de carbono.

A digestão anaeróbia individual de determinados resíduos, como das águas residuais resultantes da indústria do azeite, seria problemática pelo conteúdo de poli-fenóis e de ácidos gordos de cadeia longa, pela baixa quantidade de nitrogénio e baixa alcalinidade com impacto negativo na Metanogénese, pelo que se aponta como solução viável a mistura com outros resíduos com as características opostas. Como estes resíduos contêm uma fração muito elevada de matéria orgânica (Chemical Oxygen Demand - COD) e um baixo conteúdo em nitrogénio, o seu processo de codigestão pode incluir o estrume de suiniculturas, rico em nitrogénio amoniacal cuja degradação natural resultaria numa elevada emissão de metano durante o seu armazenamento, o que não é desejável pelo seu efeito no aquecimento global. Por outro lado, a quantidade de amónia presente no estrume de suiniculturas poderia inibir a metanogénese na sua digestão individual, pelo que a mistura destes dois resíduos melhoraria o rácio C/N. Além disso o estrume tem um elevado poder padrão e manteria o pH da mistura numa gama ideal para a metanização [18].

A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros que os tornam compatíveis alguns resíduos em termos de equilíbrio na digestão anaeróbia.

Tabela 3.3: Características complementares dos substratos a [18]; b [13]

Parâmetro	Estrume de suiniculturas	Resíduos da Produção de Azeite	Lamas Mistas	Sólidos Orgânicos
pH	7,38±0,01 a;	4,6-4,9 b; 4,93±0,01 a;	6,0-6,5 b;	5,48 b;
COD (g/l)	60,58±0,02 a;	142,94±0,04 a; 47-219 b;	30-81 b;	230 b;
Nitrogénio Amoniacal (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) (g/l)	2,82±0,05 a;	0,77±0,02 a;	–	–
Nitrogénio Orgânico Total (g/l)		0,235-0,672 b;	1,568-1,960 b;	0,073
Total de Ácidos gordos voláteis (g/l)	2,2±0,2 a;	4,1±0,3 a;	–	–

A possibilidade de codigestão é particularmente atrativa para os agricultores uma vez que poderão tratar adequadamente os seus próprios resíduos agrícolas com outros substratos orgânicos e ainda usufruir das vendas de calor e de eletricidade como também da utilização de um fertilizante biologicamente estabilizado [19].

### 3.3 Produção de fertilizante natural

O tratamento das águas residuais, explicado de uma forma simplificada, consiste na remoção de sólidos em suspensão e materiais dissolvidos nos esgotos. Os resíduos removidos a jusante são referidos como lamas de depuração e requerem um tratamento adicional ou uma

estabilização. Um dos métodos mais comuns para promover a estabilização é a digestão anaeróbia, eliminando os agentes patogénicos e reduzindo a massa de sólidos através da decomposição dos sólidos voláteis<sup>7</sup> (identificados como a matéria orgânica). Os sólidos estabilizados anaerobiamente são referidos como bio sólidos contendo todas as substâncias não degradáveis presentes na matéria-prima original, o que significa que todos os nutrientes de que a planta necessita se mantêm. São tipicamente aplicados como reparadores dos solos evitando tratamentos adicionais e o uso de fertilizantes químicos. Podem também ser usados em incinerações ou para compostagem. Também é importante referir que qualquer contaminação no material não degradável continua no produto digerido, pondo em causa o uso do fertilizante [7]. Em relação a este aspecto, o OT6 refere a reabilitação de coletores com vista à redução de aflúncias indevidas aos sistemas de drenagem de águas residuais, bem como a operacionalização de sistemas adequados de gestão de lamas de ETAR.

O processo de digestão anaeróbia é capaz de inativar sementes de ervas daninhas, bactérias como a *Salmonella*, *Escherichia Coli*, *Listeria*; vírus, fungos e parasitas da matéria-prima, o que é de extremamente importante se o material digerido é usado como fertilizante. A temperatura é o fator mais importante no que diz respeito à sobrevivência de agentes patogénicos durante a digestão anaeróbia. De acordo com a literatura, o melhor efeito é obtido a temperaturas termofílicas acima de 50°C e tempos de retenção longos; à temperatura termofílica de 53°C, consegue-se uma redução de 90% de uma população de *Salmonellas* em somente 0,7 h, enquanto à temperatura mesofílica de 35°C são necessários 2 a 4 dias.

“O processo de decomposição aumenta a disponibilidade do nitrogénio” [7], tanto a mineralização de nutrientes orgânicos, em particular do nitrogénio (N), facilitando a absorção pelas plantas, como a redução do rácio C:N beneficiam a curta duração para a fertilização nitrogenada devido à melhoria das propriedades de fluxo, levando à mais rápida penetração do produto no solo e reduzindo o risco de perda de nitrogénio pelas emissões de amónia. Um outro benefício do processo de digestão anaeróbia é a redução dos odores da matéria-prima em mais de 80% o que contribui para o uso do fertilizante obtido sem causar incómodo para os habitantes circundantes das terras fertilizadas [10].

As lamas têm uma composição diferente consoante os vários processos utilizados na purificação de águas residuais, “essa diversidade pode ser habilmente explorada segundo as necessidades agrícolas” [17]. A Tabela 3.4 mostra o conteúdo de nutrientes para cada tipo de lamas.

---

<sup>7</sup> Sólidos Voláteis: Queimando uma amostra de matéria, obtemos cinzas correspondentes à matéria inorgânica como sais minerais e a parte orgânica é relacionada com a porção que volatiliza [9].

Tabela 3.4: Conteúdo de nutrientes segundo o tipo de lamas [17]

Característica	Lama líquida	Lama Pastosa	Lama seca	Lama corrigida (cajada)	Lama de compostagem
Matéria seca (MS) (% produto fresco)	2-7	16-22	90-95	25-40	40-60
Teor de matéria orgânica (% da MS)	65-70	50-70	50-70	30-50	80-90
Conteúdo mineral (% da MS)	30-35	30-50	30-50	50-70	10-20
pH	6,5-7	7-8	6-8	9-12	6-7
Rácio carbono/azoto (C/N)	4-5	5-6	4-6	8-11	15-25
Azoto (N <sup>8</sup> kg/t matéria-prima)	2-4	8-12	30-50	6-9	5-9
Fósforo (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /t matéria-prima)	2-3	6-9	50-70	6-10	6-8
Potássio (kg K <sub>2</sub> O/t matéria-prima)	0,9	0,8	5	1	1-2
Cal (CaO kg/t matéria-prima)	1-3	5-15	40-60	60-90	10-30
Magnésio (MgO kg/t matéria-prima)	0,5	1-2	5	1-2	1-2

Os elementos nutritivos não ficam imediatamente disponíveis na totalidade, “a biodisponibilidade de cada nutriente é função do tipo de lama, mas também da atividade biológica do solo” [17], significando que a disponibilidade dos nutrientes para as plantas vai depender da mineralização dessa matéria orgânica pelos microrganismos.

### 3.3.1 Decreto-Lei N.º 276/2009 de 2 de Outubro

O Decreto-Lei nº 276/2009 de 2 de Outubro define as regras que regulamentam a valorização das lamas na agricultura e pretende garantir que a sua aplicação não prejudica a qualidade do ambiente, em especial das águas e dos solos e não constitui um risco para a saúde pública. O Artigo 9º define as características e as quantidades de lamas utilizáveis, referindo que apenas é permitida a utilização de lamas em solos agrícolas se cumprirem os valores limite de concentração relativos a metais pesados.

## 3.4 Visão Geral da Utilização de Biogás

O biogás é uma mistura gasosa combustível, tendo de ser gerido cuidadosamente por ser altamente inflamável devido ao seu elevado teor de metano que pode variar entre 50 a 80% [16]. É basicamente uma mistura de metano e de dióxido de carbono, pelo que, quanto maior o conteúdo em metano, mais energia contém. A presença de sulfureto de hidrogénio (H<sub>2</sub>S), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água (H<sub>2</sub>O) tornam o biogás muito corrosivo o que requer a

<sup>8</sup> Se a lama é líquida: 80-90% do Azoto encontra-se sob forma orgânica e 10-20% sob forma amoniacal.

adaptação dos materiais e tratamentos como dessulfuração e eliminação da humidade. A sua composição (Tabela 3.7 e Tabela 3.8) depende dos substratos utilizados, da carga orgânica, do tempo de retenção da matéria no digestor e das condições de operação do digestor.

Tabela 3.5: Valores limite de concentração de metais pesados nas lamas destinadas à aplicação no solo agrícola [20]

Parâmetro	Valor Limite (mg/kg de matéria seca)
Cádmio	20
Cobre	1000
Níquel	300
Chumbo	750
Zinco	2500
Mercúrio	16
Crómio	1000

Tabela 3.6: Valores limite de microrganismos nas lamas destinadas à agricultura [20]

Microrganismos	Valor limite
Escherichia coli	<1000 Células/g de matéria fresca
Salmonella spp	Ausente em 50 g de material original

Tabela 3.7: Composição química do biogás de acordo com os resíduos [21]

Componentes	Resíduos Domésticos	Lama de ETAR	Resíduos Agrícolas	Resíduos das indústrias Agroalimentares
CH <sub>4</sub> % volume	50-60	60-75	60-75	68
CO <sub>2</sub> % volume	34-38	19-33	19-33	26
N <sub>2</sub> % volume	0-5	0-1	0-1	-
O <sub>2</sub> % volume	0-1	<0,5	<0,5	-
H <sub>2</sub> O % volume (a 40°C)	6	6	6	6
H <sub>2</sub> S mg/m <sup>3</sup>	100-900	1000-4000	3000-10000	400
NH <sub>3</sub> mg/m <sup>3</sup>	-	-	50-100	-

É um gás consideravelmente mais leve do que o ar, o seu poder calorífico pode variar entre 5000 a 7000 kcal/m<sup>3</sup> de acordo com o conteúdo de metano, eliminando-lhe todo o dióxido de carbono, o poder calorífico equipara-se ao do gás natural.

Pode ser usado para diferentes funções energéticas, como ilustrado na Figura 3.1. O sistema mais comum é a geração simultânea de eletricidade e calor (cogeração), podendo incluir a

produção de frio (trigeração). Uma vez purificado pode abastecer a rede de gás natural para aquecimento doméstico ou como combustível para veículos. Nos países em desenvolvimento, o biogás produzido por digestores não aquecidos, é usado como um combustível para cozinhar.

Tabela 3.8: Características químicas e físicas do biogás [21]

Tipos de Biogás	Biogás de resíduos Domésticos	Biogás de Indústrias Agroalimentares	Gás Natural
Composição	60% CH <sub>4</sub> 33% CO <sub>2</sub> 1% N <sub>2</sub> 0% O <sub>2</sub> 6% H <sub>2</sub> O	68% CH <sub>4</sub> 26% CO <sub>2</sub> 1% N <sub>2</sub> 0% O <sub>2</sub> 5% H <sub>2</sub> O	68% CH <sub>4</sub> 26% CO <sub>2</sub> 1% N <sub>2</sub> 0% O <sub>2</sub> 5% H <sub>2</sub> O
PCS kWh/m <sup>3</sup>	6,6	7,5	11,3
PCI kWh/m <sup>3</sup>	6,0	6,8	10,3
Densidade	0,93	0,85	0,57
Massa (kg/m <sup>3</sup> )	1,21	1,11	0,73

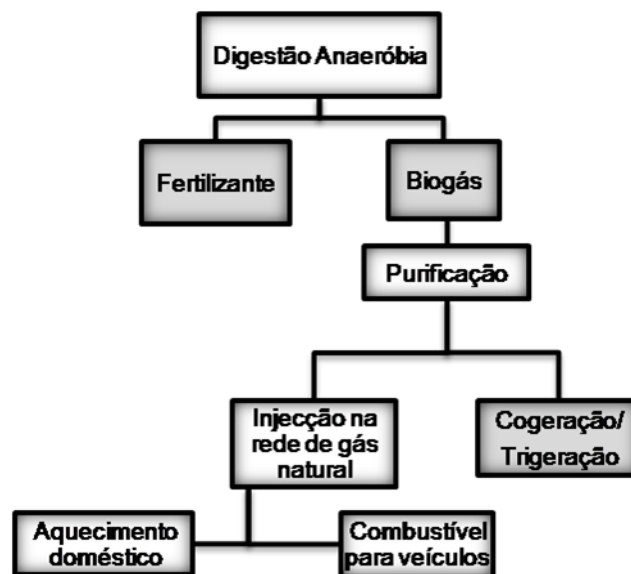


Figura 3.1: Funções energéticas do biogás

### 3.5 Sistema de digestão anaeróbia

A Figura 3.2 representa um sistema típico de digestão anaeróbia. Os vários componentes estão descritos nas páginas seguintes.

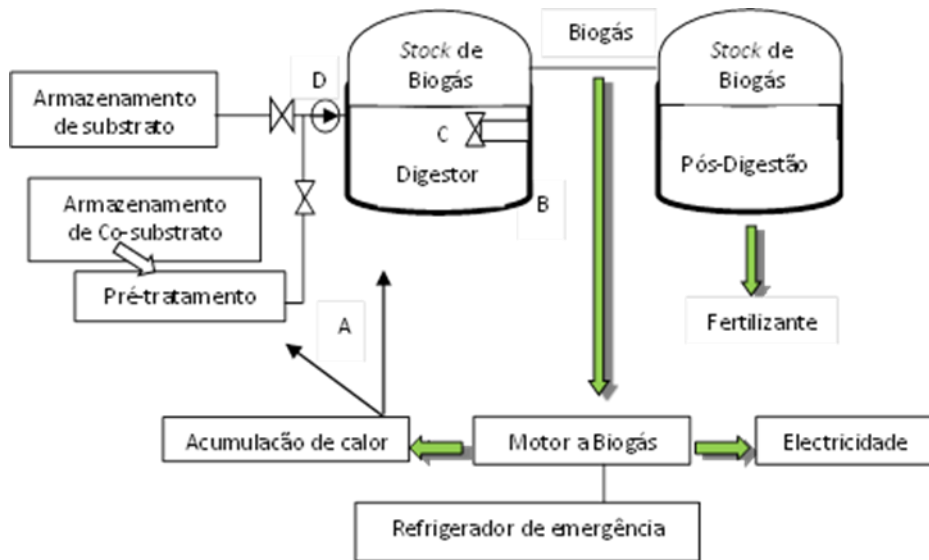


Figura 3.2: Sistema de digestão anaeróbia [16]

Onde: (A) Aquecimento do substrato e do digestor; (B) Isolamento do digestor; (C) Sistema de mistura; (D) Bomba do substrato.

### 3.5.1 Armazenamento de substratos

Os sistemas mais comuns de armazenamento são os celeiros, silos e sacos. O metano produzido na armazenagem irá reduzir o rendimento do biogás no digestor. No caso de armazenamento em celeiros abertos, as emissões de metano são indesejáveis para o bem-estar circundante e para o ambiente. O transporte do substrato do local de armazenamento para o digestor deve ser efetuado o mais rápido possível, geralmente através de uma bomba.

### 3.5.2 Armazenamento e pré-tratamento de co-substratos

O armazenamento depende das suas propriedades físicas e químicas. Por exemplo, o milho pode ser armazenado num silo, mas para as gorduras será previamente necessário um tanque aquecido para as manter no estado líquido, melhorando as características de fluxo. Basicamente há três métodos diferentes de pré-tratamento segundo a Figura 3.3, dependendo do tipo e da dimensão de cosubstrato fornecido à instalação: mecânico, térmico e pré-aquecimento.

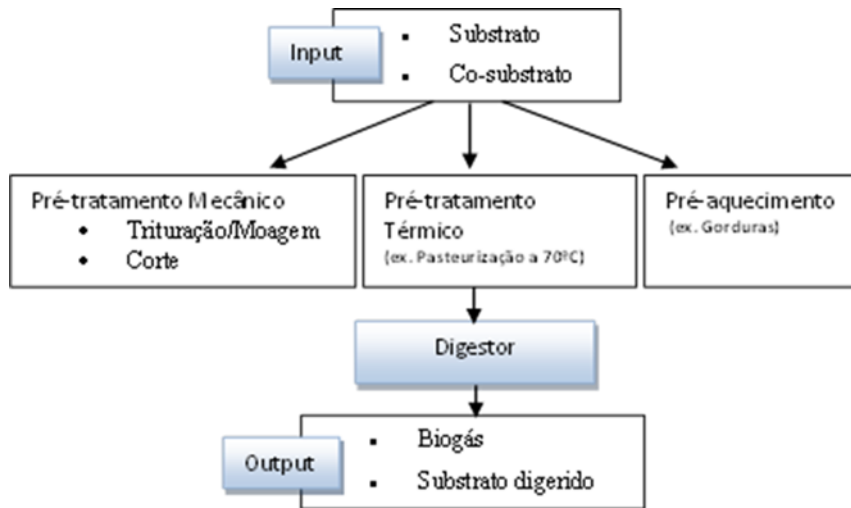


Figura 3.3: Fluxo da matéria-prima no sistema de digestão [16]

Alguns co-substratos requerem uma redução de tamanho, Figura 3.4, para se adequarem ao sistema de bombeamento e aos agitadores do digestor, a atuação das bactérias é facilitada com este processo, acelerando a produção de biogás.



Figura 3.4: Trituração e Alimentação de co-substratos [16]

Outros co-substratos necessitam de tratamento térmico para cumprirem as exigências sanitárias.

### 3.5.3 Bombas

Uma bomba, Figura 3.5, num sistema de digestão anaeróbia pode ter duas funções: para ultrapassar uma diferença de altura ou para fazer movimentar um sistema hidráulico de mistura. Os dois tipos principais de bombas existentes são: bombas centrífugas e bombas de deslocamento.



Figura 3.5: Exemplos de diferentes tipos de bombas [16]

### 3.5.4 Canalização para transporte de substratos

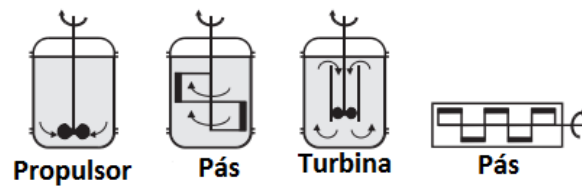
Há dois tipos de canalizações: Pressurizadas e não-pressurizadas. As canalizações pressurizadas para transporte de substratos por meio de uma bomba têm de ter um diâmetro mínimo de 100 mm (para evitar bloqueios) a 150 mm (para maiores distâncias). Para evitar sedimentação na parte inferior da tubagem, deve ser considerada uma velocidade mínima de transporte de 1 m/s. As canalizações não-pressurizadas estão sujeitas à influência da gravidade e requerem, pelo menos, um diâmetro de 200 mm. As tubagens usadas nas instalações de digestão anaeróbia são usualmente feitas de aço mas também existem em materiais plásticos. Todas as tubagens sujeitas a baixas temperaturas têm de ser isoladas de modo a prevenir a formação de gelo, bloqueando a tubagem. Deve ser instalada uma válvula de segurança para prevenir que o fluxo saia do digestor e volte para o tanque de armazenamento de substrato.

### 3.5.5 Equipamentos de agitação/mistura

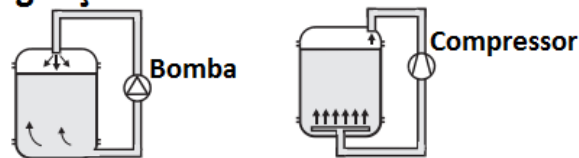
Um misturador agita periodicamente o conteúdo do digestor, tendo as seguintes funções: i) Misturar o substrato existente com o novo, para que as bactérias ativas se propaguem; ii) Evitar grandes gradientes de temperatura dentro do digestor; iii) Prevenir e dificultar a formação de aglomerações e de camadas de sedimentos; iv) Melhorar o metabolismo das bactérias, removendo as bolhas de gás, substituindo-as por matéria-prima fresca; v) Eliminar ou reduzir a acumulação de espuma; vi) Permitir a rápida dispersão do biogás resultante do metabolismo dos microrganismos; vii) Minimizar a toxicidade dos materiais que entram no digestor, pela sua rápida dispersão.

A mistura pode ser efetuada por dispositivos mecânicos, hidráulicos e por recirculação de biogás. A Figura 3.6 retrata os princípios destes sistemas de agitação.

### Agitadores mecânicos



### Agitação hidráulica



### Agitação por Injeção de biogás

Figura 3.6: Princípios de agitação de digestores através de sistemas mecânicos, hidráulicos e de injeção de biogás [22]

Os meios mecânicos mais comuns são os propulsores de parafuso cujo sistema consiste num motor elétrico com uma capacidade de carga de 2,5 a 25 kW (para um digestor de volume superior a 1000 m<sup>3</sup>), que movimenta um propulsor de parafuso, Figura 3.7 a). Alternativamente, o substrato pode ser misturado por um sistema hidráulico, Figura 3.7b), bombeando-o para fora do digestor num ponto e readmitindo-o num outro ponto. A matéria-prima é normalmente absorvida para uma tubagem na parte superior do digestor e ejetado na parte mais baixa. Este sistema só é adequado para co-substratos fluidos. A vantagem deste sistema é que não tem partes em movimento dentro do digestor, a bomba está localizada fora do digestor, sendo assim mais facilmente acessível para manutenção [22].



Figura 3.7: a) Propulsor de parafuso, b) Misturador hidráulico [16]

Na ETAR de Parada, na Maia utilizam a agitação por injeção de biogás, “a fim de se obter uma homogeneização perfeita, impedindo ainda a formação de crostas na parte superior do digestor, parte do biogás formado é recirculado por meio de três compressores de alhetas mais um de reserva” [23].

A agitação mecânica é mais eficaz do que a recirculação de biogás, mas estes dispositivos ficam frequentemente obstruídos e sujos com os sólidos do digestor. Os métodos de mistura podem ser agrupados de dois modos: um modo intermédio que incorpora recirculação da lama num permutador de calor conseguindo-se uma mistura limitada, Figura 3.8 a), e um modo rápido ou com alto índice de mistura, Figura 3.8 b), que engloba a recirculação das lamas através de um permutador de calor, mantendo a temperatura no interior do digestor, e um sistema de mistura completa, com um resultado de digestão significativa de sólidos voláteis [24].

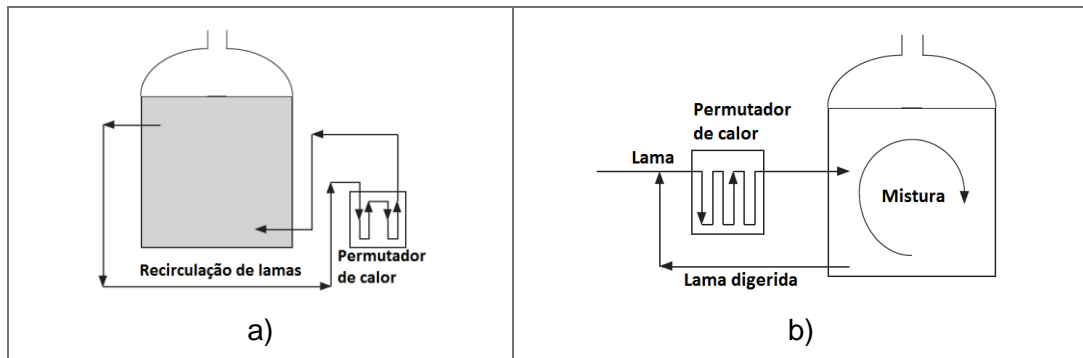


Figura 3.8: Modos de mistura [24]

O conteúdo dos digestores anaeróbios deve ser agitado, sugerindo-se uma rotina de agitação de três a seis períodos de mistura por dia de uma a três horas de duração para cada período, dando uma possível alternativa a uma dispendiosa agitação contínua [22]. É de salientar que uma agitação excessiva pode afetar a ação dos microrganismos, destruindo os agregados formados, sendo preferível utilizar velocidades mais baixas.

### 3.5.6 Armazenamento das lamas digeridas

O material digerido é usualmente armazenado num tanque de pós-digestão uma vez que pode não ser possível o seu escoamento imediato como fertilizante. Estes tanques são cobertos para evitar perdas de nitrogénio. Entretanto, mais biogás é aí produzido e aproveitado. As lamas do digestor primário consolidam neste digestor secundário o processo de estabilização e ao mesmo tempo incrementam o seu teor em sólidos [23].

### 3.5.7 Armazenamento de biogás

O biogás produzido tem de ser armazenado até à sua utilização de modo a obter um fornecimento constante à unidade de cogeração. O armazenamento pode ser interno ou externo. Se o biogás é armazenado internamente, uma tela flexível (membrana com 1 a 2 mm de espessura) expandirá à medida que a sua quantidade for aumentando. O biogás pode ser armazenado exteriormente, usando sacos para gás a baixa pressão.

### 3.5.8 Importância da purificação do biogás

O biogás contém impurezas como gotículas de água, pó, lama e resíduos de gases indesejados como Sulfureto de hidrogénio ( $H_2S$ ) que causa corrosão dos metais, danificando o motor e a tubagem. A Tabela 3.9 refere-se a algumas impurezas do biogás, às suas consequências e ao tratamento.

Tabela 3.9: Impurezas do biogás, possível impacto e tratamento [25]

Impureza	Possível Impacto	Tratamento possível
Água	Corrosão em compressores, tanques de armazenamento de biogás e motores, devido à reação com $H_2S$ , $NH_3$ e $CO_2$ para formação de ácidos. Acumulação de água nas condutas Condensação e/ou congelamento devido à alta pressão.	Métodos de separação física (condensação): através de desumidificadores, separadores de ciclone, retentores de humidade, torneiras de água. Métodos de secagem química: secador de adsorção por sílica, alumina, etc.; secador de absorção em glicol de trietileno ou com sais higroscópicos
Pó	Entupimento devido à deposição em compressores, e tanques nos tanques de armazenamento de gás.	Os métodos que retiram a água podem retirar o pó
$H_2S$	Corrosão em compressores, tanques de armazenamento de gás e em motores. Concentrações tóxicas de $H_2S > 5 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ , permanecem no biogás, $SO_2$ e $SO_3$ são formados durante a combustão que são mais tóxicos do que $H_2S$ e causam corrosão com a água.	Durante a digestão: adição de ar/oxigénio ou cloreto de ferro. Após digestão: adsorção com óxido de ferro, hidróxido de ferro ou óxido de zinco. Adsorção com líquidos, membrana de separação, filtro biológico; adsorção em carbono ativado
Siloxanos (Provêm de cosméticos e medicamentos)	Formação de $SiO_2$ e quartzo microcristalino devido à combustão, deposição em velas de ignição, válvulas e cabeças de cilindros, provocando abrasão da superfície.	Absorção com solventes orgânicos, ácidos fortes, bases fortes; Adsorção com sílica gel, carbono ativado, separação criogénica.
$O_2/Ar$	Misturas explosivas devido a altas concentrações de $O_2$ (6 e 12%) no biogás com 60% de metano dependendo da temperatura	Membranas ou <i>Pressure Swing Adsorption</i> (PSA). "O ideal é a prevenção através de monitorização".

As partículas sólidas são filtradas (filtros de pó); as lamas são separadas em ciclones; a remoção do  $H_2S$  pode ser facilmente efetuada pela adição de ar (2 a 6% do volume) na parte superior do digestor perto da saída de biogás, onde as bactérias oxidantes (sulfurosas) têm de estar presentes, convertendo o  $H_2S$  (95%) em enxofre (S). Antes de chegar ao motor, o biogás poderá também passar por um filtro contendo limalha de ferro [16]. A água, que além de diminuir o poder calorífico do biogás também pode gerar ambientes corrosivos, deve ser eliminada.

## 3.6 Cogeração

Uma ETAR consome quantias significativas de energia devido ao seu funcionamento contínuo e aos complexos processos de tratamento, grupos eletrobomba, pontes raspadoras, grandes sopradores de ar (turbinas) e agitadores submersíveis, equipamentos de tratamento de sólidos (misturadores, transportadores, dispositivos de desidratação, redutores do volume, incineradores), compressores, desumidificador de biogás, ventilação, iluminação. A digestão anaeróbia apresenta-se como um meio comprovado para reduzir o consumo de energia elétrica no tratamento de resíduos e nas instalações de tratamento, “na maioria das estações de tratamento, o uso do biogás para gerar eletricidade e calor, potencia a redução do consumo energético em 40%”; a percentagem total de recuperação de energia tem em conta diversos fatores como a eficácia do processo de digestão, a eficiência do sistema de cogeração, o tipo de processos de tratamento e a eficiência de tratamento do fluxo líquido [7].

O output típico de cogeração numa instalação de biogás é cerca de dois terços de energia térmica e de um terço de eletricidade, com 80-90% de eficiência, o que dá espaço para melhoramento da eficiência operacional, reduzindo os custos da cogeração [10].

### 3.6.1 O motor a biogás

Numa unidade de cogeração, um motor com biogás como combustível, pode usar mais de 90% do seu conteúdo energético para gerar eletricidade e calor [7]. O mais usado é o motor de combustão interna que impulsiona um gerador elétrico. Converte 30% do biogás em eletricidade e os restantes 70% são convertidos em calor [26]. O calor extraído da água de arrefecimento do motor e do sistema de exaustão é recuperado através de permutadores. Uma pequena quantidade de calor pode ser recuperada através dos turbocompressores e pelos sistemas de lubrificação. O calor pode ser usado para aquecer o digestor, o restante pode ser usado para responder a uma procura exterior (aquecimento ou refrigeração) de edifícios circundantes, estufas, processos industriais, etc.). A água quente produzida atinge frequentemente os 93°C, as temperaturas de exaustão do motor podem atingir 650°C, mas nem todo o calor de exaustão é recuperável [7]. A Figura 3.9 representa esquematicamente um motor de combustão interna cujo funcionamento se desenrola em quatro fases. A primeira fase é a de admissão da mistura ar e biogás, na segunda fase processa-se a compressão da mesma, a terceira fase consiste na ignição por faísca e a quarta fase é a de escape.

Tabela 3.10 resume as vantagens e desvantagens de um motor de combustão interna integrado num sistema de cogeração.

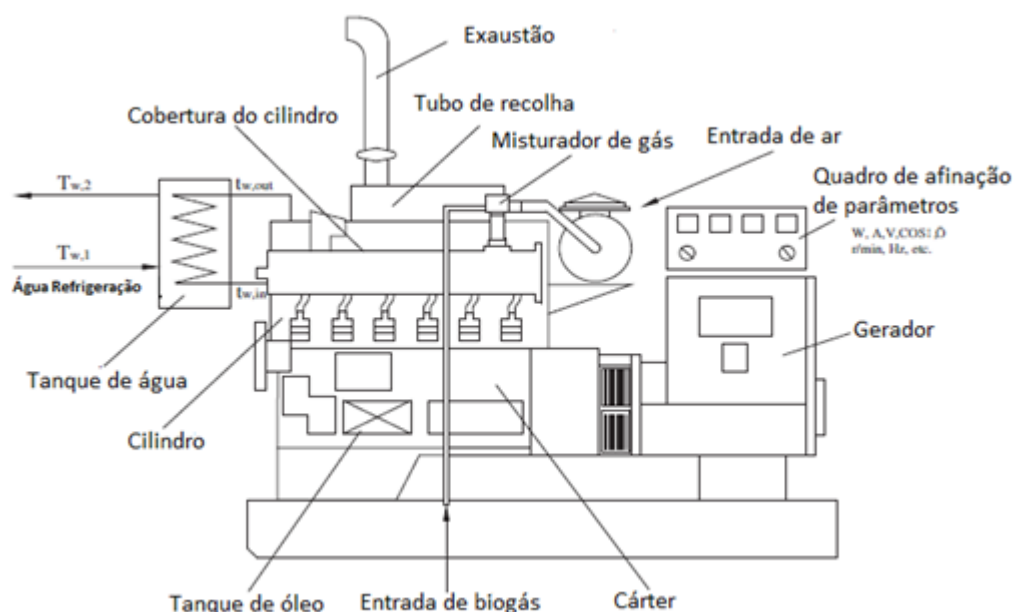


Figura 3.9: Motor de combustão interna [27]

Tabela 3.10: Vantagens e desvantagens para o motor de combustão interna [7]

Vantagens	Desvantagens
Adequado para a maioria das estações de tratamento devido à disponibilidade de uma vasta gama, mediante os requisitos de entrada de combustível	Pode exigir pré-tratamento do combustível para evitar danos no motor ou potencial perda de eficiência
Fiável, tecnologia comprovada e disponível em bons fabricantes	
A melhor combinação de eficiência térmica e elétrica para um sistema de cogeração	
Menos sensível a sulfureto de hidrogénio existente no combustível, do que outras tecnologias de cogeração	Requer arrefecimento contínuo
Fácil Manutenção	
Requer combustível pressurizado a apenas 3 a 5 psi (0,207 a 0,345 bar)	

### 3.6.2 Recuperação do calor da cogeração

Existem algumas limitações no aproveitamento útil do calor na proximidade do local em que o biogás é produzido, devido à localização isolada das centrais associadas às ETAR [5]. É fundamental um fornecimento adequado e fiável de calor ao processo de digestão anaeróbia, uma vez que terá de ser fornecido continuamente. As necessidades de eletricidade e calor são considerações importantes na escolha de um sistema de cogeração. Se o sistema de cogeração não fornecer a quantidade de calor adequado, o défice pode ser produzido por uma

caldeira de gás natural. Se a instalação fornecer calor em excesso, este pode ser suficiente para aquecer algumas instalações locais ou processos de pré-tratamento de co-substratos, aquecimento de água e se o sistema de cogeração for maximizado, o calor em excesso pode ser usado para produzir uma água gelada a 7 °C [7].

O calor em excesso pode ser usado no processo de arrefecimento através da refrigeração por absorção[10]. O sistema funciona com base num ciclo termodinâmico similar ao de compressão mecânica convencional, mas no lugar do motor-compressor, existe um absorvedor-gerador. A diferença baseia-se no uso de energia elétrica pelo refrigerador ou *chiller* de compressão, enquanto o *chiller* de absorção requer energia térmica disponível na instalação de cogeração. Nos *chillers* de absorção, para grande escala, o vapor de água é absorvido por uma solução de brometo de lítio. A Figura 3.10 mostra o funcionamento dos dois sistemas de refrigeração.

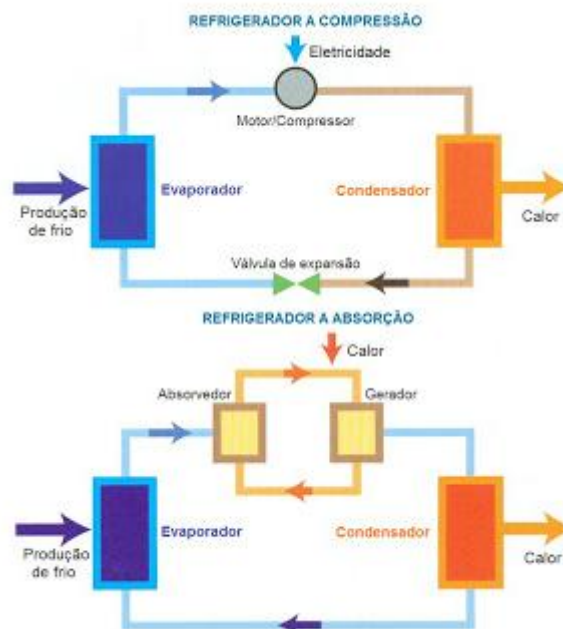


Figura 3.10: Funcionamento de refrigerador por compressão e por absorção [28]

A intermitência do fluxo de calor em excesso leva à utilização de meios de armazenamento para uso posterior. É de referir uma tecnologia comprovada de acumulação de calor sensível, em que a temperatura do material de armazenamento, como por exemplo água, areia, leitos rochosos ou óleos, aumenta quando o calor é acumulado. Esta é uma tecnologia barata, mas tem uma baixa capacidade de armazenamento. Enquanto outras tecnologias ainda estão em desenvolvimento e que se referem ao armazenamento de calor latente que provoca a perda ou o aumento de calor a um material de mudança de fase (sais inorgânicos e parafina) durante a fusão/solidificação ou gasificação/liquefação. Este sistema tem uma maior densidade de armazenamento de calor do que o armazenamento de calor sensível, mas a

baixa condutividade térmica da maioria dos materiais de mudança de fase exige grandes superfícies de troca de calor. O acumulador químico de calor, igualmente em desenvolvimento, armazena o calor como energia química, através de reacções endotérmicas e pode ser libertado através de reacções exotérmicas reversas. A amónia e os hidróxidos são dois materiais que podem ser usados para acumulação química do calor. É a tecnologia com maior densidade de calor acumulado [29].

### 3.7 Equipamento de medição e controlo

A monitorização analítica extensiva dos digestores anaeróbios não é uma prática comum em muitas instalações de tratamento de águas residuais, o que já resultou em inúmeras falhas dos mesmos, além disso, o tempo de espera dos resultados de determinados testes analíticos é muito elevado e têm de ser efetuados periodicamente vários testes analíticos para monitorizar a atividade das bactérias num digestor anaeróbio, avaliar e corrigir os problemas das operações do digestor [24].

Os aparelhos de medição diária, considerados mais importantes na gestão eficiente de uma instalação de biogás, são descritos de seguida:

**Sensores de temperatura:** usualmente instalado na parede do digestor para medir a temperatura do substrato e para determinar o consumo do calor produzido;

**Indicadores de nível de substrato:** ajudam a avaliar o desempenho do digestor na degradação da matéria orgânica;

**Contador elétrico:** para medir o consumo interno do sistema, será necessário um outro contador se a instalação fornece energia à rede, medindo a eletricidade entregue;

**Contadores de biogás:** são necessários pelo menos dois, um para medir a produção de biogás e outro para medir o seu consumo. A medição do fluxo de biogás indica o desempenho da instalação e a sua segurança.

Há parâmetros adicionais que se devem medir regularmente:

**pH:** o valor do pH do substrato e do material digerido indica se o ambiente é adequado para um bom desempenho das bactérias; se for neutro ou ligeiramente superior (7,0 e 8,5), o rendimento de biogás será mais elevado. Deve ser medido diariamente, através de papel de tornesol ou medidor eletrónico de pH [26];

**Composição do biogás:** em particular do conteúdo de metano e de sulfureto de hidrogénio, para avaliar o desempenho do digestor e a necessidade de dessulfuração. A medição ideal seria feita *online*, por um processo de cromatografia.

**Teor de matéria seca do substrato:** é importante para estimar o rendimento de biogás e a taxa de processamento/transformação. Deve ser efetuada uma medição mensal.

**Concentração de amónia:** concentrações mais elevadas de amónia prejudicam a produção de biogás pelas bactérias. A sua presença no material digerido indica o seu potencial como fertilizante. Deve ser efetuada uma medição mensal.

**Concentração de ácidos gordos:** a sua concentração dá uma indicação do desempenho do processo de digestão e permite que o operador da instalação atue no ambiente de digestão. Quanto mais baixa a concentração de ácidos gordos no substrato, maior é a quantidade de substâncias tóxicas para as bactérias. Deve ser efetuada uma medição mensal [16].

Existe a possibilidade de ligação dos vários dispositivos de medição a um computador, automatizando a aquisição dos dados e a operação, acompanhando, deste modo, o desempenho do sistema em tempo real [16]. Os processos biológicos da digestão anaeróbia são lentos e exigem um acompanhamento de perto. “São considerados ineficientes os digestores controlados manualmente, por outro lado, as instalações com sistemas de controlo automático otimizam a sua produção” [10].

### 3.7.1 Equipamento de segurança

A manipulação de combustíveis como o biogás exige a colocação de componentes de segurança no sistema, Figura 3.11.

Onde: a Orifício de inspeção, b Válvula antirretorno do biogás, c Bomba doseadora de ar, d Válvula de segurança/corte, e Válvula de retenção, f Captura de condensado, g Botão de pânico, h Filtro de biogás de malha fina, i Interruptor de pressão de vácuo, j Contador de gás, k Manómetro, l Válvula de fecho automático, m Retenção de chama, n Válvula de retenção, o Válvula de fecho automático, p Retenção de chama, q Queimador de biogás em excesso.

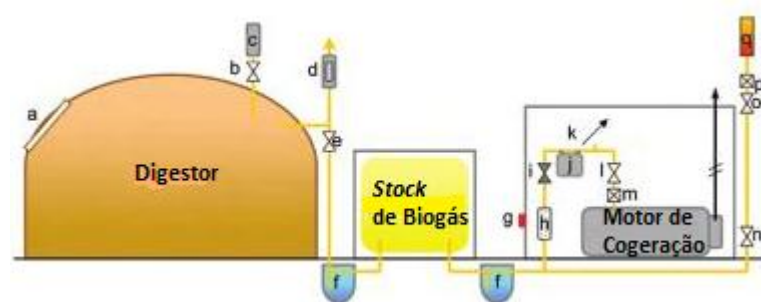


Figura 3.11: Vista geral de componentes de segurança existentes num sistema de biogás [16]

Há algumas regras adicionais a seguir como por exemplo, manter a distância entre o digestor, o motor de cogeração e os edifícios; na concepção do digestor devem ser asseguradas aberturas apropriadas para a sua correta ventilação; as válvulas de verificação e outros interruptores de segurança devem estar facilmente acessíveis; todas as canalizações devem ser à prova de corrosão; a instalação de cogeração deve ser adequadamente ventilada para proporcionar uma taxa suficiente de renovação do ar. Em relação ao funcionamento dos motores de cogeração em paralelo com a rede elétrica, devem ser seguidas normas técnicas por razões de segurança. Devem ser instalados dispositivos de medição e unidades de controlo, elementos de corte e proteção; as flutuações de tensão não devem variar em mais de ( $\pm 3\%$ ) para não interferirem com a sensibilidade do equipamento eletrónico da rede. Se a rede local for demasiado fraca para assumir a produção de eletricidade da instalação, será necessário dispor de uma subestação elétrica [16].

A segurança ambiental, relativamente às perdas de metano durante a sua produção, purificação e pressurização depende do funcionamento de cada instalação ou de tecnologia defeituosa [30].

### **3.8 Layouts mais usuais num sistema de digestão anaeróbia**

Há uma variedade considerável nos *layouts* dos sistemas de digestão anaeróbia, cada um com as suas vantagens e desvantagens. As razões mais importantes para a escolha de um determinado *layout* são a disponibilidade dos substratos, os recursos de investimento disponíveis, as infraestruturas disponíveis (por exemplo, um silo adaptado para um digestor), o espaço disponível, o saneamento requerido, o clima (um clima frio requer um melhor isolamento), o tempo de armazenamento requerido ou preferido para o material digerido, a preferência por um fornecedor.

#### **3.8.1 *Layout* quanto ao tamanho dos sistemas de digestão anaeróbia**

A digestão anaeróbia pode ser aplicada em pequena escala, à escala de uma quinta ou à escala de grandes digestores anaeróbios centralizados, dependendo da quantidade de biomassa disponível, conforme a Tabela 3.11.

#### **3.8.2 *Layout* quanto ao processo de digestão anaeróbia**

Os sistemas de digestão anaeróbia podem ser classificados em três categorias de acordo com a gestão do processo: Processo contínuo, descontínuo e Semi-contínuo.

Tabela 3.11: Dimensão dos sistemas de digestão anaeróbia [16]

Escala	Capacidade do digestor (m <sup>3</sup> )	Quantidade de substratos tratados (ton/ano)	Características
Pequena (Ex. Ásia)	5-100	100-1.000	Investimento técnico elevado e baixo rendimento; Não são isolados; Não são aquecidos; Não têm sistema de mistura.
Quinta	100-800	1.000-15.000	Possibilidade de fornecimento de eletricidade à rede; O calor residual pode substituir outros sistemas energéticos de produção de calor.
Industrial	>800	>15.000	O tratamento do material digerido é economicamente atrativo, ex. produção de fertilizante líquido de alta qualidade.

### Processo Contínuo

Uma instalação de biogás de funcionamento contínuo engloba o digestor principal continuamente alimentado, onde o volume permanece constante pela quantidade digerida correspondente que sai e um tanque separado onde esse material digerido é armazenado, “sendo estanque permite que o biogás aí produzido possa ser aproveitado e considerado na produção total de biogás, aumentando a eficiência global do sistema” [16]. As reações ocorrem simultaneamente, produzindo biogás de forma contínua.

### Processo descontínuo (lote)

O digestor é preenchido periodicamente na sua totalidade com a matéria orgânica que fica retida durante um determinado período de tempo até ao final da decomposição, implicando que as diferentes fases da decomposição ocorram sequencialmente e que a produção de biogás se processe de forma descontínua. A produção de biogás vai aumentando até atingir um valor máximo, quando esse valor desce abaixo de um certo nível, é retirado 90 a 95% do material digerido para o tanque de armazenamento, o restante (5 a 10%) permanece no biodigestor para dar continuidade ao processo de digestão da próxima carga de substrato fresco, funcionando como inóculo. Para se obter um fornecimento constante de biogás, é necessário ter vários digestores em diferentes fases de digestão anaeróbia a actuar em paralelo. Este sistema de múltiplos digestores é mais comum para digestão anaeróbia industrial em grande escala. À escala de uma quinta também podemos encontrar dois tanques de digestão descontínuos [16].

### Processo Semi-contínuo

Este tipo de processo combina as vantagens do processo descontínuo e contínuo. Permite que o digestor seja usado, tanto para digestão dos substratos, como para armazenamento do

material digerido. O material orgânico é adicionado continuamente até encher o digestor, no fim do tempo de retenção<sup>9</sup> previsto, é retirado todo o material. Salientam-se como desvantagens, a digestão parcial do material inserido originando um rendimento de biogás mais baixo do que nas outras opções de processo e um efeito sanitário ligeiramente mais baixo devido ao menor tempo de retenção [16].

### 3.9 Tipos básicos de digestores

Há dois tipos básicos de digestores, horizontais e verticais. Os sistemas semi-contínuos usam geralmente os digestores horizontais, para os digestores contínuos podem ser aplicados os dois tipos de digestores. Em geral, podem ter as características apresentadas de seguida.

#### Digestores Horizontais

Os digestores horizontais são relativamente mais pequenos, embora consistam num grande tanque com um sistema de agitadores. O volume *standard* de um digestor horizontal é entre 50 e 150 m<sup>3</sup>. Quando os substratos são inseridos no digestor, são aquecidos pelos braços rotativos que estão montados no eixo dos agitadores. Este tipo de digestor requer que o armazenamento de biogás seja sempre exterior. O substrato entra num lado do digestor e o material digerido sai pelo lado contrário. O efeito sanitário e a média do rendimento de biogás são mais elevados. O tempo de retenção pode ser mais curto, o que aumenta a capacidade do digestor. Um digestor horizontal pode lidar com uma percentagem máxima de matéria seca na ordem dos 15 a 20%.

#### Digestores Verticais

Um digestor vertical é cilíndrico e normalmente tem um volume entre 300 e 1500 m<sup>3</sup>. O conteúdo é aquecido, tanto por um aquecedor externo que aquece os substratos que entram, como por meio de tubos de água quente que envolvem as paredes do digestor. As paredes são isoladas para reduzir as perdas de calor. Há vários sistemas de agitação possíveis. Na maior parte dos casos, o biogás será armazenado por cima do material digerido, sob um teto de membrana flexível. Em geral, um digestor vertical será menos dispendioso do que um digestor horizontal por causa do uso de materiais mais baratos como o betão e pela construção mais simples. A agitação dos substratos pode ser feita usando vários tipos de dispositivos. Um

---

<sup>9</sup> Em termos médios, cada partícula permanece no interior do digestor um determinado período de tempo - tempo de retenção. O tempo de retenção hidráulico pode ser definido como o tempo médio que um dado volume de resíduos permanece no digestor. Pode ser calculado pela razão entre o volume do digestor e o caudal de resíduos afluentes ao digestor.

digestor vertical pode lidar com uma percentagem máxima de matéria seca na ordem de 10 a 15%.

### 3.10 Digestores segundo outras características

A Tabela 3.12 classifica os digestores segundo as características de crescimento de bactérias, a temperatura de digestão e a configuração do digestor.

Tabela 3.12: Tipos de Digestores Anaeróbios segundo três características [24]

Características	Aplicação
Sistema de crescimento de bactérias	Suspensão
	Película Fixa (mantas de lama)
Temperatura	Psicrofílica
	Mesofílica
	Termofílica
Configuração	Uma fase
	Duas fases

#### 3.10.1 Sistema de crescimento de bactérias

A digestão anaeróbia é capaz de tratar resíduos insolúveis e águas residuais solúveis.

##### Sistema de crescimento Suspensão

Estes digestores são dedicados ao tratamento de resíduos insolúveis de alta resistência, requerendo longos períodos de digestão para a hidrólise e solubilização. Os tempos de retenção típicos são de dez a 25 dias. As bactérias são suspensas no digestor através da ação de agitadores contínuos ou intermitentes, Figura 3.12. A agitação distribui uniformemente os nutrientes, o pH, as bactérias e a temperatura no biodigestor. Como desvantagem refere-se a necessidade de um digestor de grande volume, a eficiência pode ser reduzida devido às perdas de partículas, resíduos coloidais e de bactérias pelo efluente do digestor [24].

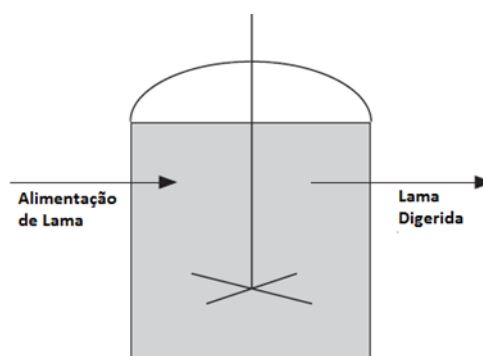


Figura 3.12: Sistema Suspensão de crescimento de bactérias [24]

### Película fixa (mantas de lama)

São digestores anaeróbios de alto rendimento. Não requerem hidrólise e solubilização de resíduos. Os tempos de retenção hidráulica podem ser inferiores a oito horas. As bactérias crescem como películas fixas ou como aglomerados de sólidos dentro das aberturas ou vazios da matéria de apoio que pode ser gravilha, plástico e pedra, Figura 3.13. As águas residuais, em fluxo ascendente ou descendente, passam através destas formações, onde os compostos orgânicos solúveis são absorvidos pelas bactérias e os insolúveis são anexados à sua superfície. A retenção das bactérias no digestor por um longo período, permite-lhes que se adaptem às substâncias tóxicas como por exemplo a amónia e sulfuretos, o que indica que estes sistemas podem ser usados para tratar águas residuais contendo substâncias tóxicas.

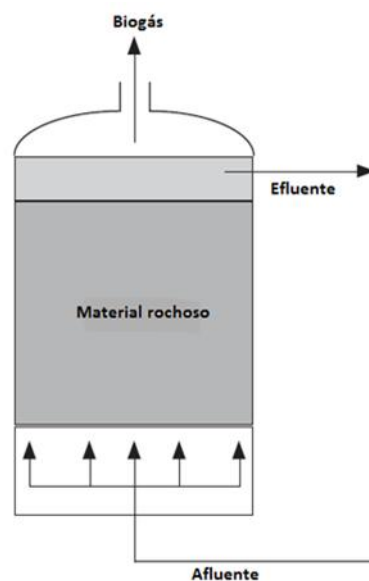


Figura 3.13: Sistema de Crescimento de bactérias em mantas de lama [24]

### 3.10.2 Temperatura

A manutenção de uma temperatura constante no interior do digestor é um parâmetro importante para a produção de biogás, desta forma o processo é acelerado e é assegurada a ausência de efeitos negativos nas bactérias produtoras de metano [24]. O processo de digestão anaeróbia requer temperaturas acima da temperatura ambiente, o calor gerado no motor de cogeração é usado para este efeito, sendo transferido desde o motor até ao digestor através de tubagens *standard*. Nos digestores horizontais, o calor está integrado no sistema de mistura, o aquecimento de digestores verticais de betão é normalmente instalado na parede interna do digestor através de tubos de aço inoxidável que têm uma condutividade térmica superior aos de PVC e menor tendência para incrustações. Nos digestores metálicos, o sistema de aquecimento pode ser aplicado na parede externa, sendo necessário isolar as paredes do digestor, para não deixar arrefecer o substrato [16].

As bactérias formadoras de metano são ativas e crescem em várias gamas de temperatura, na sua maioria são mesofílicas, algumas são psicofílicas, termofílicas e hipertermófilas, dando o nome respetivo ao digestor [24], Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Gamas de temperatura ideal para as bactérias formadoras de metano [24]

Grupo de bactérias	Gamas de temperatura °C	Uso
Psicofílicas	5-25	Digestores de pequena escala
Mesofílicas	30-35	Tratamento de águas residuais municipais e industriais
Termofílicas	50-60	Tratamento de águas residuais industriais

A temperatura elevada do digestor termofílico acelera o processo de digestão e de produção de metano, destruindo significativamente os agentes patogénicos. Tem a desvantagem do crescimento das bactérias ser lento, contando com uma elevada taxa de mortalidade das bactérias que são muito sensíveis às flutuações de temperatura do digestor [16]. A Tabela 3.14 apresenta as diferenças entre os digestores segundo as características de temperatura mesofílica ou termofílica.

Tabela 3.14: Comparação entre Digestores Mesofílicos e Termofílicos [24]

Característica	Digestor Mesofílico	Digestor Termofílico
Nível de carga	Mais baixo	Maior
Destruição de agentes patogénicos	Mais baixa	Maior
Sensibilidade a agentes tóxicos	Mais baixa	Maior
Custos operacionais	Mais baixa	Maior
Controlo de temperatura	Menos difícil	Mais difícil

Como já referido, os equipamentos de agitação/mistura têm também a função de balancear a temperatura do substrato.

O tempo de retenção do substrato no digestor está relacionado com as gamas de temperatura, “para a produção de biogás perto do máximo teórico, a gama de temperatura psicofílica requer um tempo de retenção de 40-100 dias, a gama mesofílica 25-40 dias e a gama termofílica de 15-25 dias” [16]. “A maioria dos digestores anaeróbios opera a temperaturas mesofílicas”[7].

### 3.10.3 Configuração

A digestão anaeróbia pode ocorrer num único tanque ou em dois ou mais tanques.

#### Uma fase

Um digestor de uma fase, Figura 3.14, consiste num único tanque cujas operações são adicionar e retirar lamas, misturar, aquecer, recolher gás e material flutuante. A estratificação do conteúdo do digestor facilita as operações. Do cimo para o fundo: biogás, espuma, sobrenadante, lama ativada e areias. Há dois grupos de bactérias a atuar em simultâneo: as formadoras de ácido (crescem mais rapidamente e são mais tolerantes às variações das condições operacionais) e as formadoras de metano. Ocorre frequentemente um desequilíbrio entre ambas, o que pode causar uma diminuição da alcalinidade resultando na falha do digestor [24].

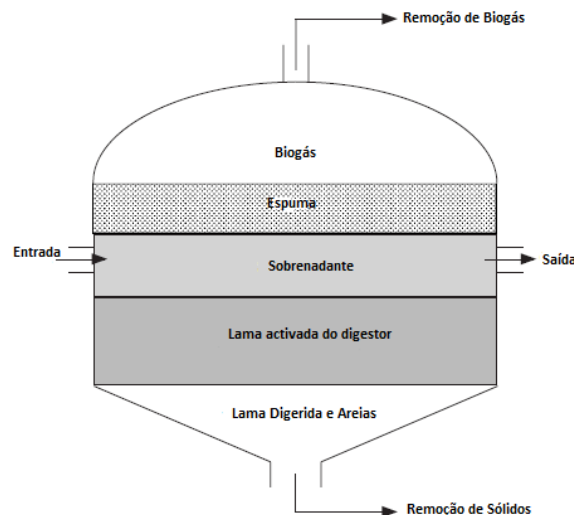


Figura 3.14: Digestão de uma fase [24]

#### Dois fases

Deste processo fazem parte pelo menos dois tanques, separados, Figura 3.15. É mais eficiente e estável em relação ao de uma fase. O tempo de retenção hidráulica (tempo médio em que o material é mantido no digestor) é menor. Os materiais tóxicos são removidos na primeira fase. Em alguns casos a produção de ácidos ocorre na primeira fase (hidrólise) e a produção de metano na segunda fase, noutros, a digestão da lama e a produção de metano ocorrem simultaneamente e continuamente num tanque e o espessamento da lama e o seu armazenamento, ocorrem no outro. Nesta configuração, a primeira fase é continuamente agitada e aquecida para a digestão da lama, a estratificação é permitida na segunda fase [24]. A recolha de biogás na segunda fase pode elevar o rendimento energético em mais 10% [10]. A Figura 3.15 c) representa uma combinação de digestão anaeróbia mesofílica e termofílica que melhora a desidratabilidade das lamas e a redução de agentes patogénicos.

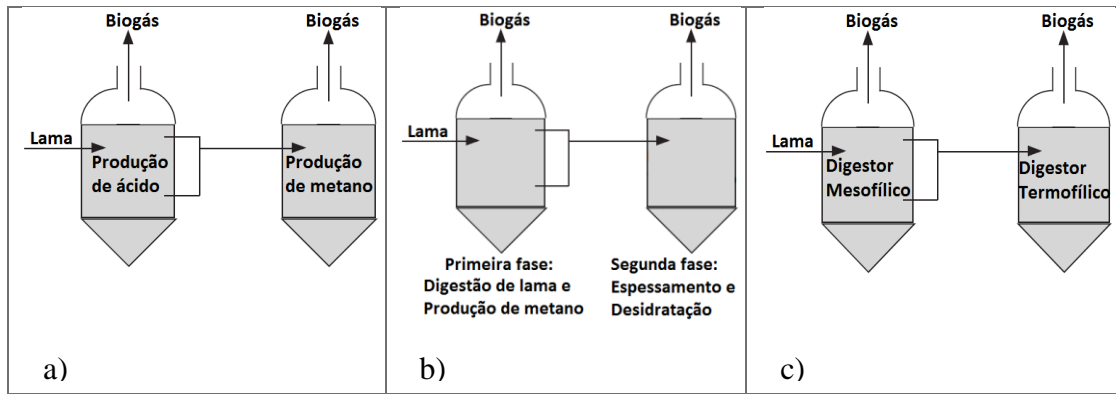


Figura 3.15: Digestão de duas fases [24]

# Capítulo 4

## Ferramentas Lean

### 4.1 Introdução

Lean Thinking refere-se a uma “filosofia de liderança e gestão mundialmente aplicada em todas as áreas de atividade económica, que tem como objetivo a sistemática eliminação do desperdício e criação de valor”. No seio de qualquer organização que crie um produto ou serviço, o valor é definido pelas partes interessadas na organização, desde os clientes, acionistas, colaboradores, sociedade, até aos fornecedores. O desperdício manifesta-se em todas as ações, materiais, informações, processos que não cumpram os requisitos definidos [31].

O sistema da *Toyota Production System* (TPS) é referido como uma das correntes de gestão que está na origem do pensamento *Lean*. É representado sob a forma de um edifício com várias divisões intimamente ligadas. O topo define claramente os objetivos de melhor qualidade com zero defeitos, menor custo, menor tempo, melhor serviço, maior segurança, maior moral e motivação. A base assenta fundamentalmente no respeito pelas pessoas, focando a gestão visual para que todos sejam envolvidos através da aplicação dos sentidos na deteção de desperdício e na uniformização e estabilização de processos como forma de reduzir a variabilidade e nivelar a produção. As três divisões centrais referem-se: à produção em *Just-In-Time* (JIT) que permite fornecer o produto ou serviço certo, no momento certo e na quantidade certa, recorrendo à produção puxada e ao sistema *Kanban* “para controlar e disciplinar o fluxo de materiais, pessoas e informação” [31]; à melhoria contínua assente numa evolução gradual apoiada no ciclo *Plan-Do-Check-Act* (PDCA) repetido continuamente até a perfeição ser alcançada e à automação de processos (*Jidoka*) que se rege pela qualidade na fonte.

São várias as ferramentas de que se serve para alcançar os objetivos. A Figura 4.1 apresenta uma compilação das ferramentas, baseada nas várias representações disponíveis, na qual se destaca o VSM, TPM, e SMED, descritos de seguida.

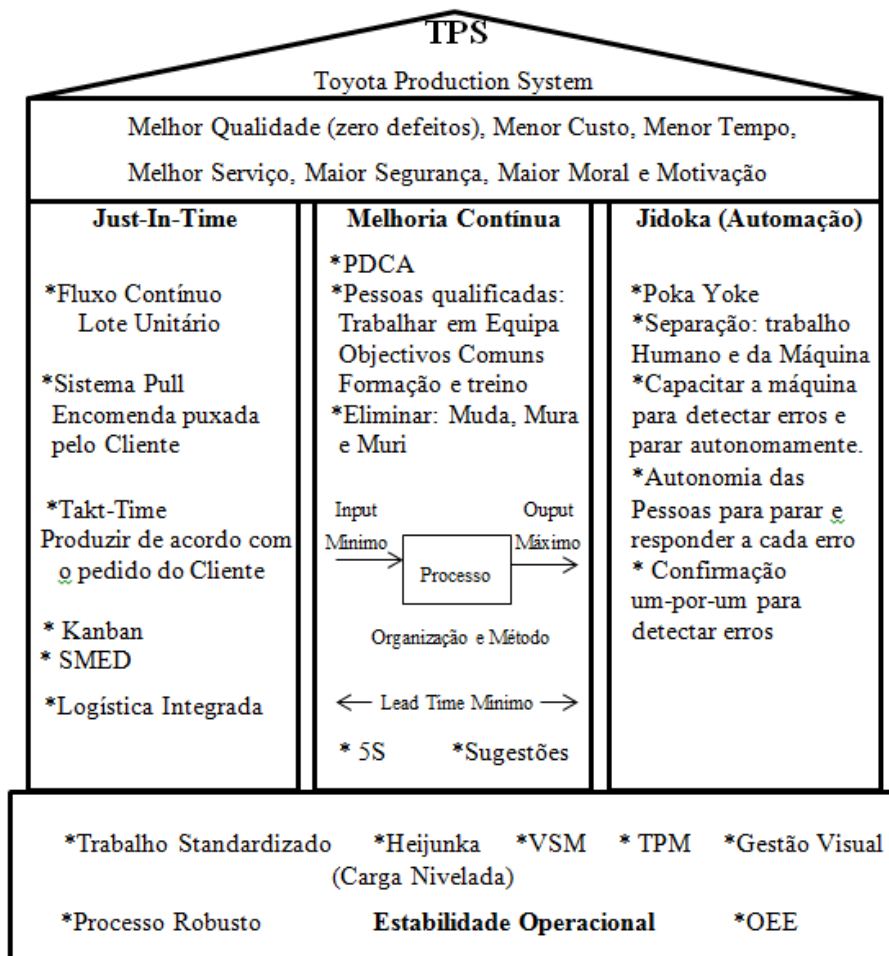


Figura 4.1: Representação da casa Toyota Production System

## 4.2 Técnicas e ferramentas de identificação dos desperdícios

São várias as técnicas e ferramentas fornecidas pelo modelo de gestão empresarial japonesa para a identificação dos desperdícios: os três MUs, os 5M+Q+S; o Fluxo de operações e os Sete Desperdícios de Taiichi Ohno.

Os três Mus: São MUDA, MURA e MURI e têm por objetivo igualar a carga à capacidade: i) MUDA refere-se ao desperdício puro, a tudo o que não acrescenta valor, devendo ser reduzido ou eliminado; ii) MURA diz respeito a tudo o que é variável por ineficiência do sistema, como irregularidades ou inconsistências. A solução requer a aplicação da ferramenta Just-In-Time (JIT), tendo o material certo, no momento certo e na quantidade requerida. O sistema *Pull* é indicado para equilibrar os processos, deixando que os produtos ou serviços sejam puxados pelo cliente. iii) MURI representa tudo o que é irracional, conduzindo a excessos ou insuficiências. A uniformização do trabalho garante o mesmo procedimento para todos, tornando os processos mais previsíveis estáveis e controláveis.

Os **5M+Q+S**: É efetuada uma análise dos desperdícios mediante as áreas onde podem ocorrer (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: 5 M + Q + S [31]

Fontes de desperdício	Desperdícios associados
<i>Men</i> (Colaboradores)	Andar, esperar, procurar, movimentos desnecessários
<i>Machine</i> (Equipamento)	Avaria, pequenas paragens, arranque, <i>setup</i> , sobredimensionado, pouco flexível, componentes de desgaste rápido, velocidade de produção diferente da programada, produção de defeitos, afinações e regulações para repor valores de origem
<i>Method</i> (Método)	Produção <i>Just-In-Case</i> ou antecipação da produção, grandes lotes, transportes e movimentações, falta de uniformização
<i>Material</i> (Material)	<i>Stock</i> , manuseamento e armazenamento
<i>Management</i> (Gestão)	Gestão de materiais, <i>stocks</i> , tempo, recursos, comunicação, práticas de planeamento e de controlo
<i>Quality</i> (Qualidade)	Defeitos, erros, retrabalho, inspeção e controlo
<i>Security</i> (Segurança)	Acidentes, redução de velocidade, layout perigoso, outras paragens

**O Fluxo de operações:** Numa empresa existem ações associadas a: i) Retenção, onde o fluxo para devido a *setup*, falhas de balanceamento, existência de problemas, acumulação de *stock*; ii) Transporte, onde os artigos são deslocados sem criação de valor; iii) Processamento, que só é desperdício quando é retrabalho; iv) Inspeção, onde se identificam e eliminam defeitos, não cria valor, não elimina as causas, apenas reduz ou elimina os defeitos no cliente.

**Os Sete Desperdícios de Taiichi Ohno:** De acordo com [31], as sete categorias de desperdícios mais conhecidas foram identificadas por Taiichi Ohno e Shigeo Shingo no decorrer do desenvolvimento do sistema da *Toyota Production System* (TPS), no início dos anos 50 e incluem:

1. Excesso de produção: Produz-se mais do que é necessário ou antecipa-se a necessidade, originando a ocupação de recursos humanos e materiais, a perda de flexibilidade, a antecipação de compra e o aumento da valorização em *stock*. As causas estão associadas à produção em grandes lotes para baixar o *setup* (para isso existe a ferramenta SMED), rentabilização dos transportes, antecipação para não falhar na entrega, acumulação de produtos em *stock* para fazer face aos defeitos de fabrico. As soluções são a uniformização do trabalho, o balanceamento do posto,

criação de fluxo contínuo de produção (produzindo peça a peça), produção puxada (*Pull*) pelo cliente e *Kanban*, produção em JIT, redução do tamanho do lote.

2. Tempos de Espera de materiais, ferramentas, tempo de ciclo das máquinas, avarias ou de informação. Originam fluxos obstruídos por defeitos de qualidade, avarias ou acidentes. As causas prendem-se com *layout* mal definido, atrasos nas entregas de fornecedores internos e externos, capacidade de oferta desfasada da procura, produção de grandes lotes. As soluções são: o nivelamento da produção (fazendo o que é pedido), *setup* rápido, melhorar o planeamento da produção, sincronizar o fluxo entre os vários estágios (*Kanban*), utilização de células de produção e formação dos operadores, racionalização das etapas de carga e descarga, rapidez na comunicação de eventos e velocidade de reação, planeamento da troca de turno, implementação de Manutenção Produtiva Total (TPM).
3. Transportes e movimentações. O Transporte de componentes dentro ou entre as instalações ou etapas, ex. uso de empilhadores, muda a posição do produto mas não lhe acrescenta valor. O movimento supérfluo do operador para alcançar e mover o material ou ferramentas a longas distâncias, procurar documentação, apanhar, baixar, levantar, escolher, caminhar, processar informação ou efectuar montagens. Transportes e movimentações ocupam espaço na fábrica, provocam defeitos, originam acidentes, aumentam os custos, aumentam o tempo de produção, originam *stock* para não levar uma peça de cada vez. As soluções requerem a implementação de *Kanban*, operadores e equipamentos mais flexíveis, produção de peças unitárias, minimização do esforço na receção e transporte de materiais, organização do chão-de-fábrica, estudo dos movimentos do homem e da máquina, implementação do sistema de controlo visual, envolvimento dos operadores nas ações de melhoria.
4. Desperdício do próprio processo, relacionado com a falta de treino e com operações desnecessárias que podem provocar defeitos, desperdício e retrabalho. As soluções podem requerer a substituição de processos por outros mais eficientes, a automatização e a formação de colaboradores.
5. *Stock*, engloba todos os inventários, incluindo entre os processos (*Work-In-Process*). Origina custos de capital, e oculta problemas da empresa. A causa pode ser um *layout* mal definido, processos desequilibrados, problemas de qualidade (para fazer face aos defeitos), antecipação da produção (*Just-In-Case*), *setup* demorado, gargalos e estrangulamentos, lotes grandes para baixar o tempo de *setup*, sensação de segurança e rentabilização de transportes. As soluções serão o reforço do planeamento e controlo de operações, produção puxada, melhoria na qualidade do processo, mudança mais rápida de ferramenta (SMED), redução do tamanho do lote ou nivelamento e flexibilização da produção, redução do *lead time*, sincronização do fluxo de trabalho e redução das interrupções no fluxo, criação de capacidade para movimentar cargas pesadas.

6. Defeitos ou problemas de qualidade que requerem a repetição ou correção dos processos. Originam retrabalho, escolha, aumento dos custos de produção. A causa parte da aceitação do erro como humano, ênfase na inspeção, ausência de padrões de autocontrole, ausência de padrões nas operações (falta de fichas técnicas). As soluções serão: a uniformização de operações, processos e fichas técnicas; dispositivos de detecção de erros, qualidade na fonte (se está mal, pára); eliminar stocks (é necessário escolher as peças boas e as defeituosas); eliminar movimentações; automatizar atividades, controlo da variabilidade do processo; Controlo Estatístico do processo (SPC).
7. Trabalho desnecessário, não requerido pelo cliente. Refere-se à realização de procedimentos desnecessários para produzir os artigos; utilização de ferramentas ou equipamentos inapropriados; previsão de níveis de qualidade superiores aos exigidos. A causa advém de operações isoladas (movimento); desmotivação das pessoas; *layout* incorreto; formação insuficiente; Instabilidade nas operações. As soluções são: implementar fluxo contínuo; apostar na formação e treino; redesenhar o processo, simplificando as etapas; rever a necessidade de cada etapa do processo; Redesenhar o produto; padronização do trabalho; implementação de dispositivos Poka-Yoke (à prova de falha); evitar o uso de equipamentos complexos de grande capacidade.

(7+1) Diz respeito ao talento ou potencial humano não utilizado. Os operadores devem conhecer as sete formas de desperdício para o saber identificar e eliminar.

### 4.3 Mapeamento da cadeia de valor

Numa cadeia de valor, as matérias-primas são recebidas, prosseguem para o processo produtivo onde é avaliado o valor que cada elemento ou etapa lhes acrescenta até obtenção de um produto final que será entregue ao cliente de acordo com o seu pedido

Na Filosofia TPS, o mapeamento de processos ou mapeamento da cadeia de valor ou *Value Stream Mapping* (VSM), “é uma das técnicas mais poderosas para conhecer o estado atual da cadeia de valor” [31]. Pretende retratar a situação atual, futura e a ideal. Os objetivos a alcançar são a ausência total de desperdícios na cadeia de valor, a melhoria do todo com atenção no fluxo para detetar o não-valor. Em cada situação estão representados os fluxos de materiais, informação e pessoas, os desperdícios associados, os indicadores de desempenho dos processos, a análise da sequência e interatividade das atividades e o grau de intervenção de clientes, fornecedores e colaboradores. Assim, o estado ideal é definido como livre de defeitos, lotes de uma unidade, fornecimento imediato, de acordo com o pedido do cliente, sem desperdícios e com segurança. Depois do estado atual são desenhados vários estados futuros com a finalidade de alcançar um estado ideal.

A elaboração do VSM é o primeiro passo requerido em qualquer iniciativa de melhoria *Lean*, onde devem ser analisadas as oportunidades visíveis do mapa para eliminar o desperdício e obter um impacto positivo na performance financeira da empresa e todas as partes interessadas [32].

A aplicação de um VSM: i) ajuda a visualizar mais do que a nível do processo único na produção (ex. montagem, solda, etc.), conseguindo-se ver o fluxo global; ii) ajuda a detetar o desperdício e as fontes do mesmo na cadeia de valor; iii) proporciona uma linguagem comum referente ao processo produtivo (definindo um estado futuro e identificando lacunas entre o fluxo atual e o estado futuro); iv) leva a discussões sobre o fluxo, à análise de detalhes e à tomada de decisões; v) combina os conceitos e as técnicas *Lean*, isto é, combina o mapa com princípios e ferramentas *Lean*, evitando escolhas aleatórias; vi) forma a base de um plano de execução, ajudando a projetar como o fluxo geral deve funcionar; vii) mostra vínculos e ligações entre o fluxo de informação e o fluxo de material; viii) o VSM é uma ferramenta qualitativa através da qual se descreve, em detalhe, como a instalação deve funcionar no sentido de criação de um fluxo e como vamos atuar para alterar os indicadores numéricos. Neste aspeto e na identificação de passos de valor não-acrescentado, do tempo de entrega (*Lead Time*), distâncias percorridas, quantidade de inventário num processo, etc., é mais útil do que os métodos quantitativos e diagramas de fluxo [33].

Em relação às distâncias percorridas, sugere-se a elaboração de um “diagrama de *Spaghetti*”, como complemento ao VSM, para melhorar a análise aos processos, marcando os fluxos de pessoas, equipamentos e informação. O resultado final será a perceção dos metros percorridos, tempo perdido em deslocações e fluxos mal definidos [31].

Devem ser envolvidas pessoas chave dos departamentos e de cada uma das etapas do processo. Para coordenação e execução dos mapas, deve ser selecionada uma pessoa que reporte diretamente ao diretor. Todos têm de estar predispostos para a mudança.

Como referido, a análise da cadeia de valor pressupõe uma visão global das operações de um processo ou serviço e o planeamento das ferramentas necessárias para otimizar os resultados. A representação do estado atual é a base para a construção de um estado futuro, onde cada fonte de desperdício é uma oportunidade de melhoria.

#### **4.3.1 Desenho do *Value Stream Mapping* atual**

Para começar a mapear um processo de fabrico, no caso de existirem vários produtos, deve ser selecionada uma determinada família de acordo com o maior impacto financeiro, o maior número de etapas englobadas, o processo mais conhecido ou onde é maior a probabilidade de sucesso. O VSM deve ser desenhado à mão, a lápis, usando os símbolos definidos pela organização ou os símbolos padrão apresentados na Figura 4.2. O plano de fundo tanto pode

ser um papel de cenário como uma parede onde podem ser usados post-it de várias cores representando as etapas, os indicadores e as possibilidades de melhoria “Kaizen Burst”.



Figura 4.2: Símbolos usados para o desenho do VSM

A equipa a constituir deverá ser multifuncional. O mapeamento deve começar no terreno com duas caminhadas, a primeira com a equipa e o diretor de produção desde a receção de matéria-prima até ao cais de carregamento do produto, o que tornará a equipa familiar com o fluxo atual e a sequência das etapas do processo; a segunda caminhada será efetuada pela equipa desde o cais de carregamento até ao cais receção de matéria-prima, o que trará uma melhor perceção do ritmo de produção definido pelo cliente, no qual a instalação deve operar [34]. O mapeamento começa com o símbolo “Cliente/Fornecedor”, cliente do lado direito do desenho e fornecedor do lado esquerdo, no meio estará a representação do departamento responsável pela gestão da produção. Nos transportes, deve ser colocada a frequência. Devem *ser desenhadas as setas que representam o fluxo de informação entre os três (eletrónico, telefone, fax, verbal)*. Um indicador representado próximo do símbolo do cliente numa caixa de informação é o número de peças requeridas diariamente pelo cliente. O ritmo de produção é imposto pelo cliente através do cálculo do *Takt Time* (relação entre o tempo diário disponível pela instalação, em segundos, e o número de peças requeridas pelo cliente, por dia).

De seguida são desenhadas sequencialmente as caixas de “Processo” representando um processo, operação/tarefa, máquina ou departamento, onde pode ser colocado o número de operadores requeridos. Entre as caixas são colocadas as setas de fluxo *Push* (quando as movimentações do material são empurradas pelo produtor) ou *Pull* (quando as movimentações do material são puxadas pelo cliente) e os triângulos de inventário que assinalam a quantidade de material em *stock* no momento da elaboração do VSM.

Na “caixa de registo de dados” são colocados os indicadores significativos do processo como:

- O tempo de ciclo ou *Cycle Time* (C/T) em segundos, que mede por observação, o tempo de saída entre duas peças consecutivas do final da etapa considerada. Pode-se ainda considerar como o tempo que um operador demora a passar por todos os elementos do seu posto de trabalho, antes de os repetir.
- O tempo de mudança ou *Changeover Time* (C/O), definido como o tempo necessário para preparar uma ferramenta, um equipamento, um processo ou um sistema para a mudança de produção entre a última peça boa do último lote até à primeira peça boa do lote seguinte. Pode indicar o tempo que uma peça significativa no processo demora a ser substituída.
- O tempo de disponibilidade do equipamento ou *Uptime* mede a percentagem do tempo em que uma máquina está disponível para produzir. É calculado pelo rácio entre o tempo de trabalho útil (tempo de paragem previsto, retirando o tempo de paragem não planeada) e o tempo de trabalho previsto. O tempo de paragem não planeado inclui atrasos por mudança de material ou em ajustamentos, reparações, arranque ou outra perda de produção não planeada.
- O número de operadores, necessários para a tarefa, usando o ícone do operador.
- O tamanho do lote.
- O tempo de trabalho, retirando os intervalos.
- A taxa de desperdício, calculado pelo rácio entre a valorização do desperdício e o custo dos bens produzidos.

Deve ser feita a representação do fluxo de informação entre o departamento que gere a produção e as diferentes etapas do processo. A “Linha do Tempo” é desenhada ao fundo do mapa e inclui, entre as etapas, os tempos de valor não-acrescentado (tempos de atividades que não acrescentam valor ao produto como os tempos de espera, desperdício de material ou transportes), no caso de existência de *stock*, o tempo de espera é calculado pelo rácio entre o *stock* aí existente e o número de peças ou produtos totais diários requeridos pelo cliente. A linha do tempo inclui também, debaixo de cada tarefa, o tempo de ciclo que representa o valor acrescentado (*Value Added*), é o tempo dos elementos de trabalho que transformam o produto de uma forma que o cliente está disposto a pagar e que não inclui valor não acrescentado (*Non Value Added*). No “Total da linha do tempo” calcula-se o *Lead Time* que

representa o número de dias que uma peça ou um produto leva a atravessar a cadeia de valor desde o início como matéria-prima, ao final como produto carregado para o cliente e o tempo de ciclo total que representa o tempo produtivo. A Figura 4.3 mostra o VSM atual de um processo de fabrico fictício, em que o *Lead Time* calculado é de 16 dias, enquanto o tempo produtivo é somente de 135 segundos. “Quando o *Lead Time* excede largamente o tempo produtivo, a gestão deve proceder a uma rápida intervenção para eliminar ou minimizar as atividades que não acrescentam valor” [31].

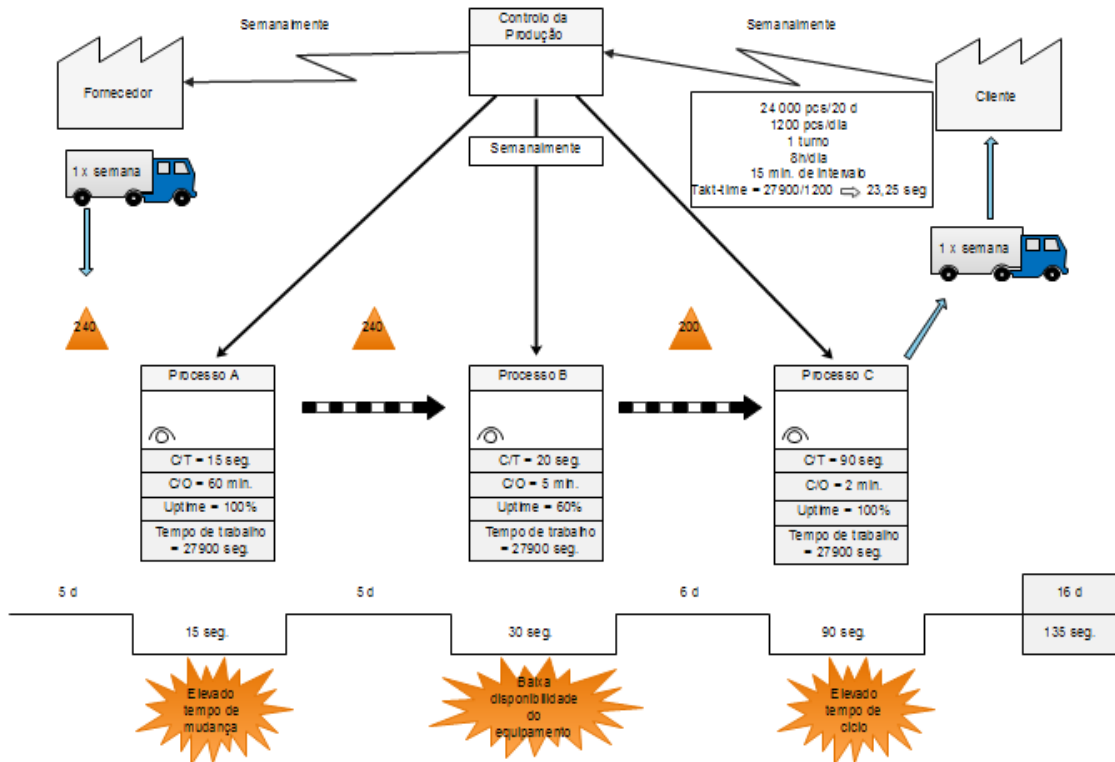


Figura 4.3: Exemplo de um VSM atual

#### 4.3.2 Como definir o mapa de estado futuro?

A primeira fase para o VSM futuro passa pela criação de uma consciencialização do que são desperdícios e a forma negativa com que afetam a cadeia de valor. O tratamento dos problemas deve ser priorizado com base no custo para a empresa e na dificuldade em resolver [31].

Sugere-se olhar para o mapa atual e ver onde estão as maiores áreas de oportunidade de melhoria. Poderemos notar grandes quantidades de inventário; processos desligados, cada um com a sua programação, empurrando o seu *output* para o processo seguinte; um lead time longo, comparado com o curto tempo de processo; longas deslocações; problemas de qualidade; baixa disponibilidade dos equipamentos e da instalação devido a avarias; elevados

tempos de mudança; atrasos ou fluxos de informação intermitentes. A seguir, perguntar que melhorias serão necessários introduzir para a cadeia de valor fluir como designado, num mapa futuro [33].

Apresentam-se as questões-chave para definir corretamente as soluções futuras no mapa atual: i) **Deve começar-se pelo cálculo do *Takt-Time***, que impõe o ritmo de produção por unidade requerida pelo cliente. ii) **Decidir produzir por encomenda ou para um supermercado.** Fazendo o balanço entre os riscos da posse de *stock* e os condicionantes da capacidade produtiva e flexibilidade do sistema para produzir diretamente para expedição, aconselha-se o trabalho por encomenda de modo a estabelecer um fluxo contínuo com clientes e fornecedores. Quando não for possível estabelecer o fluxo contínuo, é necessário a criação de um supermercado, com sistema *Pull*, porque os processos trabalham muito depressa ou muito devagar e mudam para múltiplas famílias de produção; os mesmos poderão estar no fornecedor, sendo impraticável o fornecimento à unidade; poderão ter um elevado *lead time* ou serem muito instáveis para ligação direta a um fluxo contínuo. O controlo da sua produção passa pela ligação aos seus clientes a jusante, assim, o sistema *Pull* instala-se onde o fluxo contínuo é interrompido e o processo a montante necessita de continuar a produzir em lote. iii) **Decidir enviar a programação do cliente para um único processo produtivo** [31], [33]. “Usando um supermercado *Pull*, só é necessário programar um ponto na cadeia de valor” [33], referindo-o como marca passo/ritmo ou *pacemaker* porque “a forma como é controlada a produção neste ponto, acerta o ritmo de todos os processos a montante. As flutuações de volume de produção neste ponto afetam a capacidade nos processos a jusante”, isto é, a transferência de material a partir do marca passo até ao final do processo tem de decorrer como um fluxo, sem supermercados, pelo que este é usualmente o processo mais perto da saída para o cliente.

Devem-se anotar as melhorias necessárias nos equipamentos ou nos procedimentos, através de indicações no mapa atual.

### ***Kaizen Burst Lightning***

No desenho do estado atual são incluídos *Kaizen Burst* que identificam o local de necessidade de uma melhoria ou de um evento *Kaizen*. Representam melhorias futuras, criticamente necessárias em processos específicos que prejudicam o fluxo. Os post-it podem ter essa função, assinalando áreas a intervir e sugestões de implementação com ganho imediato.

### **Análise das causas “5 Porquês e diagrama de causa-efeito”**

Sugere-se o uso do método dos 5 porquês (5 *Why's*), para identificar e reduzir ou eliminar a causa raiz do desperdício detetado ao longo do sistema através do VSM. Deve-se começar com a identificação do problema específico, escrevê-lo num papel e perguntar de seguida porque

é que este acontece e escrever a resposta por baixo da descrição do problema. Se a resposta dada não identifica a causa raiz, deve-se continuar a perguntar “porquê” até que a causa raiz do problema seja identificada. Algumas situações requerem menos de cinco perguntas e outras requerem mais [34]. De acordo com a literatura, este método consegue resolver oitenta por cento dos problemas. Pode ser usado em conjugação com a ferramenta de análise de problemas “diagrama de causa-efeito”, Figura 4.4, também conhecido por diagrama de *Ishikawa* ou diagrama espinha de peixe ou diagrama 6M, onde para cada causa “M”: Máquina (tecnologia), Método (processo), Material (matéria prima, consumíveis e informação), Mão-de-Obra (trabalho físico e mental), Medições (Inspeção) e Mãe Natureza (ambiente), se vai perguntando “porquê” até à causa raiz. “Após identificar todas as causas potenciais, quantificar o peso de cada uma na criação do efeito” [31].

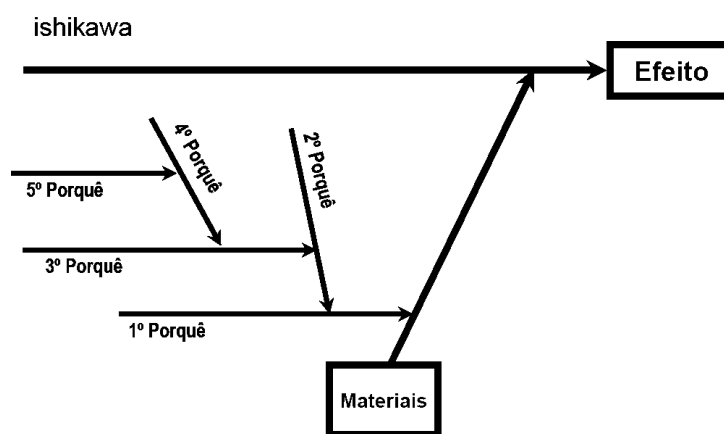


Figura 4.4: *Ishikawa* e 5 porquês

### Eventos *Kaizen*

Após a identificação da causa raiz de um problema, as soluções podem ser encontradas através eventos *Kaizen* [34]. Estes eventos são também designados eventos de rápida mudança e decorrem entre dois a cinco dias úteis, podendo ser planeados a partir dos *Kaizen Burst* assinalados no VSM. As equipas devem ter entre seis a oito pessoas, onde metade deve pertencer ao processo analisado, uma ao processo anterior e outra ao processo seguinte, uma da Manutenção e outra da Qualidade e um líder que conduzirá o trabalho focado na melhoria global do sistema de operações da empresa [31]. A transição do estado atual para o estado futuro (forma ideal de operação que orienta o avanço das operações atuais) poderá envolver vários projetos *Kaizen* definidos como necessários para atingir o estado futuro, devendo a equipa discutir e definir quais os eventos imediatos a implementar que melhor ajudarão a atingir o estado futuro planeado e o tempo em que irão decorrer, de acordo com as limitações da empresa. Os planos de ação que levarão ao estado futuro ou (to-be), devem ser traçados tendo por base os objetivos, restrições de tempo e os recursos disponíveis [31], [34]. O próprio desenho do mapa do estado atual (as-is) torna-se desperdício se não o usamos para

criar e implementar de imediato um mapa futuro que elimine as fontes de desperdício identificadas [33].

## 4.4 Resolução de problemas com A3 Report

A introdução do formato A3 pela *Toyota Motors Corporation* (TMC), veio facilitar a perceção dos problemas, desafios e responsáveis pelas ações, através da documentação de um problema numa única folha; o conteúdo do formato A3 é geralmente orientado por nove elementos críticos que contribuirão para uma boa gestão de projetos [31], a referir:

- 4 **Fundamento:** Breve descrição do problema, desafio ou necessidade; definindo os motivos do projeto (para a empresa, porque é importante resolver?).
- 5 **Condição Inicial:** Compreender o estado da situação inicial. Reunir métricas ou dados para qualificar e priorizar o problema; descrever onde o problema ocorre, quando ocorre, em que quantidade (ex.: *Pareto*, *VSM*).
- 6 **Alvo a atingir:** Afirmação do estado pretendido ou estado futuro. Quanto se pretende melhorar nas métricas?
- 7 **Procedimento ou abordagem ao problema:** Por norma, assente no ciclo: *Plan-Do-Check-Act* (PDCA), ou no método científico (teste de hipóteses).
- 8 **Análise da causa raiz:** Mostrar a lógica da escolha da (s) causa (s) raiz, baseadas em factos ou dados (ex.: aplicação dos 5W, análise do custo-benefício, diagrama de *Ishikawa*).
- 9 **Soluções propostas:** Descrição das soluções desenvolvidas para minimizar as causas (*Brainstorming* para determinar as soluções).
- 10 **Plano de implementação das soluções:** Calendarização da implementação, incluindo ações que serão efetuadas, quem as fará e em que data (5W+2H).
- 11 **Ilustrações gráficas:** Ilustrações gráficas (gráficos de radar, desenhos, croquis ou fotos) para rápida informação e perceção do que se pretende. Inclui normalização do trabalho.
- 12 **Reflexão e planos futuros:** Que ações se podem tomar para estender as soluções a outras partes da empresa? (no final da folha A3, colocar a data e a entidade responsável a quem reportar).

## 4.5 Total Productive Maintenance

A filosofia de gestão fabril *Total Productive Maintenance* (TPM) ou Manutenção Produtiva Total baseia-se na motivação dos colaboradores, para que se sintam responsáveis pela conservação das ferramentas e equipamentos de trabalho, permitindo estabilizar o fluxo produtivo pela redução da variabilidade do processo; melhoria dos níveis de qualidade devido a menos erros e melhor utilização do equipamento; participação ativa; menores custos de

manutenção; maior produtividade devido a menos paragens e maior rentabilização dos equipamentos [35].

Para iniciar um programa TPM, têm de ser verificados cinco objetivos fundamentais: i) Maximização global do equipamento; ii) Os equipamentos devem ter um sistema de manutenção preventiva em todo o seu ciclo de vida; Implementação conjunta do TPM pela Direção, Produção, Manutenção e Engenharia; iii) A participação de todos os empregados desde a Gestão até ao chão de fábrica; iv) Implementação baseada em atividades de pequenos grupos.

Se representarmos o TPM como um edifício, definimos a base como a eliminação sistemática dos desperdícios e oito pilares que são descritos a seguir.

**Pilar 1 - Manutenção Autónoma:** Os operadores devem ser preparados para a execução de limpezas, lubrificações, pequenas reparações e inspeções de acordo com as instruções do construtor, prevenindo potenciais problemas. Devem ter a capacidade de efetuar um bom diagnóstico, resolução de problemas e disciplina de comportamento. Qualquer operador e a equipa de manutenção têm a responsabilidade mínima de realização de limpeza, inspeção e reparação da área e equipamentos; devendo as questões não resolvidas de imediato ser marcadas a vermelho, criando um gráfico de responsabilidade para as mesmas [32].

**Pilar 2 - Manutenção Planeada:** É efetuada uma inspeção em determinado período de tempo estabelecido, para identificar possíveis falhas ou avarias. Pretende apoiar a Manutenção Autónoma efetuada pelos operadores, eliminar paragens não programadas, tornar o sistema de manutenção mais efetivo reduzindo a variabilidade, garantindo processos estáveis, trabalhando juntamente com a produção, eliminando as perdas relativas às quebras, falhas de operação, retrabalhos, produtos defeituosos e pequenas paragens. Pretende aumentar o tempo médio entre falhas ou *Mean Time Between Failures* (MTBF = tempo de funcionamento / número de avarias), reduzir o tempo médio de reparação ou *Mean Time To Repair* (MTTR = tempo de reparação / número de avarias). É importante a implementação de um programa de manutenção periódica que reponha os níveis de fluídos, substitua filtros, etc., devendo ser criados padrões de limpeza e de lubrificação e uma programação que indique as responsabilidades dos operadores e da manutenção [32].

São definidas sete etapas para implementação de um programa de Manutenção Preventiva:

1. Definição de prioridades para a sua implementação, através da análise dos equipamentos que avariam com mais frequência ou com intervenções mais demoradas ou custos de reparação mais elevados.
2. Reposição do estado normal através da Manutenção Autónoma, corrigindo anomalias, limpando, lubrificando e inspecionando;

3. Análise de componentes e suas avarias, fiabilidade e manutibilidade, estabelecendo um plano de vigilância;
4. Manutenção Preventiva Sistemática, determinando a frequência de intervenção em intervalos regulares (horas de funcionamento, ciclos de operação), o estabelecimento de planos de manutenção e a definição de normas de manutenção;
5. Manutenção Corretiva ou Curativa para análise da localização dos pontos fracos, identificação das causas principais de paragem da máquina, criação de planos de recuperação que reduzam o tempo de reparação da máquina após avaria, melhorando a manutibilidade e a fiabilidade dos componentes. A implementação da Manutenção Corretiva torna a Manutenção Preventiva mais fácil pela eliminação de fontes de problemas (vazamentos, etc.) e pela melhoria de acesso ao equipamento para as intervenções. O uso de sistemas de lubrificação central é uma abordagem a considerar neste passo [32].
6. Melhorar Manutenção Sistemática (intervenções em intervalos regulares de Km, horas de funcionamento, ciclos de operação, etc.), diminuindo o tempo de diagnóstico, a frequência de intervenção, a gestão de peças e lubrificantes;
7. Manutenção Preditiva através de técnicas de diagnóstico, previsão da duração de vida e redução de custos. Após a Identificação dos “Xn” chave que causam a falha da máquina (abordagem Lean Six Sigma  $Y=f(X1, X2, \dots, Xn)$ ), deverá usar-se tecnologia para os monitorizar. Os “Xn” vêm normalmente da análise de temperatura, testes de vibração, testes elétricos, medições dimensionais, análise de óleos, etc. [32].

**Pilar 3 - Melhorias específicas:** Foco no equipamento, com atividades de redução das perdas que afetam a eficiência. As perdas são sistematicamente eliminadas através do processo de melhoria contínua, usando várias ferramentas “Kaizen”.

Este pilar engloba atividades que visam erradicar as seis grandes perdas que reduzem a eficiência global do equipamento ou *Overall Equipment Efficiency* (OEE): i) Falhas ou avarias; ii) Tempos de *Setup* (mudanças e ajustes); iii) Esperas ou pequenas paragens provocadas por outros processos; iv) Redução de velocidade ou cadência, relativamente ao inicialmente planeado; v) Defeitos do processo (qualidade do produto); vi) Redução de eficiência no arranque e não-conformidades ou desperdício na mudança de produto.

**Pilar 4 - Manutenção da Qualidade:** Baseia-se na definição de um padrão de funcionamento do equipamento que garanta a qualidade do produto final. As condições de funcionamento são regularmente verificadas e medidas, pelo que, as alterações fora do intervalo de valores permitem prever a ocorrência de defeitos e preparar iniciativas de resolução antecipada - Controlo Estatístico do Processo (CEP).

**Pilar 5 - Formação e Treino:** Desenvolver novas competências e conhecimentos para que os funcionários da manutenção e produção atinjam um elevado grau de confiança nas tarefas,

engrandecendo o rendimento operacional. Engloba atividades de diagnóstico das necessidades de formação técnica, o planeamento, realização e avaliação das ações de formação e treino. Promove a autoaprendizagem e a divulgação dos conhecimentos em cascata, na qual os formandos se tornam formadores. A aquisição de conhecimentos e a participação em formações devem ser contínuos a fim de se criar equipas altamente qualificadas e eficazes.

**Pilar 6 - Controlo Inicial:** Atividades que visam a redução das perdas no período entre o desenvolvimento do produto e o início da produção em série. Participa a Manutenção, Produção, Engenharia, Compras. Os conhecimentos e as melhorias alcançadas com o TPM passam dos equipamentos atuais para os novos equipamentos e produtos.

**Pilar 7 - Áreas Administrativas:** É necessário que todas as atividades organizacionais sejam eficientes. Nas atividades de TPM, os administrativos apoiam e orientam as tarefas a serem cumpridas, motivam e estimulam os resultados desejados.

**Pilar 8 - Segurança, Saúde e Ambiente:** É o pilar primordial. Tem como objetivos a anulação dos acidentes, garantia da preservação da saúde, bem-estar dos funcionários e do meio ambiente.

#### 4.5.1 Total Process Management

A filosofia de *Total Process Management* (TPM) deriva da filosofia *Total Productive Maintenance*, inicialmente desenvolvida para apoiar a manutenção do equipamento sendo posteriormente alargada a todo o processo. A pretensão de converter os modelos tradicionais de gestão e a eliminação contínua dos desperdícios, bem como o constante aperfeiçoamento dos processos, dos meios de produção e da qualidade dos produtos e serviços, torna-o conhecido pelo princípio dos cinco zeros [31]:

1. **Zero stocks:** procurar reduzi-los através da redução de tempos (processamento, transporte e *setup*), sincronizar processos, melhorar conhecimentos, eliminar as fontes de variação nos processos. A redução de todos os desperdícios levará à eliminação gradual dos *stocks* em excesso.
2. **Zero defeitos:** Desenvolver os processos de fabrico para prevenir a ocorrência de defeitos e, ao mesmo tempo, eliminar a necessidade de inspeção. Em cada fase do processo, não aceitar defeitos nem produzir defeitos. Procurar desenvolver processos à prova de erro para que isto seja possível.
3. **Zero papéis:** Eliminar os processos burocráticos, rever fluxos de informação e sempre que possível tirar partido das novas tecnologias e dos sistemas de informação.
4. **Zero tempos:** Eliminar tempos através da sincronização do fluxo de trabalho, procurar o balanceamento de cargas e a utilização de pessoas e equipamentos flexíveis. Rever as

questões associadas aos *layouts* e localizações, de forma a eliminar transportes, sempre que possível. Procurar a racionalização de transportes e movimentação de materiais.

5. Zero avarias: Envolver e responsabilizar todos os colaboradores nas atividades de manutenção do equipamento e sistemas, promovendo ações em grupo.

As principais causas de avarias referem-se a:

- Falha na manutenção dos requisitos fundamentais dos equipamentos: como limpezas, lubrificações, aperto de parafusos, etc.
- Falha na manutenção das condições corretas de operabilidade, tais como temperatura, vibração, pressão, velocidade, binário, etc.
- Falta de aptidões do operador, causando o funcionamento incorreto do equipamento.
- Falta de aptidões da equipa de manutenção, causando erros de manutenção.
- Deterioração física de rolamentos, engrenagens, dispositivos elétricos, etc.
- Deficiência no projeto do Equipamento, como material de construção (a máquina não é suficientemente robusta para o trabalho diário), dimensões (a máquina funciona bem dentro de certos parâmetros, mas é menos robusta fora de certas configurações), etc.
- Uso indevido do equipamento, usando um ciclo de trabalho leve para uma tarefa de ciclo de trabalho médio ou pesado.

Os programas bem-sucedidos de TPM resolvem todas estas questões [32].

Resume-se a implementação de um programa TPM em doze etapas, de acordo com a Tabela 4.2.

Para implementação do TPM, recorrem-se a indicadores que permitem avaliar o decorrer de todo o processo, incluindo o cumprimento dos objectivos definidos. Alguns exemplos são OEE; *Mean Time Between Failures* (MTBF) ou Tempo Médio entre Falhas; *Mean Time To Repair* (MTTR) ou Tempo Médio entre Reparações.

## 4.6 Single Minute Exchange of Die/Quick Changeover

Os objetivos do *Single Minute Exchange of die* (SMED) ou *Quick Changeover* (QCO) são entre outros, reduzir desperdícios (tempo, movimentos e material), aumentar a flexibilidade da empresa, melhorar o tempo de entrega do produto, aumentar a segurança, reduzir a quantidade de inventário, diminuir o tempo de *setup* (tempo de mudança de ferramenta, ajustes e correções, mudança de fabrico do produto, preparação de máquinas e processos), que não acrescenta valor ao produto ou serviço, aumentando o seu custo e tempo total. O tempo de *setup* longo tem origem em deslocações, procura, falta de ferramentas adequadas, tempos de espera elevados, falta de standardização de determinados componentes e do

método, ajustes e afinações. O tempo de *setup* é contabilizado desde a última peça boa do lote anterior até à primeira peça boa do lote seguinte. Nenhuma mudança levará mais do que dez minutos.

Segundo literatura, deve ser implementado em cinco etapas distintas:

**Etapa 1:** O ponto de partida é a existência de um processo de mudança sem método operatório, tempo de preparação muito variável e sem a distinção entre operações internas (efetuadas com a máquina parada) e externas (efetuam-se em paralelo com a máquina em funcionamento), máquinas que permanecem inativas por um longo período de tempo ou com os tempos de *setup* mais significativos, influência em outros postos do fluxo, causam grandes séries e sobre stocks recorrentes, gargalo do processo, possibilidade de aplicar as soluções a outros meios de produção similares.

**Etapa 2:** Efetuar entrevistas aos operadores e filmagens de todo o trabalho de preparação, análise do vídeo e cronometragem das diferentes operações, registo dos dados, divisão das operações em internas e externas, divisão das operações em categorias (transporte, aperto, montagem, etc.). Poderá ser elaborado um diagrama de Spaghetti para analisar as deslocações dos operadores. A elaboração de um *checklist* de todas as peças e fases necessárias para uma mudança de equipamento, com os nomes, especificações, regulações de pressão, temperatura, etc., serve para saber se todas as peças estão onde pertencem.

**Etapa 3:** Definir o máximo de operações internas que poderão ser efetuadas externamente, enquanto a máquina está em funcionamento, sem pensar em soluções de melhoria.

**Etapa 4:** Reduzir o trabalho interno, analisando os transportes, deslocações, movimentos, desperdício da máquina, simplificando fixações e apertos, eliminando ajustes e afinações. Verificar que trabalho pode ser efetuado em paralelo.

**Etapa 5:** O trabalho externo deverá ser analisado e melhorado na logística de suporte (melhoria de alocação e transporte de ferramentas), manutibilidade dos equipamentos (devem ser efetuados ensaios de funções para saber se estão em perfeito funcionamento), etc. Como complemento, toda a área envolvente terá de ser arrumada, definindo claramente o *layout* para cada elemento, tendo como base a ferramenta dos cinco Ss (organização, arrumação, limpeza, normalização e autodisciplina).

Será definido e standardizado o método operatório mais eficiente, que poderá conter os tempos de realização. Deve ser criado um gráfico de melhoria, definindo os objetivos a atingir.

Tabela 4.2: Implementação de *Total Productive Maintenance* em doze etapas [36]

FASES	ETAPAS		PONTOS PRINCIPAIS
Preparação para a Introdução	1	Manifestação da administração sobre a decisão de introduzir a TPM.	Esta manifestação deve acontecer num encontro interno da empresa, dedicado exclusivamente à TPM, e deve ser publicada num boletim interno da própria empresa.
	2	Campanha de divulgação e formação para a introdução da TPM.	Executivos: realizam estudos em grupo, consoante os cargos que ocupam. Funcionários em geral: devem ser orientados através da projeção de “slides” e de outros recursos multimédia.
	3	Estrutura para a implantação da TPM.	Engloba uma comissão e grupos de estudos por cada especialidade, bem como um secretariado.
	4	Estabelecimento de diretrizes básicas e metas para a TPM.	<i>Benchmarking</i> e metas: previsão dos resultados.
	5	Elaboração do plano diretor para a implantação da TPM.	Engloba desde os preparativos para a introdução até aos detalhes de implantação.
Início da Introdução	6	Início do programa da TPM.	Endereçar convites a clientes, a empresas relacionadas, e a empresas colaboradoras.
Implantação	7	Aperfeiçoamento individualizado dos equipamentos para se melhorar a sua disponibilidade operacional.	Seleção de um equipamento modelo, e organização de uma equipa de projetos.
	8	Estruturação da manutenção por iniciativa própria, de carácter espontâneo.	Método de evolução passo a passo, diagnóstico, e aprovação.
	9	Estruturação da manutenção programada pelo departamento de manutenção.	Manutenção preventiva sistemática e condicionada, controlo de construções, peças sobresselentes, ferramentas, e desenhos.
	10	Formação para melhoria do nível de capacidade técnica dos operadores dos equipamentos e dos técnicos de manutenção.	Formação concentrada de todos os recursos humanos envolvidos.
	11	Estruturação do controlo da fase inicial de operação dos equipamentos.	Manutenção preventiva, e análise dos custos do ciclo de vida dos equipamentos.
Consolidação	12	Execução total da TPM, e elevação do nível geral da empresa.	Procura de um maior desafio, através de objetivos cada vez mais ambiciosos.

# Capítulo 5

## Caso de Estudo

### 5.1 Introdução

Apresentam-se com algum detalhe os problemas do cenário atual: Gargalo da instalação provocado por baixa quantidade de lamas mistas e águas ruças sazonais, provocando baixa produção de biogás, paragem dos motores-geradores; baixa produção de eletricidade e calor, redução das condições ideais de temperatura da digestão anaeróbia. Aborda o desperdício das lamas digeridas, que devido ao não cumprimento da legislação em termos de zinco e *Escherichia Coli*, segue para aterro com custos elevados de transporte. Baseia-se num protótipo de VSM do estado atual para dar uma visão geral da instalação e de problemas recorrentes assinalados por *Kaizen Burst*, apontando a necessidade de eventos *Kaizen* de melhoria sistemática.

### 5.2 Apresentação da ETAR Municipal de Abrantes

A maior ETAR do Município de Abrantes, de nome ETAR da Fonte Quente, está situada em Alferrarede, foi construída em 1982 e serve atualmente uma população de 37.588 habitantes [37]. Faz parte do sistema regional de tratamento de resíduos com outras 26 ETAR. Em 2004, a Câmara Municipal de Abrantes com a participação do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), implantou o sistema de cogeração, valorizando o biogás produzido nos dois digestores já existentes. Para aumento da eficiência do processo, foi introduzido aquecimento no digestor primário. Atualmente a ETAR é gerida pela Abrantáqua, Serviço de Águas Residuais Urbanas do Município de Abrantes, S.A. que assume as vertentes de operação, manutenção, consumos e reabilitação das infraestruturas.

Em termos gerais, o processo de tratamento das águas residuais inclui i) **Obra de entrada**, onde existe um processo manual de desarenamento e de triagem grosseira de sólidos; ii) **Estação elevatória inicial**, composta por um poço de bombagem equipado com um grupo eletrobomba submersível mais um de reserva, elevando o afluente a tratar que chega à obra de entrada; iii) **Tratamento preliminar** através de gradagem, retirando trapos, paus, resíduos flutuantes e restos de comida; desarenação e remoção de gorduras através de um desarenador/desengordurador mais um de reserva, com uma ponte raspadora de superfície para as gorduras e de fundo para as areias, os dois resíduos seguem para aterro; iv) **Tratamento primário**, através de um decantador (primário) que recebe graviticamente o efluente vindo do desarenador. A decantação, que separa pequenas partículas que se encontram em suspensão, é facilitada pela adição de cloreto de ferro que precipita o fósforo,

possibilitando a obtenção de flocos de matéria orgânica poluente de maior dimensão. As lamas são chamadas de “primárias” e seguem para o poço de lamas; v) **Tratamento secundário ou biológico** com remoção do nitrogénio através de nitrificação-desnitrificação e decantação secundária onde se dá a separação entre a fase sólida e a líquida. Uma parte das lamas secundárias ou ativadas são recirculadas para o tratamento biológico dando continuidade à presença de microrganismos aeróbios que irão agregar a matéria orgânica poluente, o excesso junta-se às lamas primárias, formando as lamas mistas que seguem para um poço de lamas mistas onde lhes são adicionadas águas ruças, seguindo a mistura para o digestor primário; vi) **Tratamento terciário** do efluente resultante, efetuando-se a desinfecção de microrganismos patogénicos através da adição de hipoclorito de sódio numa câmara de contacto de forma labiríntica para promover um maior tempo de contacto; vii) **Digestão anaeróbia** das lamas mistas, processa-se em dois estágios por incluir um digestor primário e um digestor secundário resultando na produção de biogás para geração de energia elétrica e térmica na central de cogeração; viii) **Desidratação mecânica** das lamas digeridas, passam por um processo de desumidificação através de num filtro de banda ou por um espessamento em leitos de secagem.



Figura 5.1: Níveis de tratamento de águas residuais [38]

A Figura 5.1 resume as fases inerentes ao processo de tratamento das águas, das lamas mistas, do biogás e das lamas digeridas na ETAR Municipal de Abrantes. O diagrama linear da Figura 5.2 pretende mostrar com mais pormenor os processos em termos do fluxo de matéria-prima para a produção de biogás, produção de eletricidade e calor e os equipamentos envolvidos em cada etapa. Posteriormente é feita descrição correspondente a cada número indicado

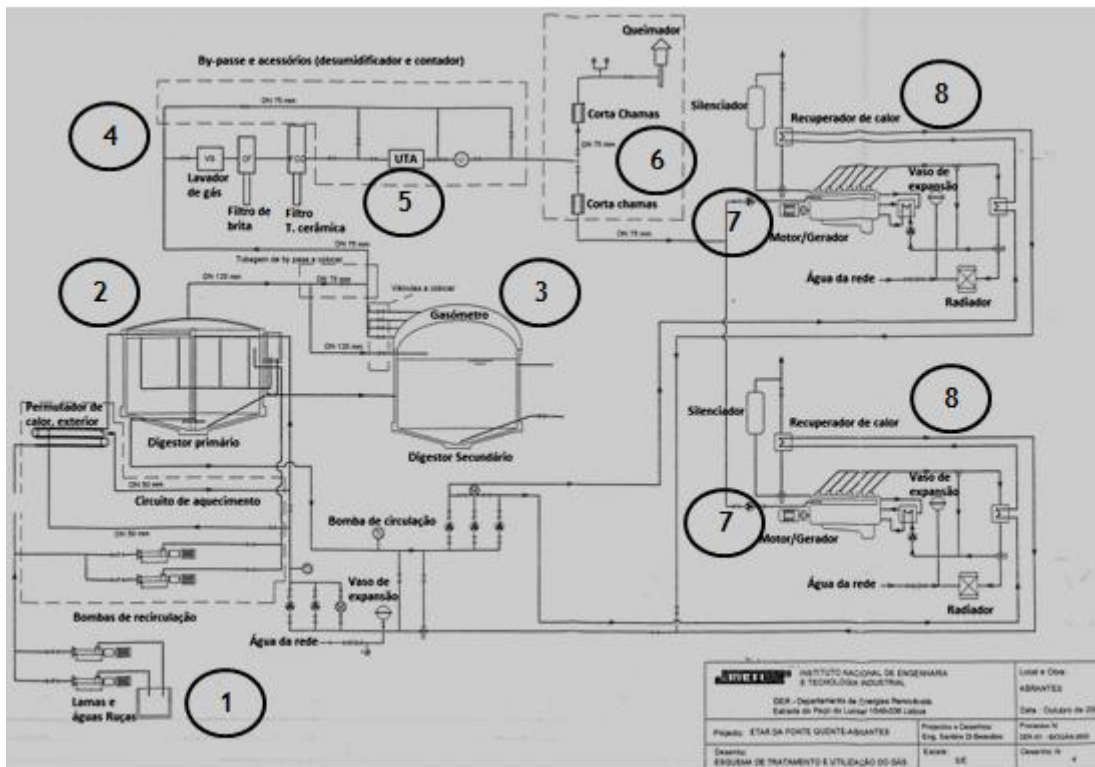


Figura 5.2: Diagrama linear da ETAR da Fonte Quente em Abrantes [39]

1. Estação de bombagem de águas ruças e de lamas mistas, composta por duas estações elevatórias com controlo de nível alto/baixo; regulação de capacidade de transferência através de reguladores de frequência e variadores de velocidade. Bombeiam cerca de 56 m<sup>3</sup>/h.
2. Digestor primário, vertical, de fluxo ascensional com volume útil de 1200 m<sup>3</sup>; do tipo mistura completa através de dois agitadores submersíveis intermitentes; aquecido através de um permutador de calor interno e outro externo, os dois garantem uma temperatura mesofílica constante e uniforme de aproximadamente 35°C no interior do digestor, levando geralmente a um tempo de retenção hidráulica da mistura entre 15 a 20 dias; cobertura em betão; tubagem de captação de biogás; tubagem aérea com ligação ao digestor secundário para a fase gasosa e tubagem subterrânea para a fase líquida (para equilíbrio de níveis e pressões); filtros de remoção de impurezas; entradas e saídas múltiplas para permitir uma eficaz distribuição dos resíduos no

fundo do digestor e evitar zonas inativas em termos de digestão; dispositivo para a descarga de condensados, com tubagens para a entrada e saída de lamas.

3. Digestor secundário com volume útil de 767 m<sup>3</sup> em betão armado. Recebe o biogás e as lamas líquidas que continuam a decompor anaerobiamente e a gerar mais biogás; relembrando que a recolha de biogás na segunda fase pode elevar o rendimento energético em mais 10%. A cobertura é um gasómetro com capacidade de armazenamento para 300 m<sup>3</sup> de biogás, constituído por duas membranas, uma de tela flexível em poliéster que segura o biogás e outra de revestimento em PVC que protege a primeira.
4. Linha de tratamento de biogás que retira sólidos em suspensão e reduz a humidade antes da sua injeção nos motores. Inclui vaso de purga, lavagem, filtro de brita, filtro com tubos cerâmicos. Os condensados acumulam-se nos pontos baixos sendo extraídos por meio de válvula.
5. Chiller para arrefecimento do biogás, com absorção da humidade restante.
6. Tocha (flare) e retentores de chamas “a instalar”.
7. Dois grupos de cogeração que incluem: i) Dois compressores, que injetam o biogás no motor, através de válvulas solenoide, elevando a sua pressão de 10 para 30 mbar (um para cada grupo); ii) Dois geradores constituídos por alternadores com capacidade para debitarem 60 kVA a 380V e a uma frequência de 50 Hz. Constituídos por uma máquina assíncrona, sem escovas, de campo rotativo e dotados de regulação eletrónica de tensão. Do tipo auto ventilado e que incluem supressores de ruído, sistema anti vibração, quadros de controlo; iii) Detetor de fugas de biogás ligado a sistema de alarme com alimentação autónoma.
8. Sistema de recuperação térmica dos dois grupos de cogeração para aquecimento das lamas, é constituído por dois circuitos de água: i) O circuito primário contém a energia térmica resultante da potência dissipada em cada grupo gerador de aproximadamente 115 kW, fornecendo água a 90°C, que é pressurizada por dois grupos de eletrobombas (com um de reserva) para o permutador de calor tubular exterior onde a lama circula em contracorrente com a água (lama no interior, água no exterior); ii) O circuito secundário contém água com a energia térmica de 40 a 50°C, resultante da temperatura da água de arrefecimento dos motores/geradores e da temperatura dos gases de escape. A água é pressurizada por dois grupos de eletrobombas para o permutador no interior do digestor primário, permitindo aquecer as lamas até 33°C.

Os dois circuitos complementam-se, pelo que a mistura, depois de ter sido pré-aquecida no permutador de calor interno, é bombeada para o permutador de calor tubular externo, de onde sai com uma temperatura de cerca de 36°C para compensar as perdas térmicas do digestor, prosseguindo novamente para o seu interior.

## 5.3 Três cenários da ETAR da Fonte Quente

São referidos três cenários relativos à ETAR Municipal de Abrantes, cenário teórico, cenário atual e cenário futuro.

### 5.3.1 Cenário teórico

A produção de biogás por digestão anaeróbia de matéria orgânica foi implementada em 2004 na ETAR pelo departamento de energias renováveis do LNEG-Unidade de Bioenergia, mediante um projeto europeu - Life Olèico+, de promoção de tecnologias de tratamento e valorização dos subprodutos dos lagares de azeite. Segundo esse estudo patentado, uma mistura de águas ruças com as lamas da ETAR, na proporção de 1:6 permite maximizar a produção de biogás. Seriam reunidas na digestão, além dos resíduos dos lagares de azeite recolhidos em altura de campanha, as lamas das restantes 26 ETAR do Concelho e os resíduos orgânicos de supermercados e restaurantes. Nestas condições o sistema geraria diariamente 1,6 toneladas de lamas digeridas e mais de 300 m<sup>3</sup> de biogás com média de 68% de metano e de 0,02% a 0,03% de Sulfureto de hidrogénio. A Figura 5.3, retirada de brochura do LNEG, mostra esquematicamente o tipo de resíduos tratados, os produtos e resíduos resultantes e as quantidades envolvidas.

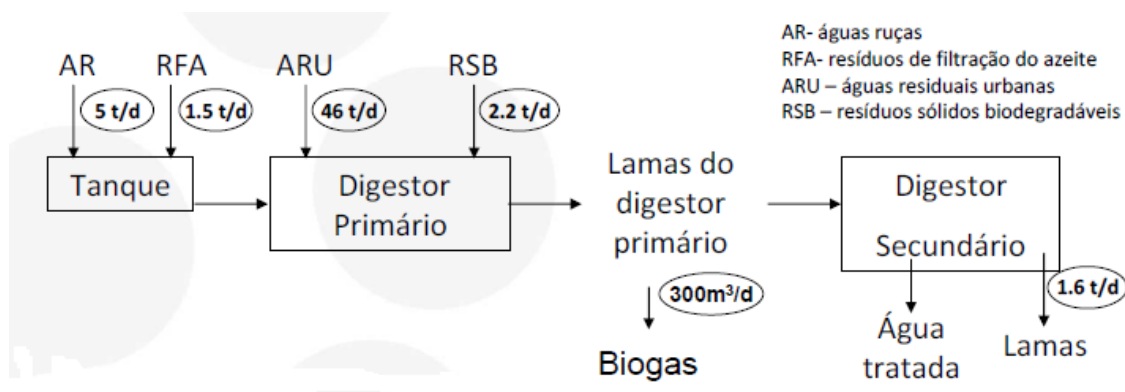


Figura 5.3: Balanço de massa no processo de codigestão patentado pelo LNEG projetado para a ETAR de Abrantes em 2004

Com os valores indicados previa-se uma produção diária de 375 kWh, para um consumo de 270 kWh e uma receita anual de 19 659 € proveniente da poupança em consumos elétricos. Os custos previstos em operação e manutenção seriam da ordem dos 9 490 €/ano.

### 5.3.2 Cenário atual

Atualmente, a ETAR gera cerca de 52,4 m<sup>3</sup>/dia de lamas mistas resultantes do tratamento das águas residuais, às quais adiciona 3,6 m<sup>3</sup>/dia de águas ruças, obtendo cerca de 100 m<sup>3</sup>/dia de biogás (com 70% de metano) e 4,8 a 7,2 m<sup>3</sup>/dia de lamas digeridas.

Os resíduos orgânicos de supermercados e restaurantes e restantes resíduos da indústria do azeite, previstos no anterior cenário, não foram considerados pela impossibilidade de colocar em funcionamento o pré-tratamento necessário. Ocasionalmente, a ETAR da Fonte Quente, reúne as lamas das restantes ETAR do Concelho para incremento da produção de biogás. O transporte através de trator com cisterna encarece o processo, pelo que, em 2013 e no ano corrente não ocorreu nenhum.

Atendendo à potência instalada da cogeração de 120 kVA, correspondente aos dois grupos motores-geradores de 60 kVA cada, constatamos que o funcionamento de um grupo na sua potência máxima consumiria rapidamente, em menos de duas horas, o biogás produzido de acordo com o seu consumo que varia entre 35 a 70 m<sup>3</sup> biogás/h, consoante o regime de rotação do motor. Nestas condições, atualmente funciona só um grupo a 30 kVA, ficando o outro de reserva, que representa metade da sua capacidade, produzindo no total 120 kWh/dia contra um consumo diário dos processos/equipamentos de 1880 kWh/dia, como se pode verificar na Tabela 5.1. A produção diária de biogás é consumida em menos de 4h de funcionamento à rotação mais baixa.

Tabela 5.1: Levantamento dos consumidores de energia elétrica na ETAR da Fonte Quente

Consumidores de Energia	un	kW/un	h/dia	kWh/dia
Estação Elevatória inicial				
Grupo eletrobomba submersível	2	18,5	8	296
Tratamento Preliminar				
Tamisador	1	1,5	6	9
Compactador	1	0,8	4	3
Pontes raspadoras	2	0,8	6	9
Bombas de areias	2	2,5	4	20
Bombas de gorduras	2	2,5	4	20
Lavador de areias	1	2,5	6	15
Concentrador de gorduras	1	2,5	6	15
Decantação Primária				
Pontes raspadora	1	1,5	24	36
Tratamento Biológico				
Agitadores das câmaras anóxicas	4	1,5	24	144
Arejadores	8	11,0	8	704
Bombas de recirculação interna	2	4,2	24	201,6

Tabela 5.1: Levantamento dos consumidores de energia elétrica na ETAR da Fonte Quente (Cont.)

Consumidores de Energia	un	kW/un	h/dia	kWh/dia
Decantação Secundária				
Bombas de recirculação de lamas	2	3,0	24	144
Pontes raspadoras	2	1,5	24	72
Bombas de sobrenadantes	2	2,2	4	17,6
Reagentes				
Cloreto de ferro	1	0,3	24	6
Hipoclorito de Sódio	1	0,3	24	6
Lamas Mistas				
Bomba de elevação	1	4,2	2	8,4
Tanque de Armazenamento de águas ruças				
Bomba de elevação	1	1,5	2	3
Digestão				
Agitadores submersíveis	2	4,2	12	100,8
Bombas de recirculação de lamas	2	2,2	_	Avaria
Compressor do gasómetro	1	2,2	_	Avaria
Desumidificador	1	1,0	_	Avaria
Cogeração				
Vários Equipamentos	1	7,5	4	30
Motores geradores	1	-30,0	4	-120
Desidratação				
Vários equipamentos	1	10,0	7	70
Compressor geral	1	2,2	1	2,2
Conjunto Hidroressor	1	4,0	3	12
Iluminação (conjunto)	1	6	9	54
Elevatória de escorrências	1	2,2	0,5	1,1
Total (kWh)				1879,7
€/kWh				0,100
Custos de energia (estimados)				188,0 €/dia
				5639,1 €/mês

Atendendo à análise de *Pareto* apresentada na Figura 5.4, os processos/equipamentos que representam cerca de 80% dos consumos de energia elétrica são, por ordem de maior consumo, os oito arejadores do Tratamento Biológico (TB), os dois grupos de eletrobombas submersíveis da Estação Elevatória Inicial (EEI), as duas bombas de recirculação interna do Tratamento Biológico, os quatro agitadores das câmaras anóxicas do Tratamento Biológico, as duas bombas de recirculação de lamas na Decantação Secundária (DS) e dos dois agitadores submersíveis da Digestão Anaeróbia (DA). Uma ação de redução dos consumos em energia elétrica requer uma especial atenção nestes processos.

Pela análise do histórico de avarias da ETAR, desde Janeiro até Agosto do corrente ano, verificamos que a sua ocorrência advém essencialmente do tempo de funcionamento, isto é,

as ações de manutenção procedem-se numa base corretiva. A Figura 5.5 mostra que 93% das horas de paragem se concentram nos dois processos cogeração e tratamento preliminar, correspondendo a avarias ainda não resolvidas. Em termos figurativos, o total de avarias da cogeração (8568h), quase atinge um ano de paragem (365dx24h = 8760h).

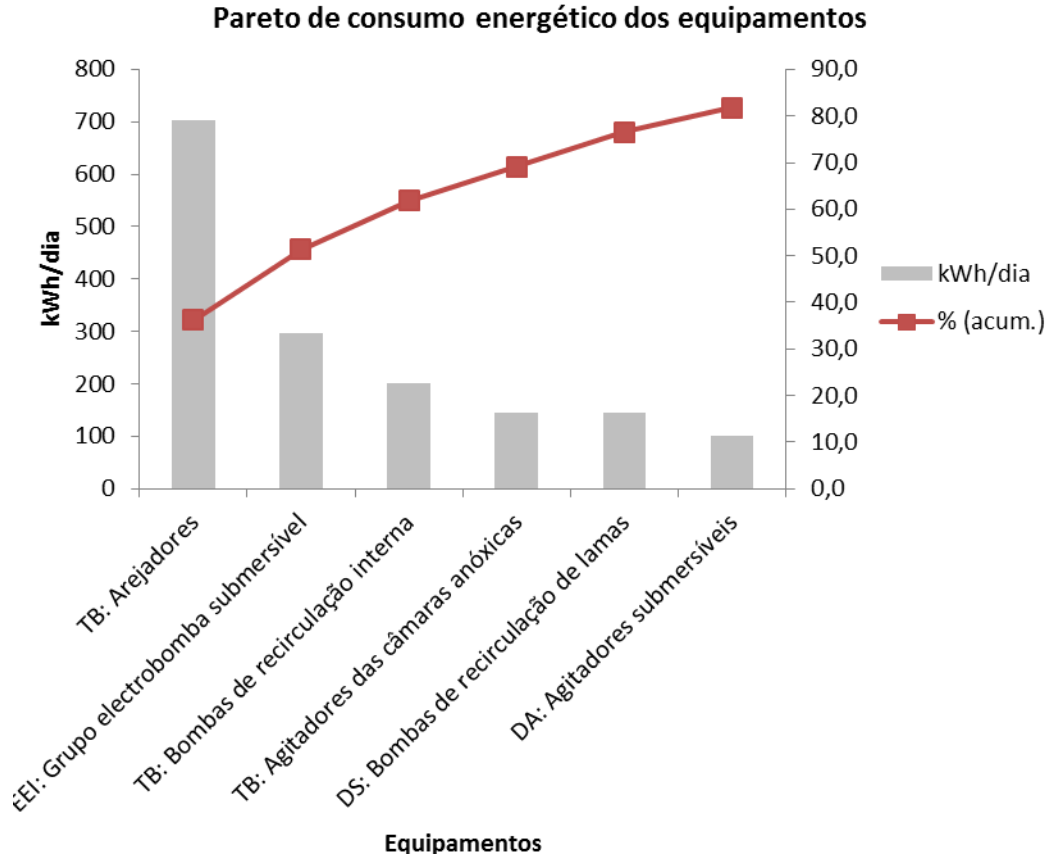


Figura 5.4: Análise de Pareto dos consumidores de energia da ETAR Municipal de Abrantes

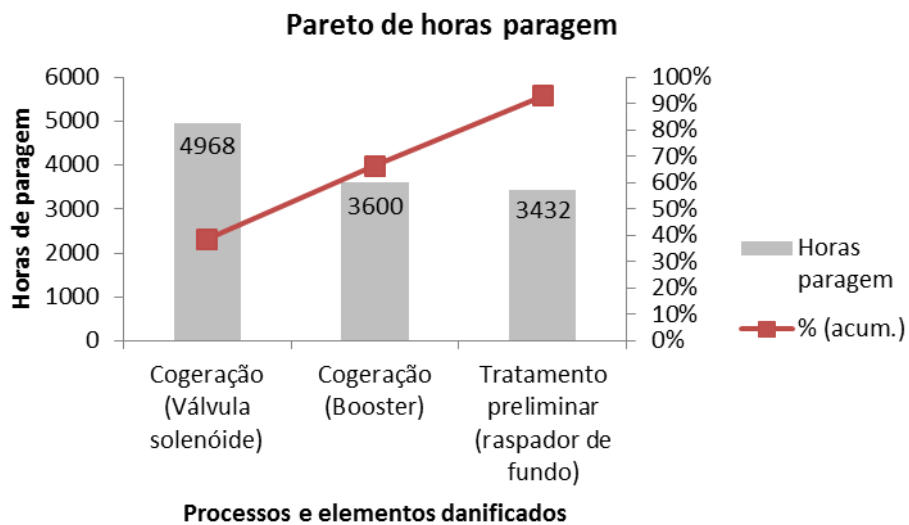


Figura 5.5: Análise de Pareto em horas de paragem entre Janeiro e Agosto 2014

### 5.3.3 Mapeamento da cadeia de valor atual

Para obter uma visão da situação atual recorreu-se à ferramenta VSM (Anexo I), desenhando a caixa representativa da chefia direta, os principais processos que incluem: a Estação Elevatória Inicial, Tratamento Preliminar, Decantação Primária, Tratamento Biológico, Decantação Secundária, Elevação das Lamas Mistas e águas Ruças, Digestão Primária, Digestão secundária, Cogeração e Desidratação de lamas, os fluxos de informação entre a chefia direta, os fornecedores, clientes e a ETAR. As setas de fluxo foram desenhadas de acordo com a sequência de produção, empurrada a partir da estação elevatória inicial, uma vez que o fluxo se desloca graviticamente com exceção das zonas de recirculação. Desenhou-se uma linha com os valores de consumos energéticos e uma linha do tempo para o tempo de ciclo e *lead time*. Entre os processos representou-se o *stock* e o volume dos respetivos contentores. Usaram-se *post-it* de cor verde para assinalar os principais indicadores: tempo de ciclo, tempo de mudança e disponibilidade do equipamento. Na mesma folha foram desenhados os processos e os *Kaizen Burst* com *post-it* cor de laranja. Para diferenciar os defeitos, usaram-se *post-it* roxos.

#### ***Kaizen Burst Lightning* assinalados no mapa atual**

As “dores crónicas” com que a instalação se depara referem-se à reduzida produção de biogás e de energia elétrica/térmica; ao elevado consumo de energia elétrica da rede; à indisponibilidade de equipamentos e processos; aos elevados custos em manutenção essencialmente curativa; aos defeitos, como o desperdício de lamas digeridas. De seguida são descritas com maior pormenor.

#### **Gargalo da instalação**

O gargalo da instalação é atribuído ao digestor primário, no qual não se forma biogás suficiente para manter um grupo motor-gerador a funcionar por mais de quatro horas diárias. A sua capacidade de tratamento ascende a 80 m<sup>3</sup>/dia, no entanto, são tratados somente 56 m<sup>3</sup>/dia da mistura lamas mistas e águas ruças.

#### **Erros de velocidade do motor**

A crescer à paragem da cogeração por falta de biogás, refira-se a paragem frequente devido a erros de velocidade do motor.

O re-arranque nem sempre é conseguido pela equipa de manutenção local, na medida em que este requer um ajuste de um conjunto de parâmetros, de onde se destaca a velocidade de rotação do motor, logo a regulação da entrada de biogás e a programação de parâmetros, sendo necessário recorrer a serviços externos.

## **Processos com consumos elevados de energia elétrica**

Para o mapa, foram transferidos os valores de consumos energéticos dos processos, de acordo com a potência dos equipamentos e o número de horas de funcionamento. Destaca-se através da análise de Pareto:

- 1º O tratamento biológico com oito turbinas de arejamento, a funcionar oito horas; duas bombas de recirculação interna e quatro agitadores das câmaras anóxicas em funcionamento permanente.
- 2º A estação elevatória inicial com funcionamento de uma bomba submersível (com outra de reserva) durante oito horas.
- 3º As duas bombas de recirculação de lamas dos decantadores secundários que funcionam em regime permanente.
- 4º Os dois agitadores submersíveis do digestor primário em funcionamento durante 12 horas diárias.

## **Indisponibilidade de equipamentos e processos**

- O desumidificador cuja função é arrefecer o biogás, promovendo a condensação da humidade, apresenta paragem prolongada;
- Os dois grupos de cogeração encontram-se parados, um deles devido à avaria das duas válvulas de admissão de biogás, o outro ainda por apurar as causas, pelo que toda a energia consumida pela instalação é fornecida pela rede nacional;
- As duas bombas de recirculação de lamas no digestor primário não estão disponíveis devido ao entupimento com sólidos existentes nas lamas mistas, pelo que as condições de temperatura ideal na digestão anaeróbia não estão asseguradas;
- A bomba de águas ruças tem duração reduzida, pela corrosão provocada pela acidez das mesmas.

## **Elevados custos em manutenção**

O custo anual da manutenção ascende a 45 000 €/ano. Os componentes são substituídos após avaria.

## **Defeitos**

- A gradagem existente na obra de entrada deixa passar muitos sólidos para a estação elevatória inicial, estes resíduos prosseguem para a decantação primária que não é eficaz na sua remoção, pelo que chegam às bombas de recirculação das lamas do digestor primário, entupindo-as, obrigando à paragem do permutador de calor exterior;

- A paragem da estação elevatória inicial não permite o tratamento das águas residuais;
- Consumo elevado de hipoclorito;
- A corrosão das válvulas de injeção de biogás mostra que o sulfureto de hidrogénio não é convenientemente eliminado antes de chegar à cogeração;
- O excesso de biogás é libertado para a atmosfera por não existir um queimador no exterior do digestor secundário;
- As lamas desidratadas não cumprem a legislação na quantidade de zinco, devido a descargas das indústrias metalomecânicas e em bactérias *Escherichia Coli*, pelo que seguem para aterro. No primeiro semestre de 2013 foram da ordem das 277 toneladas.

### 5.3.4 Cenário Futuro

#### Máxima produção de energia com o equipamento disponível

De acordo com informação técnica da instalação, um motor-gerador poderia ser mantido em funcionamento durante 18h a metade da sua capacidade instalada (30 kW), obtendo-se 540 kWh/dia, que corresponderia a cerca de 197.100 kWh/ano e a uma poupança em energia elétrica em cerca de 19.710 €/ano.

Com o funcionamento diário do motor-gerador durante 18h à rotação mínima, teria de se garantir uma produção de biogás de 630 m<sup>3</sup>/dia. Este valor foi já ultrapassado no arranque do projeto com a adição de 30 m<sup>3</sup> de lamas mistas, 10 m<sup>3</sup> de águas ruças e de resíduos sólidos da filtração do azeite.

#### Balanço entre custos e proveitos

Além dos elevados custos energéticos, somam-se os custos de manutenção, transporte das lamas desidratadas para aterro, controlo analítico, reagentes, administrativos, consumo de água. A Tabela 5.2 mostra o balanço entre os custos globais e os proveitos energéticos com a produção de eletricidade na instalação gerada por 630 m<sup>3</sup>/dia de biogás e com um motor a meio da sua capacidade em funcionamento durante 18 h/dia.

### 5.3.5 Melhorias que ressaltam do VSM atual

A Tabela 5.3 apresenta as questões relativas a cada um dos processos e as respetivas soluções sugeridas, que serão ou não aplicadas de acordo com a análise mais aprofundada de custos e interesse para a ETAR. A apresentação é feita segundo a ferramenta 5W+2H.

### 5.3.6 Priorização de um problema para determinar a causa raiz

Uma análise do histórico das paragens ocorridas desde Janeiro até Agosto do presente ano, na ETAR da Fonte Quente, trouxe o interesse de chegar à causa raiz dos elevados tempos de paragem da cogeração, nomeadamente devido à avaria das válvulas e reguladoras solenoide, pelo impacto que representa para a empresa (4968 h). A descrição efetuada refere “Entrada de biogás não é o expectável, válvula e reguladora solenoide ficam presas”, como causa foi apontada “corrosão”. Como ferramenta de resolução optou-se pelo A3 *Report* apresentado na Tabela 5.4

Tabela 5.2: Balanço entre custos e proveitos

Descrição dos custos e proveitos	Valor médio (€/ano)
Consumo de eletricidade	56.391
Manutenção	25.000
Transporte de lamas para aterro	14.400
Controlo analítico	6.000
Reagentes	5.000
Administrativos e outros	4.000
Consumo de água	1.200
Produção de energia elétrica	- 19.710
Total	111.991-19.710 = 92.281

Tabela 5.3: Melhorias sugeridas

Melhorar o Quê? ( <i>What</i> )	Porquê? ( <i>Why</i> )	Como? ( <i>How</i> )	Quem? ( <i>who</i> )	Onde? ( <i>where</i> )	Quanto vai Custar? ( <i>How much</i> )	Quando? ( <i>when</i> )
Segregação de sólidos desde a obra de entrada ao digestor primário.	A obra de entrada segrega poucos sólidos que chegam à estação elevatória inicial; ao decantador primário que não é eficaz na sua remoção; entope as bombas de recirculação de lamas para o permutador de calor exterior que tem de permanecer desligado.	*Melhorar triagem na obra de entrada; *Melhorar decantação primária; * Limpar digestor e *Gradação fina à entrada das lamas mistas no poço de lamas.	Abrantáqua	*Obra de entrada; *Decantação primária; *Digestor e entrada poço lamas.	*Gradação na Obra Entrada =? *Sistema lamelar na decantação =? *Limpeza do digestor =?	ASAP
Consumo de hipoclorito.	Adiciona-se sempre a mesma quantidade de hipoclorito, 3 l/h Para caudal alto ou mais reduzido.	Regular a quantidade de hipoclorito a adicionar, de acordo com a variação do caudal.	Abrantáqua	No depósito de hipoclorito.	NA	ASAP
Quantidade de substratos para misturar às lamas mistas.	As águas ruças chegam à ETAR em menor quantidade e a produção de biogás é reduzida.	*Centralizar lamas das outras 26 ETAR do Concelho; *Protocolo com suiniculturas, cooperativas de frutas, legumes, restaurantes, etc.	Abrantáqua	ETAR da Fonte Quente.	*Tratamento de resíduos sólidos biodegradáveis =? *Transporte =?	ASAP
Durabilidade da bomba de águas ruças.	As bombas utilizadas para as águas ruças (pH: 4,5 e 5,5) não são adequadas para o fluxo ácido e apresentam durabilidade reduzida.	Instalação de bomba mais adequada: Bomba submersível, marca ZENIT, modelo DRE 150/G50V-T(M) em aço inoxidável	BNT-Bombas e novas tecnologias Tf. <a href="tel:+351214582566">+351 214582566</a> Fx. <a href="tel:+351214582574">+351 214582574</a> Email: <a href="mailto:bnt@bnt-lda.com">bnt@bnt-lda.com</a> <a href="http://www.bnt-lda.com">www.bnt-lda.com</a>	Bombeamento das águas ruças entre a lagoa e o poço de lamas mistas.	Bomba = 501€+IVA	ASAP
Contabilização de biogás produzido e consumido.	A medição do fluxo de biogás indica o desempenho da instalação e a sua segurança.  Para detetar anomalias na produção.  Para ligação ou não da cogeração, mediante o biogás produzido.  Para avaliar o desempenho da cogeração.	Inserir dois contadores de biogás: Um para a produção diária de biogás e outro para o consumo.	Abrantáqua	Na tubulação entre o digestor primário e o digestor secundário.	Medidor de caudal =?	ASAP

Tabela 5.3: Melhorias sugeridas (Cont.1)

Melhorar o Quê? ( <i>What</i> )	Porquê? ( <i>Why</i> )	Como? ( <i>How</i> )	Quem? ( <i>who</i> )	Onde? ( <i>where</i> )	Quanto vai Custar? ( <i>How much</i> )	Quando? ( <i>when</i> )
Eliminar problema ambiental relativo à libertação de biogás em excesso.	Não existe queimador de biogás em excesso e o metano (principal constituinte do biogás) é 21 vezes mais poluente do que o dióxido de carbono que se libertaria na queima.	Colocação de um queimador de biogás em excesso ( <i>flare</i> ).	Abrantáqua	No digestor secundário.	Flare = 20.000 a 30.000 €	ASAP
Remoção de Sulfureto de Hidrogénio (H <sub>2</sub> S) no biogás.	Há indícios de corrosão de componentes, ex. válvulas de injeção de biogás nos grupos motor-gerador.  Na combustão é transformado em Dióxido de Enxofre (poluente)	Ex. Colocação de filtro com limalha de ferro ou Introdução de oxigénio no biogás, à saída do digestor primário.	Abrantáqua	Junto aos restantes filtros de biogás (tubos de cerâmica e brita).	Filtro com limalha de ferro = 22.000 a 55.000 €	ASAP
Desumidificação do biogás.	O <i>chiller</i> de arrefecimento, por compressão, está avariado. A humidade no biogás reduz o poder calorífico, prejudica o processo da queima tornando-a menos eficiente; absorve parte da energia gerada.	*Arranjo do <i>chiller</i> de compressão (funciona com energia elétrica) ou *Substituir por <i>chiller</i> de absorção que necessita de calor da cogeração para o processo)	Abrantáqua	Entre o Digestor secundário e a cogeração.	*Arranjo do <i>chiller</i> de compressão > 700€  * Aquisição de <i>chiller</i> de absorção =?	ASAP
Ligação dos grupos motor-gerador para a queima de biogás/produção de energia elétrica.	A ligação dos grupos processa-se em modo manual, o que torna menos precisa a produção de energia elétrica nas horas de ponta do consumo. O sistema já esteve implementado.	Project automático de ligação dos grupos para funcionarem nas horas de ponta ou para estarem desligados nas horas de vazio.	Abrantáqua	Central de cogeração	Automatização =?	ASAP
Aviso de avarias ou anomalias.	Importância de atuar em tempo real  O sistema já esteve implementado.	Instalação de equipamento de telegestão, recebendo informação no computador ou no telemóvel.	Abrantáqua	ETAR	Automatização =?	ASAP
Disponibilização de recursos humanos para pequenas reparações em motores / bombas.	Nas 27 ETAR existem 200 bombas submersíveis que quando avariadas vão para orçamento no fornecedor. São vários os fornecedores de bombas. Poderiam ser reparadas nas instalações.	Os fornecedores de bombas dão formação para a reparação.	Abrantáqua	Abrantáqua	Efetuar balanço entre:  *Custos de Formação =? *Custos de orçamento e reparação no fornecedor? *Custos de reparação nas instalações da Abrantáqua =?	ASAP

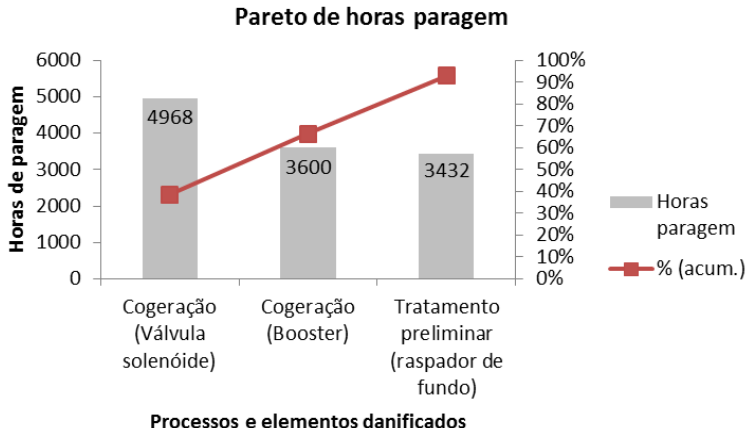
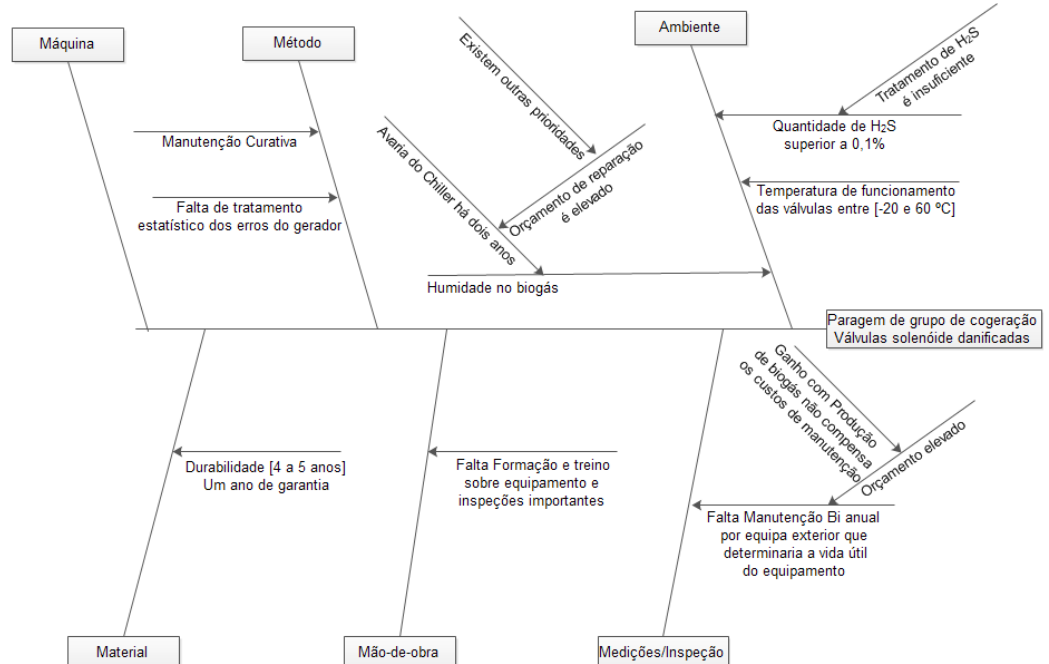
Tabela 5.3: Melhorias sugeridas (Cont.2)

Melhorar o Quê? (What)	Porquê? (Why)	Como? (How)	Quem? (who)	Onde? (where)	Quanto vai Custar? (How much)	Quando? (when)
Formação de recursos humanos para resolução de erros detetados pelo gerador na cogeração.	Perde-se muito tempo (de duas a três horas) nas afinações de entrada de biogás, aceleração do motor e por vezes é necessário chamar uma equipa exterior, representante da marca, para resolução dos erros e programação de parâmetros.	*Formação de operadores. *Utilização de meios apropriados para a regulação de caudal de biogás (manómetro para controlo de pressão).	Turbomar ou Velmet Portugal	Abrantáqua	Efetuar balanço entre: *Formação =? *Meios =? *Deslocação da equipa exterior para efetuar a reposição =?	ASAP
Possibilidade de aproveitamento do relatório de erros disponibilizado pelo equipamento de cogeração.	O sistema do gerador deteta qualquer variação fora dos parâmetros regulados, nomeadamente pressão do caudal de biogás e velocidade do motor. Os desvios são indicadores de anomalia.	Reprogramação do autómato de forma a processar os dados numa plataforma informática.	Turbomar	Cogeração	NA	ASAP
Formação de operadores para a Manutenção Autónoma.	Motivação dos colaboradores. Estabilização do fluxo produtivo. Melhoria dos níveis de qualidade devido a menos erros e melhor utilização do equipamento. Menos custos de manutenção e melhor utilização do equipamento	Implementação de um programa <i>Total Productive Maintenance</i> “ Da minha máquina cuido eu”	Abrantáqua	Abrantáqua	Formação =?	ASAP
Diminuir Manutenção Curativa pela implementação de Manutenção Preventiva Total.	Evitar perdas de produção.	Oito pilares: Manutenção Autónoma; Manutenção Planeada; Melhorias específicas; Manutenção da Qualidade; Formação e treino; Controlo inicial, Apoio das Áreas Administrativas; Segurança, Saúde e Ambiente.	Abrantáqua	27 ETAR do Concelho	Efetuar balanço entre: *Formação =? *Redução do tempo de reparação =?	ASAP
Diminuir Manutenção Curativa pela implementação de Manutenção Preditiva (cont.).	Evitar perdas de produção.	*Uso de técnicas de Termografia, Vibrometria, análise de óleos, análises ao sistema elétrico, etc.	Abrantáqua	27 ETAR do Concelho	Efetuar balanço entre: *Serviço de análise externo =? *Redução do tempo de reparação =?	ASAP

Tabela 5.3: Melhorias sugeridas (Cont 3)

Melhorar o Quê? (What)	Porquê? (Why)	Como? (How)	Quem? (who)	Onde? (where)	Quanto vai Custar? (How much)	Quando? (when)
Valorização das lamas digeridas.	As lamas não cumprem os objetivos em Escherichia Coli (<1000 un/g de matéria fresca) e vão para o aterro de Castelo Branco	*Eliminar Escherichia Coli, mantendo a temperatura de digestão a 35°C.  Como complemento: Sistema de armazenamento de calor, em depósito de água.	Abrantáqua	Entre Digestor primário e a cogeração.	Depósito de água =?	ASAP
Valorização das lamas digeridas (cont.).	As lamas não cumprem os objetivos na quantidade de Zinco (< 2500 mg/kg matéria seca), devido às descargas das indústrias metalomecânicas. As lamas vão para o aterro de Castelo Branco.  Custo de transporte para aterro: entre 12.000 e 17.000 €/ano	Penalizar fontes emissoras.	Abrantáqua	Fornecedores de esgoto.	NA	ASAP
Redução dos consumos de energia elétrica.	Consumos mensais elevados.	Acesso a plataforma de consumos com autorização da EDP Distribuição para análise dos consumos (picos). Permite análise e ajuste da potência contratada.	Abrantáqua	Abrantáqua	NA	ASAP
Redução dos consumos de energia elétrica (cont.).	Consumos mensais elevados.	Redução de ar comprimido para o mínimo requerido.  Averiguar fugas de ar nas linhas / válvulas de ar comprimido, especialmente nas ligações.	Abrantáqua	Linhas de ar comprimido	Reparação =?	ASAP
Redução dos consumos de energia elétrica (cont.).	Consumos mensais elevados.	Intercalar a agitação do digestor primário entre os dois agitadores submersíveis e a recirculação de biogás formado (Ex. ETAR de Parada - Maia).	Abrantáqua	Digestor Primário	Compressores de alhetas =?	ASAP

Tabela 5.4: A3 Report

<p>1 - Fundamento</p>	<p>5 - Soluções</p>																																															
<p>Avaria das duas válvulas solenoide de admissão do biogás ao motor-gerador. Com esta paragem, não se produz energia elétrica/térmica, consome-se em exclusivo da rede nacional; o biogás produzido no digestor é lançado na atmosfera.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Efetuar revisão geral aos dois motores-geradores, Substituição das válvulas solenoide.</li> <li>✓ Reparação do chiller de compressão ou substituição por um chiller de absorção.</li> <li>✓ Baixar concentração de H<sub>2</sub>S do biogás para &lt;0,1%, através de colocação de filtro de limalha de ferro.</li> <li>✓ Implementar TPM: Formação e treino de operadores; Manutenção Autónoma e Planeada; Criação de instruções de trabalho; Manutenção da qualidade (CEP); Envolvimento do pessoal administrativo.</li> <li>✓ Implementar ferramenta SMED para mudança mais rápida.</li> </ul>																																															
<p>2 - Condição Inicial</p>	<p>6 - Plano de Implementação: 5W+2H</p>																																															
 <p><b>Pareto de horas paragem</b></p> <p>Horas de paragem</p> <p>Processos e elementos danificados</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Processo</th> <th>Horas paragem</th> <th>% (acum.)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cogeração (Válvula solenóide)</td> <td>4968</td> <td>~45%</td> </tr> <tr> <td>Cogeração (Booster)</td> <td>3600</td> <td>~75%</td> </tr> <tr> <td>Tratamento preliminar (raspador de fundo)</td> <td>3432</td> <td>~95%</td> </tr> </tbody> </table>	Processo	Horas paragem	% (acum.)	Cogeração (Válvula solenóide)	4968	~45%	Cogeração (Booster)	3600	~75%	Tratamento preliminar (raspador de fundo)	3432	~95%	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Melhorar o Quê? (What)</th> <th>Porquê? (Why)</th> <th>Como? (How)</th> <th>Quem? (who)</th> <th>Onde? (where)</th> <th>Quanto vai Custar? (How much)</th> <th>Quando? (when)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Funcionamento atual da cogeração</td> <td>Grupo motor-gerador parado por avaria das duas válvulas solenóide</td> <td>*Novas válvulas *Revisão geral</td> <td>*Abrantáqua *Turbomar</td> <td>Cogeração</td> <td>*Válvulas =1383€ *Revisão =3000 €</td> <td>ASAP</td> </tr> <tr> <td>Desumidificação do biogás</td> <td>A humidade provoca corrosão</td> <td>Arranjo do chiller</td> <td>Abrantáqua</td> <td>Antes da cogeração</td> <td>&gt;700€</td> <td>ASAP</td> </tr> <tr> <td>Baixar concentração de H<sub>2</sub>S do biogás, para &lt;0,1%</td> <td>H<sub>2</sub>S provoca corrosão</td> <td>Colocação de filtro de limalha de ferro</td> <td>Abrantáqua</td> <td>Antes da cogeração</td> <td>Filtro =[20 mil e 30 mil €]</td> <td>ASAP</td> </tr> <tr> <td>Manutenção</td> <td>Evitar perdas de produção</td> <td>Implementação de TPM e SMED</td> <td>Abrantáqua</td> <td>ETAR da Fonte Quente</td> <td>Formação =? €</td> <td>ASAP</td> </tr> </tbody> </table>	Melhorar o Quê? (What)	Porquê? (Why)	Como? (How)	Quem? (who)	Onde? (where)	Quanto vai Custar? (How much)	Quando? (when)	Funcionamento atual da cogeração	Grupo motor-gerador parado por avaria das duas válvulas solenóide	*Novas válvulas *Revisão geral	*Abrantáqua *Turbomar	Cogeração	*Válvulas =1383€ *Revisão =3000 €	ASAP	Desumidificação do biogás	A humidade provoca corrosão	Arranjo do chiller	Abrantáqua	Antes da cogeração	>700€	ASAP	Baixar concentração de H <sub>2</sub> S do biogás, para <0,1%	H <sub>2</sub> S provoca corrosão	Colocação de filtro de limalha de ferro	Abrantáqua	Antes da cogeração	Filtro =[20 mil e 30 mil €]	ASAP	Manutenção	Evitar perdas de produção	Implementação de TPM e SMED	Abrantáqua	ETAR da Fonte Quente	Formação =? €	ASAP
Processo	Horas paragem	% (acum.)																																														
Cogeração (Válvula solenóide)	4968	~45%																																														
Cogeração (Booster)	3600	~75%																																														
Tratamento preliminar (raspador de fundo)	3432	~95%																																														
Melhorar o Quê? (What)	Porquê? (Why)	Como? (How)	Quem? (who)	Onde? (where)	Quanto vai Custar? (How much)	Quando? (when)																																										
Funcionamento atual da cogeração	Grupo motor-gerador parado por avaria das duas válvulas solenóide	*Novas válvulas *Revisão geral	*Abrantáqua *Turbomar	Cogeração	*Válvulas =1383€ *Revisão =3000 €	ASAP																																										
Desumidificação do biogás	A humidade provoca corrosão	Arranjo do chiller	Abrantáqua	Antes da cogeração	>700€	ASAP																																										
Baixar concentração de H <sub>2</sub> S do biogás, para <0,1%	H <sub>2</sub> S provoca corrosão	Colocação de filtro de limalha de ferro	Abrantáqua	Antes da cogeração	Filtro =[20 mil e 30 mil €]	ASAP																																										
Manutenção	Evitar perdas de produção	Implementação de TPM e SMED	Abrantáqua	ETAR da Fonte Quente	Formação =? €	ASAP																																										
<p>3 - Alvo a atingir</p>	<p>7 - Questões/Ações de seguimento</p>																																															
<p>Pretende-se reduzir as paragens imprevistas da cogeração em 50% de 4968h para 2484h.</p>	<p>Análise de cartas X/R (Xm-MR): seguimento de indicadores de pressão, velocidade, temperatura; Auditoria; Melhoria sistemática.</p>																																															
<p>4 - Análise da causa raiz</p>	<p>8 - Métricas</p>																																															
	<p>9 - Reflexão e Planos Futuros</p> <p>Os elevados custos de Manutenção Curativa, podem ser reduzidos pela implementação de um programa TPM, permitindo que as avarias sejam resolvidas num espaço de tempo mais curto. O custo anual da Manutenção ascende a 25.000 €, pelo que seria benéfico para a empresa a aposta em mão-de-obra qualificada nas suas instalações.</p>																																															

# Capítulo 6

## Conclusões e trabalhos futuros

### 6.1 Conclusões

A ETAR da Fonte Quente tem um papel fundamental no tratamento das águas residuais de 37.588 habitantes, bem como o benefício de tratamento das poluentes águas ruças dos lagares de azeite da região. Cumpre relativamente bem na sua função de clarificação do caudal afluyente, apresentando alguns problemas de segregação de sólidos na obra de entrada e no decantador primário, causando a jusante, o entupimento das bombas de recirculação de lamas no circuito digestor primário/permutador de calor externo; em relação à produção de biogás e à qualidade de fertilizante natural, fica aquém do projeto inicialmente desenvolvido. Através da elaboração de um mapa da cadeia de valor, realçaram-se outros problemas e defeitos, com evidência para o elevado consumo de energia elétrica, justificado em parte pelo funcionamento em contínuo de alguns processos, e essencialmente para a baixa disponibilidade dos equipamentos de cogeração. A análise em detalhe das horas de paragem evidenciou algumas lacunas de Manutenção Autónoma e Preventiva no processo de cogeração. Pratica-se uma política de Manutenção Curativa que se julga inadequada, uma vez que os equipamentos avariam e não existem peças fundamentais de substituição. Atualmente a cogeração não tem dia de arranque, sabendo-se que a intervenção da equipa de manutenção exterior, representante do equipamento em Portugal, se baseará numa revisão geral dos dois grupos motor-gerador, representando um custo considerado elevado para empresa. A questão ambiental de libertação do biogás para a atmosfera por falta de meios de queima, influenciará uma decisão a curto prazo em avançar com os trabalhos de recuperação da cogeração.

### 6.2 Trabalhos futuros

Ultimamente os produtores de azeite optam pela construção de lagoas de tratamento das águas ruças, o que tem diminuído o fluxo das mesmas para a ETAR. Esta redução leva à equação de outras soluções em termos de substratos e co-substratos que venham a rentabilizar a produção de biogás, nomeadamente a centralização das lamas das restantes 27 instalações do Concelho, na Estação de Tratamento de águas Residuais da Fonte Quente, por ser a única com sistema de cogeração. A memória descritiva do projeto inicial previa esta solução, bem como a aglomeração de outros resíduos disponíveis na região, como esgoto de suiniculturas e materiais biodegradáveis de restaurantes, cooperativas e mercados de frutas e legumes. No cenário futuro apresentado, a valorização da poupança energética em 19.710 €/ano, é significativa, pelo que se deverá apostar neste processo de rentabilização.

A ETAR já funcionou, em tempos de gestão da Câmara Municipal de Abrantes, com outro nível de monitorização (telegestão), comando automático do funcionamento dos grupos motor-gerador e com um sistema de diagnóstico, por equipa exterior, com técnicas de termografia e vibrometria; práticas cuja retoma seria útil. O custo anual da Manutenção ascende a 25 mil €, o que justificaria a implementação de um programa de *Total Productive Maintenance* com um operador dedicado a tempo inteiro à instalação, sendo necessária a aposta pela chefia na criação de condições, passando pela formação, visando o melhor conhecimento técnico do equipamento e dos procedimentos para um melhor diagnóstico e resolução, pela obtenção e substituição de peças com maior rapidez, contribuindo essencialmente para a motivação dos operadores, a sua segurança e saúde. O objetivo fundamental é a capacitação para a eliminação sistemática dos desperdícios.

O presente trabalho contribuirá para a aplicação de simples ferramentas *Lean*, nomeadamente *VSM* e *A3 Report*, no diagnóstico e resolução de problemas de instalações de tratamento de águas residuais com produção de biogás e geração de energia ou a outras instalações.

## Referências Bibliográficas

- [1] “Aproveitamento energético do Biogás”, [Online]. Available: <http://www.simarsul.pt/PageListagem.aspx?idCat=83&idContent=449&idMasterCat=25&idLayout=0&idLang=1>. [Acedido em 19 09 2014].
- [2] R. Madlener, C. H. Antunes e L. C. Dias, “Assessing the performance of biogas plants with multi-criteria and data envelopment analysis”, *European Journal of Operational Research*, vol. 197, p. 1084–1094, 2009.
- [3] Agência Portuguesa do Ambiente, Fevereiro 2014. [Online]. Available: [http://www.apambiente.pt/\\_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioPropostaPERSU2020\\_Fev14\\_v2.pdf](http://www.apambiente.pt/_zdata/DESTAQUES/2014/RelatorioPropostaPERSU2020_Fev14_v2.pdf). [Acedido em 29 Maio 2014].
- [4] APREN, INEGI, “e2p Energias Endógenas de Portugal - Bases de dados de fontes renováveis de energia”, APREN, INEGI, 26 Maio 2014. [Online]. Available: <http://e2p.inegi.up.pt/index.asp#Tec1>. [Acedido em 26 Maio 2014].
- [5] D. d. R. 1. s. —. N. 7. —. 1. d. ab, “Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013”, 2013. [Online]. Available: <http://dre.pt/pdf1sdip/2013/04/07000/0202202091.pdf>. [Acedido em 25 Maio 2014].
- [6] QREN, “A POLÍTICA DE COESÃO NO PERÍODO DE PROGRAMAÇÃO 2014-2020”, 31 Janeiro 2014. [Online]. Available: [http://www.qren.pt/np4/np4/?newsId=4209&fileName=20140131\\_acordo\\_parceria\\_portugal\\_2020.pdf](http://www.qren.pt/np4/np4/?newsId=4209&fileName=20140131_acordo_parceria_portugal_2020.pdf). [Acedido em 03 Junho 2014].
- [7] J. R. Wisler, J. W. Schettler e J. L. Willis, *EVALUATION OF COMBINED HEAT AND POWER TECHNOLOGIES FOR WASTEWATER TREATMENT FACILITIES*, Georgia: Brown and Caldwell, 2010.
- [8] DGEG, “Estatísticas Rápidas - Renováveis”, Fevereiro 2014. [Online]. Available: <http://www.dgeg.pt/>. [Acedido em 25 Maio 2014].
- [9] Fritsche, U. R., *Greenhouse Gas Emissions and Abatement Costs of Nuclear, Fossil and Renewable Power Production*, Öko Institute, Darmstadt, Deutschland, 2007.
- [10] M. Poeschl, S. Ward e P. Owende, “Prospects for expanded utilization of biogas in Germany”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, p. 1782–1797, 2010a.
- [11] M. Ferreira, I. P. Marques e I. Malico, “Biogas in Portugal: Status and public policies in a European context”, *Energy Policy*, vol. 43, p. 267–274, 2012.
- [12] C. Mendes, “Tecnologia do Biogás”, *Energias Renováveis*, pp. 154–159, 2009.
- [13] S. D. Bernardino, *Cogeração na ETAR de Abrantes, Memória descritiva*, 2005.
- [14] H. Zhou, D. Löffler e M. Kranert, “Model-based predictions of anaerobic digestion of agricultural substrates for biogas production”, *Bioresource Technology*, vol. 102, p. 10819–10828, 2011.
- [15] M. Poeschl, S. Ward e P. Owende, “Evaluation of energy efficiency of various biogas production and utilization pathways”, *Applied Energy*, vol. 87, p. 3305–3321, 2010b.
- [16] Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie, ECOFYS (Firm), *PLANNING AND*

*INSTALLING BIOENERGY SYSTEMS A guide for installers, architects and engineers*, © The German Solar Energy Society (DGS), Ecofys, 2005.

- [17] Ademe, “La valeur agronomic des boues de d’epuration”, 2013. [Online]. Available: <http://www.ademe.fr/partenaires/Boues/Pages/f22.htm>. [Acedido em 15 Dezembro 2013].
- [18] P. G. Kougiyas, T. A. Kotsopoulos e G. G. Martzopoulos, “Effect of feedstock composition and organic loading rate during the mesophilic co-digestion of olive mill wastewater and swine manure”, *Renewable Energy*, 2014.
- [19] S. Karellas, I. Boukis e G. Kontopoulos, “Development of an investment decision tool for biogas production from agricultural waste”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, p. 1273–1282, 2010.
- [20] DRAPC, “licenciamento | valorização agrícola de lamas”, 2009. [Online]. Available: <http://www.drapc.min-agricultura.pt/drapc/servicos/licenciamento/lamas.htm>. [Acedido em 17 Dezembro 2013].
- [21] b. r. energy, “[www.biogas-renewable-energy.info/biogas\\_composition.html](http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html)”, 2009. [Online]. Available: [http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas\\_composition.html](http://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html). [Acedido em 29 07 2014].
- [22] R. Braun, “Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental management and rural development”, em *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses*, Bologna, Italy, P. RANALLI, 2007, p. 335–416.
- [23] SMEAS, Serviços Municipalizados de Electricidade, Água e Saneamento da Maia, “[www.smeas-maia.pt/default.aspx?id=20&ids=20](http://www.smeas-maia.pt/default.aspx?id=20&ids=20)”, 02 Junho 2014. [Online]. Available: <http://www.smeas-maia.pt/default.aspx?id=20&ids=20>. [Acedido em 28 Julho 2014].
- [24] M. H. Gerardi, *The Microbiology of Anaerobic Digesters*, A John Wiley & Sons, Inc., Publication, 2003 .
- [25] E. Ryckebosch, M. Drouillon e H. Vervaeren, “Techniques for transformation of biogas to biomethane”, *biomass and bioenergy*, vol. 35, pp. 1633–1645, 2011.
- [26] T. Karlsson, O. Konrad, M. Lumi, N. P. Schmeier, M. Marder, C. E. Casaril, F. F. Koch e A. G. Pedroso, “Manual básico de Biogás”, vol. 1ª edição, RS, Brasil, Editora Univates, 2014.
- [27] L. Yingjian, Q. Qi, H. Xiangzhu e L. Jiezhi, “Sustainable Energy Technologies and Assessments”, vol. 6, p. 25–33, 2014.
- [28] “O frio que vem do sol”, 25 02 2013. [Online]. Available: <http://ofrioquevemdosol.blogspot.pt/2013/02/franca-biomassa-e-usada-para-climatizar.html>. [Acedido em 01 09 2014].
- [29] S. B. Viklund e M. T. Johansson, “Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction”, *Energy Conversion and Management*, vol. 77, p. 369–379, 2014.
- [30] P. Börjesson e L. M. Tufvesson, “Agricultural crop-based biofuels – resource efficiency and environmental performance including direct land use changes”, *Journal of Cleaner Production*, vol. 19, p. 108–120, 2011.
- [31] J. P. Pinto, *Pensamento Lean-A filosofia das organizações vencedoras*, LIDEL - Edições técnicas, Lda, 2009.
- [32] B. Excellence, “VSM,” 2014. [Online]. Available:

- <http://www.bexcellence.org/Lean-manufacturing.html>. [Acedido em 12 Agosto 2014].
- [33] J. S. Mike Rother, M. Rother e J. Shook, “Learning to see - Value Stream Mapping to Create Value and Eliminate Muda”, Brookline, Massachusetts, USA, The Lean Enterprise Institute, 1999.
- [34] J. C. Chen, Y. Li e B. D. Shady, “From Value Stream Mapping toward a lean/sigma continuous improvement process: an industrial case study”, *International Journal of Production Research*, vol. 48, pp. 1069-1086, 15 February 2010.
- [35] Bernardo, Adelino, “Lean Manufacturing”, CLT, 14 12 2012. [Online]. Available: <https://sites.google.com/site/pglmv10/m2-lean-manufacturing>. [Acedido em 13 09 2014].
- [36] C. Cabrita, *Manutenção: Textos de apoio à Unidade Curricular Fiabilidade e Manutibilidade*, Universidade da Beira Interior, 2003.
- [37] INE, “Estatísticas territoriais”, 2013. [Online]. Available: [http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_unid\\_territorial&menuBOUI=13707095&Contexto=ut&selTab=tab3](http://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_unid_territorial&menuBOUI=13707095&Contexto=ut&selTab=tab3). [Acedido em 06 09 2014].
- [38] Abrantáqua, *Memória descritiva*, 2013.
- [39] Abrantaqua, “plano de investimentos”, 2010. [Online]. Available: <http://www.abrantaqua.pt/index.php?id=1510>. [Acedido em 2 Novembro 2013].
- [40] Cogen, “Micro-cogeração”, Outubro 2011. [Online]. Available: <http://www.cogenportugal.com/ficheirosupload/Brochura%20Micro-cogera%C3%A7%C3%A3o.pdf>. [Acedido em 01 09 2014].
- [41] APREN, “Roteiro das Energias Renováveis”, 2014. [Online]. Available: <http://apren.pt/dadostecnicos/index.php?id=166&cat=35>>.. [Acedido em 05 Fevereiro 2014].

# Anexo I - VSM atual

