

**Maximização da valorização energética em aterros sanitários recorrendo
a equipamentos baseados no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC).**

Mestrado Engenharia Eletrotécnica

Sistemas Eléctricos de Energia

Maximização da valorização energética em aterros sanitários recorrendo a equipamentos baseados no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC).

Alfredo Verónico da Silva

Dissertação Submetida para Satisfação dos requisitos de grau de mestre em
Engenharia Eletrotécnica – Sistemas de Energia

Dissertação realizada sob a orientação:

Professora Doutora Teresa Alexandra Pinto Nogueira

Porto, Outubro 2013

*“Nenhum trabalho de qualidade
pode ser feito sem concentração e
autossacrifício, esforço e dúvida.”*

Max Beerbohm

Resumo

Atualmente, os aterros sanitários representam uma solução para a gestão e tratamento dos resíduos sólidos urbanos. Da deposição, ocorrem duas formas de emissões ao longo do tempo, a produção de biogás e de lixiviados, que resultam sobretudo da decomposição da matéria orgânica. Um dos principais constituintes do biogás é o metano, o qual tem elevado poder calorífico.

O presente trabalho aborda, a maximização da valorização energética em aterros sanitários, recorrendo a equipamentos baseados no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) para a produção de eletricidade.

É apresentado como caso de estudo a central de valorização energética da Suldouro, em Sermonde, que produz eletricidade a partir do biogás resultante da decomposição da matéria orgânica depositada em aterro. O biogás é utilizado como combustível para os motogeradores utilizados para o seu aproveitamento energético, sendo que apenas cerca de 40% do potencial energético contido no biogás é transformado em eletricidade, registando-se perdas sobretudo nas emissões dos gases de exaustão e na água de arrefecimento dos motores.

Para avaliação do potencial da recuperação energética dos gases de escape é avaliado o desempenho termodinâmico do ciclo ORC. Para tal foi desenvolvida uma ferramenta em *MATLAB* utilizando como modelo a configuração do ORC com recuperador de calor. O cálculo das propriedades termodinâmicas dos fluidos foi obtido através da criação de uma sub-rotina que chama o programa *CoolProp*. Este programa restitui propriedades como a entalpia, entropia, pressões e temperaturas em cada ponto do ciclo, permitindo assim ao utilizador otimizar o tempo na obtenção de resultados.

A avaliação económica é fundamental na tomada de decisões por parte do investidor e dos financiadores do projeto. É então apresentada a análise económica e efetuada uma análise de sensibilidade, onde foram efetuadas variações nos vetores mais importantes de forma a poder avaliar-se o impacto em termos da sua rentabilidade. A ferramenta desenvolvida permite obter de forma prática, os três indicadores económicos extremamente influentes no que se refere à tomada de decisão.

A utilização dos sistemas ORC e os seus benefícios não se esgotam na maximização dos aproveitamentos da valorização energética em aterros sanitários. Também a recuperação de calor para a produção de energia elétrica pode ter um impacto importante em muitos setores intensivos de energia, contribuindo significativamente para a redução do consumo e aumentando a eficiência de todo o processo de produção.

Abstract

Nowadays, landfills represent a solution for the management and treatment of solid urban waste. Throughout time two forms of emissions occur from landfill, the production of biogas and leachate, which result mainly from the decomposition of organic matter. One of the main constituents of biogas is the methane, which has a high calorific power.

This work is about the most efficient use of energy in landfills, using equipment's based on the Organic Rankine Cycle (ORC) for the production of electricity.

The Energy recovery Plant of Suldouro, in Sermonde, which produces electricity through biogas coming from the decomposition of the landfill of organic matter, is presented as the case study. The biogas is used as a fuel for motor generators used for its energetic use, and only about 40% of the potential energy contained in the biogas is transformed into electricity, registering losses mainly in the emission of exhaust gases and in the cooling water of motors. In the case of the exhaust gas, which reach a temperature around 450°C, has been recognized a potential for significant energy recovery.

To validate the technological option ORC, a program is developed in Matlab, which connected to the CoolProp program, restores characteristics as enthalpy and entropy, etc. The developed tool provides a sensitivity analysis and optimizes the time in achieving results. It was created an industry which generates, in a practical way, three economic indicators which are extremely influential with regard to decision making, the Net Present Value (NPV), the Internal Rate of Return (IRR) and the Payback period.

The use of ORC systems and its benefits do not stop at the maximization of hydroelectric energy recovery in landfills. Also, the heat recovery for the production of electricity can have a significant impact in many energy-intensive sectors, contributing significantly to reducing the consumption and increasing the efficiency of the whole production process.

Agradecimentos

A realização deste trabalho só foi possível com o apoio e colaboração de um conjunto de pessoas e de instituições. A todos os que, direta ou indiretamente, participaram neste trabalho, desejo expressar o meu agradecimento.

À Senhora Professora Doutora Teresa Alexandra Ferreira Mourão Pinto Nogueira, por ter aceite a orientação desta dissertação, pela disponibilidade, conselhos e apoio que me disponibilizou durante a elaboração do trabalho.

Ao Senhor Engenheiro Manuel Silva da SULDOURO pela amabilidade e disponibilidade manifestadas na colaboração que se dignou prestar e nas informações sobre as tecnologias e alternativas.

A todos os professores do Instituto Superior de Engenharia do Porto do Curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica Sistemas de Energia pelo saber e ensinamentos transmitidos.

A todos os colegas de Mestrado, pela amizade e companheirismo demonstrados.

À minha esposa, pelo enorme apoio, carinho e sacrifício que dispensou durante o desenrolar deste curso de mestrado e pela leitura atenta desta dissertação.

E especialmente à, minha filha, Bárbara que mostrou estar à altura, em todas os momentos que a privei e sempre me incentivou e encorajou desde a primeira hora.

Índice

Resumo	i
Abstract	iii
Agradecimentos	v
Índice	vii
Índice de figuras	xi
Índice de tabelas.....	xv
Lista de Abreviaturas	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Enquadramento do tema	1
1.2 Enquadramento Legal.....	3
1.2.1 Regulação comunitária	3
1.2.2 Legislação e regulamentação	6
1.3 Relevância do tema e objetivos	7
1.4 Organização	8
2 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS	11
2.1 Introdução.....	11
2.2 Setor energético Português	12
2.3 Evolução das renováveis em Portugal	13
2.4 Cogeração / Trigeração	17
2.4.1 Conceitos e princípios	17
2.4.2 Cogeração	18
2.4.3 Trigeração	19
2.4.4 Tecnologias de cogeração.....	20
2.4.5 Eficiência	23
3 GESTÃO DOS RESÍDUOS URBANOS EM PORTUGAL	25
3.1 Introdução.....	25
3.2 Caracterização dos Resíduos Urbanos.....	27
3.3 Composição física típica dos RU em Portugal.	32

3.4	Aterro Sanitário.....	34
3.4.1	Caraterísticas	34
3.4.2	Infraestruturas	36
4	PRODUÇÃO DO BIOGÁS	41
4.1	Composição do biogás em aterros.....	41
4.2	Estimativas teóricas da produção de biogás em aterros	45
4.3	Benefícios do aproveitamento do biogás	47
4.4	Biogás em estações de águas residuais	48
4.5	Biogás de explorações agropecuárias	49
4.6	Tecnologias para conversão do biogás em energia	50
4.6.1	Motor de combustão interna	50
4.6.2	Turbinas a Gás.....	52
5	INDAGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS CICLOS ORGÂNICOS DE RANKINE.....	55
5.1	Princípio de funcionamento do Ciclo de Rankine	55
5.2	Princípio de funcionamento do Ciclo de Rankine Orgânico.....	57
5.2.1	Vantagens dos Ciclos Orgânicos de Rankine	58
5.2.2	Descrição da tecnologia.....	59
5.2.3	Fluidos Orgânicos utilizados em sistemas ORC	61
5.3	Análise termodinâmica dos sistemas ORC.	63
5.4	Configurações.....	65
5.4.1	ORC simples	65
5.4.2	ORC com recuperador de calor	66
5.4.3	ORC com recuperador de calor e Chiller	67
5.4.4	ORC com recuperador, pré-aquecedor e superaquecedor	68
5.5	Equipamentos de Expansão	69
5.6	Aplicações dos ORC.....	70
5.6.1	Recuperação de calor.....	70
5.6.2	Energia solar	72
5.6.3	Biomassa.....	75

5.6.4	Geotérmicos	76
6	CASO DE ESTUDO: ATERRO SANITÁRIO SERMONDE	77
6.1	Caracterização do aterro sanitário Sermonde	77
6.2	Central de valorização energética do biogás	79
6.3	Maximização do aproveitamento energético	82
6.4	Estudo da viabilidade tecnológica do ORC	84
6.4.1	Método aplicado	84
6.4.2	Programa Informático	86
6.4.3	Apresentação de resultados.	90
6.5	Critérios de avaliação e de decisão de investimento	95
6.5.1	Valor Atual Líquido (VAL).	95
6.5.2	Período de Recuperação do Investimento	96
6.5.3	Taxa Interna de Rentabilidade do Projeto	96
6.5.4	Pressupostos.....	97
6.5.5	Ferramenta informática de auxílio à avaliação e de decisão de Investimentos	98
6.5.6	Análise de resultados.	98
6.6	Análise de risco	99
6.6.1	Incerteza do projeto.	99
6.6.2	Análise de sensibilidade.	100
7	CONCLUSÕES.....	103
7.1	Análise conclusiva	103
7.2	Trabalhos futuros.....	104
	Referências Bibliográficas.....	107
	Anexos.....	111
A.1	m-file matlab cálculo parâmetros ORC.....	111
A.2	m-file <i>matlab</i> cálculo viabilidade económica.....	117
A.3	Software utilizado.....	119

Índice de figuras

Figura 2.1 - Consumo de energia primária em Portugal	12
Figura 2.2 -Evolução da Energia Produzida a Partir de Fontes Renováveis (TWh)	13
Figura 2.3 - Peso da produção de energia elétrica a partir de energias renováveis na produção bruta + saldo importador.	16
Figura 2.4 - Esquema de um sistema de cogeração	18
Figura 2.5 - Esquema de um sistema de trigeração	19
Figura 2.6 - Esquema de um chiller de absorção	22
Figura 3.1 - Evolução da Produção total e da Capitação de RU, em Portugal Continental entre 2005 e 2010	28
Figura 3.2 - Evolução anual de RU produzidos por unidades de PIB, em Portugal Continental, entre 1999 e 2010.	28
Figura 3.3 - Distribuição dos Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos por Portugal	29
Figura 3.4 - Gráfico da evolução do número de infraestruturas de Gestão de RU em exploração, em Portugal Continental, entre 2002 e 2010	32
Figura 3.5 - Caracterização física dos RU produzidos, em 2010	33
Figura 3.6 - Caracterização dos RU depositados em aterro, em 2010	33
Figura 3.7 - Esquema da estrutura de um aterro sanitário	36
Figura 3.8 - Estrutura de selagem de um aterro sanitário.....	38
Figura 3.9 - Célula selada de um aterro sanitário.....	39
Figura 4.1 - Fases de formação do biogás.	42
Figura 4.2 - Geração de gases em aterros sanitários.....	44
Figura 4.3 - Esquema de um digestor num aterro	45
Figura 4.4 - Programa informático LandGem	47
Figura 4.5 - Diagrama de uma Etar com aproveitamento de biogás.....	49
Figura 4.6 - Motor de combustão interna a biogás	50
Figura 4.7 - Etapas de funcionamento ciclo Otto.....	51
Figura 4.8 - Turbina a gás.....	53
Figura 5.1 - Ciclo de <i>Rankine</i> esquema de princípio	55
Figura 5.2 - Diagrama Temperatura-Entropia.....	56
Figura 5.3 - Diagrama Temperatura – Entropia de um ciclo Rankine real	56
Figura 5.4 - Diagrama para o vapor	57
Figura 5.5 - Esquema de princípio da tecnologia	60
Figura 5.6 - Perspetiva de uma instalação ORC	60
Figura 5.7 - Representação esquemática de fluidos isentrópicos húmidos e secos	61
Figura 5.8 - Representação dos processos do sistema ORC.....	64

Figura 5.9- Constituição ORC simples	66
Figura 5.10 - Diagrama T-s para um ORC simples	66
Figura 5.11 - Constituição ORC com recuperador de calor	67
Figura 5.12 - Diagrama T-s para um ORC com recuperador de calor	67
Figura 5.13 - Constituição ORC com recuperador de calor e Chiller	68
Figura 5.14 - Diagrama T-s para um ORC com recuperador de calor e Chiller	68
Figura 5.15 - Constituição ORC com pré-aquecedor.....	69
Figura 5.16 - Máquina de reação	69
Figura 5.17 - Máquina de deslocamento	70
Figura 5.18 - Diagrama de Sankey para motor diesel de grande dimensão	71
Figura 5.19 - Diagrama simplificado do sistema de recuperação da fábrica de cimento através de um módulo de ORC.....	72
Figura 5.20 - ORC solar com entrada direta de calor	73
Figura 5.21 - ORC solar com permutador de calor.....	73
Figura 5.22 - Princípio de funcionamento de um sistema ORC solar.	74
Figura 5.23 - Princípio de funcionamento de um sistema ORC - Biomassa	75
Figura 5.24 - Diagrama simplificado de uma central ORC geotérmica	76
Figura 6.1 - Vista aérea do aterro sanitário Sermonde 2013	78
Figura 6.2 - Previsão de potência, aterro de Sermonde	80
Figura 6.3 – Central de valorização energética do biogás de Sermonde.....	81
Figura 6.4 - Produção de eletricidade 2008-2012	82
Figura 6.5 - Central ORC Tri-o-Gen instalada na Suldouro	83
Figura 6.6 - Diagrama Sistema ORC TRI-O-GEN implementado	83
Figura 6.7 – Fluxograma representativo do processo de cálculo.....	85
Figura 6.8 - Ecrã Inicial do programa	86
Figura 6.9 - Seleção do fluido de trabalho e características da fonte de calor.....	87
Figura 6.10 - Eficiências isentrópicas.....	87
Figura 6.11 - Temperatura condensação, rendimento alternador.....	88
Figura 6.12 - Saída de resultados	88
Figura 6.13 - Programa – apresentação de resultados	89
Figura 6.14 - Output representação esquemática do ciclo	89
Figura 6.15 - Características do ciclo - toluene	90
Figura 6.16 – Potência gerada em função da temperatura.....	91
Figura 6.17 – Calor de entrada no ciclo em função da temperatura dos gases de escape	91
Figura 6.18 - Potência gerada em função do fluxo de massa.....	92
Figura 6.19 – Potência gerada em função do rendimento da turbina.	92

Figura 6.20 - Características do ciclo - rf245 fa.....	93
Figura 6.21 - Características do ciclo - rf245 fa.....	93
Figura 6.22 - Estudo de viabilidade económica.....	98

Índice de tabelas

Tabela 2.1 - Evolução histórica da energia elétrica produzida através de renováveis (GWh).....	14
Tabela 2.2 - Evolução histórica da potência total instalada em renováveis (MW)	15
Tabela 2.3 - Crescimento da potência instalada em energias renováveis	16
Tabela 2.4 - Características dos diferentes tipos de sistemas de cogeração	21
Tabela 3.1 - População média residente e Produção de RU em Portugal Continental, entre 2005 e 2010.....	27
Tabela 3.2 - Produção Total de RU, em 2010	27
Tabela 3.3- Capitação de RU em Portugal Continental entre 2005 e 2010	28
Tabela 3.4 - Características dos Sistemas de Gestão de RU da Região Norte	30
Tabela 3.5 - Quantidades de RU por Operação de Gestão	31
Tabela 4.1- Evolução da produção de energia a partir do biogás em GWh.....	48
Tabela 4.2- Motor de combustão interna a biogás	51
Tabela 4.3 - Características de uma turbina.....	54
Tabela 5.1- Principais fabricantes de sistemas ORC	59
Tabela 5.2 - Principais fluidos utilizados em sistemas ORC.....	62
Tabela 6.1 - Características Técnicas do Sistema ORC	84
Tabela 6.2 - Principais parâmetros característicos do ciclo termodinâmico.....	90
Tabela 6.3 – Características do ciclo em função da temperatura dos gases de escape	91
Tabela 6.4 - Principais parâmetros característicos do ciclo termodinâmico.....	93
Tabela 6.5 – Taxa de inflação em Portugal 2005-2012	96
Tabela 6.6 - Custo médio anual por tecnologia (€/MWh).....	97
Tabela 6.7 - VAL, PRI, TIR do projeto.....	99
Tabela 6.8 - Cenário de variação tarifa venda de energia à rede.....	101
Tabela 6.9 - Cenário de variação do tempo de funcionamento por ano.	101
Tabela 6.10 - Cenário de variação dos custos de manutenção.	102

Lista de Abreviaturas

APA	Agencia Portuguesa do Ambiente
AS	Aterros Sanitários
CBO	Carência Bioquímica de Oxigénio
CDR	Combustíveis Derivados de Resíduos
CH ₄	Símbolo químico do metano
CHCP	<i>Combined Heat, Cooling and Power Production</i>
CHP	<i>Combined Heat and Power</i>
CO ₂	Símbolo químico do dióxido de carbono
CQO	Carência Química de Oxigénio
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia
ETAR	Estação Tratamento Águas Residuais
EOL	Eólica
FER	Fontes de Energia Renováveis
GEE	Gases com Efeito de Estufa
HFC	Hidrofluorcarbonetos
MCI	Motores de Combustão Interna
MRRU	Mapa do Registo dos Resíduos Urbanos
N ₂ O	Símbolo químico óxido Nitroso
OMS	Organização Mundial de Saúde
ORC	<i>Organic Rankine Cycle</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCH	Pequenas Centrais Hídricas
PEP	Poupança de Energia Primária
PERH	Plano Estratégico de Resíduos Hospitalares
PERSU	Plano estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos
PRI	Período de Recuperação do Investimentos
PESGRI	Plano Estratégico de Gestão de Resíduos Industriais
PFC	Perfluorcarbonetos
PME	Pequenas e Médias Empresas
PNAC	Programa Nacional para Alterações Climáticas
PNAEE	Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis
RA	Região Autónoma
REE	Rendimento Elétrico Equivalente
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RU	Resíduos Urbanos

SF ₆	Símbolo químico do hexafluoreto de enxofre
SIRAPA	Sistema Integrado de Agencia Portuguesa do Ambiente
SIRER	Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos
TCMA	Taxa de Crescimento Média Anual
TIR	Taxa Interna de Rentabilidade
UE	União Europeia
VAL	Valor Atual Líquido

1. INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do tema

O desenvolvimento desmesurado da humanidade faz com que esta chegue ao nosso século como a civilização dos resíduos, que se evidencia pelo desperdício e pelo desejo de um desenvolvimento a todo o custo sem se preocupar, efetivamente, com a sustentabilidade ambiental.

Utilizamos de forma descontrolada os recursos da biosfera como se fossem inesgotáveis e declinamos a ela o grande desafio e responsabilidade de “assimilar” novos produtos e materiais, completamente anónimos ao seu sistema e ciclos e, que não lhe permitem “trabalhar” com eficiência a reciclagem dos mesmos uma vez que ultrapassam os limites dos fluxos naturais de energia e matéria.

Ao longo dos tempos, o lixo urbano havia sido tratado como um problema, quase exclusivamente, sanitário. Queimá-lo ou depositá-lo o mais longe possível das cidades era a solução encontrada. No séc. XIX, com a revolução industrial, novas medidas sanitárias de controlo de esgotos e lixos permitiram grandes melhorias nas condições de saúde pública das populações.

As sociedades parecem no entanto estar a acordar para este enorme problema e o seu debate, nas mais altas instâncias, levou a um despertar de consciências nas pessoas em geral e nos governos em particular. À medida que se focam na resolução desta problemática com novas medidas e legislação os vários países dão sinais ao mundo do seu estágio de desenvolvimento. Não será errado pensar que existe, neste momento, uma dicotomia entre o desenvolvimento ambiental e económico que caracteriza cada uma das sociedades.

O desenvolvimento económico das sociedades entra muitas vezes em colisão com um desenvolvimento ambiental sustentável.

No passado o tratamento de resíduos sólidos urbanos era escassa e muitas vezes inexistente, no presente converteu-se numa das principais preocupações urbanísticas, estando a sua gestão nas mãos dos municípios, o que leva muitas vezes a erros na

área da jurisdição quer no que respeita a aspetos ambientais quer no que respeita à defesa do consumidor.

As dificuldades dos vários municípios em lidar com todas as especificidades do serviço de resíduos sólidos urbanos aliadas a várias pressões da União Europeia (UE) levaram a que alguns países tomassem a dianteira na concretização de algumas diretivas e decisões relativas às problemáticas relacionadas com o sector da gestão dos resíduos sólidos.

A enorme diversidade cultural e económica espalhada um pouco por todo o mundo com todas as suas especificidades e complexidades, tornam uma tarefa árdua a convergência sistémica para uma política energética eficiente, coerente, globalizante centrada nas necessidades e exigências de cada um.

Na sua essência a política ambiental deve entender o papel fundamental da energia do mundo, sobretudo ao nível da eletricidade para elevar os padrões de vida das pessoas em geral.

A crescente preocupação com o impacto ambiental ao nível das Gases com Efeito de Estufa (GEE) tem como base sobretudo o recurso intensivo aos combustíveis fósseis. A escassez e instabilidade do petróleo levaram a que os governos repensassem estratégias e adotassem políticas de incentivo à promoção de energias renováveis – eólicas, hídrica, biogás, solar, marés, geotérmica e biomassas, muito menos poluentes e capazes de se regenerar e assim potencialmente inesgotáveis.

A queima de combustíveis não é a única que contribui para a produção de GEE. O biogás produzido nos Aterros Sanitários (AS), que resulta da decomposição da fração biodegradável dos resíduos urbanos, tem na sua composição dois gases, o metano e o dióxido de carbono, que também contribuem de forma significativa para o aquecimento global do planeta.

Nas últimas décadas o consumo de energia teve um aumento exponencial e é expectável que continue a aumentar nas próximas décadas daí a importância da concertação de esforços, que solucionem algumas questões em aberto e traduzam uma proteção efetiva do meio ambiente.

Em Portugal o panorama não é diferente do resto da UE. Nas últimas décadas, os esforços desenvolvidos levaram a uma melhoria significativa da situação. O número de lixeiras a céu aberto está mais controlado, as medidas e estratégias implementadas, pelo poder político, ao nível da promoção das energias renováveis começaram, já, a dar os seus frutos, traduzidos numa melhoria visível da qualidade de serviços prestados pelas entidades gestoras.

Ainda assim são necessárias novas tecnologias de conversão de energia para aproveitar recursos energéticos apropriados para a produção de eletricidade, sem causar danos ambientais.

A energia proveniente do biogás dos aterros sanitários, produção de eletricidade a partir do biogás resultante da decomposição da matéria orgânica depositada em aterro, ganha importância nas políticas de geração de energia a partir de biomassa e outras fontes de energia renováveis, visto que podem reduzir o consumo de combustíveis fósseis.

Neste princípio enquadra-se a maximização destes aproveitamentos energéticos, com recurso a equipamentos baseados no Ciclo Orgânico de Rankine (ORC), que permitem aproveitar o calor dos gases de exaustão dos grupos moto geradores, que de outra forma seriam desperdiçados.

1.2 Enquadramento Legal

A temática do biogás encontra-se contemplada quer na regulamentação comunitária, quer na legislação nacional referentes aos temas de agricultura, resíduos, energias renováveis e biomassa. É ainda referenciado em diversos planos estratégicos. Pela diversidade de diplomas que seria fastidioso enumerar, são aqui referidos apenas os mais relevantes para a temática em estudo.

1.2.1 Regulação comunitária

No contexto comunitário, o biogás tem vindo a assumir-se nos anos mais recentes, como o combustível com maior difusão obtido a partir dos resíduos. Tal deve-se em grande parte a um enquadramento legislativo destinado a incentivar a sua obtenção a partir de fontes diversas, numa abordagem transversal de diferentes atividades económicas. As orientações relativas a agricultura, ambiente e energia, têm incentivado à utilização das matérias orgânicas da agricultura e das agroindústrias, entre outras,

como matérias-primas na produção de biogás. Os objetivos a atingir são a redução da contaminação do solo, do ar e da água, a valorização de fontes de energia endógenas e renováveis e a produção de matérias adequadas para fertilização dos solos, decorrentes de um correto encaminhamento e tratamento dos resíduos.

Neste momento, os diplomas com maior relevância para contextualização da temática em estudo são os que a seguir se apresentam.

A *Diretiva 2006/12/CE* do Parlamento Europeu e do Conselho consolida as diversas alterações à *Diretiva 75/442/CEE* do Conselho, de 15 de Julho de 1975, relativa aos resíduos. Apresenta as linhas de orientação para a aplicação de uma regulamentação eficaz e coerente da eliminação e da valorização dos resíduos entre os Estados Membros, incentivando-se a respetiva valorização e a utilização dos materiais valorizados como matérias-primas, a fim de preservar os recursos naturais. Reforça o papel dos Estados-Membros na elaboração de planos de gestão de resíduos, na promoção da autossuficiência do seu tratamento e na sua função de controlo.

A *Decisão 406/2009/CE* do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009, concerne aos esforços a realizar pelos Estados-Membros para redução das suas emissões de gases com efeito de estufa, com o objetivo de respeitar os compromissos da Comunidade até 2020.

Refere ainda a importância de os Estados-Membros contribuírem para reduzir as emissões de gases com efeito de estufa Dióxido de Carbono (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Hidrofluorcarbonetos (HFC), Perfluorcarbonetos (PFC) e Hexafluoreto de enxofre (SF₆) provenientes das atividades de energia, processos industriais, uso de solventes e outros produtos, agricultura e resíduos. O diploma incentiva a redução de gases com efeito de estufa através da promoção do aumento da produção de eletricidade a partir de fontes de energia renováveis no contexto da *Diretiva 2009/28/CE* do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Abril de 2009.

A *Diretiva 2009/28/CE* do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009, refere a promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis. Este diploma vem alterar e subseqüentemente revogar as *Diretivas 2001/77/CE* e *2003/30/CE*.

Refere a importância de dar cumprimento aos compromissos relativos às emissões de GEE da UE através de um pacote de medidas que passam pelo controlo e poupança

do consumo de energia na Europa, pela utilização crescente de energia proveniente de fontes renováveis e pelo aumento da eficiência energética.

A Diretiva reforça o papel das Pequenas e Médias Empresas e dos Produtores Independentes na promoção do crescimento económico e na dinamização local, através da produção descentralizada de energia a partir de fontes renováveis, incentivando os Estados-membros a incentivarem e apoiarem estas iniciativas.

Foram já reconhecidas as oportunidades para potenciar o crescimento económico através da inovação e de uma política energética sustentável e competitiva. A produção de energia a partir de fontes renováveis depende frequentemente das Pequenas e Médias Empresas (PME) locais e regionais. As oportunidades de crescimento e emprego que os investimentos na produção de energia a partir de fontes renováveis a nível regional e local proporcionam aos Estados-Membros e às suas regiões são significativas. Por conseguinte, a Comissão e os Estados-Membros deverão apoiar as medidas de desenvolvimento tomadas nas esferas nacional e regional nesses domínios, incentivar o intercâmbio das melhores práticas na produção de energia a partir de fontes renováveis entre as iniciativas de desenvolvimento locais e regionais e promover a utilização de fundos estruturais neste domínio.

A Diretiva defende ainda a utilização de materiais agrícolas na produção de biogás, como forma de reduzir as emissões de GEE, produzir energia térmica/ elétrica, diversificar a atividade e as fontes de receitas dos agricultores e promover o desenvolvimento das zonas rurais.

No art.º 16 são abordados os principais constrangimentos à promoção da produção descentralizada de energia a partir de fontes renováveis e apontados os comportamentos a seguir para os remover. Os Estados-Membros devem assegurar que as tarifas cobradas pelos operadores de sistemas de transporte e os operadores de sistemas de distribuição pelo transporte e distribuição de eletricidade a partir de instalações que utilizam fontes de energia renováveis reflitam as vantagens realizáveis em termos de custos resultantes da ligação da instalação à rede. Essas vantagens em termos de custos podem resultar da utilização direta da rede de baixa tensão.

O mesmo artigo nos pontos 9, 10 e 11, aconselha os Estados-Membros a avaliar a necessidade de expandir as atuais infraestruturas da rede de gás para facilitar a integração do gás proveniente de fontes de energia renováveis, refere ainda que se for caso disso, os Estados-Membros devem exigir que os operadores de redes de

transporte e os operadores de redes de distribuição no seu território publiquem normas técnicas nos termos do artigo 6º da Diretiva 2003/55/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 26 de Junho de 2003, que estabelece regras comuns para o mercado interno de gás natural, nomeadamente no que se refere às normas de ligação à rede que incluam requisitos de qualidade, odor e pressão do gás. Os Estados-Membros devem igualmente exigir que os operadores de sistemas de transporte e os operadores de sistemas de distribuição publiquem as tarifas de ligação às fontes renováveis de gás, com base em critérios transparentes e não discriminatórios.

A avaliação da necessidade de construir novas infraestruturas urbanas de aquecimento e de refrigeração produzidos a partir de fontes de energia renováveis é incentivada, assim como a prossecução das medidas necessárias ao desenvolvimento de uma infraestrutura de aquecimento urbano com vista a permitir o desenvolvimento da produção de aquecimento e arrefecimento a partir de grandes centrais de biomassa, solares e geotérmicas.

1.2.2 Legislação e regulamentação

Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de Setembro, aprova um novo regime jurídico para a gestão de resíduos que substitui-o o regime de 1997.

O decreto-lei aplica-se às operações de gestão de resíduos, considerando toda e qualquer operação de recolha, transporte, armazenagem, triagem, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, bem como as operações de descontaminação de solos e a monitorização dos locais de deposição após o encerramento das respetivas instalações.

Exclui do âmbito de aplicação a biomassa florestal e a biomassa agrícola, assim como os cadáveres de animais, ou suas partes, e resíduos agrícolas que sejam chorume e conteúdo do aparelho digestivo ou outras substâncias naturais não perigosas aproveitadas nas explorações agrícolas, sujeitos a legislação especial.

Decreto-Lei n.º 118/2006 de 21 de Junho (lamas), consagra uma maior exigência de proteção de valores fundamentais como o ambiente e a saúde humana, que se consubstancia em regras mais restritas no que respeita às análises, às definições, às informações a prestar e às proibições de aplicação de lamas. Por outro lado, e tendo em vista a aproximação da Administração Pública aos cidadãos, estabelece-se um processo de licenciamento com intervenção das entidades públicas que a nível regional têm competência na matéria.

Portaria n.º 187/2007 de 12 de Fevereiro, aprova o Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos, PERSU II.

O *Decreto-Lei n.º 276/2009* de 2 de Outubro vem estabelecer o regime de utilização de lamas de depuração em solos agrícolas. Pretende-se com o diploma regular a gestão das lamas de depuração, promovendo a sua correta utilização de forma a evitar efeitos nocivos para o homem, para a água, para os solos, para a vegetação e para os animais.

O decreto regula ainda as obrigações dos produtores de lamas e as condições em que as mesmas podem ser espalhadas ou injetadas no solo, dando consistência legal ao disposto no Código de Boas Práticas Agrícolas.

Dispõe sobre os requisitos de qualidade das lamas e dos solos, verificáveis através da conformidade das análises requeridas com os valores limite estabelecidos. Define um conjunto de restrições à utilização das lamas no solo, prevê procedimentos específicos de aplicação das lamas, bem como deveres de registo e informação por parte dos operadores de gestão de lamas.

Despacho n.º 21295/2009 - Aprova a Estratégia para os Combustíveis Derivados de Resíduos (CDR) e complementa o PERSU II.

1.3 Relevância do tema e objetivos

A presente Dissertação tem como objetivo estudar a maximização da valorização energética em aterros sanitários, recorrendo a equipamentos baseados no Ciclo Orgânico de Rankine (*Organic Rankine Cycle* - ORC) para a produção de eletricidade. E a aplicabilidade destes ciclos na maximização de outro género de aproveitamentos energéticos.

Para tal faz-se necessário definir quatro grandes objetivos. Em primeiro efetuar uma pesquisa sobre as tecnologias e aspetos técnicos envolvidos na construção de aterros sanitários, forma de captação, compressão, tratamento e queima do biogás produzido, bem como a análise das características das diferentes tecnologias que permitam realizar a queima do biogás para geração de energia. Estas diferentes perspetivas sobre o sector ajudam a contextualizar a realidade Portuguesa e deste modo perceber melhor o funcionamento do serviço de resíduos sólidos urbanos bem como as suas potencialidades energéticas.

Em segundo pretende-se abordar um caso de estudo da forma de maximização da produção de energia elétrica dos grupos moto-geradores a biogás nos aterros, recorrendo a equipamentos baseados no ORC, que tem como princípio de funcionamento do débito calorífico dos gases de escape dos moto-geradores, bem como o estudo da viabilidade económica. Tal caso incidirá sobre o aterro sanitário de Sermonde, tendo em conta que esta tecnologia foi a primeira a ser instalada na Península Ibérica.

Em terceiro pretende-se inquirir da viabilidade desta tecnologia noutros aproveitamentos energéticos nomeadamente, na energia solar, energia biomassa, energia geotérmica e no aproveitamento do calor proveniente de ciclos de produção que estão intrinsecamente caracterizados por quantidades significativas de energia térmica dos resíduos contidos nos gases de combustão do processo.

Por último, pretende-se encontrar um modelo matemático aproximado, mas realista, dos parâmetros envolvidos no sistema ORC, de forma a permitir a simulação do comportamento de todo o sistema bem como a viabilidade económica do projeto. A partir da simulação do modelo deverá ser possível obter estimativas da eficiência térmica e da energia produzida pelo ciclo, para tal será desenvolvida uma ferramenta informática que potenciará a análise do aproveitamento energético e a viabilidade económica do mesmo.

1.4 Organização

A presente Dissertação está dividida em sete capítulos, conforme estrutura detalhada a seguir.

O presente capítulo “Introdução” apresenta a contextualização do trabalho, caracterizando o tema desta pesquisa, o enquadramento legal, a relevância do tema e os objetivos do estudo.

No segundo capítulo “Contextualização das energias renováveis” faz-se a caracterização das energias renováveis predominantes e elabora-se uma perspetiva sobre a evolução da energia elétrica produzida em Portugal a partir das fontes renováveis nomeadamente a cogeração, biogás e biomassa.

No terceiro capítulo “Gestão dos resíduos urbanos em Portugal” são apresentados os resultados da pesquisa sobre a gestão dos resíduos urbanos em Portugal, as tecnologias e aspetos técnicos envolvidos na construção de aterros sanitários, forma de

captação, compressão, tratamento e queima do biogás produzido, bem como a análise das características das diferentes tecnologias que permitem realizar a queima do biogás para geração de energia.

No quarto capítulo “Biogás em aterros sanitários” faz-se uma revisão bibliográfica sobre a utilização do biogás de aterros sanitários e o seu histórico, os aspetos e fatores que influenciam a sua formação bem como as características deste gás e os processos de purificação para utilização do mesmo como combustível para a geração de energia elétrica.

No quinto capítulo “Indagação do comportamento dos ciclos orgânicos de rankine” aborda o princípio de funcionamento dos ORC e enumera-se as principais vantagens. É efetuada a análise termodinâmica dos sistemas, são apresentadas as várias configurações e as principais aplicações.

O sexto capítulo, “Estudo do caso: Aterro sanitário de Sermonde” inicia-se com a caracterização do aterro, seguindo-se a estimativa de produção de metano por resíduos depositados em aterro e a energia elétrica extraída do biogás. Aborda o recurso ao sistema ORC, como forma de maximização da valorização energética. É apresentado o modelo matemático do sistema ORC com recuperação de calor, permitindo a análise e simulação do comportamento do sistema. É exibida a ferramenta informática desenvolvida que permitiu obter as estimativas do aproveitamento energético em função da temperatura, do fluxo de massa da fonte de calor e do fluido a utilizar. Realiza-se ainda a análise de viabilidade económica do projeto, com base nos pressupostos previamente formulados, terminando o capítulo com a análise de sensibilidade a alterações nas variáveis de maior risco.

Por último, no sétimo capítulo “Conclusões” são apresentadas todas as conclusões que se podem tirar deste caso de estudo e dos benefícios da utilização dos sistemas ORC na recuperação de calor para a produção de energia elétrica, contribuindo para a redução do consumo e aumentando a eficiência de todo o processo de produção, finalizando com algumas propostas de trabalhos futuros.

2 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

2.1 Introdução

A energia elétrica é uma forma de energia secundária não existindo na natureza sob a forma em que é usualmente utilizada. Segundo dados da *International Energy Agency* (IEA) tem-se presenciado nos últimos anos a um forte incremento da sua produção, sendo esperado que a nível mundial até 2030 sejam produzidos 30354 TWh. A necessidade de energia elétrica nos países em vias de desenvolvimento irá aumentar, considerando que estes países têm um enorme potencial económico e índices de crescimento populacional elevado seguido de um aumento dos padrões de vida.

Como efeito, as necessidades de consumo de energia elétrica irão aumentar no sector residencial e comercial. De acordo com IEA prevê-se que até 2030 o crescimento da procura de energia elétrica seja de 119% no sector residencial, 97% nos serviços e 86% na indústria e que o consumo mundial total de energia elétrica foi em 2010 de 1436 Mtep (17% de toda a energia consumida) e será em 2030 de 2263 Mtep (20% de toda a energia consumida).

A pressão económico-social tem levado a um incremento da chamada produção de energia elétrica descentralizada. Esta produção assenta em pequenas unidades, de reduzida potência instalada, distribuídas em função dos recursos existentes. Na grande maioria das situações a produção descentralizada faz uso das tecnologias de aproveitamento das fontes renováveis de energia (mini-hídrica, solar, eólica, geotérmica, biomassa, biogás), sendo da responsabilidade de operadores independentes ou mesmo de consumidores finais.

No que se refere à utilização mundial de recursos renováveis para a produção de energia elétrica, estes são atualmente liderados pelos recursos hídricos (90% da energia elétrica obtida a partir de recursos renováveis é de origem hídrica), sendo que a IEA prevê que este valor baixe para 70% em 2030 graças a um aumento da contribuição das outras fontes renováveis de energia, em especial da biomassa.

2.2 Setor energético Português

Os recursos energéticos próprios em Portugal são escassos, nomeadamente aqueles que asseguram a generalidade das necessidades energéticas como o petróleo, carvão e gás natural. Esta escassez conduz a uma elevada dependência energética do exterior.

A escassez de recursos fósseis conduz a uma elevada dependência energética do exterior 79,3% em 2011 (DGEG, 2012) nomeadamente das importações de fontes primárias de origem fóssil. Importa assim aumentar a contribuição das energias renováveis: hídrica, eólica, solar, geotérmica, biomassa. A taxa de dependência energética tem vindo a decrescer desde 2005. O valor mais elevado da década registou-se no ano de 2005 devido à baixa produtividade das centrais hídricas resultado de um ano hidrológico muito seco, e a subida registada em 2011 foi devida sobretudo ao aumento do consumo de carvão na produção de energia elétrica, para compensar a redução na produção hídrica.

Na figura 2.1 é apresentado o gráfico que mostra a evolução do consumo de energia primária e final em Portugal, no período 2005-2012 (DGEga, 2013).

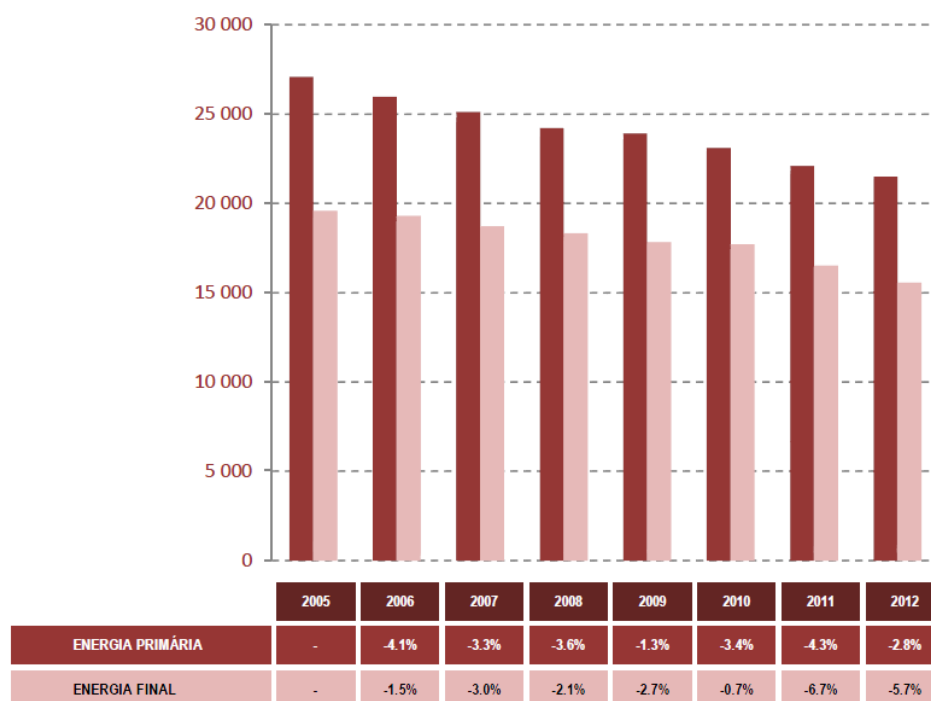
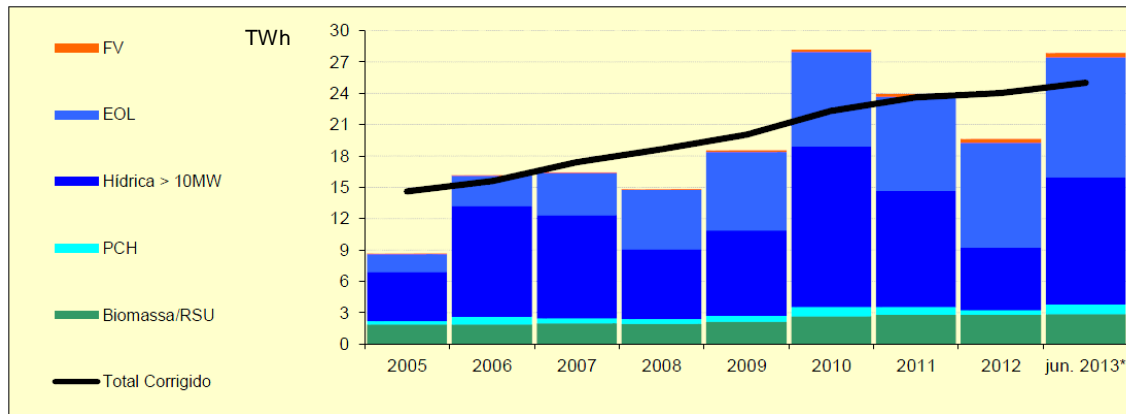


Figura 2.1 - Consumo de energia primária em Portugal

2.3 Evolução das renováveis em Portugal

Em termos gerais, Portugal tem vindo a promover as energias renováveis como forma de combater o efeito de estufa e a reduzir a dependência face a países terceiros, equilibrando simultaneamente a sua balança de pagamentos.

Na figura 2.2 é apresentado o gráfico representativo da evolução da energia produzida a partir de fontes renováveis de 2005 a junho 2013 (DGEG, 2013b).



* Ano de 2011, 2012 e 2013 provisórios

Figura 2.2 -Evolução da Energia Produzida a Partir de Fontes Renováveis

A análise do gráfico da figura 2.2 revela que ao contrário do que se tem vindo a verificar com a energia eólica o biogás apresenta um desenvolvimento bastante modesto, no contexto da produção elétrica nacional.

Em Portugal, o biogás é perspetivado como uma forma de complementar os atuais sistemas de tratamento de resíduos, de tratamento de águas residuais ou apenas de responder às exigências legais de funcionamento de unidades agrícolas ou industriais.

As estratégias nacionais para as áreas do ambiente, agricultura e energia contemplam a promoção da tecnologia do biogás, como solução privilegiada para a promoção do desenvolvimento sustentável. No entanto, o número de estações em funcionamento não tem revelado acréscimos significativos ao longo dos últimos anos.

No período 2007 – 2013, o maior contributo para a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis é dado pela energia eólica. A categoria biomassa revela no mesmo período um acréscimo na energia elétrica produzida, que é demonstrativo do peso crescente da biomassa na produção anual de energia elétrica a partir de fontes renováveis. No entanto, esta categoria agrega quer as centrais de queima de biomassa,

quer os incineradores de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), quer as centrais de biogás. O conceito de biomassa, para produção de energia refere-se a matérias tão diversas como:

- Resíduos, incluindo-se nestes os resíduos florestais e os das indústrias da fileira florestal
- Os resíduos agrícolas e das indústrias agroalimentares bem como os seus efluentes.
- Excreta animal proveniente das explorações pecuárias
- A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos
- Esgotos urbanos
- Culturas energéticas incluindo as culturas de curta rotação.

Uma análise mais pormenorizada do contributo do biogás para a produção de energia elétrica em Portugal é realizada a partir dos dados da tabela 2.1 (DGEG,2013b). Nesta, a informação apresentada, revela em 2013 um peso de 7,2% do biogás no total da biomassa. No total das renováveis, apenas 0,9% da energia elétrica é produzida a partir do biogás (DGEG, 2013b).

Tabela 2.1 - Evolução histórica da energia elétrica produzida através de renováveis (GWh)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	jun. 2013*
Hídrica Total	10351	7 102	8 717	16 249	11 827	6 446	13104
Grande Hídrica (>30MW)	9 406	6 190	7 547	14 306	10 495	5 593	11 322
em bombagem	357	498	725	399	575	1 038	1 096
PCH (>10 e <=30 MW)	504	478	618	1 045	646	393	860
PCH (<= 10 MW)	441	434	552	898	686	460	922
Eólica	4 007	5 720	7 506	9 078	9 003	10 011	11 504
Biomassa (c/ cogeração)	1 361	1 381	1 390	1 579	1 669	1689	1725
Biomassa (s/ cogeração)	149	146	311	612	688	718	711
Resíduos Sólidos Urbanos	498	441	458	455	486	395	431
Biogás	55	67	80	97	152	202	223
Fotovoltaica	24	41	160	213	265	360	394
microprodução					75	138	157
Total	16 445	14 898	18 622	28 283	24 089	19 821	28 094
Hídrica Total Corrigida (Diretiva 2009/28/CE)	11 129	10 931	10 644	11 154	10 776	10 719	11 002
Eólica Total Corrigida (Diretiva 2009/28/CE)	4 221	5 639	7 000	8 204	9 091	9 951	10 559
Total Corrigido	17 436	18 647	20 043	22 315	23 127	24 033	25 046
Produção Bruta + Saldo Imp. (GWh)	52 952	53 558	53 134	54 865	53 109	52 715	52 267
% de renováveis (Real)	31,1%	27,8%	35,0%	51,6%	45,4%	37,6%	53,8%
% de renováveis (Diretiva)	32,9%	34,8%	37,7%	40,7%	43,5%	45,6%	47,8%

A produção de energia elétrica a partir dos RSU revela um ligeiro decréscimo que se deve ao aumento da fração reciclada. A produção de energia elétrica a partir do biogás sofreu um acréscimo notório a partir de 2007, na sequência da instalação de centrais de biogás em aterros sanitário e em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR's).

A mesma análise poderá realizar-se para a potência instalada. A eólica apresenta um acréscimo de potência instalada de 2 018MW entre 2007 e junho 2013. A Biogás registou no mesmo período um acréscimo de 48,8 MW, tabela 2.2 (DGEG,2013b). No entanto, este valor encontra-se afastado da expectativa de 100MW de capacidade instalada em 2010 (através da criação de mais unidades de tratamento anaeróbio de resíduos), conforme aprovado no Programa Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC). Este plano foi aprovado pela Resolução de Conselho de Ministros n.º 104/2006 de 23 e posteriormente revisto, conforme publicado em Diário da República na Resolução do Conselho de Ministros n.º 1/2008.

Tabela 2.2 - Evolução histórica da potência total instalada em renováveis (MW)

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	jun. 2013*	TCMA
Hídrica Total	4 787	4 792	4 821	4 837	5 280	5 284	5 540	1,5%
Grande Hídrica (>30MW)	4 234	4 234	4 234	4 234	4 662	4 662	4916	1,4%
PCH (>10 e <=30 MW)	263	263	263	263	275	264	265	1,9%
PCH (<= 10 MW)	290	295	324	340	344	357	359	3,2%
Eólica	2 446	3 037	3 519	3 863	4 301	4 450	4 464	23,6%
offshore					2,0	2,0	2,0	
microprodução				0,6	0,6	0,6	0,6	
Biomassa (c/ cogeração)	357	357	359	360	367	367	352	0,4%
Biomassa (s/ cogeração)	24	24	101	106	105	105	113	36,3%
Resíduos Sólidos Urbanos	88	88	88	88	88	88	88	0,1%
Biogás	12,4	12,4	20,0	28,0	40,2	60,8	61,2	33,1%
Fotovoltaica	14,5	58,5	104,1	122,9	155,3	225,5	243,3	86,3%
microprodução					60,4	99,8	117,3	
Total	7 729	8 369	9 011	9 405	10 336	10 389	10 862	7,8%

TCMA - Taxa de Crescimento Média Anual entre 2007 e 2013 *A potência instalada é provisória para 2011, 2012 e 2013.

Constata-se que as renováveis que registaram uma maior Taxa de Crescimento Média Anual (TCMA) entre 2007 e 2013 foram a Fotovoltaica, Biomassa, Eólica, e o Biogás. Embora estas energias tenham apresentado acréscimos significativos na sua potência instalada, o seu peso na produção bruta de energia não se alterou, com exceção da energia eólica, que passou de 1,6% em 2004 para 23,6% em 2013 (DGEG,2013b).

Em 2013, a DGEG avaliava o crescimento da potência instalada das renováveis mais dinâmicas conforme a tabela 2.3 (DGEG,2013b).

Tabela 2.3 - Crescimento da potência instalada em energias renováveis

Renovável	TCMA	Potencia instalada (junho 2013)
Eólica	34,6%	4 332MW
Biogás	28,4%	88 MW
Fotovoltaica	78,4%	161,4 MW

A incorporação de Fontes de Energia Renováveis (FER) no consumo bruto de energia elétrica, para efeitos da Diretiva 2009/28/CE, será de 51% em 2020. Portugal foi, em 2007, o terceiro país da União Europeia (UE15) com maior incorporação de energias renováveis, apenas ultrapassado pela Áustria e pela Suécia.

No entanto, o biogás tem vindo a contribuir de forma crescente, embora modesta para a prossecução das metas definidas. Na figura 2.3 é apresentado o gráfico representativo do peso da produção de energia elétrica a partir de energias renováveis na produção bruta + saldo importador nos países da EU 15 (DGEG,2013b)

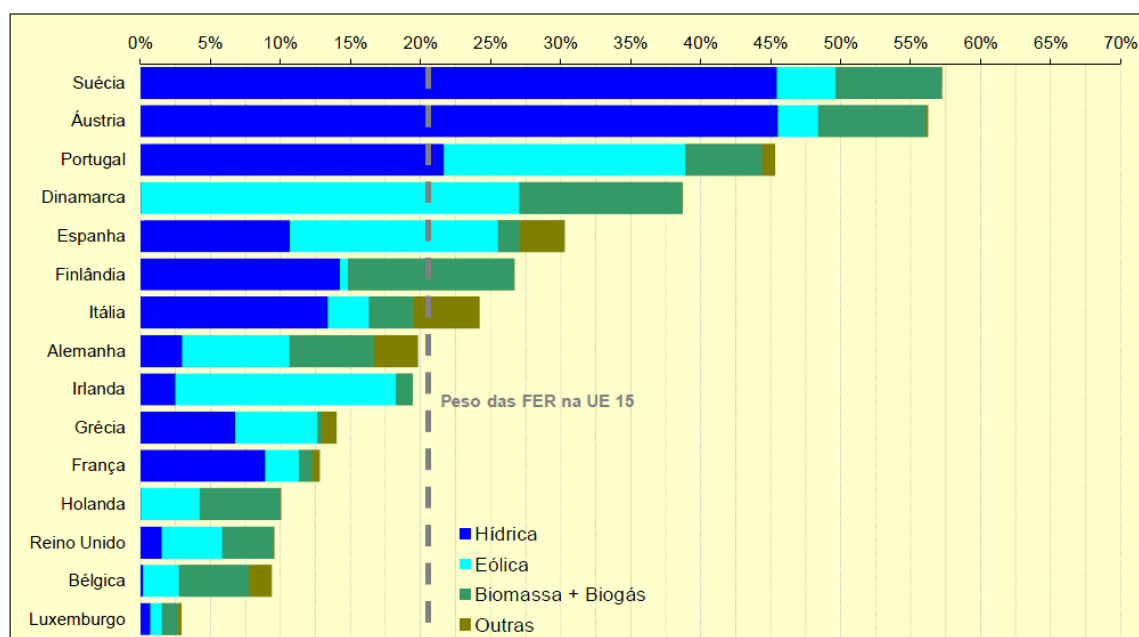


Figura 2.3 - Peso da produção de energia elétrica a partir de energias renováveis na produção bruta + saldo importador.

Países como a Áustria, a Suécia, a Dinamarca, a Finlândia e recentemente a Alemanha, têm vindo a apostar no biogás como forma de diversificar as suas fontes energéticas, beneficiando das vantagens económicas e ambientais associadas à tecnologia.

Ao nível nacional, a produção de energia elétrica a partir de FER está concentrada no norte do país, principalmente nos distritos de Viana do Castelo, Bragança, Viseu, Coimbra, Vila Real, Braga e Castelo Branco. Excluindo a grande hídrica, Viseu, Coimbra, Castelo Branco, Viana do Castelo, Vila Real, Lisboa, Guarda, Leiria, Braga e Porto são os principais distritos em termos de potência instalada, correspondendo a potência destes dez distritos a 82% do total, em junho de 2012 (DGEG Renováveis Estatísticas Rápidas Novembro Junho 2012).

Esta produção encontra-se associada a recursos naturais locais, como o potencial de aproveitamento eólico ou hídrico. O aproveitamento da biomassa refere a especificidades locais, como a proximidade de zonas florestais, no caso das centrais de biomassa florestal ou a condicionantes antropológicas (incineradoras de RSU (Porto e Lisboa) e incineradoras industriais).

O peso da fotovoltaica é notório em Beja devido à instalação neste distrito da Central Fotovoltaica de Mora.

2.4 Cogeração / Trigeriação

A cogeração / trigeriação surge como uma tecnologia interessante ao garantir economias de energia e competitividade acrescida às empresas e consiste basicamente na produção combinada de energia térmica e elétrica num mesmo equipamento, destinando-se ambas ao consumo da própria empresa ou de terceiros, evitando ou atenuando a utilização de equipamentos próprios de produção de calor e aquisição de energia elétrica à rede.

2.4.1 Conceitos e princípios

As centrais convencionais convertem em eletricidade apenas cerca de 1/3 da energia do combustível que consomem, o resto é perdido na forma de calor. Tal desperdício acarreta efeitos adversos para o meio ambiente tornando-se imperativa a necessidade do aumento de eficiência no processo de produção. A cogeração apresenta um rácio onde 4/5 da energia primária é convertida em energia utilizável apresentando vantagens na área financeira e ambiental (Cogen, 2012).

O conceito de produção distribuída diz respeito à produção de energia o mais próximo de onde ela é consumida, ou seja, a energia é produzida no local de consumo sendo evitadas as perdas nas redes de distribuição, e aplicadas no sector industrial e

em edifícios onde existe uma exigência simultânea de energia elétrica e térmica calor e/ou frio.

No processo convencional de transformação de energia fóssil em energia elétrica a maior parte da energia contida no combustível é transformada em calor e perdida no meio ambiente.

2.4.2 Cogeração

Começando pela necessidade de entender o conceito poder-se-á dizer que a cogeração consiste, basicamente, na produção de eletricidade junto dos centros de consumo, permitindo o aproveitamento de calor no processo de geração, também designada por *Combined Heat and Power* (CHP). O aproveitamento pode dar-se sob a forma de calor ou água quente, para uma aplicação secundária. Os processos conseguem assim um máximo de aproveitamento de combustível consumido e poupam energia primária (Brandão, Sérgio da Silva. Cogeração, 2004).

Na figura 2.4 é apresentado o esquema de um sistema de cogeração.

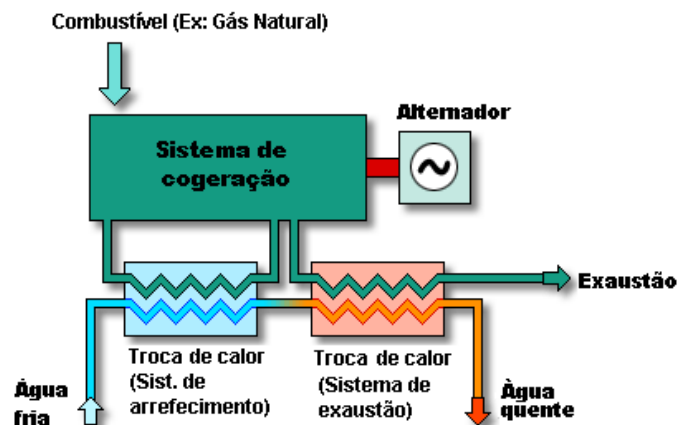


Figura 2.4 - Esquema de um sistema de cogeração

Devido às grandes dificuldades no transporte da energia térmica o calor só pode ser utilizado perto do centro produtor, o que limita estas instalações a centrais relativamente pequenas. O limite de distância para o transporte de calor ser economicamente viável fica em torno de 5 km.

2.4.3 Trigeração

Já no que diz respeito à trigeração poder-se-á dizer que esta implica a produção simultânea de eletricidade, calor e frio a partir de um único combustível. É um esquema de produção de energia em que se recupera calor desperdiçado para se obter frio. Compreende sistemas CHP combinados com *chillers* de absorção.

Nos serviços, o calor gerado pelos sistemas de cogeração é essencialmente utilizado para a climatização, dos edifícios, no entanto as necessidades de aquecimento são limitadas a alguns meses de inverno. Há, contudo, necessidades significativas de arrefecimento, ar condicionado, durante os meses de verão. A Energia térmica proveniente de uma instalação de cogeração será utilizada para produzir frio, através de um ciclo de absorção. Este processo “alargado” de cogeração é conhecido por trigeração ou produção combinada de eletricidade, calor e frio, *Combined Heat, Cooling and Power Production* (CHCP) e está representado na figura 2.5 (STET,2013).

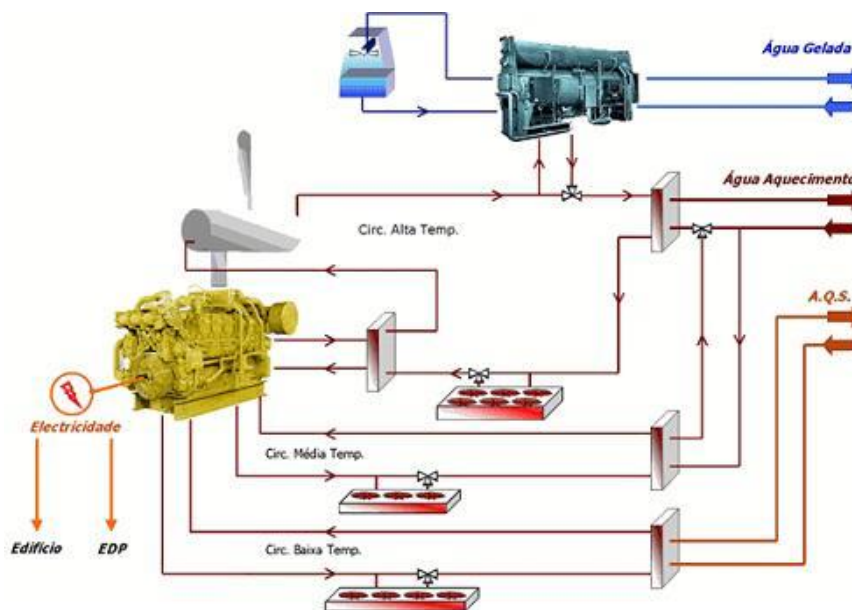


Figura 2.5 - Esquema de um sistema de trigeração

Vantagens e benefícios da cogeração

No sector terciário a cogeração já provou ser uma solução apropriada para uma vasta gama de tipos de edifícios, nomeadamente Hotéis, Hospitais, Escolas, Universidades, Aeroportos e grandes Centros Comerciais. Apresentando as seguintes vantagens:

- **Economias de energia primária:** Cerca 25% comparativamente à produção convencional de energia elétrica.
- **Redução de emissões poluentes:** Com a utilização de gás natural em vez de combustíveis derivados do petróleo ou carvão, as emissões de CO₂ e partículas são praticamente nulas.
- **Benefícios económicos:** Os custos energéticos das instalações de trigeriação são menores do que os das instalações convencionais. Pode dizer-se que a redução de preços é da ordem dos 20-30%.
- **Aumento da fiabilidade do aprovisionamento energético:** Pequenas centrais de cogeração/trigeriação de energia elétrica, calor e frio ligadas à rede elétrica, garantem uma operação ininterrupta da instalação, no caso de falha do funcionamento da central ou do abastecimento da rede. Ao nível nacional favorecem a produção descentralizada, reduzindo a necessidade de grandes centrais termo elétricas. Contribuindo também para o aumento do emprego a nível local.
- **Aumento de estabilidade do sistema elétrico:** As unidades de trigeriação proporcionam um alívio significativo às redes do sistema elétrico durante os meses quentes de verão. As cargas de arrefecimento são transferidas da eletricidade para um combustível fóssil, uma vez que o processo de arrefecimento/refrigeração muda dos, largamente, utilizados ciclos de compressão de vapor para os de absorção. Isto contribui ainda para o aumento da estabilidade das redes elétricas e para a melhoria da eficiência do sistema, porquanto os picos de verão são servidos pelas empresas elétricas distribuidoras através de unidades de apoio ineficientes e linhas de transporte de energia elétrica sobrecarregadas.

2.4.4 Tecnologias de cogeração

A parte mais importante de uma instalação de cogeração é a máquina que produz eletricidade e energia térmica (calor). Esta máquina caracteriza a instalação ou central de cogeração CHP. Seguindo-se o aparelho que produz o frio, utilizando energia térmica do processo de cogeração (*chiller* de absorção).

Presentemente as tecnologias mais importantes disponíveis no mercado para cogeração são:

- Turbina de gás;
- Turbina de vapor;
- Ciclo combinado;
- Motor alternativo de combustão interna;
- Pilhas de combustível;
- Microturbinas.

As primeiras quatro tecnologias, usando turbinas ou motores alternativos de combustão interna, têm sido aplicadas em instalações de cogeração nas últimas décadas. As pilhas de combustível e microturbinas estão em fase de desenvolvimento e início de comercialização.

Para a cogeração/trigeração, os tipos vulgarmente mais aplicados são os motores de combustão interna, muitas das vezes em grupos de mais que um para fazer face à variação de carga. As turbinas de gás são utilizadas em grandes complexos de edifícios tais como Hospitais ou redes urbanas de calor e frio.

Para comparação, a tabela resume as características técnicas dos tipos de tecnologias de cogeração mais utilizados.

Tabela 2.4 - Características dos diferentes tipos de sistemas de cogeração

Máquina Motriz	Turbina de gás	Turbina de Vapor	Ciclo Combinado	Motor de Combustão	Célula de Combustível
Potencia (MWe)	0,2 -100	0,5-100	4-100	0,015-30	0,01-0,25
Razão Calor/Eletricidade	1,12- 2	2-10	0,5-1,7	0,4-1,7	1,1
Rend. Elétrico (%)	15-35	10-40	30-40	25-45	35-40
Rend. Térmico (%)	40-59	40-60	40-50	40-60	20-50
Rend. Total (%)	60-85	60-85	70-90	70-85	55-90
Tempo de Vida (anos)	15-25	20-35	15-25	10-20	>5
Carga Mínima (%)	75	20	75	50	Sem limites
Eficácia (%)	90-98	99	90-98	92-97	>95
Uso Energia Térmica	Aquecimento, AQS, Vapor BP e AP	Vapor BP e AP	Vapor BP e AP	Aquecimento, AQS, Vapor BP e AP	AQS, Vapor BP e AP
Combustível	Gasoso, Líquido	Todos	Gasoso, Líquido	Gás, Gasolina, Gasóleo	Gás

As pilhas de combustível são utilizadas, essencialmente no sector terciário, devido ao seu funcionamento silencioso. Outras vantagens fundamentais deste sistema, reside

nos subprodutos da operação, nomeadamente o hidrogénio. Este pode ser utilizado como meio de armazenar energia, contribuindo para o aumento global da instalação de trigeriação.

Unidades produtoras de água refrigerada (*Chiller*)

Um *chiller* é uma máquina que tem como função arrefecer água ou outro líquido em diferentes tipos de aplicações, através de um ciclo termodinâmico.

Os dois principais tipos de *chiller* são:

- *Chiller* de compressão ou elétrico
- *Chiller* de absorção

Os *chillers* de compressão utilizam um compressor mecânico acionado, normalmente, por um motor elétrico de forma a aumentar a pressão em determinada fase do ciclo termodinâmico do sistema.

Os *chillers* de absorção, representado na figura 2.6 (adaptado FSCC, 2012), permitem produzir água gelada a partir de uma fonte de calor utilizando para tal uma solução de um sal (brometo de lítio) num processo termoquímico de absorção. Os *chillers* de absorção são, muitas vezes, integrados em sistemas de cogeração, de forma a permitir o aproveitamento do calor que de outra forma seria desperdiçado.

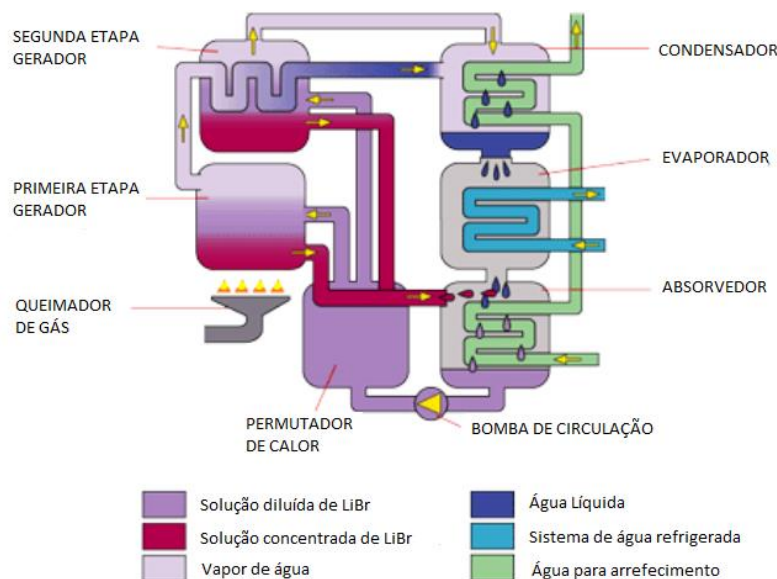


Figura 2.6 - Esquema de um chiller de absorção

2.4.5 Eficiência

Para a produção separada de energia elétrica e de calor utilizam-se parâmetros de rendimentos normalmente comparando a energia utilizada em relação à gasta no combustível, referida ao Poder Calorífico Inferior (PCI). O *Decreto-Lei 23/2010* - Estabelece o regime jurídico e remuneratório aplicável à energia elétrica e mecânica e de calor útil produzidos em cogeração. Os prémios de eficiência e de energia renovável incidem sobre a energia elétrica produzida pela instalação de cogeração, excluindo os consumos nos sistemas auxiliares internos de produção energética.

A eficiência térmica do processo (CHP $H\eta$), é definida como a produção anual de calor útil dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor e de eletricidade.

(2.1)

$$H\eta = \frac{T}{C} \times 100$$

T - energia térmica útil consumida anualmente

C- energia primária consumida anualmente e avaliada a partir do poder calorífico inferior do combustível

O valor de referência da eficiência para a produção separada de calor (Ref $H\eta$), está compreendido entre os 70% e 90% .

A eficiência elétrica (CHP $E\eta$) é definida como a produção total anual de eletricidade dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor útil e de eletricidade num processo de cogeração

(2.2)

$$H\eta = \frac{E}{C} \times 100$$

E - energia elétrica produzida anualmente

C- energia primária consumida anualmente e avaliada a partir do poder calorífico inferior do gás natural

O valor de referência da eficiência para a produção separada de eletricidade (**Ref** $E\eta$) está compreendido entre os 35% e 45%.

Calculada a eficiência energética elétrica e térmica, e conhecidos os valores de referência correspondentes procederemos então ao cálculo da Poupança de Energia Primária (PEP) da atividade da cogeração, através da expressão seguinte:

(2.3)

$$PEP = \left[1 - \frac{1}{\frac{CHP H\eta}{Ref H\eta} + \frac{CHP E\eta}{Ref E\eta}} \right] \times 100$$

A eficiência global do sistema corresponde ao total anual da produção de energia elétrica e da produção de calor útil dividido pelo consumo de combustível utilizado na produção de calor num processo de cogeração e na produção bruta de energia elétrica e mecânica, sendo a eficiência calculada com base no poder calorífico líquido dos combustíveis (também denominado poder calorífero inferior).

(2.4)

$$G\eta = \frac{E + T}{C} \times 100$$

A legislação portuguesa define o Rendimento Elétrico Equivalente (REE) por forma a avaliar o rendimento efetivo da instalação de cogeração em função da tecnologia seguinte. Por exemplo para o caso de uma central que funciona a gás natural o REE têm de ser superior a 55% sendo dada pela seguinte expressão.

(2.5)

$$REE = \frac{E}{C - \frac{T}{0,9}}$$

3 GESTÃO DOS RESÍDUOS URBANOS EM PORTUGAL

3.1 Introdução

O progresso do sector dos RU comporta-se como um indicador importante de caracterização do desenvolvimento. A evolução das sociedades, aliada à proliferação da produção de RU, tornou-se numa complexa dicotomia entre desenvolvimento económico e ambiental.

O objetivo de uma sociedade ambientalmente sustentável contrasta, muitas vezes com o seu desenvolvimento económico. Embora no passado, a importância do serviço de resíduos sólidos era reduzida ou inexistente, o mesmo converteu-se hoje, num dos principais serviços públicos locais. Pertencendo a sua atribuição aos municípios, as consequências da sua gestão inadequada ultrapassam a sua área de jurisdição, quer no que concerne aos aspetos ambientais e relacionados com a saúde pública, quer relativamente à defesa do consumidor.

Em todo o mundo muitos países já conferem ao sector dos resíduos urbanos a preocupação devida e, por conseguinte, diversas medidas têm sido tomadas, procurando o seu desenvolvimento.

As orientações estratégicas para a gestão de resíduos em Portugal foram consagradas em vários planos próprios de gestão de resíduos, principalmente em finais da década de 90. Como exemplos mais importantes numera-se o (PERSU), o Plano Estratégico de Resíduos Hospitalares (PERH) e o Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais (PESGRI).

A gestão dos Resíduos Urbanos (RU) em Portugal Continental está atualmente a cargo de 23 Sistemas de Gestão de RU, 12 multimunicipais e 11 intermunicipais. No que diz respeito às Regiões Autónomas (RA), na RA dos Açores são as autarquias que assumem a gestão dos sistemas de RU e na RA da Madeira esta gestão é partilhada pelas autarquias e pelo Governo Regional.

A informação relativa aos RU é disponibilizada pelos Sistemas de Gestão à Agência Portuguesa do Ambiente no âmbito do previsto no artigo 48.º do Decreto-Lei n.º 178/2006, alterado e republicado pelo Decreto-Lei n.º 73/2011, de 17 de Junho, através da Internet, no Sistema Integrado de Registo Eletrónico de Resíduos (SIRER) suportado

através do Sistema Integrado da Agência Portuguesa do Ambiente (SIRAPA) onde preenchem a informação relativa a dados qualitativos e quantitativos de RU através dos formulários que constituem o Mapa de Registo de Resíduos Urbanos (MRRU).

De acordo com o Decreto-lei nº 73/2011, de 17 de junho, “resíduo” pode ser definido como qualquer substância ou objeto de que o detentor se desfaz com intenção ou obrigação de se desfazer, nomeadamente os que estão inseridos na Lista Europeia de Resíduos (Portaria 209/2004, de 3 de Março).

De acordo com o Decreto-Lei nº 239/97, de 9 de setembro, “resíduos urbanos” são designados como sendo os resíduos domésticos ou outros resíduos idênticos, em razão da sua natureza ou composição, nomeadamente os procedentes do sector de serviços ou de estabelecimentos comerciais ou industriais e unidades prestadoras de cuidado de saúde, desde que, em qualquer dos casos, a produção diária não exceda 1100 litros por produtor.

Nos termos do Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto, “aterro” é a instalação de eliminação de resíduos através da sua deposição acima ou abaixo da superfície natural, incluindo:

- a) as instalações de eliminação internas, considerando-se como tal os aterros onde o produtor de resíduos efetua a sua própria eliminação de resíduos no local de produção;
- b) uma instalação permanente, considerando-se como tal a que tiver uma vida útil superior a um ano, usada para armazenagem temporária.

É ainda definido nos termos Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de agosto “Valorização Orgânica” como a utilização da fração orgânica contida nos resíduos para produção de composto, por via aeróbia, ou para produção de biogás e composto, por via anaeróbia. A compostagem consiste na degradação, na presença de ar, dos resíduos orgânicos até à sua estabilização. A digestão anaeróbia constitui um processo de mineralização da matéria orgânica na ausência de oxigénio.

3.2 Caracterização dos Resíduos Urbanos

O conhecimento das características dos resíduos urbanos bem como as quantidades é essencial para o planeamento e gestão eficiente dos sistemas de recolha, armazenamento, tratamento, valorização e eliminação de resíduos, designadamente para determinar, a dimensão e localização das infraestruturas de resíduos as necessidades de mão-de-obra, o equipamento requerido, os impactos ambientais (Martinho, G.G.; Freitas, 1999)

A variação da produção de RU ao longo do tempo relaciona-se com a dimensão do agregado familiar do tipo e dimensão da habitação, o clima e a estação do ano, o nível de vida das populações bem como a sua situação geográfica.

A produção total de RU em Portugal Continental, no ano 2010, foi aproximadamente de 5.184 mil toneladas, tendo-se verificado uma diminuição de cerca de 0,03% em relação ao ano de 2009 (INE 2011, APA/SIRAPA, 2011)

Tabela 3.1 - População média residente e Produção de RU em Portugal Continental, entre 2005 e 2010

População (Hab)						Total de RU (t)					
2005	2006	2007	2008	2009	2010	2005	2006	2007	2008	2009	2010
10.062.959	10.096.213	10.118.576	10.131.095	10.140.125	10.144.270	4.470.869	4.641.103	4.684.222	5.144.882	5.185.035	5.183.569
0,45	0,33	0,22	0,12	0,09	0,04	1,75	3,81	0,15	10,68	0,78	-0,03

Tabela 3.2 - Produção Total de RU, em 2010

Total RU (t)	
Portugal Continental	5.183.569
RA Madeira	135.908
Total	5.319.477

(Fonte: APA/SIRAPA 2011)

Em 2010 a produção total de RU em Portugal Continental com a R.A. Madeira foi aproximadamente de 5.319 mil toneladas (INE 2011, APA/SIRAPA, 2011).

O indicador mais utilizado para expressar os quantitativos de resíduos produzidos é a capitação, ou seja, a produção de RU, em kg por habitante e por unidade de tempo, ano ou dia. Verifica-se, através do Tabela 3.3, que a capitação anual em 2010 foi de 511 kg/hab*ano, o que corresponde a uma produção diária de RU de 1,4 kg por habitante(INE 2011, APA/SIRAPA, 2011).

Tabela 3.3- Capitação de RU em Portugal Continental entre 2005 e 2010

Capitação anual (Kg/hab.ano)						Capitação anual (Kg/hab.dia)					
2005	2006	2007	2008	2009	2010	2005	2006	2007	2008	2009	2010
444	460	459	508	511	511	1,22	1,26	1,26	1,39	1,4	1,4

Na figura 3.1 representam-se os valores de capitação anual indicados no Tabela 3.3 em paralelo com a produção total de RU, para o período 2005 – 2010 (INE 2011, APA/SIRAPA, 2011) .

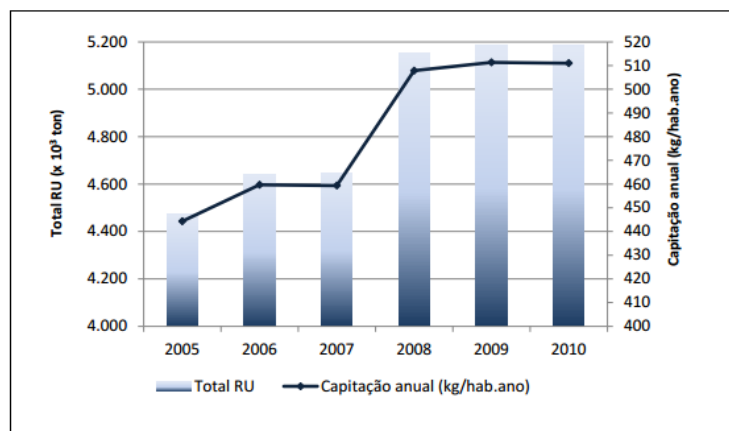


Figura 3.1 - Evolução da Produção total e da Capitação de RU, em Portugal Continental entre 2005 e 2010

No que respeita à evolução da produção de RU face ao PIB, analisando a figura 3.2, constata-se que o crescimento de um acompanha o crescimento do outro (INE 2011, APA/SIRAPA, 2011).

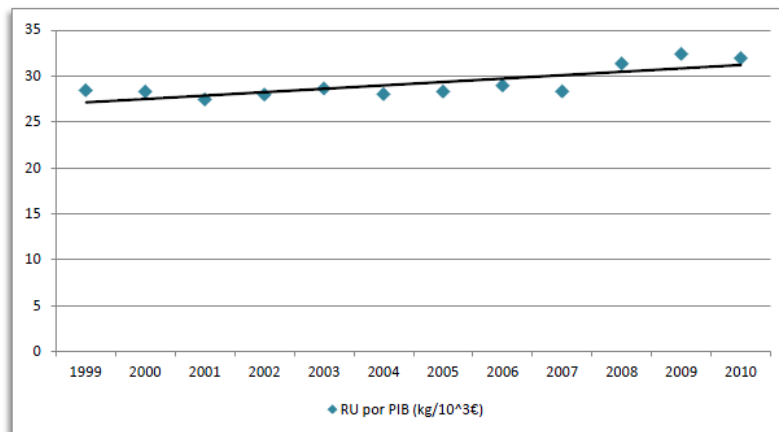


Figura 3.2 - Evolução anual de RU produzidos por unidades de PIB, em Portugal Continental, entre 1999 e 2010.

Cruzando os valores da produção de resíduos de um país com indicadores que traduzem a riqueza por si gerada obtemos indicadores que traduzem a sua eco-eficiência. Em Portugal Continental, em termos de produção de resíduos por unidade de PIB (figura 3.2), verifica-se que, para 2010, foram produzidos cerca de 31,94 kg de RU por cada 1.000 € de PIB, menos 0,46 kg de resíduos que em 2009 para a mesma riqueza gerada

- 1- VALORSINHO
- 2- RESULIMA
- 3- BRAVAL
- 4-RESINORTE
- 5-Lipor
- 6- Valsousa
- 7-SULDOURO
- 8- Resíduos do Nordeste
- 9- VALORLIS
- 10- ERSUC
- 11- AMR
- 12- RESIESTRELA
- 13- VALNOR
- 14- VALORSUL
- 15- Ecoleziria
- 16- Resitejo
- 17- Amtres
- 18- AMARSUL
- 19- Amde
- 20- Amagra
- 21- Amcal
- 22- Amalga
- 23 ALGAR



Figura 3.3 - Distribuição dos Sistemas de Gestão de Resíduos Urbanos por Portugal

Na Figura 3.3 (APA, 2012) encontra-se representada a distribuição geográfica dos Sistemas de Gestão de RU, em Portugal Continental, sendo que os sistemas multimunicipais se encontram identificados com letra maiúscula e os sistemas representados com letra minúscula correspondem às associações de municípios.

Nos Quadro seguinte estão indicadas as principais características dos Sistemas de Gestão de RU da região Norte, nomeadamente a população média residente durante o ano 2010, os municípios abrangidos e a respetiva área (INE 2011, APA 2011)

Tabela 3.4 - Características dos Sistemas de Gestão de RU da Região Norte

Sistema	População (hab)	Nº de Municípios	Concelhos abrangidos	Área abrangida (km ²)
BRAVAL	292.482	6	Amares, Braga, Póvoa do Lanhoso, Terras de Bouro, Vieira do Minho, Vila Verde.	536
Lipor	969.185	8	Espinho, Gondomar, Maia, Matosinhos, Porto, Póvoa de Varzim, Valongo, Vila do Conde	648
RESINORTE	979.857	35	Amarante, Baião, Cabeceiras de Basto, Celorico de Basto, Marco de Canaveses, Mondim de Basto, Fafe, Guimarães, Santo Tirso, Trofa, Vila Nova de Famalicão, Vizela, Boticas, Chaves, Montalegre, Ribeira de Pena, Valpaços, Vila Pouca de Aguiar, Armamar, Cinfães, Lamego, Moimenta da Beira, Penedono, Resende, São João da Pesqueira, Sernancelhe, Tabuaço, Tarouca, Alijó, Mesão Frio, Murça, Peso da Régua, Sabrosa, Santa	8077
Resíduos do Nordeste	146.336	13	Alfândega da Fé, Bragança, Carrazeda de Ansiães, Freixo de Espada à Cinta, Macedo de Cavaleiros, Mirandela, Miranda do Douro, Mogadouro, Torre de Moncorvo, Vimioso, Vila Flor, Vila Nova de Foz Côa, Vinhais	6997
RESULIMA	332.897	6	Arcos de Valdevez, Barcelos, Esposende, Ponte da Barca, Ponte de Lima, Viana do Castelo	1740
SULDOURO	465.440	2	Santa Maria da Feira, Vila Nova de Gaia	384
VALORMINHO	77.202	6	Caminha, Melgaço, Monção, Paredes de Coura, Valença, Vila Nova de Cerveira	944
Ambisousa	339.481	6	Castelo de Paiva, Felgueiras, Lousada, Paços de Ferreira, Paredes, Penafiel	764

A Tabela 3.5 apresenta, por Sistema, as quantidades de RU por Operação de Gestão, isto é, Aterro, Valorização Energética, Valorização Orgânica e Valorização Material/Triagem, associando esta com a respetiva percentagem relativa à produção total de resíduos (APA/SIRAPA 2011)

Tabela 3.5 - Quantidades de RU por Operação de Gestão

Sistema	Aterro		Valorização Energética		Valorização Orgânica		Valorização Material		Total (t)
	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	(t)	(%)	
BRAVAL	98.685	86,51					15.383	13,49	114.068
Lipor	57.579	11,06	366.090	70,32	43.852	8,42	53.093	10,20	520.613
RESINORTE	270.562	69,93			81.645	21,10	34.682	8,96	386.889
Resíduos Nordeste	58.768	94,18					3.630	5,82	62.398
RESULIMA	127.949	90,81			511		12.439	8,83	140.899
SULDOURO	187.810	90,64			452		18.942	9,14	207.204
VALORMINHO	36.030	91,73					3.249	8,27	39.279
Ambisousa	130.087	92,71					10.231	7,29	140.318
RESIESTRELA	73.521	91,33			2.397		4.582	5,69	80.500
ERSUC	394.778	88,47					51.473	11,53	446.251
Planalto Beirão	127.226	93,03					9.530	6,97	136.756
Raia/Pinhal	36.694	98,95					390	1,05	37.084
VALORLIS	112.992	86,52			4.795		12.811	9,81	130.598
AMARSUL	422.924	87,41			25.792		35.099	7,25	483.815
Amtres-Tratolixo	167.730	33,65	72.352	14,52	169.528	34,01	88.813	17,82	498.422
Resitejo	87.887	91,03					8.664	8,97	96.552
Ecolezíria	62.596	95,11					3.217	4,89	65.813
VALORSUL	270.083	30,74	496.000	56,45	25.446	2,90	87.071	9,91	878.600
Ambilital	64.347	90,24					6.956	9,76	71.303
Amcal	12.936	80,94					3.047	19,06	15.983
Gesamb	80.387	91,98					7.012	8,02	87.399
Resialentejo	48.416	94,37					2.890	5,63	51.306
VALNOR	42.406	47,77			29.934	33,72	16.430	18,51	88.771
ALGAR	358.524		89,02		10.257	2,55	33.968	8,43	402.749
Portugal Continental	3.330.919	64,26	934.441	18,03	394.609	7,61	523.599	10,10	5.183.569
Valor Ambiente	2.230	1,64	123.926	91,18		9.752		7,18	135.908
Total Portugal Continental e RA Madeira	3.333.149	62,66	1.058.367	19,90	394.609	7,61	533.351	10,03	5.319.477

Pela análise da tabela anterior verifica-se que o destino preferencial dado aos RU continua a ser a deposição em aterro (63%), seguindo-se a valorização energética (20%), a valorização material (10%), e por fim a valorização orgânica (8%).

Os gráficos seguintes mostram a evolução das infraestruturas, em Portugal Continental, entre 2002 e 2010 (figura 3.4). Salienta-se que os dados apresentados se referem às infraestruturas em exploração (APA, 2011).

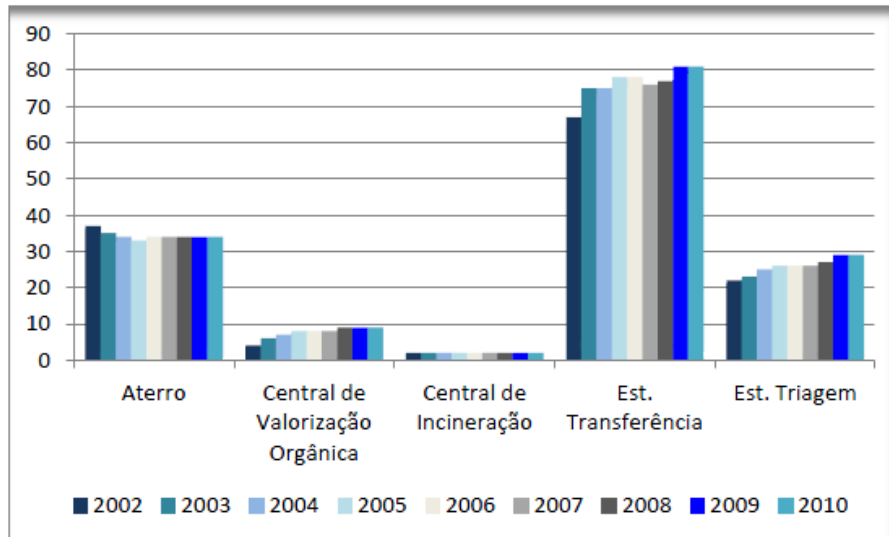


Figura 3.4 - Gráfico da evolução do número de infraestruturas de Gestão de RU em exploração, em Portugal Continental, entre 2002 e 2010

3.3 Composição física típica dos RU em Portugal.

A composição dos resíduos num determinado local ou região varia em função de um conjunto de fatores que se assemelham aos que determinam as variações na produção de resíduos, referidos no ponto anterior.

Na composição física típica dos resíduos urbanos, os principais tipos de materiais que se encontram são os seguintes:

- Resíduos fermentáveis onde se encontram os resíduos orgânicos provenientes da preparação e consumo de alimentos, vegetais, restos dos alimentos fruta, etc.;
- Papel e cartão
- Plásticos;
- Vidro;
- Metais ferrosos;

- Têxteis
- Finos (resíduos com menos de 20 mm)
- Outros resíduos

Apresentam-se na figura 3.5 os resultados relativos à caracterização física dos RU produzidos em Portugal Continental, em 2010 (APA, 2011).

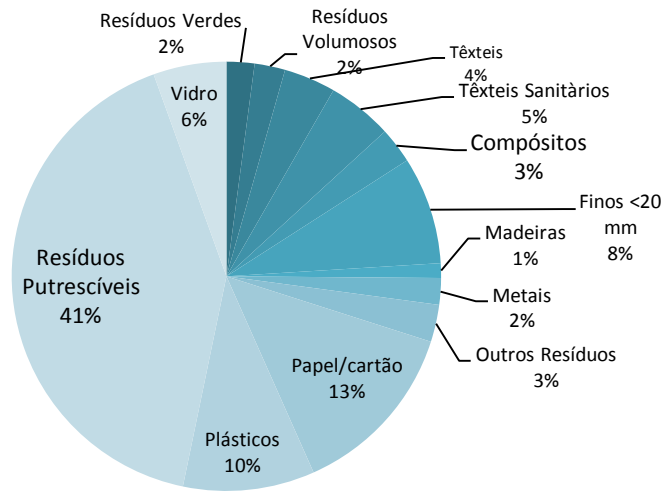


Figura 3.5 - Caracterização física dos RU produzidos, em 2010

Apresentam-se na figura 3.6 o gráfico dos resultados Caracterização dos RU depositados em aterro, em 2010

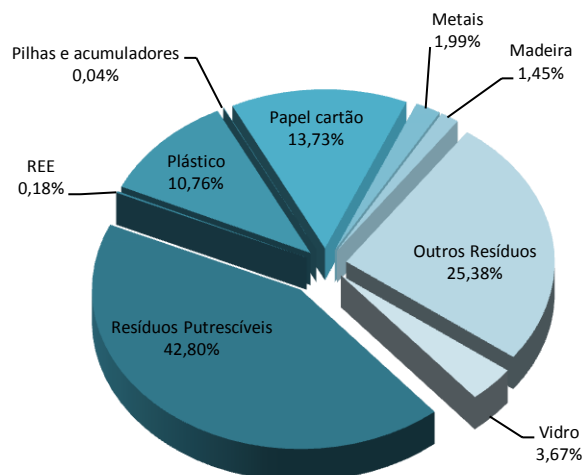


Figura 3.6 - Caracterização dos RU depositados em aterro, em 2010

Para além da produção e composição, os RU são também caracterizados através dos seguintes parâmetros:

- Peso específico;
- Humidade;
- Poder calorífico;
- Relação carbono /azoto

3.4 Aterro Sanitário

3.4.1 Características

Atendendo à função e o tipo de resíduos que irá receber, os aterros deverão possuir diferentes características, de forma a melhor atingirem o máximo potencial no armazenamento de resíduos. A extensão e a profundidade de um aterro podem constituir um fator limitativo no ciclo de geração do biogás. Num aterro superficial com uma cobertura permeável, a infiltração de oxigénio origina uma inibição da produção de metano. De forma a contrariar estas limitações, deverá ser criado um plano de controlo de qualidade de forma a garantir que, na construção do aterro, a instalação de condutas de circulação de lixiviados, águas superficiais e de biogás sejam apropriadamente instaladas, e com estabilidade geotécnica. Esse plano passa pela escolha e caracterização do aterro, seleção de materiais e mão-de-obra qualificada e pela implementação de um sistema de inspeção (recolha de amostras e observações regulares) e monitorização (TILS, 1991).

O AS constitui uma das formas utilizadas para a deposição controlados dos RU, sendo considerada uma obra de engenharia multidisciplinar que tem de ser concebida, projetada e ponderada sobre todos os fatores que condicionam o seu dimensionamento procurando garantir o equilíbrio dos compromissos de índole técnica, estrutural, ambiental, económica, funcional, sanitário e social (Levy, J. e Cabeças, 1999).

A gestão dos RU, em 1995 por falta de recursos técnicos e financeiros, em Portugal, resumia-se fundamentalmente à sua recolha e eliminação não controlada, existindo nessa altura 341 lixeiras, 5 unidades de valorização orgânica e 13 aterros sanitários. Apenas 26% dos resíduos produzidos teriam destino considerado aceitável (Maotdr, PERSU II, 2007)

De referir que os modernos conceitos de gestão de RU preconizam soluções integradas de valorização, tratamento, e confinamento técnico, sempre com vista à minimização da deposição de resíduos urbanos biodegradáveis em aterro, com efeitos naturalmente, na diminuição da produção de biogás.

Refira-se também, a este propósito, a obrigatoriedade de reduzir os RU biodegradáveis destinados a aterros, tendo sido fixados (artigo 8º do Decreto –Lei n.º183/2009 de 10 de Agosto, que transpõe para o ordenamento jurídico nacional a diretiva “Aterros” 1999/31/CE de 26 de Abril, os seguintes objetivos:

- a) Até julho de 2013 os resíduos urbanos biodegradáveis destinados os aterros devem ser reduzidos para 50% da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995;
- b) Até julho de 2020 os resíduos urbanos biodegradáveis destinados os aterro devem ser reduzidos para 35%, da quantidade total, em peso, dos resíduos urbanos biodegradáveis produzidos em 1995.

Mesmo tendo em conta os objetivos delineados pela diretiva, qualquer que sejam as alternativas de tratamento e valorização dos resíduos a deposição de RU em aterro sanitário é ainda hoje, uma prática essencial num sistema de gestão integrada de resíduos ou como destino final dos rejeitos produzidos nos processos de tratamento (Levy, J. e Cabeças, 1999).

O AS também pode ser considerado um processo de valorização se o biogás for recolhido e aproveitado para fins energéticos como a produção de calor ou eletricidade e/ou quando contribuir para a recuperação de áreas degradadas, por exemplo, antigas pedreiras ou explorações mineiras (Martinho, M.G. ; Freitas, 1999)

Quando se inicia um projeto de construção de um aterro, é necessário a consulta de material técnico e recomendações nacionais e internacionais para que o processo seja o mais adequado possível. As recomendações baseiam-se em fatores económicos, ambientais e sociais definidas pela Agencia Portuguesa do Ambiente (APA) e a Organização Mundial de Saúde (OMS). Em Portugal, a legislação ambiental começa com a Lei nº 11/87, de 7 de Abril, onde é estabelecida a lei de bases do ambiente. Em Julho de 1997 surge o PERSU onde se define a estratégia nacional da redução de resíduos urbanos biodegradáveis destinados aos aterros. O PERSU tem como principal

objetivo acabar com as lixeiras a céu aberto e implementar um controlo rigoroso dos AS de modo a garantir menores impactos ambientais.

3.4.2 Infraestruturas

A conceção e construção de um AS obedece a normas técnicas muito exigentes, designadas a nível de controlo da produção do biogás, da proteção das águas subterrâneas e de superfície, dos afluentes residuais líquidos, controlo de deposições de resíduos e exploração do aterro e monitorização global do aterro e zonas envolventes.

A construção de um AS passa por considerar as várias fases de vida do aterro e das necessidades que estão intrínsecas ao seu funcionamento e manutenção. É necessário que haja a inclusão de planos, projeto, operação, encerramento e controlo pós encerramento (Tchobanoglous *et al.*, 1993). A base de construção de um aterro deverá ser constituída por um material impermeável de forma a evitar possíveis contaminações dos solos. Na construção de um aterro deve ser utilizada argila compacta, cujo valor de permeabilidade do solo (k) seja inferior a 5×10^{-10} (m/s) e cuja espessura seja inferior a 1,5mm, por cima da camada de argila, deverá ser colocado um geossintético em polietileno de alta densidade (PEAD) com espessura superior a 2,5mm(Thrid Internacional Landfill Symposium TILS, 1991).

Na figura 3.7 é representado o esquema da estrutura base de um aterro sanitário.

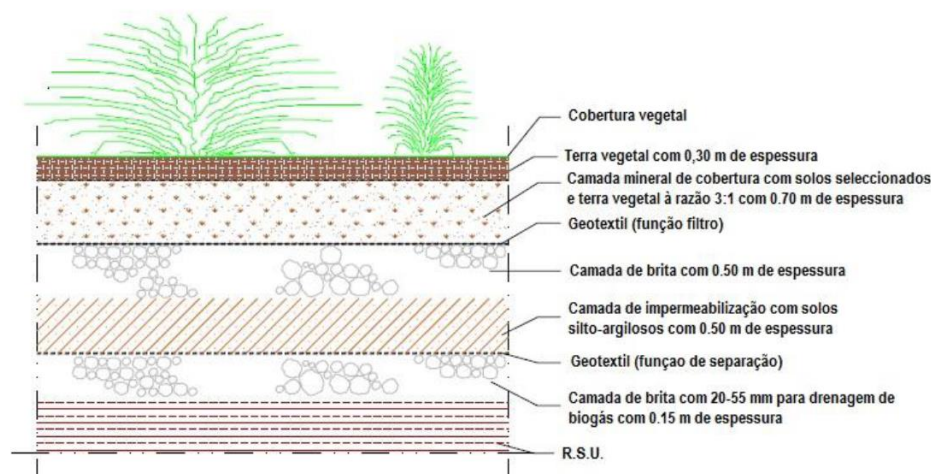


Figura 3.7 - Esquema da estrutura de um aterro sanitário

A realização de um bom estudo geológico e geotérmico do local onde se pretende construir um aterro é essencial, de modo a conhecer as características do aterro e,

assim, garantir economia de recursos e a máxima segurança. Outro dos fatores importante é o estudo hidrológico local para o dimensionamento das redes de recolha de lixiviados e biogás adequados.

Os geossintéticos mais frequentemente usados na impermeabilização de aterros são geralmente de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), pelo que possuem boa resistência à perfuração. As geomembranas, habitualmente feitas de PEAD, têm a função de impedir a passagem de líquidos e gases e permitem um melhor controlo dos lixiviados e biogás produzidos. São, geralmente, aplicadas na superfície de aterros, de modo a assegurar a drenagem de águas superficiais e pluviais, bem como a minimizar a perda de biogás por migração e a formação de lixiviados (TILS, 1991). Segundo SrasbY(2000), existem elementos que são comuns em vários aterros:

- Sistema de revestimento de baixa permeabilidade, de forma a evitar a contaminação de solos e aquíferos.
- Sistema de deteção de lixiviados, de modo a identificar qualquer fuga que ocorra no aterro.
- Sistema de drenagem de lixiviados sobre o sistema de revestimento, de modo a criar uma circulação mais eficiente do efluente.
- Camada de cobertura do aterro com baixa permeabilidade, de modo a minimizar a infiltração de água e, conseqüentemente, o volume de lixiviado criado.
- Sistema de ventilação de biogás, de modo a controlar o movimento e a sua concentração no aterro.
- Sistema de monitorização de lixiviados e biogás. Tais sistemas terão que ser criados no interior e exterior do aterro, durante e no fim da operação, sendo essenciais para a quantificação e deteção de poluição.

Os poços normalmente possuem um diâmetro aproximado de 1 m com anéis em betão perfurado e incorporam um tubo interno em PEAD com um diâmetro de 150 mm. Cada um dos poços de extração deverá estar a uma distância radial de 25 m. A cada poço convergem 3 drenos horizontais perfurados, que formam, entre si, ângulos de 120° e com 25 m de comprimento, de modo a melhor capturar o biogás (Russo, 2003). Pode-se observar na figura 3.8 a estrutura de selagem de um aterro sanitário.



Figura 3.8 - Estrutura de selagem de um aterro sanitário

A deposição de RSU em aterro implica um conjunto de procedimentos e normas, para que todos os processos de transporte, deposição e decomposição ocorram dentro da normalidade. A exploração inclui a monitorização do volume de resíduos que são recebidos em aterro, a deposição e compactação dos resíduos e a criação de estações de controlo e monitorização. Posteriormente à deposição, é colocada uma cobertura com solo ou composto, de forma a controlar o arrastamento de resíduos por ação do vento, evitar a entrada e saída de meios transmissores de doenças (roedores, moscas e outros) do aterro e controlar a entrada de água no aterro durante a operação. (Tchobanoglous et al., 1993).

Existem efluentes resultantes da exploração de um aterro que deverão ser tratados de modo a que o seu impacto no ambiente seja minimizado. A implantação de um sistema de impermeabilização tem como objetivos: o controlo e prevenção de infiltrações de lixiviados em águas subterrâneas, de modo a prevenir a sua contaminação, a captação do biogás gerado em aterro para reduzir emissões para a atmosfera e a criação de uma gestão equilibrada da produção de lixiviados e biogás, de acordo com o projeto do aterro (Sarsby, 2000).

Outro fator importante durante o processo de exploração reside no controlo das emissões de biogás no interior e exterior do aterro, através do uso de sondas, de modo a obter as respetivas concentrações para que não sejam atingidos valores que possam ser prejudiciais à saúde pública e ao ambiente (Sarsby, 2000).

Ao atingir a capacidade de receção de resíduos, os responsáveis pela gestão do aterro devem proceder ao seu encerramento, para, assim, minimizar um acréscimo da produção de lixiviados, bem como as emissões de odores desagradáveis para as imediações do aterro (Barroso, 1994). De acordo com o Decreto-Lei nº 183/2009, de 10

de agosto, antes da selagem, um aterro deverá possuir alguns sistemas incorporados, tais como: sistema de impermeabilização artificial, sistema de drenagem de águas pluviais, sistema de drenagem e recolha de lixiviados e um sistema de drenagem de biogás. Aquando da selagem final, outros sistemas deverão ser implementados, nomeadamente, uma camada de drenagem de gases, uma barreira de impermeabilização, uma camada mineral impermeável, uma camada de drenagem e uma cobertura com material terroso. No cumprimento destas condições, o aterro ficará sujeito a uma avaliação anual, que deverá ser reportada à entidade licenciadora do aterro. Esse relatório deverá incluir os efeitos negativos para o ambiente verificados nas operações de manutenção. O mesmo Decreto-Lei também especifica que deverá ser prevista uma reintegração paisagística do local, de modo a minimizar os impactos do pós-encerramento.



Figura 3.9 - Célula selada de um aterro sanitário

Após o encerramento das células, é necessário proceder ao cobrimento com geossintéticos, de modo a minimizar as fugas de biogás, figura 3.9, bem como à implantação de sistemas de ventilação, para evitar a formação de bolsas de biogás, que podem originar deflagrações não controladas. O volume de lixiviados diminui com a compressão dos estratos e com a colocação de uma camada de solo no topo do aterro, que fará com que haja menos água infiltrada. Deste modo a produção de lixiviados será significativamente inferior (Misgav *et al.*, 2001).

De acordo com as características do lixiviado que é produzido em aterro, existem diferentes tratamentos que podem ser aplicados. Segundo Renau et al. (2007), os processos de tratamento de lixiviados podem ser divididos em três grandes grupos: (a) transferência de lixiviados por recirculação ou por um tratamento combinado com águas residuais, (b) biodegradação, tanto por processo aeróbios como anaeróbios e, (c) por métodos químicos e físicos, ou seja, oxidação química, precipitação química, coagulação/floculação e por sedimentação/flutuação. O clima é um fator que influencia bastante o tipo de lixiviado que será produzido e suas características. Fatores como a precipitação, a variação climática sazonal, idade do aterro, tipo de resíduos e sua composição influenciam a qualidade do lixiviado e, conseqüentemente, o tipo de tratamento mais apropriado na sua depuração.

Dependendo da fase de decomposição dos resíduos, a concentração de metano no biogás geralmente encontra-se entre os 40% e 60%. Como o metano é um gás de efeito estufa, é necessário tomar precauções de modo a garantir que não é enviado para a atmosfera. Existem várias formas de gestão do biogás tais como a queima, a valorização energética e até o aproveitamento para aquecimento central, dependendo da quantidade que é gerada em aterro e do fim que se pretende dar (Themelis e Ulloa, 2007). Quando a quantidade de biogás produzida não é suficiente para justificar a instalação de moto geradores para o aproveitamento elétrico, o recurso à queima é, por norma, a solução adotada, visto que o metano (CH_4) tem um contributo para o efeito estufa cerca de 20 vezes superior que o CO_2 (Themelis e Ulloa, 2007; IPCC, 2007)

4 PRODUÇÃO DO BIOGÁS

4.1 Composição do biogás em aterros

O biogás é um gás combustível, constituído em média por 60% de metano e 40 % de CO₂, que é conseguido pela degradação biológica anaeróbia dos resíduos orgânicos. Este gás pode ser usado como substituto do gás natural e assim produzir calor, vapor e/ou eletricidade, sendo que os mecanismos agora usados terão de ser substituídos por outros já adequados às características da combustão do biogás.

O biogás é tipicamente usado em combustões internas para a produção de eletricidade sendo que as tecnologias em desenvolvimento apontam para a utilização do biogás em micro turbinas, células de combustível e equipamentos a vapor, sendo que a sua utilização para a produção de calor, água quente e vapor já é completamente abrangida pelas tecnologias existentes. Uma das principais vantagens na utilização e recuperação do biogás é sem dúvida o efeito ambiental. O biogás é constituído principalmente por CH₄ e CO₂ dois dos principais GEE, sendo que a sua utilização vai levar à diminuição das emissões de GEE e também compensar produções altamente nocivas ao ambiente.

O biogás é formado a partir da degradação da matéria orgânica. A sua produção é possível a partir de uma grande variedade de resíduos orgânicos sendo os principais o lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias. É composto tipicamente por 60% de CH₄, 35% de CO₂ e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogénio, nitrogénio, gás sulfídrico e monóxido de carbono. Estas percentagens variam em função do tipo de resíduo, do tratamento e, de acordo com a eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de CH₄.

O interesse pelo Biogás recuperado a partir de AS para uso como fonte de energia tem aumentado, como consequência das limitações de recursos convencionais e significativos problemas ambientais em todo o mundo. A utilização do biogás recuperado é considerado como um processo eficaz não só para o tratamento de resíduos orgânicos, proporcionando ao mesmo tempo, uma quantidade significativa de energia elétrica (Taleghani e Shabani Kia, 2004), enquanto estes resíduos forem

produzidas continuamente, poderá então ser considerado como uma fonte de energia renovável (McKendry, 2002).

Apresenta-se a seguir algumas propriedades do biogás proveniente de aterros:

- O poder calorífico do Biogás é aproximadamente 21600 kJ/m^3 .
- O principal componente do Biogás, quando usado como combustível é o CH_4 .
- O metano, não tem cheiro, cor ou sabor, mas outros gases presentes, conferem-lhe um ligeiro odor de alho ou de ovo podre.
- Apresenta menor perigo de explosão – NÃO TÓXICO.
- A densidade do CH_4 é pouco mais de metade do peso do ar. ($\rho = 0,72 \text{ kg/m}^3$)
- Fonte de energia alternativa e renovável.

No aterro a decomposição da matéria orgânica ocorre por meio de dois processos. Inicialmente, durante a deposição de resíduos no solo, tem início a decomposição aeróbia e, após a cobertura dos resíduos, com a redução do oxigênio presente, inicia-se a fase de decomposição anaeróbia.

Para Tchobanoglous Theisen e Vinil (1993), a formação dos gases do AS é variável ao longo do tempo e segue várias fases distintas conforme a figura 4.1.

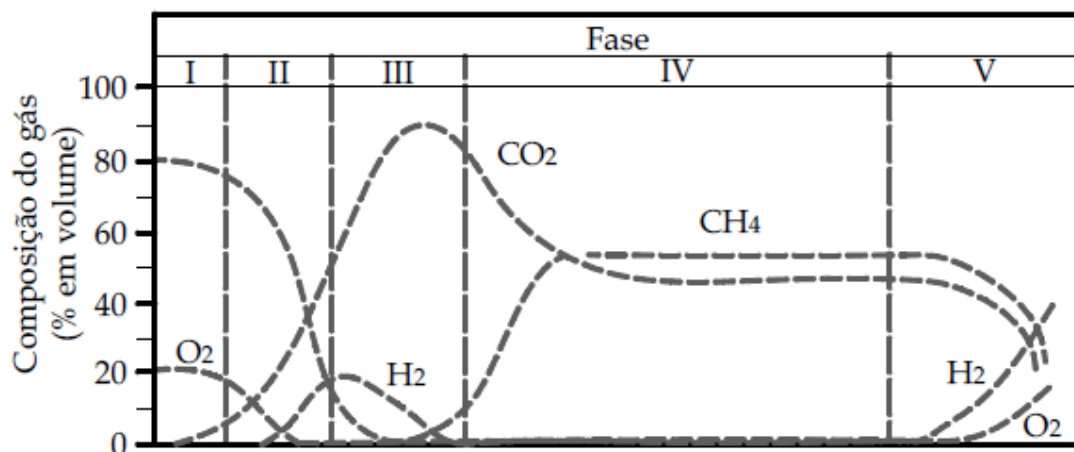


Figura 4.1 - Fases de formação do biogás.

Fase I - Ajuste inicial: a decomposição biológica da matéria orgânica ocorre principalmente em condições aeróbicas, devido à presença de ar no interior do aterro. A principal fonte de micro-organismos para a decomposição aeróbia e anaeróbia nessa

fase é a terra, que é usada como material de cobertura para divisão das células do aterro e como camada final.

Fase II - Transição: Nesta fase decrescem os níveis de oxigênio e começa a fase anaeróbia. O início das condições anaeróbias pode ser verificado através do potencial de oxidação que possuem os resíduos. Com a queda do potencial de óxido-redução os microrganismos, responsáveis pela conservação da matéria orgânica em CH_4 e CO_2 , iniciam a conservação do material orgânico complexo em ácidos orgânicos.

Fase III - Fase ácida: Começa a formação de CH_4 , a qual aumenta com a atividade microbiana de produção de ácidos orgânicos e menores quantidade de hidrogênio (H_2). Inicia-se a hidrólise de componentes com maior massa molecular, tais como os lípidos, polissacarídeos, proteínas e ácidos nucleicos, em compostos mais simples, para que possam ser mais facilmente utilizados pelos microrganismos como fonte de energia. Consequentemente, através da acidogênese, os compostos são transformados em ácido acético. No final desta fase, há formação de CO_2 e pequenas quantidades de H_2 . O pH do lixiviado diminui para valores inferiores a 5 e verifica-se o aumento de valores da Carência Bioquímica de Oxigênio (CBO) e da Carência Química de Oxigênio (CQO).

Fase IV - Fase metânica: Ocorre a fermentação metanogénica, onde um grupo de microrganismos anaeróbios converte o ácido acético e o H_2 gasoso que foi formado na fase ácida em CH_4 e CO_2 , dando, deste modo, origem aos dois principais constituintes do biogás. O pH do lixiviado atinge valores entre 6 e 8.

Fase V - Fase de maturação: Verifica-se a conversão dos compostos orgânicos em CH_4 e CO_2 , traduzindo-se numa redução do biogás produzido ao longo do tempo, até que este atinge quantidades tão baixas que a sua captação já não é rentável.

A duração e eficiência de cada uma das fases acima referidas dependem de fatores específicos de cada região tais como o tipo de RU que foram inseridos no aterro, bem como de fatores climáticos. Por outro lado, fatores como a elevada compactação das camadas do aterro ou a baixa quantidade de água disponível, farão com que a produção de metano seja reduzida (Tchobanoglous e Kreith, 2002).

A partir do momento que o lixo é depositado em aterros os componentes começam a sofrer reações químicas. Na presença de oxigênio (O_2) atmosférico, que está à superfície do aterro, os componentes orgânicos oxidam anaerobiamente, numa reação

similar à da combustão, uma vez que os produtos são CO_2 e vapor de água. Entretanto, a principal reação biológica nos aterros é a digestão anaeróbia que ocorre na ausência de O_2 em três etapas. Na primeira etapa, bactérias fermentadoras hidrolisam o material orgânico complexo em moléculas solúveis. Na segunda, estas moléculas são convertidas por bactérias em ácidos orgânicos simples, onde os principais produtos são o ácido acético, ácido propanoico, ácido butílico e o etanol. Finalmente, no terceiro estágio, o CH_4 é formado por bactérias metalogénicas que tanto quebram os ácidos em metano e CO_2 com H_2 .

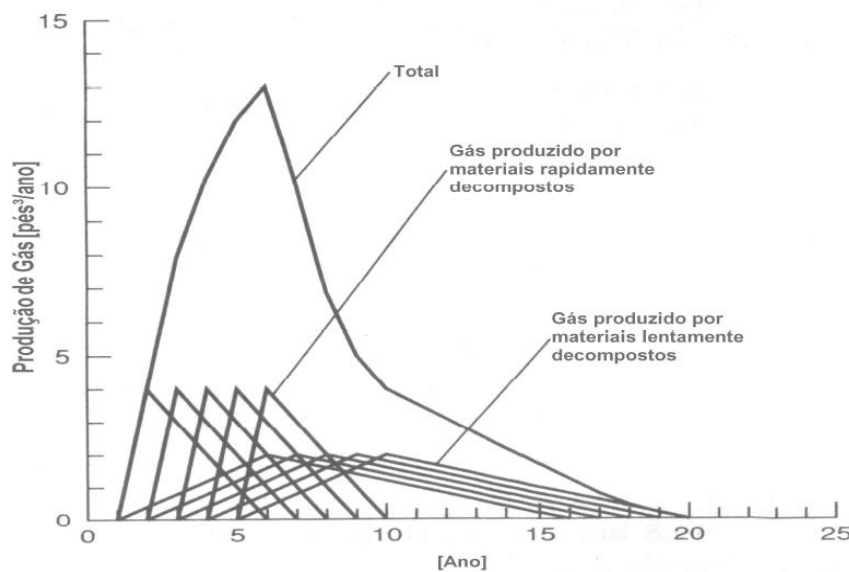


Figura 4.2 - Geração de gases em aterros sanitários

O volume de biogás gerado por um AS não é constante ao longo dos anos. Como o aterro é preenchido gradualmente ao longo dos anos, cada célula de lixo apresenta produções diferentes de biogás em função do tempo dentro do aterro conforme figura 4.2 (Adaptado Tchobanoglous, 1993). Assim o biogás total produzido por um AS, num determinado tempo, é a soma das capacidades individuais de cada massa de resíduos que foi depositada em diferentes períodos no aterro. A consequência deste sistema de acondicionamento do lixo é um aumento da produção de biogás até o último ano de deposição de lixo no aterro.

Em condições normais, a velocidade de decomposição, medida através da produção de gás chega a um máximo nos dois primeiros anos e decresce lentamente por cerca de 20 ou mais. Porém as fases de um aterro não podem ser claramente definidas, já que novos resíduos são depositados diariamente.

O aproveitamento económico do biogás para a produção de energia eléctrica fica limitado a um intervalo de tempo entre os 12 e 18 anos, correspondente ao período de exploração do aterro, seguindo-se a fase referente à selagem final do aterro onde a produção do biogás cai para metade.

O biogás, devido à sua composição, apresenta um potencial energético que permite a sua utilização em diversas aplicações. Existe a possibilidade de produção de vapor para o aquecimento do próprio digestor, no entanto, a opção mais interessante será a sua aplicação para produção de electricidade, reaproveitando o calor para processos no qual seja necessário.

Neste último caso, além de se produzir o calor suficiente para manutenção do processo anaeróbio, existe produção de electricidade que pode ser exportada para a rede de distribuição com uma tarifa de energia renovável.

A qualidade e quantidade do biogás obtido dependem das características dos resíduos presentes no processo de digestão, uma vez que cada tipo de resíduo orgânico apresenta potenciais diferentes. A otimização do processo passa pela mistura de vários tipos de resíduos biodegradáveis (codigestão) de forma a atingir-se o equilíbrio adequado e retirar a máxima potencialidade da solução.

A figura 4.3 representa o esquema de um digestor de um aterro (Adaptado de Tchobanoglous e Kreith, 2002).

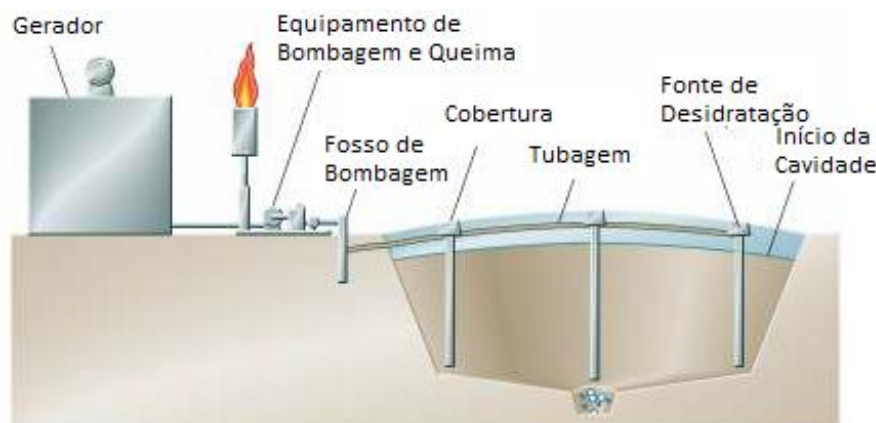


Figura 4.3 - Esquema de um digestor num aterro

4.2 Estimativas teóricas da produção de biogás em aterros

No sentido de avaliar a viabilidade económica do aproveitamento energético do biogás, é necessário obter uma estimativa da quantidade total de gás produzido no

aterro em questão, bem como a variação da sua produção ao longo do tempo. Para o efeito existem vários modelos que podem ser seleccionados consoante os dados disponíveis. Considerando que existem um grande número de fatores que afetam a produção do biogás, os resultados dos modelos existentes podem apresentar alguns erros face à realidade.

Um dos modelos universalmente aceite e utilizado é o de “ *Landfill Gás Emissions Model*” (LandGem) desenvolvido pela *Control Techonology Center da United States Environmente Protection*, que é baseado numa cinética química de primeira ordem de produção de CH₄.

Este modelo assume que a produção de biogás é mais intensa no período imediatamente após a deposição dos resíduos em aterro, ocorrendo posteriormente um decréscimo potencial de produção, decréscimo de primeira ordem, à medida que a disponibilidade de carbono orgânico degradável vai diminuindo. A equação do modelo e as suas variáveis são a seguir enunciadas.

(4.1)

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

Onde,

Q_{CH_4} = Produção anual de metano no ano do cálculo (m³/ano)

i = 1 (incrementos de tempo de 1 ano)

n = ano inicial da deposição de resíduos

j = incremento de tempo de 0,1 anos

L_0 = potencial de produção de metano (m³ / Mg)

k = taxa de produção de metano (ano⁻¹)

M_i = massa de resíduos confinados ano i (Mg)

O potencial de produção de CH₄, $L_0 = 100$ m³/Mg, (produção média observada em aterros portugueses e europeus) representa a capacidade dos resíduos gerarem metano ao longo da sua degradação e é dependente da matéria orgânica contida nos resíduos. O coeficiente de produção de metano, $k = 0,04$ ano⁻¹, traduz a rapidez com que o metano será produzido e é função das condições no aterro, da humidade, da disponibilidade de nutrientes, do pH e da temperatura.

O modelo dos *United States Environmental Protection Agency* (US EPA), conhecido como LandGEM, parte do pressuposto que todos os resíduos que são depositados em aterro possuem a mesma capacidade de gerar biogás e que o seu potencial é constante, fazendo com que o seu uso seja relativamente simples na obtenção de resultados. Este modelo funciona em formato EXCEL (figura 4.4) e está disponível na página da internet da US EPA. O primeiro passo para o funcionamento do modelo é inserir a data de início da deposição de resíduos e o ano de encerramento. Caso não seja possível obter o ano de encerramento, ao colocar o volume de dimensionamento do aterro, o modelo simula a deposição de um valor médio constante até atingir o volume designado. Segundo a *guideline* disponibilizada pela US EPA (2005), na ausência de fatores como a taxa de geração de metano e a capacidade potencial de geração de metano, os valores a assumir devem ser constantes com a categoria selecionada (CAA ou *inventory*). No cálculo do volume por ano de metano, o modelo considera que a totalidade de biogás produzido apenas é constituída por metano e dióxido de carbono, o que não corresponde à realidade.



Figura 4.4 - Programa informático LandGem

4.3 Benefícios do aproveitamento do biogás

O investimento no aproveitamento do biogás apresenta grandes vantagens. Primeiro, diminui as emissões de GEE, porque o CH₄ constituinte do biogás é destruído através da combustão nos grupos geradores. Estima-se que uma tonelada de CH₄, emitida para a atmosfera, pode ter um efeito de aquecimento global equivalente a 21 toneladas de CO₂. Segundo, o biogás de aterro constitui um recurso energético passível

de ser aproveitado, como combustível, em grupos moto geradores, para produzir eletricidade ou para produzir energia térmica, de origem renovável.

De referir que, em Portugal, a produção de energia elétrica a partir do biogás de aterro passou de 67 GWh em 2008 para 202 GWh em 2013. Este aumento de produção de energia deveu-se à entrada em funcionamento de várias novas centrais electroprodutoras de biogás (DGEG, 2013).

Na Tabela 4.1 (DGEG, 2013), apresenta-se a evolução da energia gerada através do aproveitamento e valorização do biogás que, apesar de representar pouco no cômputo geral da energia produzida, regista no entanto um crescimento sustentado desde 2008.

Tabela 4.1- Evolução da produção de energia a partir do biogás em GWh

	2008	2009	2010	2011	Junho 2012*
Biogás	67	80	97	152	182
Evolução		19,4%	21,5%	56,7%	19,2%

* Ano Móvel de julho de 2011 a junho de 2012.

De referir que, uma vez que os RU constituem uma fonte energética endógena e renovável, o Governo incluiu no Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis (PNAEE, 2008) os resíduos urbanos como uma fonte energética que importa valorizar, designadamente no que se refere ao biogás produzido nos aterros sanitários.

4.4 Biogás em estações de águas residuais

Tal como no caso dos aterros, também as estações de tratamento de águas residuais, ETAR,s têm a capacidade de produção de gás combustível, biogás, devido à fermentação e decomposição da matéria orgânica. Assim sendo, algumas ETAR,s a nível nacional já fazem o aproveitamento desta forma de energia, a finalidade mais comum é produzir eletricidade e calor, cogeração, através de um ou mais grupos motor gerador.

A eletricidade é consumida e/ou vendida à rede, no que diz respeito ao calor, este é essencialmente para consumo interno, tal como aquecimento dos biodigestores, aquecimento de águas e aquecimento ambiente.

Esta forma de aproveitamento energético é fundamental acima de tudo porque o tratamento das lamas é extremamente necessário. Uma vez que não é viável, ambientalmente, a deposição das lamas em aterros, sendo esta uma forma de as estabilizar e posteriormente serem utilizadas como fertilizante agrícola.

Na figura 4.5 está representado o digrama do aproveitamento energético de biogás em ETAR (SIMARSUL, 2013).

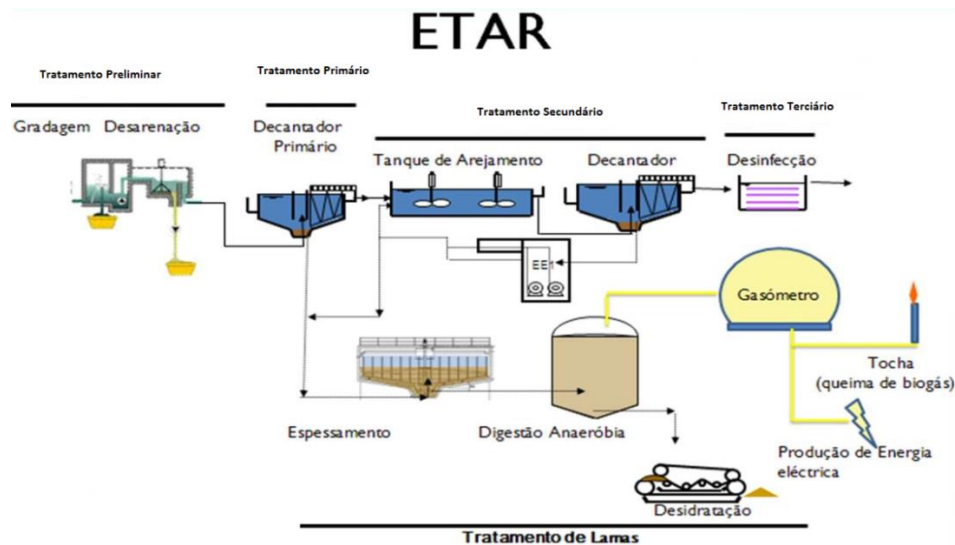


Figura 4.5 - Diagrama de uma Etar com aproveitamento de biogás

4.5 Biogás de explorações agropecuárias

O aproveitamento do biogás proveniente de explorações agropecuárias é uma das formas mais utilizadas em zonas rurais. Tendo em conta que nestas zonas se verifica a existência de biomassa em abundância. É sabido que este tipo de explorações tem alguma dificuldade em efetuar o tratamento dos dejetos animais ou o seu transporte para uma estação de tratamento, o que por vezes origina descargas ilegais muito prejudiciais para o meio ambiente.

Desta forma, a existência de unidades de produção de biogás, ou mesmo a implementação de pequenas unidades nas próprias explorações, poderiam ser uma solução para este problema. Sendo ainda uma mais-valia na geração de energia, tanto para consumo das próprias instalações como para venda à rede.

Num recente estudo realizado por Bruno Teixeira no âmbito da sua Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica Sistemas Eléctricos de Energia no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) em colaboração com a empresa *Magnetic Fields* permitiu concluir que será possível às explorações agrícolas ter uma redução mensal de cerca de 50% na fatura elétrica através do aproveitamento dos resíduos orgânicos poluentes. É apresentado, como vantagem, esta forma de energia em relação a outras energias renováveis pelo facto de ser possível armazenar o biogás para ser utilizado em períodos de maior necessidade e a redução de CO₂ emitido para a atmosfera.

4.6 Tecnologias para conversão do biogás em energia

4.6.1 Motor de combustão interna

Os MCI (figura 4.6) são a alternativa mais comum no aproveitamento de gases dos AS para a geração de energia derivado ao seu baixo custo de investimento e facilidades de operação e manutenção. Sendo indicados para projetos em aterros com potencial de 800 kW (US EPA, 2008).



Figura 4.6 - Motor de combustão interna a biogás

São obtidas altas eficiências principalmente em aplicações de cogeração com aproveitamento do calor rejeitado pelo motor, para geração de água quente, ou nos gases de exaustão para a produção de vapor de baixa pressão. A principal desvantagem destes sistemas deve-se às altas quantidades de NO₂ e CO₂, comparadas com outras tecnologias. A tabela 4.2 mostra a eficiência, consumo de um motor Caterpillar 3516 utilizando como combustível biogás de aterro (Caterpillar, 2013).

Tabela 4.2- Motor de combustão interna a biogás

Eficiência elétrica	33%
Consumo de combustível (kJ/kWh)	10972
Emissões (µg/kJ)	
NO ₂	56,6
CO ₂	56,6

(Fonte: Caterpillar)

Existem no mercado dois tipos de Motores de Combustão Interna (MCI): os de ciclo *Otto* e os de ciclo *Diesel*. Nos motores de ciclo *Otto* (figura 4.7) a combustão da mistura ar-combustão é provocada por uma faísca produzida por uma vela de ignição, já nos motores de ciclo Diesel, a combustão ocorre em função da compressão da mistura, neste caso o combustível entra em combustão espontânea devido ao aumento da pressão e da temperatura dentro do cilindro (SCS Engineers, 2002).

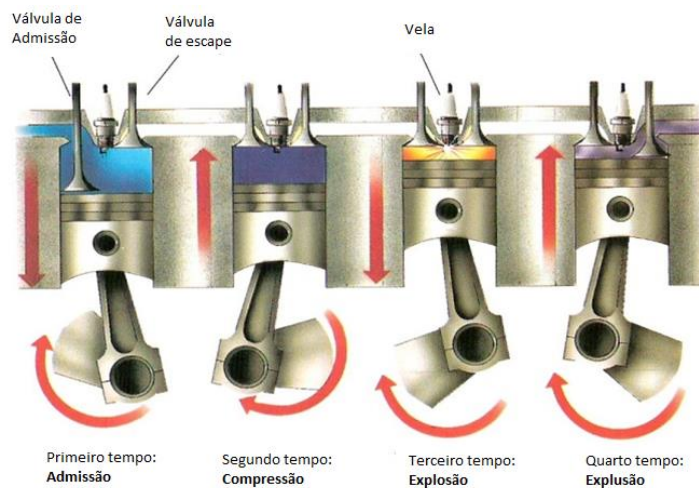


Figura 4.7 - Etapas de funcionamento ciclo Otto

Admissão (primeiro tempo): abertura da válvula de admissão através da qual é injetada ao cilindro a mistura ar-combustível e o pistão é empurrado para baixo com o movimento da cambota.

Compressão (segundo tempo): fecho da válvula de admissão e compressão da mistura (ordem de 10:1) e conforme o pistão sobe (antes de chegar a parte superior) a vela gera uma faísca.

Combustão (terceiro tempo): onde ocorre a explosão da mistura e expansão dos gases quentes formados na explosão. Essa expansão dos gases promove uma determinada força, permitindo que o pistão desça.

Exaustão (quarto tempo): abertura da válvula de escape através da qual os gases são expulsos pelo pistão.

Os motores de ciclo Otto, desenvolvidos para trabalhar com combustíveis derivados do petróleo, são mais suscetíveis ao Sulfeto de Hidrogênio (H_2S) do que os motores Diesel mais robustos. No entanto os motores estacionários a biogás podem derivar de adaptações dos motores a gás natural com ignição por faísca (Liang, 2009). Um motor Diesel pode ser modificado para um motor a gás natural com ignição por faísca ou para um motor bicomcombustível (Gás-Diesel) onde 8 a 10% de diesel são injetados para a ignição, os dois tipos frequentemente aplicados, porém o bicomcombustível possui maior eficiência elétrica.

A vida útil dos motores a biogás é de difícil determinação, pois depende das horas, das combinações de operação do mesmo e da qualidade do biogás usado como matéria-prima. Por esta razão, estas informações devem ser obtidas com os construtores e operadores do motor. Usualmente, o tempo de vida de um motor/turbina está à volta de 7,5 anos (tempo de operação 8000h/ano) ou 8 anos (7500 h/ano). A substituição ou reparação em larga escala do motor no fim da vida útil é, habitualmente, economicamente inviável devido à baixa produção de gás de aterro nos anos finais.

As potências hoje disponíveis no mercado variam de 5 kW a 1,6 MW. Para aterros de pequeno porte e, conseqüentemente com baixa produção de CH_4 , existem motores de pequenas potências que vão de 5 kW até 230 kW. Para aterros de grande porte existem motores de vão desde 925 kW até 1,6 MW.

4.6.2 Turbinas a Gás

As turbinas a gás têm como princípio de funcionamento o ciclo termodinâmico conhecido como Ciclo de *Brayton*. Uma turbina a gás consiste essencialmente num compressor de ar, um combustor e uma turbina de expansão. O ar é empurrado através do compressor e libertado no combustor onde o combustível é permutado com débito constante. Após a combustão os gases formados, a alta temperatura, expandem e desenvolvem uma alta velocidade. Esta energia é transferida para as pás da turbina e então para o eixo na forma de trabalho (SCS Engineers, 1997).

As turbinas são utilizadas nos grandes aterros em projetos com potências instaladas de 3 a 4 MW. Representam a segunda tecnologia mais utilizada na recuperação energética do biogás, embora o número de instalações seja menor quando comparados com os motores de combustão interna. O menor número de aplicações deve-se às perdas energéticas das pequenas turbinas a gás especialmente quando operam em regime de cargas parciais.

As turbinas a gás aplicadas em aterros atingem de 20 a 28% em plena carga. Entretanto estas eficiências caem substancialmente quando a unidade está a funcionar em regimes de carga parcial. O recurso ao ciclo combinado, que utiliza a energia perdida nos gases de exaustão aumentam a eficiência até aproximadamente 40%, porém esta configuração continua a ser menos eficiente em regimes de carga parcial, sendo utilizadas apenas em grandes aplicações (US EPA, 2009).

A principal desvantagem das turbinas a gás é que requerem compressão do gás, e como o biogás pode conter até 50% de CO₂. Perde-se uma fração da energia para comprimir um gás sem valor energético, esta perda situa-se entre 15 a 20% da potência final (SCS Engineers, 1997). NA figura 4.8 apresenta-se a instalação de uma central com recurso a turbinas a gás (Wellwatcher, 2013)



Figura 4.8 - Turbina a gás

Os custos de instalação, operação e manutenção e também a eficiência elétrica do sistema aumentam de acordo com a escala do projeto, assim sendo, a turbina a gás é uma alternativa mais adequada para grandes projetos de geração. Porém de acordo com (SCS, Engineers, 1997), as turbinas a trabalhar com biogás são instalações feitas sob medida, assim estimativas de custos por princípio devem de ser utilizadas com cautela. Na tabela 4.3 abaixo são apresentadas as características de uma turbina a gás a trabalhar com biogás de aterro (Bove ,2013).

Tabela 4.3 - Características de uma turbina

Eficiência elétrica	28%
Consumo de combustível (kJ/kWh)	12872
Emissões ($\mu\text{g}/\text{kJ}$)	
NO ₂	15
CO ₂	19

5 INDAGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DOS CICLOS ORGÂNICOS DE RANKINE

5.1 Princípio de funcionamento do Ciclo de Rankine

O ciclo de *Rankine* permite a conversão da energia térmica em energia elétrica ou mecânica com recurso à utilização de turbinas de vapor. Neste ciclo termodinâmico a produção de vapor realiza-se numa caldeira que poderá queimar combustíveis como por exemplo carvão, gás natural, etc. ou então recuperar calor de um processo industrial ou mesmo aproveitar o calor contido em gases de escape de turbinas a gás tal como acontece nas centrais de ciclo combinado.

O vapor a alta pressão e temperatura sobreaquecida é expandido na turbina de vapor produzindo trabalho mecânico que pode então ser convertido em energia elétrica através de um alternador. A expansão realiza-se a pressões muito baixas normalmente alguns milibares a que correspondem temperaturas de saturação inferiores a 40 °C. O vapor à saída da turbina é condensado no condensador que é mantido a uma pressão inferior à atmosférica com recurso a bombas de vácuo e arrefecido por um circuito de água que permuta calor da fonte fria: mar, rio, atmosfera. O condensado obtido é bombeado através da bomba de alimentação da caldeira reiniciando-se o ciclo.

O esquema de princípio subjacente ao ciclo *Rankine* é apresentado na figura 5.1 (Cogen, 2011).

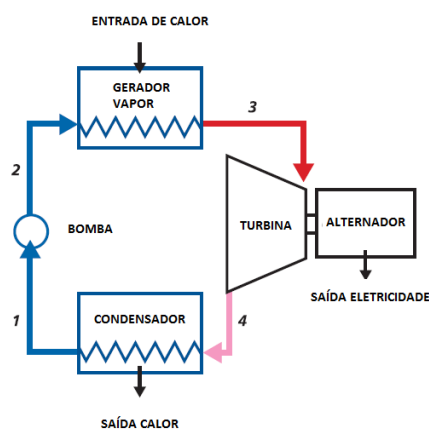


Figura 5.1 - Ciclo de *Rankine* esquema de princípio

Na figura 5.2 é apresentado o ciclo termodinâmico teórico num diagrama temperatura – entropia (Cogen, 2011).

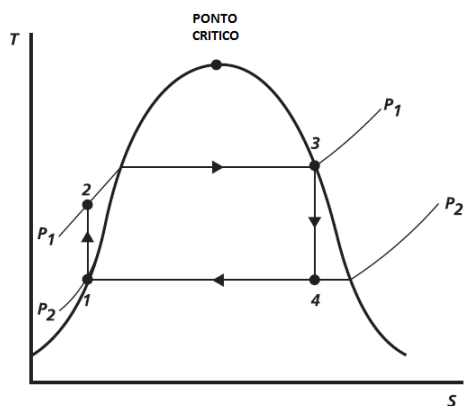


Figura 5.2 - Diagrama Temperatura-Entropia

A entropia é uma grandeza termodinâmica que traduz as irreversibilidades de um qualquer processo termodinâmico. Num ciclo de *Rankine* ideal a expansão do vapor seria realizado a entropia constante entre a pressão do vapor na admissão da turbina e a pressão de condensação. Esta situação corresponde ao trabalho máximo teórico que é possível extrair do fluido de trabalho, no caso a água, entre as condições de pressão e temperatura à entrada e saída da turbina a vapor. No entanto como existem perdas de calor sendo este processo adiabático, e ocorrem irreversibilidades na expansão do vapor no interior da turbina neste caso o rendimento isentrópico de cada andar da turbina é inferior a 100%, significa então que a expansão de vapor não se realiza a entropia constante como se pode verificar através da figura 5.3 (Cogen, 2011).

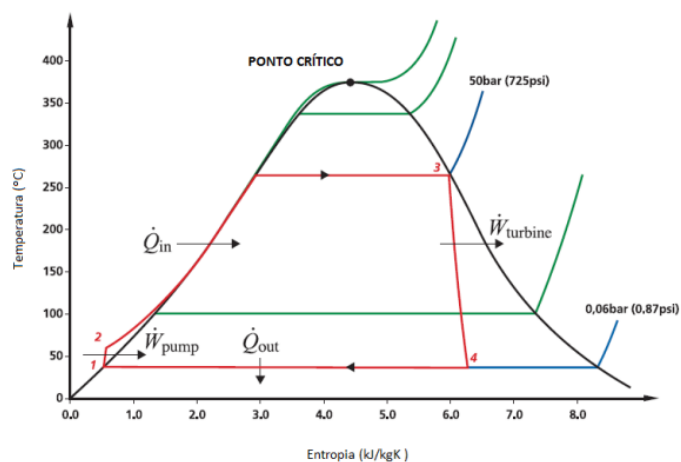


Figura 5.3 - Diagrama Temperatura – Entropia de um ciclo Rankine real

Pode-se aumentar o trabalho realizado num ciclo de Rankine recorrendo-se à expansão do vapor a diferentes níveis de pressão com posterior reaquecimento e sobreaquecimento. Na prática corresponde a um aumento da área do ciclo representado que é proporcional ao trabalho realizado, aumentando-se desta forma o rendimento termodinâmico do mesmo como se pode verificar através da figura 5.4 (Cogen, 2011).

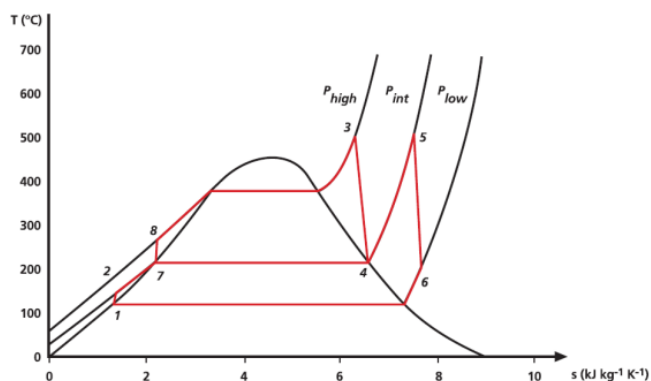


Figura 5.4 - Diagrama para o vapor

5.2 Princípio de funcionamento do Ciclo de Rankine Orgânico

No caso de um ciclo de *Rankine* orgânico "*Organic Rankine Cycle*" (ORC) o processo de funcionamento é semelhante ao ciclo fechado de *Rankine* a vapor, envolvendo os mesmos componentes (evaporador, máquina de expansão, condensador e bomba), mas utiliza fluido orgânico ao invés de usar água como fluido de trabalho. Parte do desafio está na escolha do fluido de trabalho orgânico mais apropriado e da configuração do próprio ciclo (Saleh et al, 2005). O ORC é hoje em dia um processo promissor de conversão de energia térmica de baixa e média temperatura em eletricidade.

Uma questão a considerar nos processos do ORC é a de se avaliar quando é que uma substância orgânica é realmente melhor que a água a funcionar como fluido de trabalho. Esta questão levanta-se, em particular, para fontes térmicas de temperatura média. Uma maior massa volúmica do fluido de trabalho à saída das turbinas permite que estas tenham uma menor oposição (Quoilin e Lemort, 2009), e assim permitir uma redução do tamanho do ORC e reduzir significativamente as despesas de manutenção de forma a ter um menor custo de produção, permitindo ao processo ser economicamente exequível e viável (Larjola, 1994).

O sucesso desta tecnologia pode ser em parte explicado pelo tipo de construção modular. Um mesmo sistema ORC pode ser usado, com poucas modificações, em conjunto com diversas fontes de calor. Este sucesso é também reforçado pela maturidade tecnológica da maioria dos seus componentes, devido ao seu uso extensivo em aplicações ligadas à indústria da refrigeração.

Num ORC é usual utilizar fluídos cuja linha de saturação à pressão atmosférica ocorre a uma temperatura mais baixa do que no caso da água o que permite, nomeadamente a recuperação de calor a mais baixas temperaturas permitindo assim recuperar calor de fontes tais como:

- Geotérmica;
- Combustão de biomassa;
- Energia solar;
- Combustão de biogás;
- Efluentes térmicos industriais.

5.2.1 Vantagens dos Ciclos Orgânicos de Rankine

Num ciclo de Rankine convencional os rotores das turbinas de vapor giram a velocidades elevadas e os andares de baixa pressão podem sofrer erosão no caso de ocorrer condensação de vapor antes do condensador. É fácil entender que pequenas gotas de água com muito maior densidade que o vapor estimuladas de uma elevada energia cinética podem ter consequências gravosas para a integridade das pás de uma turbina a vapor. Esta é uma das razões da utilização de vapor sobreaquecido à entrada de uma turbina para que durante a sua expansão, no interior da máquina, se minimize o risco de ocorrência de condensação.

Uma turbina que opere segundo um ORC funciona num regime de rotação mais baixo com ausência de erosão de componentes metálicos, incluindo as pás da turbina. Pelo facto do fluido de trabalho possuir uma massa molecular mais elevada permite maiores caudais mássicos e, conseqüentemente, uma maior potência debitada para o mesmo caudal volúmico sendo que a potência a desenvolver por uma turbina é proporcional ao caudal mássico do fluido de trabalho que a atravessa.

Enumera-se de forma resumida alguma das vantagens de um grupo que opere segundo um ORC:

- Elevado rendimento do ciclo termodinâmico;
- Rendimento muito elevado da turbina aproximadamente 90%;
- Baixa solicitação mecânica da turbina, derivado à baixa velocidade periférica do rotor;
- Baixa rotação da turbina permitindo um acionamento direto do alternador sem recurso a caixas de redução de velocidade;
- Inexistência de erosão nas pás por ausência de condensação no interior da máquina.
-

5.2.2 Descrição da tecnologia

Existem diversos fabricantes que disponibilizam tecnologia com base em ORC, na tabela 5.1 são apresentados alguns dos principais fabricantes mundiais, as suas aplicações e tecnologias empregues.

Tabela 5.1- Principais fabricantes de sistemas ORC

Fabricantes	Aplicações	Potências [kWe]	Temperatura da fonte de calor [°C]	Tecnologia
ORMAT, US	Geotérmica, Solar WHR	200-70.000	150 - 300	Fluido: n-pentano Turbinas axiais de dois estágios, Gerador síncrono
Turboden, Italy	Biomassa, WHR, Geotérmica.	200 - 2000	100 - 300	Fluidos: OMTS, Solkatherm, Turbinas axiais de dois estágios
Adoratec, Germany	Biomassa	315- 1600	300	Fluido: OMTS
Cryostar, França	WHR	200- 2600	100-400	Fluido: R245fa, R134a Turbina radial,
Tri-o-gen, Holanda	WHR	160	>350	Fluido: Tolueno, Turbina radial turbo-expansor,
Electrathem, US	WHR	50	>93	Fluido: R245fa

As diferenças residem no tipo de fluido utilizado no ciclo e na forma como é fornecido o calor ao equipamento. A empresa Turboden por exemplo utiliza óleo térmico para transportar o calor da fonte quente às unidades que operam segundo um ciclo orgânico de Rankine. O esquema da figura 5.5 ilustra o diagrama de princípio da tecnologia ORC típica e correspondente evolução no diagrama T-s (Turboden,2013).

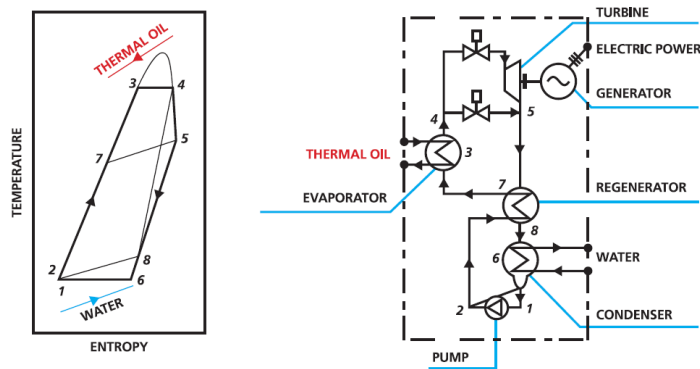
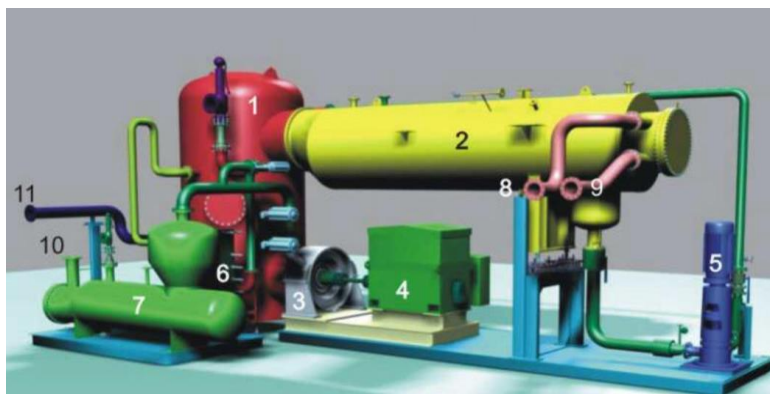


Figura 5.5 - Esquema de princípio da tecnologia

O turbo gerador utiliza o óleo térmico a temperatura elevada para pré-aquecer e vaporizar um fluido orgânico adequado no evaporador (7,3,4). O vapor do fluido orgânico aciona a turbina que se encontra acoplada ao alternador. O vapor á saída da turbina atravessa um regenerador (5,8) onde aquece o líquido orgânico (2,7). O Vapor é então condensado no condensador (arrefecido pelo escoamento de água – 8,6,9). O líquido orgânico é finalmente bombeado (1,2) ao regenerador e depois ao evaporador, completando desta forma a sequência de etapas no circuito fechado. Na figura 5.6 é apresentada a perspectiva de uma instalação ORC (adaptado Obernberger, 2002).



- | | | |
|----------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1 - Regenerador | 5 - Bomba de circulação | 9 - Saída de água quente |
| 2 - Condensador | 6 - Pré-aquecedor | 10 - Entrada de óleo |
| 3 - Turbina | 7 - Evaporador | 11 - Saída de óleo |
| 4 - Gerador Elétrico | 8 - Entrada de água quente | |

Figura 5.6 - Perspetiva de uma instalação ORC

5.2.3 Fluidos Orgânicos utilizados em sistemas ORC

Uma questão a considerar nos processos do ORC é a de se avaliar quando é que uma substância orgânica é realmente melhor que a água a funcionar como fluido de trabalho. Esta questão levanta-se, em particular, para fontes térmicas de temperatura média. Uma maior massa volúmica do fluido de trabalho à saída das turbinas permite que estas tenham um menor avançamento (Quoilin e Lemort, 2009), e assim permitir uma redução do tamanho do ORC e reduzir significativamente as despesas de manutenção de forma a ter um menor custo de produção, permitindo ao processo ser economicamente exequível e viável.

O fluido utilizado é um fator importante que afeta o arrefecimento do ORC. Um fluido de trabalho adequado deverá reunir as seguintes características

- Baixa toxicidade;
- Boa estabilidade;
- Compatibilidade com o material da tubagem e equipamento de expansão;
- Pouco inflamável;
- Pouco corrosivo.

Os fluidos orgânicos podem ser classificados como secos, húmidos e isentrópicos, função do declive da sua curva de saturação no diagrama T-s (temperatura – entropia) como ilustrado na figura 5.7 (P.Mago,2011).

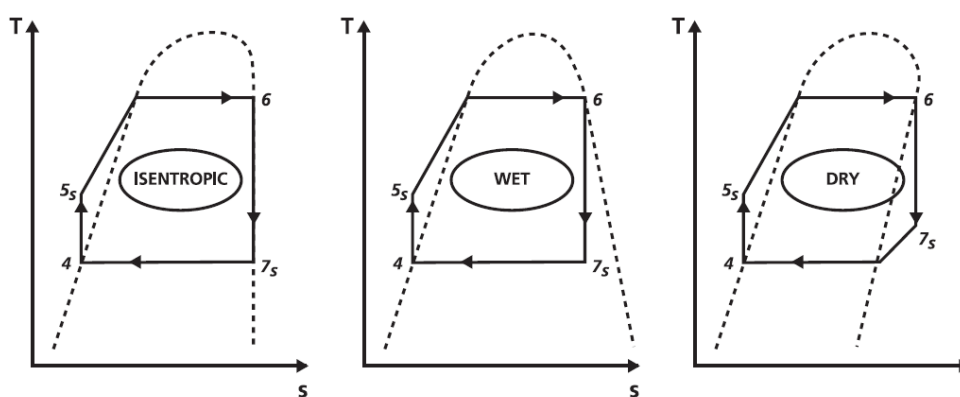


Figura 5.7 - Representação esquemática de fluidos isentrópicos húmidos e secos

Os fluidos orgânicos considerados secos e isentrópicos não condensam após a expansão numa turbina, contrariamente ao que acontece com os fluidos designados por

húmidos. Desta forma, os primeiros são mais adequados a aplicações com base em ORC quando não é possível um sobreaquecimento do fluido.

Muitos fluidos refrigerantes utilizados na indústria de refrigeração e climatização podem ser utilizados em ORC, fluidos como o R-134a, designação comercial para o tetra-flúor-etano ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{F}$) e que não afeta a camada de ozono, sendo o principal substituto do R12 em sistemas de ar condicionado e sistemas de climatização.

Outro fluido com aplicação em ORC é o penta-flúor-propano ($\text{CF}_3\text{CH}_2\text{CHF}_2$) comercialmente designado por R- 245. Este fluido ao contrário de outros refrigerantes utilizados em ORC caracteriza-se por ter uma baixa toxicidade e não ser inflamável. Este fator permite uma maior penetração comparado com outros sistemas que incluem fluidos inflamáveis, assim como uma maior aceitação e implementação de ORC em diversas aplicações e ambientes de utilização final.

O R-245 é particularmente bem adaptado ao aproveitamento de calor a baixa temperatura, tipicamente entre 60° e 300°C , sendo as suas propriedades termodinâmicas distintas de outros HFCs utilizados em refrigeração.

Na tabela 5.2 são apresentadas as principais características de funcionamento de fluidos utilizados em sistemas ORC.

Tabela 5.2 - Principais fluidos utilizados em sistemas ORC

Fluido	Tipo de fluido	Pressão crítica (bar)	Temperatura crítica ($^\circ\text{C}$)
R245fa	Isentrópico /Seco	36.5	154
R134a	Húmido	40.6	101
R227ea	Seco	29.2	101.7
iso-pentane	Seco	33.8	187.2
R141b	Isentrópico /Seco	42.2	204.3
R114	Isentrópico /Seco	32.6	145.7
n-butane	Isentrópico /Seco	37.96	152
R123	Isentrópico /Seco	36.6	183.6
n-pentane	Seco	33.7	196.5
cyclopentane	Seco	45.15	238.5
tolunene	Seco	31.1	318

5.3 Análise termodinâmica dos sistemas ORC.

A análise do ciclo de ORC ajuda a determinar o tipo de sistema de ORC exigido para determinadas condições de funcionamento. Os componentes que constituem o sistema consistem num evaporador, uma turbina, um condensador e uma bomba. A análise do ciclo permite determinar se a adição de um pré-aquecedor ou recuperador de calor, ou a combinação de ambos é viável para o aumento da produção de energia.

A análise do ciclo termodinâmico envolve relações empíricas termodinâmicas e o estudo dos vários processos do ciclo, sob diferentes condições de trabalho. A intenção é de encontrar os valores ideais para as diferentes variáveis envolvidas.

(Yiping Dai) e (Kyoung Hoon Kim et al) Focaram no seu trabalho a otimização paramétrica do sistema ORC para recuperação de calor, com o intuito de encontrar um fluido de trabalho que pudesse mostrar melhor desempenho do sistema para recuperação de calor. São explorados todos os parâmetros no desempenho do sistema com diferentes fluidos de trabalho, para a otimização é utilizado um algoritmo genético, que é um método novo *para a otimização de recuperação de calor no sistema ORC. São comparados e analisados diferentes fluidos de trabalho sob a mesma condição (calor) de forma a obter-se as melhores performances dos sistemas.*

(Yekoladio et al) Expõe uma análise termodinâmica de otimização do desempenho de quatro sistemas de conversão de energia utilizados em pequenas centrais geotérmicas que operavam com recursos geotérmicos a temperaturas moderadamente baixas na gama dos 110 °C a 160 °C. *C.They*, no entanto, concentrou-se na maximização da produção de energia para ciclos para uma determinada taxa de fluxo de fluido geotérmico, minimizando a destruição da exergia ¹ geotérmica ou irreversível com uma conceção cuidadosa dos permutadores de calor utilizados nos sistemas. O processo de otimização foi realizado para minimizar as perdas de exergia na turbina. Além disso foi elaborado uma análise ao desempenho dos fluidos orgânicos selecionados como o R123, R152a, isobutano e n-pentano nos sistemas ORC.

(César et al) Propuseram diferentes configurações face ao ORC, associando um *chiller* de absorção, com e sem recuperador de calor. A análise termodinâmica exposta

¹ Em termodinâmica, a exergia de um sistema pode ser definido como o trabalho teórico máximo que pode ser obtido via processo mais adequado de um sistema que encontre-se em um dado estado inicial até que este atinja o estado final de referência caracterizado pelo equilíbrio termodinâmico com o meio ambiente.

no artigo apresenta a eficiência e destruição de exergia como parâmetros de avaliação de desempenho real. Deste modo, a irreversibilidade (I) e eficiência exergética (ϵ) no sistema térmico cada subsistema para diferentes fluidos de trabalho. Os resultados são relatados em diferentes pressões do evaporador, mantendo a temperatura de entrada da turbina em estado saturado.

O desempenho da instalação é avaliado de acordo com o esquema da figura 5.8 e a partir das seguintes formulações:

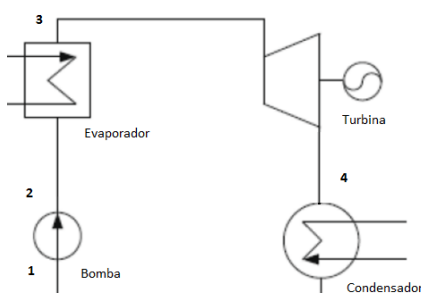


Figura 5.8 - Representação dos processos do sistema ORC.

Processo 2-3: Processo a pressão constante, e absorção de calor no evaporador. O calor transferido da fonte quente para o fluido de trabalho é dado pela equação 5.1.

(5.1)

Q_i – Calor fornecido ao fluido
 m – Fluxo massa kg/s
 h – Entalpia estado

$$\dot{Q}_i = \dot{m}(h_3 - h_{2a})$$

Processo 3-4: Processo de expansão não-isentrópica na turbina. Idealmente, este é um processo isentrópico. Contudo, a eficiência da transformação da energia na turbina nunca é ideal e a condição real do fluido de trabalho na saída da turbina é indicado pelo ponto estado 4.

O rendimento isentrópico da turbina pode ser expressa pela equação 5.2.

(5.2)

η_T – Rendimento isentrópico turbina
 h - entalpia no estado

$$\eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}}$$

por sua vez o cálculo da potência gerada pela turbina é dado pela equação 5.3.

(5.3)

W_t – Trabalho na turbina (kW)
 m - fluxo mássico (kg/s)
 h - Entalpia (kJ/kg)

$$\dot{W}_t = \dot{m}_{fluido}(h_3 - h_4)$$

Processo 4-1: Processo de rejeição de calor no condensador a pressão constante, o calor rejeitado é obtido pela equação 6.4.

Q_c - Calor rejeitado condensador (kW)
 \dot{m} - Fluxo mássico (kg/s)
 h - Entalpia (kJ/kg)

$$\dot{Q}_c = \dot{m}(h_4 - h_1) \quad (5.4)$$

Processo 1-2: Este é um processo de compressão não-isentrópico na bomba de líquido, onde o estado 2 indica a condição real do fluido de trabalho na saída da bomba, e o ponto 2s representa a condição ideal (isentrópica).

O rendimento isentrópico da bomba é dado pela equação 5.5.

η_b - Rendimento bomba
 h - Entalpia (kJ/kg)

$$\eta_b = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} \quad (5.5)$$

o trabalho introduzido pela bomba é:

W_b - Trabalho da Bomba
 \dot{m} - Fluxo de massa (kg/s)
 h - Entalpia (kJ/kg)

$$\dot{W}_b = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (5.6)$$

O rendimento térmico do ORC é definido com base na primeira lei da termodinâmica como o rácio entre a potência útil e o calor fornecido ao ciclo:

η_t - Rendimento termodinâmico
 W_t - Trabalho turbina (kW)
 W_b - Trabalho bomba (kW)
 Q_e - Calor entrada (kW)

$$\eta_t = \frac{W_t - W_b}{Q_e} \quad (5.7)$$

5.4 Configurações.

5.4.1 ORC simples

O sistema ORC é composto por um evaporador, uma turbina, um condensador e uma bomba. (figura 5.8) o fluido de trabalho deixa o condensador como líquido saturado (ponto 1 do estado). Em seguida é comprimido pela bomba para estado líquido à pressão subcrítica (ponto 2 do estado) necessária no processo de adição de calor. O fluido de trabalho é aquecido no evaporador até que se torne vapor superaquecido (ponto 3 do estado). O vapor sobreaquecido flui para a turbina e é expandido para a pressão de condensação (ponto 4 do estado). À pressão de condensação, o fluido de

trabalho encontra-se na região de duas fases. O fluido passa através de duas fases o condensador, onde o calor é removido até que se torne um líquido saturado (ponto 1 do estado).

Na figura 5.9 é apresentada a constituição de um ORC simples e na figura 5.10 o diagrama T-s.

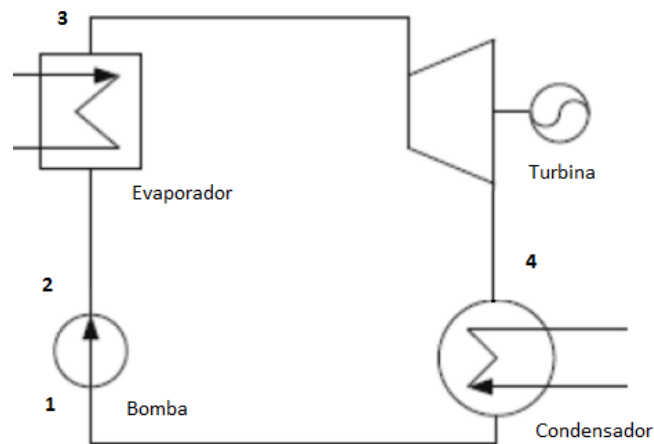


Figura 5.9- Constituição ORC simples

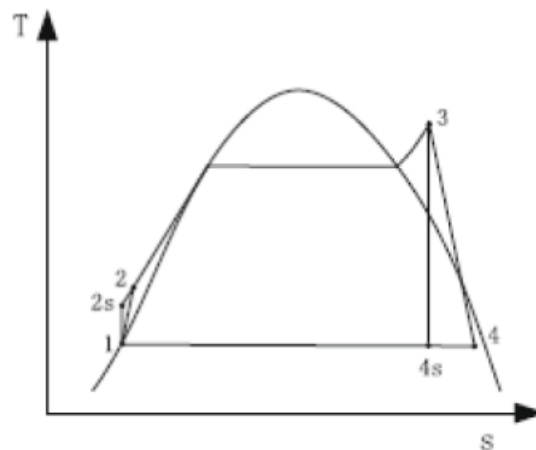


Figura 5.10 - Diagrama T-s para um ORC simples

5.4.2 ORC com recuperador de calor

No ciclo seguinte, a temperatura no ponto 4 (T_4) é marcadamente superior à temperatura no estado (T_1), pode então ser vantajoso implementar um permutador de calor interno no ciclo, conforme mostrado na figura 5.11. Este permutador de calor também é representado na figura 5.11 pelos pontos adicionais estado 4a e 2a. Os gases de escape da turbina fluem para o permutador de calor interno e arrefecem no

processo de (4-4a), através da transferência de calor para o líquido comprimido, que é aquecido no processo (2-2a), (Dai Yiping et al). Este processo pode ser verificado no diagrama T.s apresentada na figura 5.12

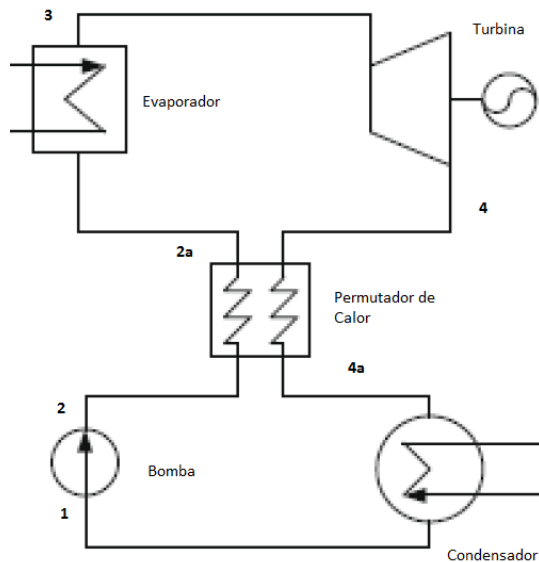


Figura 5.11 - Constituição ORC com recuperador de calor

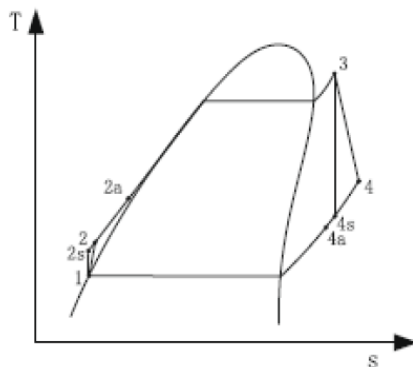


Figura 5.12 - Diagrama T-s para um ORC com recuperador de calor

5.4.3 ORC com recuperador de calor e Chiller

Neste ciclo é associado um *chiller* de absorção ao ciclo anterior constituído por bomba, evaporador, turbina, recuperador de calor e condensador, ver figura 5.13. O fluido orgânico de trabalho pressurizado, vapor saturado, expande-se na turbina para produzir trabalho útil, os gases de escape, depois de passar pelo permutador de calor sendo arrefecido e pelo condensador, arrefecido até à temperatura mínima do ciclo, passa através da bomba, retornando para o evaporador à pressão desejada. É ainda possível a utilização de um recuperador de calor que usa o fluxo na saída da turbina

para pré-aquecer o fluxo que entra no evaporador, com o objetivo de aumentar a eficiência do ciclo (T. Yang, G. J. Chen, and T. M. Guo)

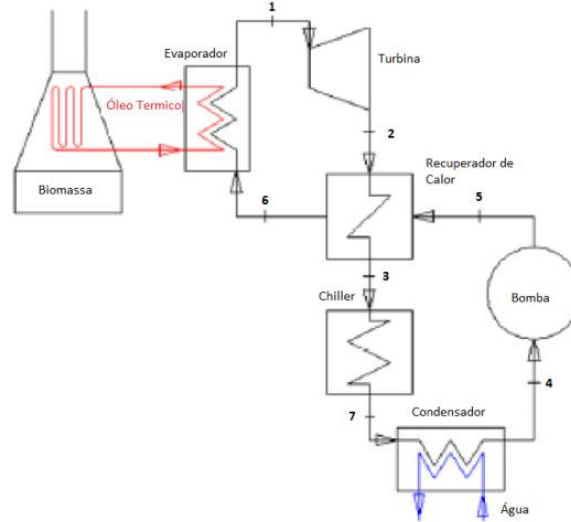


Figura 5.13 - Constituição ORC com recuperador de calor e Chiller

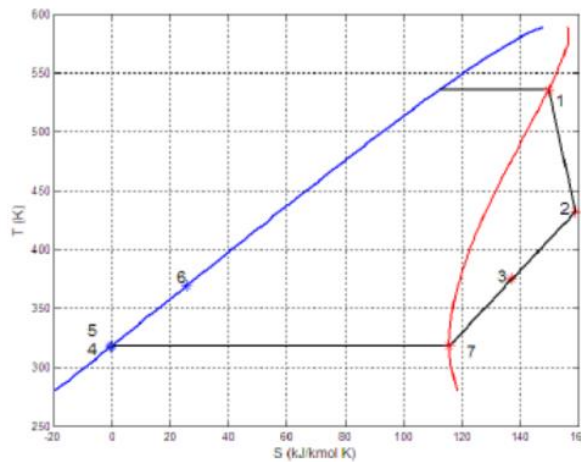


Figura 5.14 - Diagrama T-s para um ORC com recuperador de calor e Chiller

5.4.4 ORC com recuperador, pré-aquecedor e superaquecedor

O sistema proposto consiste no condensador, bomba, turbina, recuperador, pré-aquecedor de caldeira, e superaquecedor e o seu diagrama esquemático é mostrado na figura 5.15. O fluido vai passar antes do evaporador através de pré-aquecedor e depois disso através do superaquecedor antes de ir para turbina. Aumentando assim a saída do ciclo (T. Yang, G. J. Chen, 1997).

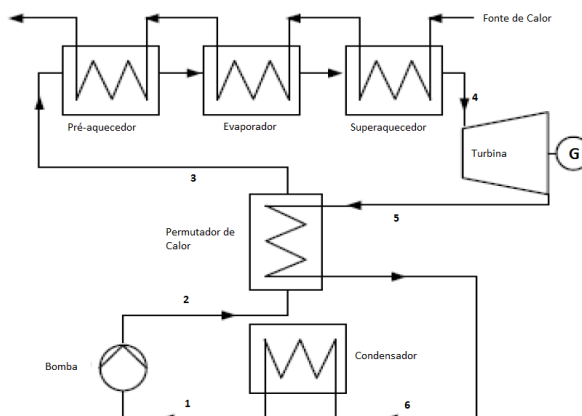


Figura 5.15 - Constituição ORC com pré-aquecedor

5.5 Equipamentos de Expansão

O desempenho dos sistemas baseados ORC está intimamente ligado ao equipamento que produz a expansão do vapor do fluido orgânico. Utilizam-se, essencialmente máquinas de dois tipos

- Reação
- Deslocamento

No primeiro caso são utilizadas turbinas (centrifugas ou axiais) e no segundo máquinas de parafuso, *scroll* ou alternativas que são mais adequadas a potências mais pequenas caracterizando-se por movimentar menores caudais, exibir razões de pressão mais elevadas e velocidades de rotação mais baixas.

Na figura 5.16 é apresentada uma imagem de uma máquina de reação da (Honeywell, 2013)



Figura 5.16 - Máquina de reação

As máquinas de expansão de parafuso com utilização em ORC são construídas por dois helicoidais que engrenam entre si, ver figura 5.17 (Honeywell, 2013), e estão contidos dentro de uma carcaça com tolerâncias bastante reduzidas da ordem dos 0,05mm (Quolilin and Vicent Lemorte, 2009)



Figura 5.17 - Máquina de deslocamento

Os parafusos, sob ação do fluido orgânico, na fase do vapor, que preenche o volume livre entre os rotores e a carcaça, transforma a energia de pressão em trabalho mecânico ao veio. À medida que a pressão do fluido diminui o seu volume específico e a velocidade aumentam. Ao contrário das turbinas centrífugas ou axiais o efeito dinâmico do escoamento do fluido tem um peso reduzido na transferência de energia nas máquinas de expansão de parafuso. A presença de líquido juntamente com o vapor a ser expandido tem um efeito reduzido no seu modo de funcionamento ou rendimento.

5.6 Aplicações dos ORC

5.6.1 Recuperação de calor

O rendimento de combustão interna poderá ser inferior a 30% no caso de motores de pequena cilindrada para tração automóvel até mais de 45% no caso de motores industriais de grandes dimensões. Temos então perdas de mais de 50% da energia contida no combustível em calor que será cedido à fonte fria sem qualquer utilidade prática quando o objetivo é apenas a produção de energia mecânica ou elétrica.

Os ciclos de produção de muitos setores intensivos em energia estão intrinsecamente caracterizados por quantidades significativas de energia térmica dos resíduos contidos nos gases de combustão do processo. Apesar de parte da energia contida nos gases de combustão ser reutilizada por meio de processos de otimização, as dificuldades relacionadas com a sua composição ou a natureza cíclica do processo de produção reduz o custo da recuperação de energia puramente térmica. A evolução do mercado de energia nos últimos anos, lançou as bases económicas para a reutilização deste calor residual para a produção de energia elétrica, ao mesmo tempo.

A recuperação de calor para a produção de energia elétrica pode ter um impacto importante em muitos setores intensivos de energia, contribuindo significativamente

para a redução do consumo e aumentando a eficiência de todo o processo de produção.

O sucesso desta tecnologia pode ser em parte explicado pelo tipo de construção modular. Um mesmo sistema ORC pode ser usado, com poucas modificações, em conjunto com diversas fontes de calor. Este sucesso é também reforçado pela maturidade tecnológica da maioria dos seus componentes, devido ao seu uso extensivo em aplicações ligadas à indústria da refrigeração. Além do mais, e ao contrário dos ciclos convencionais, esta tecnologia possibilita a produção de eletricidade ao nível local.

Atualmente, os ciclos de Rankine orgânicos estão comercialmente disponíveis para capacidades da ordem dos MW. Contudo, poucas são as soluções atualmente aplicáveis à escala de kW, estando em fase de investigação e desenvolvimento (Quoilin e Lemort, 2009).

A recuperação de calor para a produção de energia elétrica pode ter um impacto importante em muitos setores intensivos em energia, contribuindo significativamente para a redução do consumo e aumento da eficiência de todo o processo de produção. A figura 5.18 (Diesel & Gas Turbine Worldwide, 2011) ilustra, esquematicamente, as perdas de calor decorrentes do funcionamento de um motor alternativo de grande dimensão. Verifica-se que o calor a baixa temperatura decorrente do sistema de refrigeração do motor representa uma percentagem importante da energia primária fornecida.

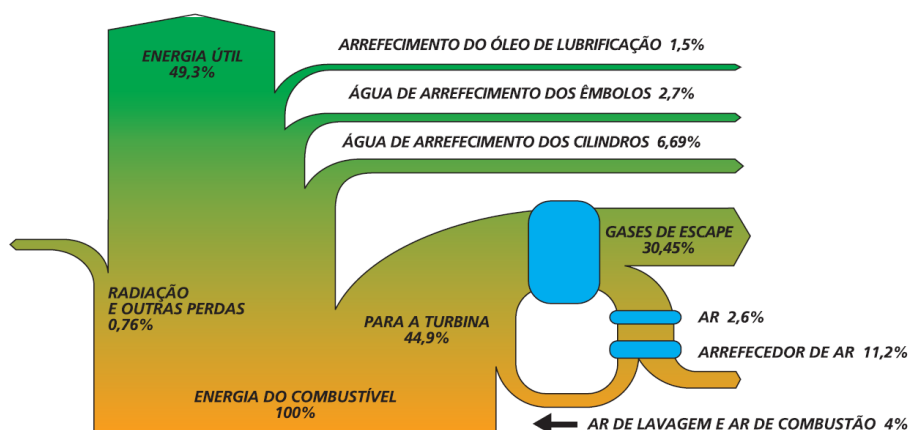


Figura 5.18 - Diagrama de Sankey para motor diesel de grande dimensão

Ensaios com um interesse mais significativo para o sector industrial com motores de maior dimensão têm ocorrido no setor naval em que se pretende aumentar o

rendimento de um motor diesel e baixar as suas emissões com recurso a tecnologia com base em ORC (Diesel & Gas Turbine Worldwide, Maio 2011). O aproveitamento de calor é realizado a temperaturas na ordem dos 55°C, integrando tecnologias ORC desenvolvidas pela OPCON num motor Diesel naval a 2 tempos.

Na figura 5.19 é apresentado um diagrama simplificado do sistema de recuperação de calor de uma fábrica de cimento através de um módulo ORC, (Turboedn,2013).

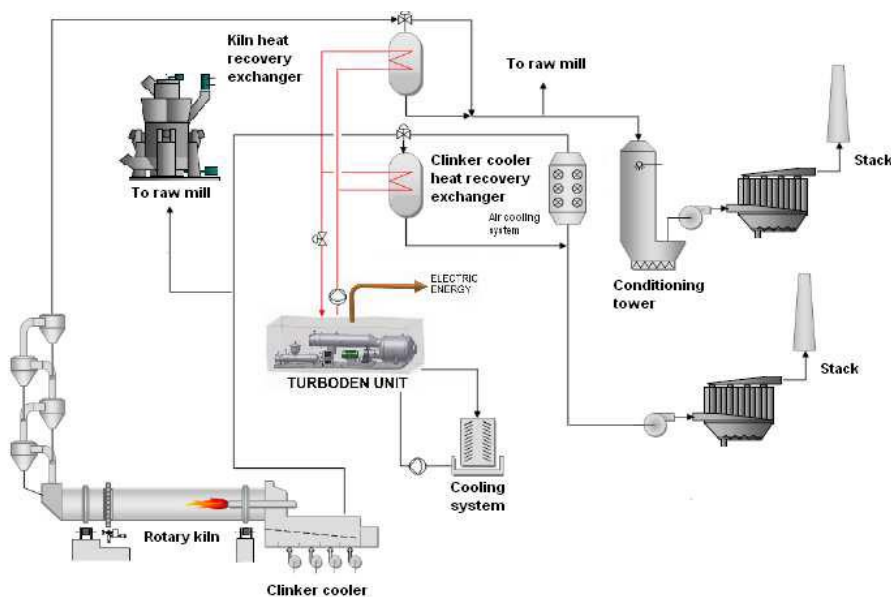


Figura 5.19 - Diagrama simplificado do sistema de recuperação da fábrica de cimento através de um módulo de ORC.

5.6.2 Energia solar

A aplicação dos ORC com energia solar é uma interessante opção de aproveitamento dessa fonte de energia renovável. Neste caso, a entrada de calor no ciclo varia de acordo com a radiação solar na superfície terrestre. O ciclo precisa de equipamentos que capturem esta energia e a transfiram para o fluido de trabalho, para depois efetuar o processo seguinte de expansão.

Os coletores solares são dispositivos conhecidos por captar a energia solar incidente. Existem duas formas de acoplar esses coletores, numa delas os coletores estão incluídos dentro do ciclo ORC na outra existe um mecanismo para levar o calor adquirido até ao fluido de trabalho.

No primeiro caso (figura 5.20) com entrada direta de calor os coletores são parte integrante do ORC. Após a elevação da pressão pela bomba, o fluido passa diretamente pelos coletores, adquire o calor necessário e sai dos coletores para o expansor ou turbina.

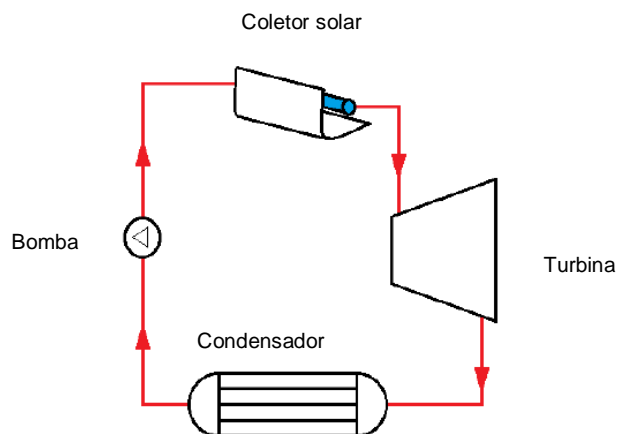


Figura 5.20 - ORC solar com entrada direta de calor

No segundo caso, figura 5.21, os coletores não fazem parte do ORC. O fluido de trabalho após a elevação de pressão passa por um permutador de calor que, por sua vez transfere o calor de outro fluido que foi aquecido nos coletores. Os fluidos não se misturam e somente existe a troca de calor. Existe então um circuito principal, o do fluido de trabalho do ORC, e o circuito secundário do fluido que circula nos coletores.

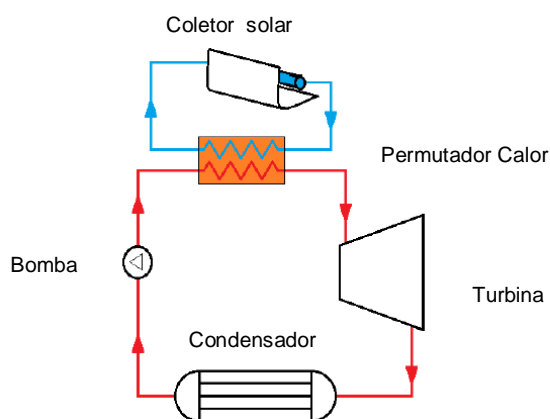


Figura 5.21 - ORC solar com permutador de calor

O ciclo com entrada de calor direta a partir dos coletores é termodinamicamente mais adequado. Isto porque um ingresso de calor com mais equipamentos como permutadores de calor aumenta as irreversibilidades do sistema. Estas irreversibilidades fazem com que nem todo o calor capturado nos coletores chegue ao ciclo. No entanto existe um problema uma vez que os coletores solares e seus acessórios normalmente não são desenhados para suportar as altas pressões que devem alcançar um ciclo ORC.

Na atualidade, em regiões onde o recurso solar é abundante e o acesso às redes elétricas é complicado, os ORC constituem uma solução para a geração de eletricidade para potências inferiores a 100 kW. São apresentadas a seguir algumas das vantagens e desvantagens da utilização deste tipo de ciclos em projetos de baixas potências:

- Não são necessárias temperaturas tão elevadas nos coletores solares, portanto, menores perdas térmicas;
- O volume e custo dos equipamentos são muito menores que os de um projeto de maior capacidade;
- As eficiências podem ser menores que as de um projeto de grande porte.

Na figura 5.22 é apresentado o princípio de funcionamento do sistema ORC solar (S. Quoilin et al. , 2013).

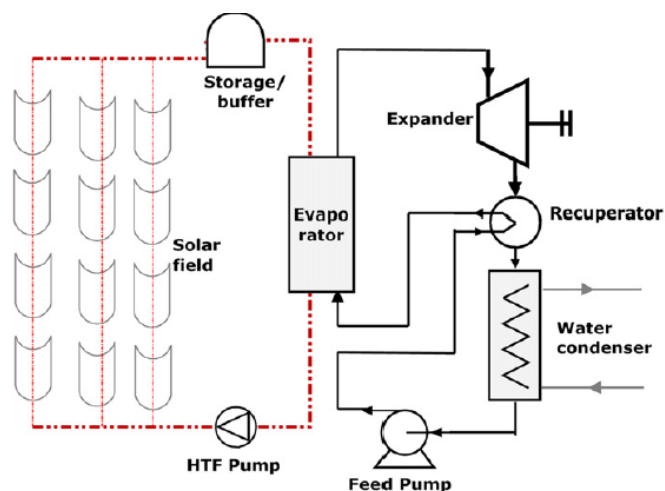


Figura 5.22 - Princípio de funcionamento de um sistema ORC solar.

5.6.3 Biomassa

Outra forma possível para o funcionamento do ORC é a biomassa. A biomassa está amplamente disponível num certo número de processos agrícolas ou industriais, tais como a indústria de madeira ou de desperdícios agrícolas. Temos ainda a biomassa florestal primária que é formada pelos materiais vegetais procedentes das operações silvícolas como podas, seleção de toiças, desbastes, cortes fitossanitários e controlo da vegetação espontânea. Nesta, também se incluem os resíduos de aproveitamento madeireiro, quer sejam provenientes de cortes finais ou de cortes intermédios, lenhas provenientes das podas e desramações e material vegetal proveniente de culturas, instalados em terrenos florestais. Com o ORC, a combustão da biomassa é a maneira mais comum para gerar energia a partir desta fonte. O calor que ingressa no ciclo é gerado através da queima da matéria orgânica.

A forma de implantação mais utilizada é a combustão em caldeira ou forno convencional, o calor gerado é transferido para o fluido de trabalho do ORC mediante um permutador de calor. A energia residual dos gases de escape do forno ou caldeira pode ainda ser reaproveitada. Pode-se observar os principais módulos do sistema ORC com recurso à biomassa na figura 5.23 (Fonte: Sylvain Quoilin 2012).

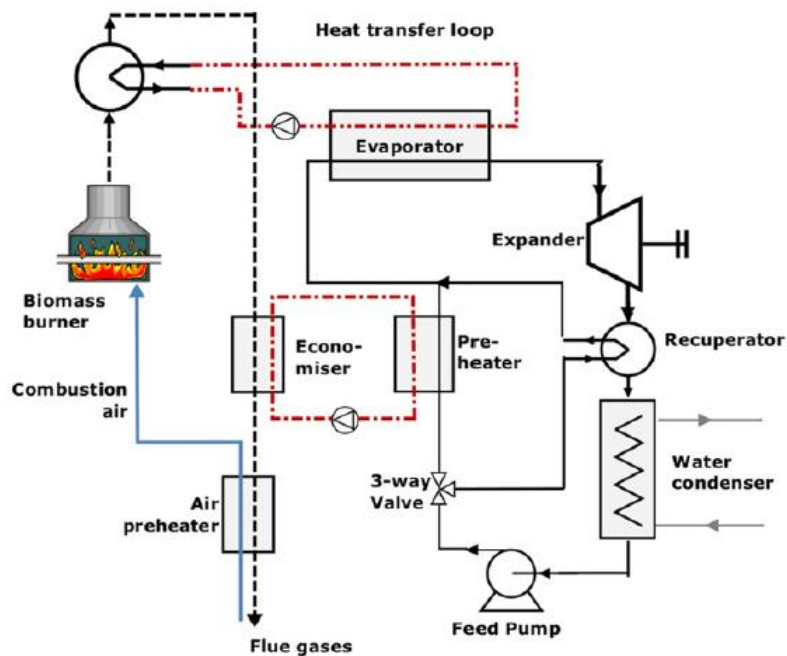


Figura 5.23 - Princípio de funcionamento de um sistema ORC - Biomassa

5.6.4 Geotérmicos

A energia geotérmica é uma forma de energia renovável com origem no calor que está presente nas camadas mais profundas da terra, o gradiente geotérmico médio da crosta na terra é de aproximadamente 3 °C por cada 100 metros de profundidade. Esta fonte de energia pode ser explorada através da perfuração de poços profundos e transportar os fluidos quentes, água e / ou vapor, presos no subsolo para a superfície.

Embora represente menos de 1% da produção atual de eletricidade do mundo, a energia geotérmica é a fonte de energia renovável com maior potencial na terra, juntamente com a energia solar, e é o único disponível 24 horas por dia, 7 dias por semana, todos os dias, independente do sol, vento, ondas e marés. A exploração deste recurso, que é amplamente disponível em baixas e médias temperaturas, até cerca de 180 °C, é, portanto, uma fronteira promissora em termos de energia limpa.

Em 2012 a Turboden começou a construir a primeira central ORC geotérmica na Europa, um protótipo de 500 kW, testou a sua flexibilidade e otimizou o desempenho com a entrada de calor altamente variável. Com este protótipo conseguiu ganhar a concessão, construção de *strat-up* de três centrais ORC geotérmicas na Baviera de 5 MW cada. Estas centrais utilizam água geotérmica a 140°C bombeadas a partir de uma profundidade de 400 metros, sendo refrigeradas a ar. Na figura 5.24 é apresentado diagrama simplificado de uma central ORC geotérmica.

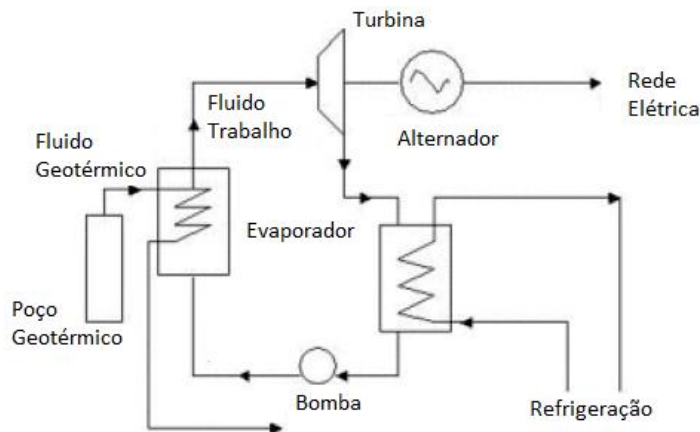


Figura 5.24 - Diagrama simplificado de uma central ORC geotérmica

6 CASO DE ESTUDO: ATERRO SANITÁRIO SERMONDE

Neste capítulo é apresentado o caso de estudo Central de Valorização Energética de Biogás provenientes de aterros sanitários Sermonde. Inicia-se com a caracterização do aterro, seguindo-se a estimativa de produção de metano por resíduos depositados em aterro e a energia elétrica extraída do biogás. Aborda o recurso ao sistema ORC, como forma de maximização da valorização energética.

É apresentado o modelo matemático do sistema ORC com recuperação de calor, permitindo a análise e simulação do comportamento do sistema. É exibida a ferramenta informática desenvolvida para obter as estimativas do aproveitamento energético em função da temperatura, do fluxo de massa da fonte de calor e do fluido a utilizar. Realiza-se ainda a análise de viabilidade económica do projeto, com base nos pressupostos previamente formulados.

6.1 Caracterização do aterro sanitário Sermonde

O Sistema Multimunicipal de triagem, recolha seletiva, valorização e tratamento de resíduos sólidos urbanos do Sul do Douro foi criado pelo Decreto-Lei nº 89/96, de 3 de julho integrando os municípios de Vila Nova de Gaia e Santa Maria da Feira. O mesmo diploma constitui a sociedade SULDOURO - Valorização e Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos S.A. adjudicando-lhe em regime de concessão a exploração e gestão do sistema multimunicipal a Sul do Douro por um período de 25 anos, ou seja, até 2021 (contrato de concessão celebrado em 30 de julho de 1996).

São acionistas da sociedade a Empresa Geral de Fomento (60%), o município de Santa Maria da Feira (15%) e o município de Vila Nova de Gaia (25%).

A SULDOURO desenvolve a sua atividade numa área de aproximadamente 384 km² e, em 2001, servia uma população de 423 538 habitantes, sendo responsável pela exploração do Aterro de Sermonde (Licença de exploração n.º 23/05/INR de 30 de Dezembro e Averbamento n.º 1 de 30 de abril de 2008 o qual integra a Licença Ambiental n.º23/2008 de 5 de março de 2008).

É apresentada na figura 6.1 a vista aérea, através do Google Maps, do aterro sanitário de Sermonde.



Figura 6.1 - Vista aérea do aterro sanitário Sermonde 2013

O modelo técnico de gestão e valorização dos resíduos sólidos urbanos da SULDOURO estrutura-se sobre várias infraestruturas e equipamentos, nomeadamente:

- Aterro Sanitário para deposição final de RSU (localizado em Sermonde);
- Estação de triagem localizada junto ao Aterro Sanitário de Sermonde;
- Unidade complementar de tratamento – Central de Valorização Orgânica (em construção junto ao Aterro de Sermonde) por digestão anaeróbia com aproveitamento energético do biogás gerado;
- Recolha seletiva:
 - 1514 ecopontos (1043 em Gaia e 471 na Feira);
 - 4 ecocentros (2 em Vila Nova de Gaia e 2 em Santa Maria da Feira);
- Central Termoelétrica alimentada a partir do biogás gerado no Aterro Sanitário;
- Selagem das lixeiras existentes na área do Sistema Multimunicipal (em Canedo no concelho de Santa Maria da Feira e em Vilar de Andorinho no concelho de Vila Nova de Gaia).

À data da projeção do Aterro de Sermonde (1995), considerou-se que o ano zero seria 1997 e o ano horizonte do projeto seria 2011, ou seja, teria uma vida útil de 15 anos. Após o estudo comparativo de alternativas, o Aterro Sanitário foi construído na freguesia de Sermonde no concelho de Vila Nova de Gaia.

No entanto, a exploração do AS apenas se iniciou em Março de 1999 (dois anos após o inicialmente previsto). Nesta data, Vila Nova de Gaia iniciou a deposição parcial dos seus resíduos no aterro tendo Santa Maria da Feira começado a depositar os seus resíduos em junho desse mesmo ano.

O aterro construído, apresenta um volume útil 1 650 000 m³ e ocupa uma área de aproximadamente 10 ha. Esta capacidade permitiria a deposição no ano horizonte de cerca de 2,3 milhões de toneladas de resíduos.

Perspetivando-se, o esgotamento previsto da capacidade do Aterro em 2010, foi desenvolvido um projeto de ampliação da capacidade do Aterro de Sermonde através da abertura de mais uma célula dentro dos limites atuais do terreno da Suldouro cuja construção decorreu em 2009. Esta nova célula, com uma área de cerca de 3 ha permitiu a deposição de mais cerca de 530 000 ton de resíduos. O esgotamento da capacidade de deposição de RU no aterro de Sermonde ocorreu em finais de 2012, e não sendo possível proceder à sua expansão, será necessário construir um novo aterro que permita assegurar a operacionalidade do sistema até ao final da concessão atribuída à Suldouro.

O local selecionado para a implantação do novo aterro da Suldouro, situa-se na freguesia de Canedo, concelho de Santa Maria da Feira, próximo da povoação de Sobreda. O grupo DST é a empresa responsável pela construção do novo aterro sanitário, uma empreitada que representa um investimento superior a 10 milhões de euros e que é fundamental para o eficaz tratamento dos resíduos sólidos dos concelhos abrangidos, prevendo-se a sua conclusão em julho de 2014.

6.2 Central de valorização energética do biogás

Numa altura em que a gestão de resíduos se encontra cada vez mais sob restrições europeias e nacionais, a recolha do gás de aterro torna-se uma medida imprescindível do ponto de vista ambiental. Cientes das questões ambientais e do potencial do biogás, pelo seu poder calorífico, representa como fonte de energia que pode ser aproveitada, a

Suldouro elaborou um plano para a implementação da Central de Valorização Energética do biogás produzido.

Para o desenvolvimento do projeto da Central de Valorização, foi realizado pela Energaia, o cálculo do potencial energético, apontando para o seguinte cenário:

- 1 000 kW a partir de 2002 durante cerca de 15 anos;
- 2 000 kW a partir de 2004 durante cerca de 10 anos;
- 3 000 kW a partir de 2006 durante cerca de 5 anos.

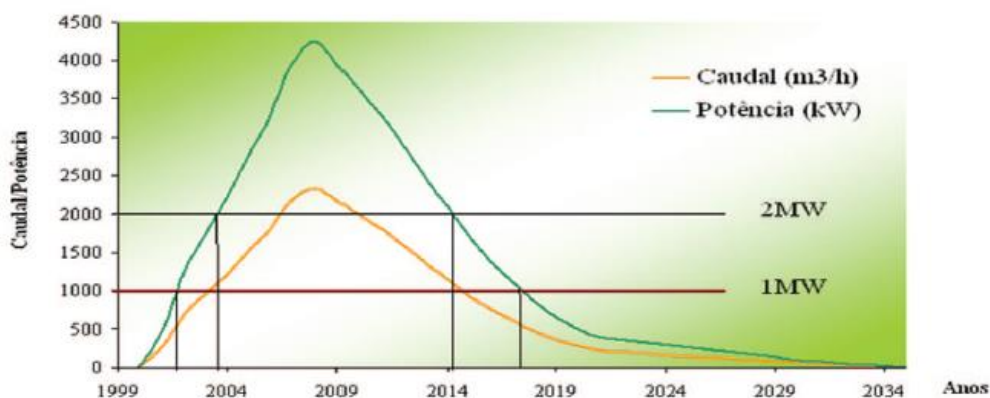


Figura 6.2 - Previsão de potência, aterro de Sermonde

A figura 6.2 apresenta o gráfico da previsão de potência para o aproveitamento do biogás no aterro sanitário de Sermonde (Suldouro, 2013).

A solução técnica adotada consistiu na instalação de poços de captação de biogás e condução do gás recolhido, por uma rede de tubagens, até uma unidade de cogeração para produção de energia elétrica e térmica. A eletricidade produzida pelos grupos geradores é exportada para a rede pública de eletricidade e parte do calor gerado é utilizado para o aquecimento de uma nave de separação de resíduos existentes nas instalações do aterro sanitário.

Em termos ambientais, o projeto tinha por objetivo contribuir para a redução das emissões de GEE para a atmosfera, nomeadamente, CO₂, NO₂ e CH₄. Segundo o mesmo estudo a utilização deste recurso endógeno junto do local de consumo permitia a redução das emissões de CO₂ em de cerca de 5.000 ton CO₂ eq/ano.

Através da análise económica foi estimado um tempo de recuperação de capital investido entre 2 e 3 anos, pelo que o projeto seria viável mesmo nos cenários mais pessimistas.

Face aos resultados obtidos, a Administração da Suldouro decidiu avançar para a conceção e execução de uma central de produção de energia a partir do biogás gerado no aterro. Assim, o primeiro grupo gerador, com uma potência de 1 000 kW, entrou em funcionamento em Setembro de 2004, com um investimento próximo dos 1,3 milhões de euros, em 2005 produziu cerca de 8,7 GWh, superando o valor previsto de 8 GWh/ano. Este valor representou uma redução de 4 176 ton CO₂. Tendo-se confirmado a previsão de produção de biogás, em Abril de 2007 entrou em funcionamento o segundo grupo gerador, também este com uma potência de 1 000 kW.

Na figura 6.3 apresenta-se a vista global dos dois grupos geradores da central de valorização energética do biogás de Sermonde.



Figura 6.3 – Central de valorização energética do biogás de Sermonde

No sentido de maximizar a captação de biogás e reduzir as emissões difusas, foram alterados alguns procedimentos, nomeadamente o aumento da rede de extração com incremento significativo do número de poços, reduzindo o raio de influência dos mesmos, assim como a depressão da extração; impermeabilização dos taludes e colocação de drenos sob o mesmo; instalação de um cais de descarga; ligação de caixas e estação elevatória de lixiviados à rede de drenagem, pois nestes locais verificava-se também a emissão de biogás.

Como consequência da maximização na captação do biogás, minimizaram-se as emissões difusas e consequentemente minimizou-se um problema ambiental (emissão

de GEE) e a emissão de odores que representa um problema social. Quanto ao aumento previsto para a produção de biogás as estimativas também estavam corretas.

Ao longo da exploração a Suldouro tem tentado otimizar a produção da eletricidade e reduzir as intervenções de manutenção. Neste sentido, investiu na formação interna e na procura de empresas locais para manutenção, aquisição de ferramentas específicas e de peças de reserva (velas, turbo, intercooler) e no recurso à tecnologia de manutenção condicionada como equipamentos para a análise de óleos, previamente à sua substituição.

Todas estas melhorias permitiram que em Abril de 2007 e Agosto de 2008 entrassem em funcionamento mais dois grupos geradores, cujo investimento foi totalmente assumido pela Suldouro, permitindo que em 2012 fosse produzido cerca de 35,98 GWh de energia elétrica proveniente do aproveitamento do biogás de aterro.

No gráfico apresentado na figura 6.4 pode-se observar a produção de eletricidade de 2008 a 2012 (Suldouro, 2013).

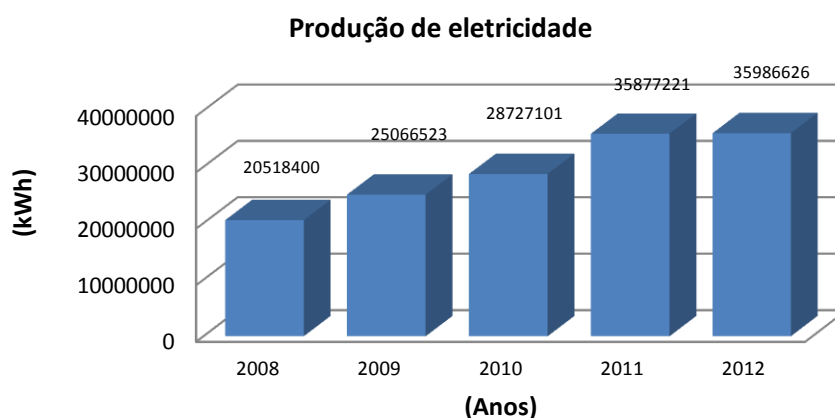


Figura 6.4 - Produção de eletricidade 2008-2012

(Fonte: Suldouro, 2013).

6.3 Maximização do aproveitamento energético

No caso dos gases de escape, que atingem uma temperatura da ordem dos 450°C, foi identificado um potencial de recuperação energética relevante. Após a análise das diversas tecnologias existentes e fabricantes disponíveis no mercado mundial, a que oferecia melhores rendimentos e maior fiabilidade foi a solução apresentada pela TRI-O-GEN, uma empresa Holandesa que está no mercado desde 2001, com fortes ligações ao meio universitário tendo apostado fortemente na investigação e

desenvolvimento desta tecnologia.

Estas instalações, figura 6.5, permitiram um maior rendimento dos equipamentos de produção de energia, poupando combustíveis, diminuindo a emissão de gases de efeito de estufa, e contribuindo para um aumento sustentável dos rendimentos dos produtores.



Figura 6.5 - Central ORC Tri-o-Gen instalada na Suldouro

A grande vantagem desta tecnologia prende-se com o facto de as temperaturas requeridas para tornar o método eficiente serem relativamente baixas. Com diferenças de temperatura, entre a fonte quente e fonte fria da ordem dos 38°C , sendo possível a produção de eletricidade. Neste caso, a instalação utiliza gases com temperaturas a rondar os 480°C e consegue uma produção média anual de 1 248MWh, correspondendo a um aumento 7% na produção de energia elétrica.

É apresentada na figura 6.6 o diagrama do sistema ORC implementado no aterro sanitário de Sermonde (TRI-O-GEN, 2013).

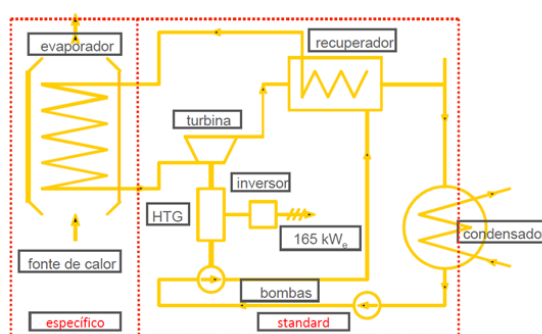


Figura 6.6 - Diagrama Sistema ORC TRI-O-GEN implementado

Na tabela 6.1 são apresentadas as características técnicas do sistema ORC implementado. A operacionalidade da unidade ORC é relativamente simples, não necessitando de supervisão constante (TRI-O-GEN, 2013).

Tabela 6.1 - Características Técnicas do Sistema ORC

Sistema	
Fluido de Trabalho	Tolueno
Temperatura de entrada gás seco	>350°C
Potência térmica	450 - 900 kW _{th}
Arrefecimento (condensação)	Água 350 - 700 kW _{th}
Temperaturas arrefecimento	35 >55° C
Componentes	
Evaporador	Permuta direta, sem circuito intermédio
Turbina	Estádio único 28000 rpm , 55 kg
Lubrificante	Tolueno
Performance	
Potência elétrica (bruta)	165 kWe (rendimento 13-18%)
Potencia elétrica (Líquida)	155 kWe (rendimento 11- 17,5%)

6.4 Estudo da viabilidade tecnológica do ORC

Verificado o potencial de recuperação energética relevante no caso dos gases de escape neste ponto proceder-se-á ao estudo da viabilidade técnica do sistema ORC. Para a análise e simulação do desempenho é assumido que o sistema funciona em regime permanente, a queda de pressão nos tubos e perdas de calor para o ambiente no evaporador, condensador, turbina e bomba são negligenciáveis, devido às irreversibilidades termodinâmicas que ocorrem em cada um dos principais componentes, tais como expansão não-isentrópica, compressão não-isentrópica e transferência de calor com diferenças de temperaturas finitas.

6.4.1 Método aplicado

A configuração do sistema incidirá no ORC com recuperador de calor, conforme explicitado no ponto 5.4.2. Para a seleção da configuração foi considerado o diagrama apresentado pela TRI-O-GEN, sendo o respetivo diagrama esquemático apresentado na figura 6.6.

Para avaliação do potencial de recuperação energética nos gases de escape e o desempenho termodinâmico do ciclo ORC, foi desenvolvido um programa em *MATLAB*. O programa tem a opção de utilização de diferentes fluidos e as propriedades físicas

dos mesmos é disponibilizado por um programa chamado *CoolProp* sendo chamado como uma sub-rotina de dentro do *MATLAB*, retornando um ou mais valores a partir de dois valores de entrada (por exemplo, a entalpia e entropia como valores de entrada obtém-se a temperatura, pressão, etc.). Apresenta-se no anexo A1 o *m-file* do programa para o cálculo dos parâmetros do ORC.

Apresenta-se a seguir o na figura 6.7 o fluxograma representativo do processo de cálculo.

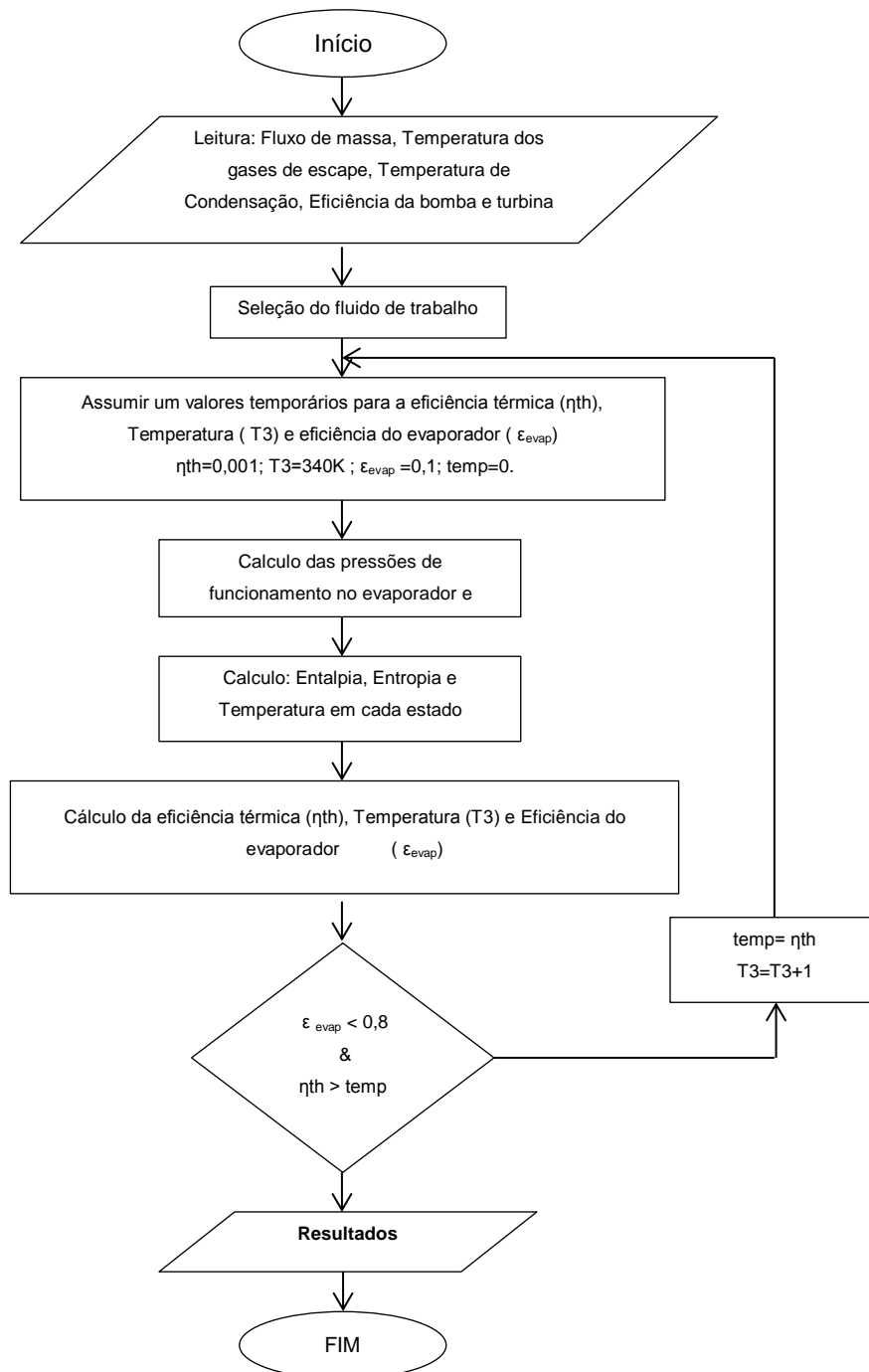


Figura 6.7 – Fluxograma representativo do processo de cálculo

O desempenho da instalação é avaliado de acordo o método de cálculo explicitado no ponto 5.3. Para a análise e simulação do sistema ORC foram consideradas os seguintes dados:

- A diferença de temperatura no evaporador foi assumida de 8°C;
- A temperatura de condensação é considerada como 35°C a qual corresponde à temperatura mínima e à pressão de condensação P_1 ;
- A temperatura mais elevada do ciclo ocorre na admissão da turbina T_3 , e a pressão mais elevada no ciclo é a pressão do evaporador P_2 ;
- A temperatura na saída do recuperador de calor no lado da baixa pressão é 5°C mais elevada do que a temperatura à saída da bomba, ou seja $T_{4a} - T_2 = 5^\circ\text{C}$;
- As eficiências isentrópicas para a turbina e para a bomba estão assumidas de 85% e 60%, respetivamente.

6.4.2 Programa Informático

Apresenta-se e explica-se de seguida a estrutura gráfica, o seu funcionamento e os aspetos mais importantes inerentes ao programa. Na figura 6.8 apresenta-se a interface gráfica do programa desenvolvido para a análise e simulação do sistema ORC.

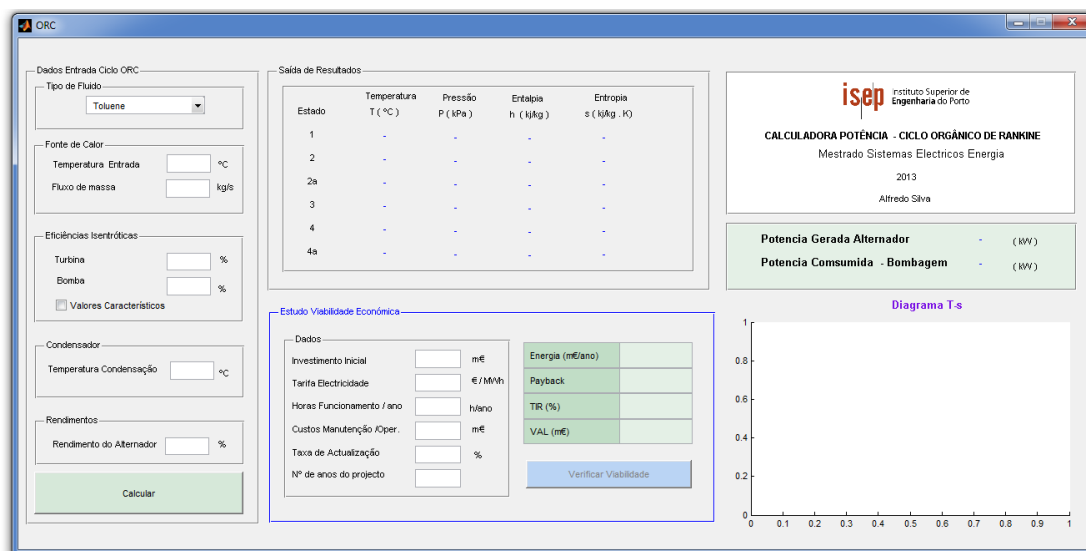


Figura 6.8 - Ecrã Inicial do programa

O programa permite ao utilizador inserir os parâmetros necessários, designados como *inputs*, e no mesmo ambiente obter os resultados, outputs. Cada parâmetro está

identificado de forma objetiva, seguido do respetivo campo, onde o utilizador deverá inserir o respetivo valor.

Na figura 6.9 é demarcado a azul os dados de entrada do sistema. O utilizador começa com a seleção do fluido de trabalho do ciclo continuando com inserção da temperatura da fonte calor, e o fluxo de massa.

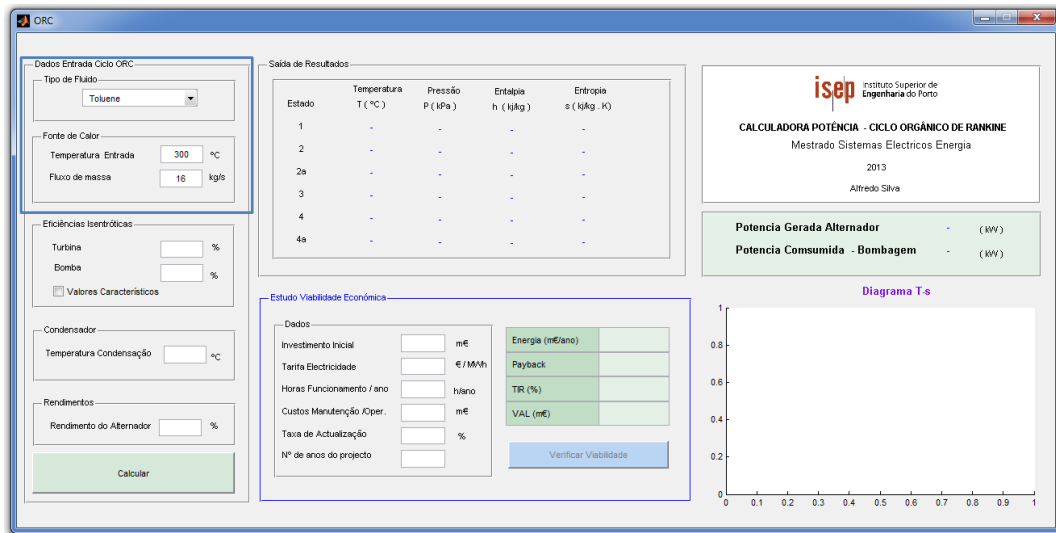


Figura 6.9 - Seleção do fluido de trabalho e características da fonte de calor.

Na figura 6.10 define-se as eficiências isentrópicas características da turbina e da bomba. Se o utilizador não for conhecedor destes valores poderá selecionar “valores característicos”.

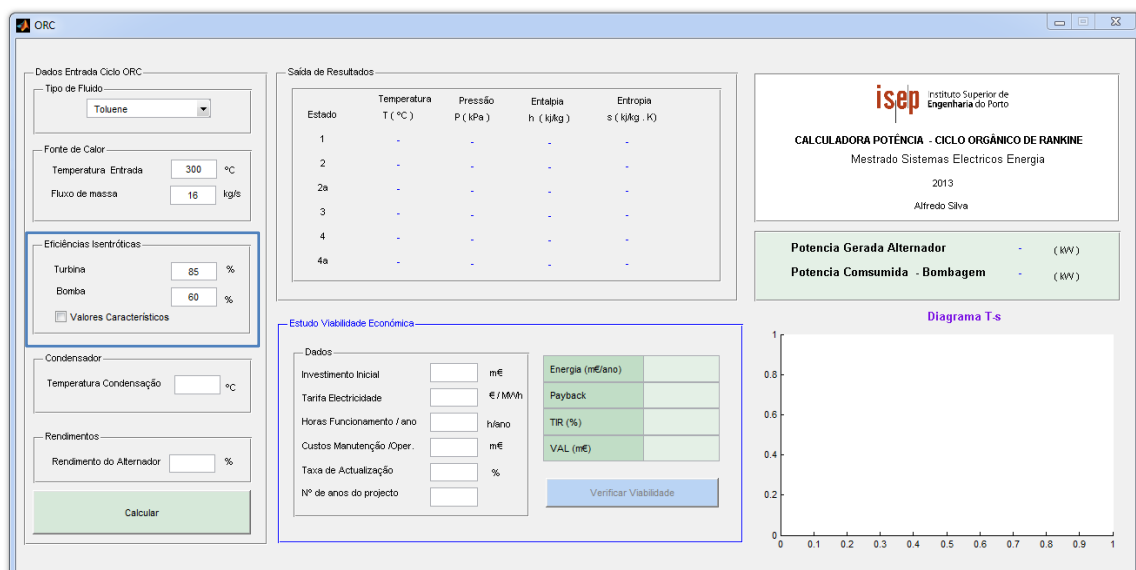


Figura 6.10 - Eficiências isentrópicas

Na figura 6.11 deverá ser indicada qual a temperatura de condensação, sendo esta a temperatura mínima do ciclo a qual corresponderá também à pressão mais baixa. Seguindo-se a definição do rendimento do alternador. Após estes dados estarem inseridos poder-se-á avançar para o cálculo, efetuando o *click* no botão calcular.

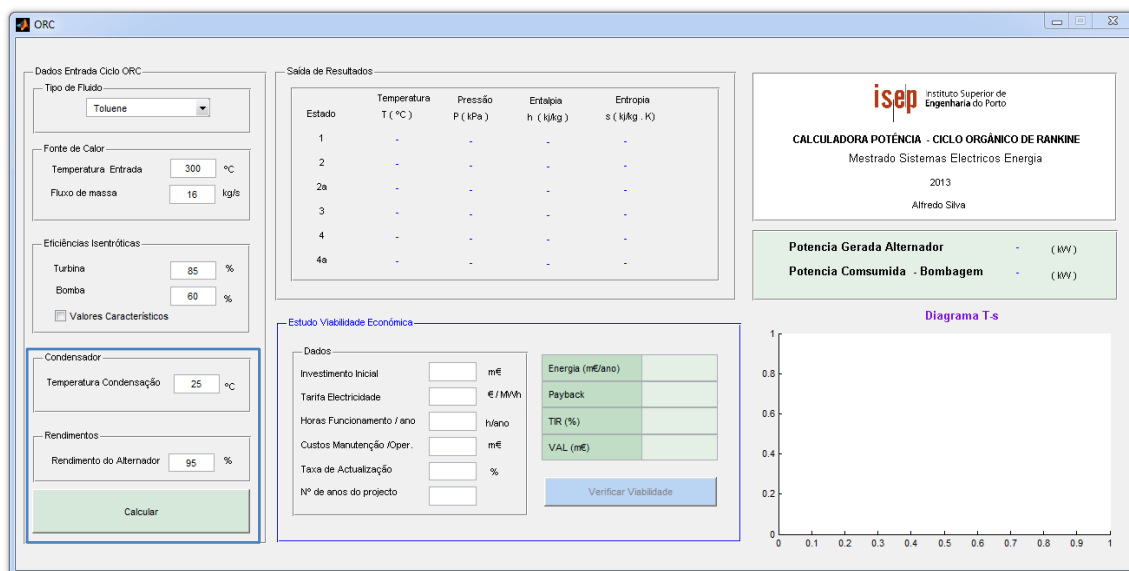


Figura 6.11 - Temperatura condensação, rendimento alternador

Reforçando o método e explicitando o recurso utilizado, é possível observar na figura 6.12, os resultados do ciclo, num quadro são apresentadas as temperaturas, pressões, entalpia e entropia para cada um dos estados do ciclo. No outro quadro, figura 6.13 pode consultar-se a potência gerada no alternador e a potência consumida pela bomba, responsável pela bombagem do fluido, é ainda apresentado o gráfico de temperatura entropia (T-s).

Estado	Temperatura T (°C)	Pressão P (kPa)	Entalpia h (kJ/kg)	Entropia s (kJ/kg · K)
1	30	4.8944	-149.693	-0.436203
2	31.2783	1897.28	-146.017	-0.436203
2a	91.0553	1897.28	-37.1872	-0.436203
3	258.85	1897.28	565.388	1.16258
4	117.99	4.8944	376.341	1.25047
4a	36.2783	4.8944	267.511	1.16258

Figura 6.12 - Saída de resultados

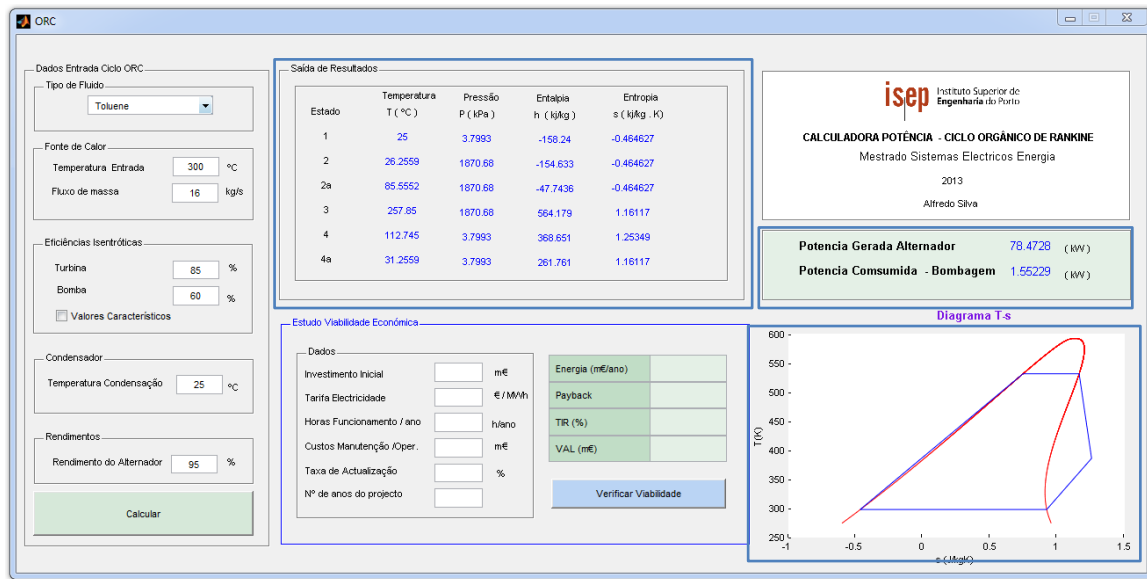


Figura 6.13 - Programa – apresentação de resultados

O programa tem ainda como output a representação esquemática do ciclo onde são apresentadas as pressões e temperaturas em cada ponto do ciclo o calor de entrada no evaporador e calor rejeitado no condensador para a temperatura dos gases de escape e fluxo de massa indicados. Podendo ainda ser consultado o trabalho na turbina e na bomba.

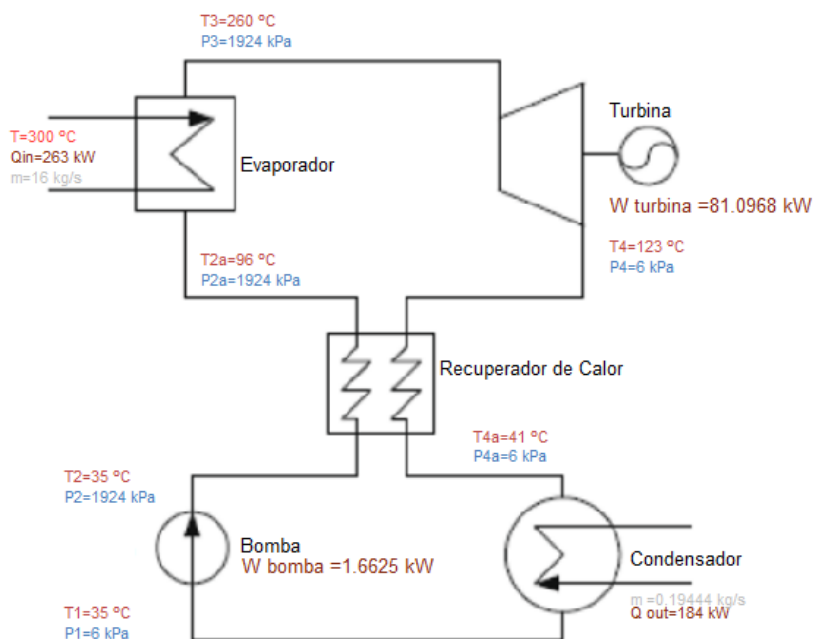


Figura 6.14 - Output representação esquemática do ciclo

6.4.3 Apresentação de resultados.

Baseado em todas as considerações e formulações descritas apresenta-se a seguir os resultados obtidos para o fluido *toluene*.

Na figura 6.15 é apresentada as temperaturas e pressões em cada ponto do ciclo bem como o trabalho realizado pela turbina e bomba, o calor de entrada no evaporador e calor rejeitado no condensador para uma temperatura dos gases de escape de 300° C e um fluxo massa de 16 kg/s.

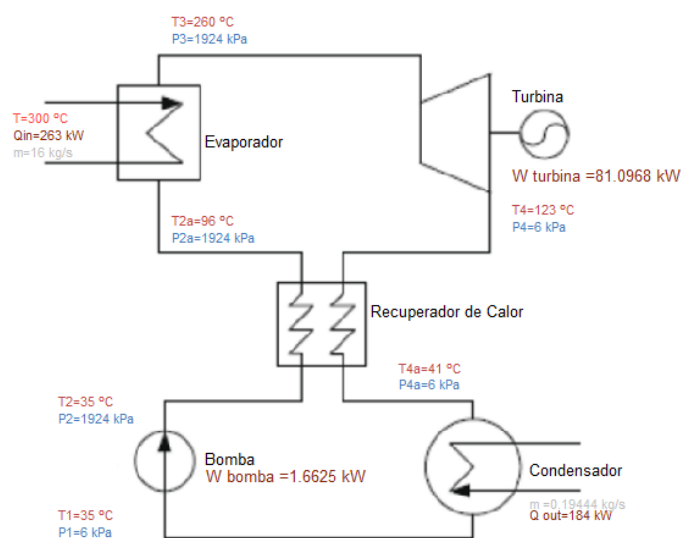


Figura 6.15 - Características do ciclo - toluene

Como se pode observar obtém-se para o exemplo um trabalho na turbina de 81,1 kW, colocando em evidência a recuperação energética do sistema ORC.

Na tabela 6.2 é apresentado os principais parâmetros característicos obtidos para o ciclo termodinâmico como a temperatura, pressão, entalpia, entropia para cada um dos estados.

Tabela 6.2 - Principais parâmetros característicos do ciclo termodinâmico

Estado	Temperatura T (°C)	Pressão P (Kpa)	Entalpia h (kJ/kg)	Entropia h (kJ/kg)
1	35	6,2	-141	-0,407
2	36,3	1924	-137	-0,407
2a	96,4	1924	-26,7	-0,407
3	259,8	1924	566	1,16
4	123,1	6,2	383	1,24
4a	41	6,2	273	1,16

Na tabela 6.3 apresenta-se os resultados obtidos no ciclo termodinâmico em função da variação da temperatura dos gases de escape para um fluxo de massa de 15 kg/s.

Tabela 6.3 – Características do ciclo em função da temperatura dos gases de escape

Temperatura (°C)	Q in (kW)	Q out (kW)	W Bomba (kW)	W Turbina (kW)
150	182	156	0,059	25,8
200	193	159	0,12	34,7
250	230	168	0,79	63,1
300	263	184	1,66	81,1
350	262	178	2,8	86,6
400	276	187	3,17	91,3
450	288	196	3,3	95,6

Na figura 6.16 apresenta-se os resultados obtidos da potência gerada em função da temperatura dos gases de escape para um fluxo de massa de 15 kg/s.

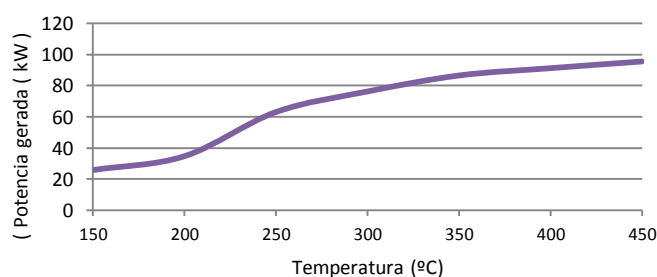


Figura 6.16 – Potência gerada em função da temperatura

Podemos observar que a baixas temperaturas a subida da temperatura não apresenta grandes variações, na potência gerada no entanto para temperaturas entre os 200 °C e os 300 °C a temperatura dos gases apresenta uma grande influência na potência gerada

Na figura 6.17 o calor recuperado pelo ciclo em função da temperatura dos gases de escape para um fluxo de massa de 15 kg/s.

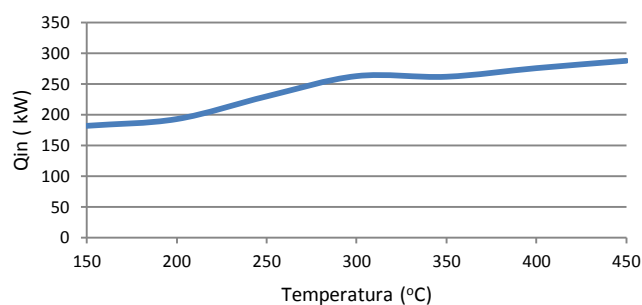


Figura 6.17 – Calor de entrada no ciclo em função da temperatura dos gases de escape

Na figura 6.18 pode-se verificar a evolução da potência gerada em função do fluxo de massa, a temperatura constante de 400°C.

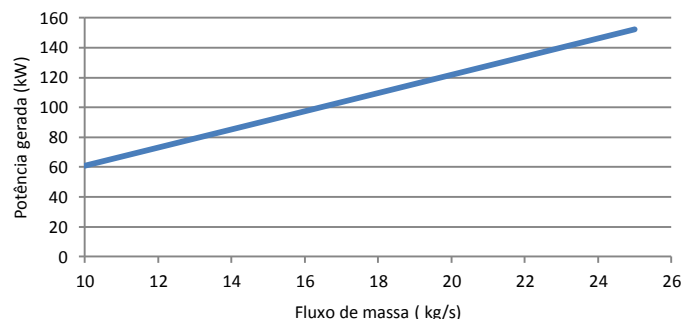


Figura 6.18 - Potência gerada em função do fluxo de massa

Como se pode observar o fluxo de massa apresenta uma grande influência na potência gerada na turbina.

Na figura 6.19 é apresentado o gráfico representativo da potência gerada em função do rendimento isentrópico da turbina. Onde se pode verificar a influência da eficiência isentrópica

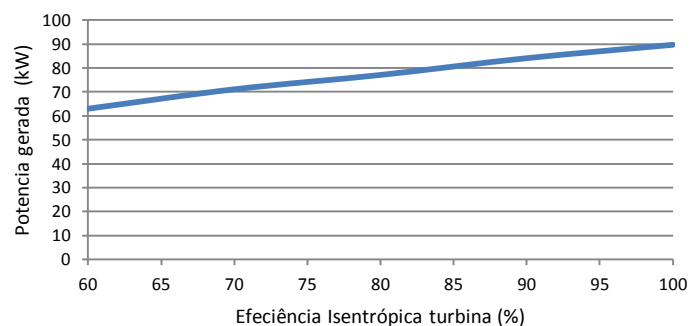


Figura 6.19 – Potência gerada em função da eficiência da turbina.

. Conforme explicitado no ponto 5.2.3 uma questão a considerar nos ORC é a de se avaliar qual o fluido de trabalho. Esta questão levanta-se, em particular, para fontes térmicas de temperatura média sendo o fluido utilizado um fator importante que afeta o rendimento do ORC. Neste sentido foram testados vários fluidos de trabalho no sistema ORC para temperatura dos gases de 120°C e fluxo de massa de 20 kg/s.

Na figura 6.20 é apresentado o diagrama esquemático do ciclo com indicação das temperaturas e pressões em cada ponto, o trabalho realizado pela turbina e bomba, o calor de entrada no evaporador e calor rejeitado no condensador para o fluido de trabalho RF 245 fa

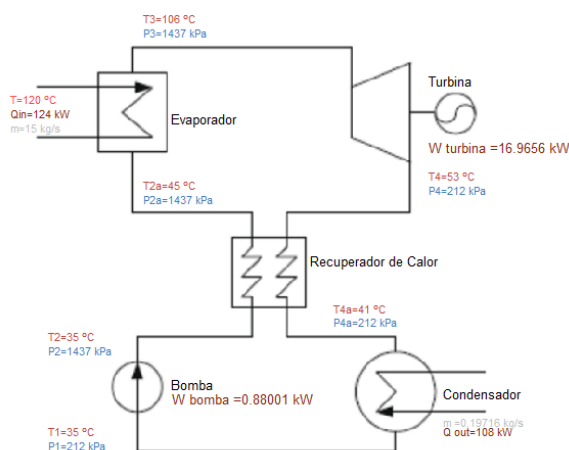


Figura 6.20 - Características do ciclo - rf245 fa

Na tabela 6.4 é apresentado os principais parâmetros característicos obtidos para o ciclo termodinâmico como a temperatura, pressão, entalpia, entropia para cada um dos estados.

Tabela 6.4 - Principais parâmetros característicos do ciclo termodinâmico

Estado	Temperatura T (°C)	Pressão P (Kpa)	Entalpia h (kJ/kg)	Entropia h (kJ/kg)
1	35,0	211	245,8	1,16
2	35,9	1437	247,8	1,16
2a	44,5	1437	258,9	1,16
3	105	1437	477,5	1,79
4	52,7	211,7	447,4	1,81
4a	40,9	211,7	435,9	1,79

Na figura 6.21 apresenta-se os resultados obtidos da potência gerada em função da temperatura dos gases.

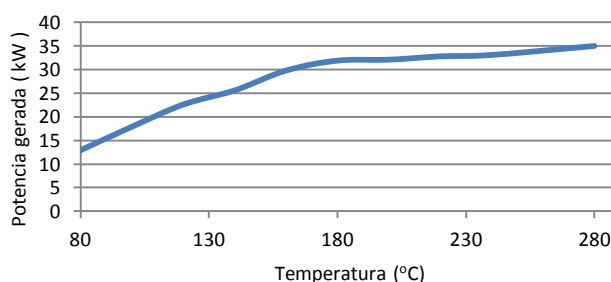


Figura 6.21 – Potência gerada - rf245 fa

Na figura 6.22 é apresentado o diagrama esquemático do ciclo com indicação das temperaturas e pressões em cada ponto, o trabalho realizado pela turbina e bomba, o calor de entrada no evaporador e calor rejeitado no condensador para o fluido de trabalho R 227 ea

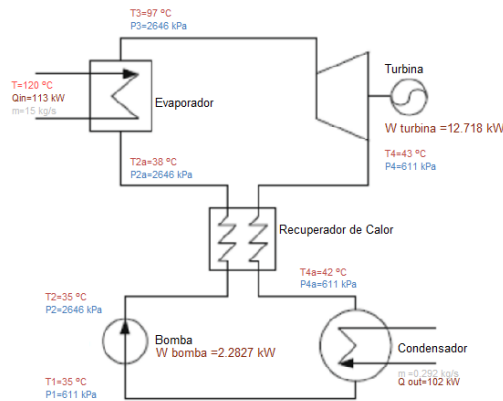


Figura 6.22 - Características do ciclo – R 227 ea

Na tabela 6.5 é apresentada os principais parâmetros característicos obtidos para o ciclo termodinâmico como a temperatura, pressão, entalpia, entropia para cada um dos estados.

Tabela 6.5 - Principais parâmetros característicos do ciclo termodinâmico

Estado	Temperatura T (°C)	Pressão P (Kpa)	Entalpia h (kJ/kg)	Entropia h (kJ/kg)
1	35,0	610	37,4	0,36
2	37,1	2646	39,9	0,36
2a	37,1	2646	40,8	0,36
3	96,8	2646	164,7	0,72
4	43,1	610	150,7	0,73
4a	42,1	610	149,7	0,72

Na figura 6.23 apresenta-se os resultados obtidos da potência gerada em função da temperatura dos gases.

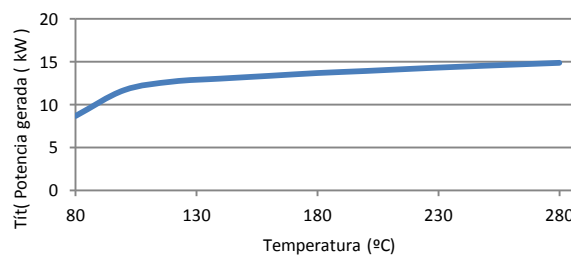


Figura 6.23 – Potência gerada – R 227 ea

Após comparação dos resultados obtidos para cada um dos fluido é possível constatar que o R245 fa apresenta melhores performances que o R 227ea para as condições definidas para o ciclo.

6.5 Critérios de avaliação e de decisão de investimento

A avaliação económico-financeira constitui-se como um estudo de apoio à tomada de decisões por parte do investidor e dos financiadores do projeto, ponderando as despesas e as receitas do projeto de forma a aferir da rentabilidade em termos de mercado.

De forma a evitar a dependência da medida de rentabilidade do projeto do procedimento contabilístico adotado, utiliza-se como medida de rentabilidade do projeto o cash-flow.

O projeto de investimento será avaliado pela sua capacidade de remunerar os capitais investidos. Desta forma, a estimativa dos cash-flows, enquanto base de análise do projeto de investimento, constitui um dos fatores críticos de sucesso na sua fase de implementação.

Existem diversos critérios, que podem ser adotados para a avaliação do projeto de investimento, sendo que na avaliação aqui realizada, os critérios de decisão adotados sobre a implementação ou a não implementação deste projeto foram o VAL, o PRI e a TIR, que são medidas de rentabilidade associadas ao cash-flow.

6.5.1 Valor Atual Líquido (VAL).

O VAL é considerado pela maioria dos manuais de avaliação financeira de projetos, como o critério de avaliação mais consistente, definindo-se por ser o excedente do acumulado dos fluxos líquidos de tesouraria, ou cash-flows de exploração atualizados, calculados para todo o tempo de vida útil do investimento, subtraídos do montante de capital investido, ou seja, é o somatório dos cash-flows líquidos atualizados.

$$VAL = -Investimento + (Receita - Despesa) * \left[\frac{(1 + a)^n - 1}{a * (1 + a)^n} \right] \quad (6.1)$$

Assim, considera-se que o projeto é rentável quando o VAL é positivo à taxa de atualização escolhida, significa que o projeto é totalmente recuperado, que já inclui um prémio de risco e ainda é criado um excedente monetário relativamente ao investimento inicial, em valores atuais. De acordo com este critério adotado, quando o VAL é maior que 0 (zero) o projeto é implementável e quando o VAL é menor que 0 (zero), o projeto é rejeitado.

A escolha da taxa de atualização dos cash-flows, teve em conta o custo de oportunidade de investir num determinado projeto em detrimento de outro. Para o efeito de cálculo considerou-se a média de evolução da taxa de inflação nos últimos anos.

A tabela 6.6 traduz a evolução da taxa de inflação em Portugal desde 2005.

Tabela 6.6 – Taxa de inflação em Portugal 2005-2012

Ano	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Taxa	2,28	3,11	2,45	2,59	-0,83	1,4	3,65	2,77

(6.2)

$$TI = \frac{\sum_{2012}^{2005} \text{Pecentage}}{8} = 2,2 \%$$

6.5.2 Período de Recuperação do Investimento

Para o cálculo do PRI, efetua-se a acumulação dos cash-flows líquidos e atualizados, sendo que o momento em que o seu valor acumulado passa de negativo a positivo, e o momento que representa o período previsto de recuperação do capital investido.

(6.3)

$$PRI = \frac{\text{Investimento total}}{\text{Receita Anual} - \text{Despesas Anuais}}$$

A partir do momento em que se recupera o investimento (PRI), a entidade começa a acumular excedentes líquidos, que se traduzem no VAL no final do último ano.

6.5.3 Taxa Interna de Rentabilidade do Projeto

Para além de se saber se o investimento no projeto é recuperável e em quanto tempo e recuperável, pode-se saber através da TIR qual a taxa de remuneração a que o capital investido será sujeito.

A TIR é a taxa de atualização dos cash-flows líquidos do projeto que dá o VAL nulo, ou seja, chama-se TIR de um projeto, a taxa para o qual o VAL é nulo.

A TIR é a taxa a que o investidor obtém em média em cada ano sobre os capitais que se mantem investidos no projeto, enquanto o investimento inicial é recuperado progressivamente.

(6.4)

$$0 = -Investimento + (Receita - Despesa) * \left[\frac{(1 + TIR)^n - 1}{a * (1 + TIR)^n} \right]$$

O critério de decisão adotado, consiste na implementação do projeto, sempre que a TIR seja superior à taxa de atualização utilizada no VAL, caso contrário não se deverá investir.

6.5.4 Prossupostos

O valor da tarifa da energia está diretamente conectado com as receitas anuais obtidas com a venda da energia elétrica produzida à rede nacional. Neste sentido a tarifa foi determinada tendo em conta a média, dos últimos oito anos, dos custos médios anuais para a tecnologia em questão (ERSE, agosto 2013).

Tabela 6.7 - Custo médio anual por tecnologia (€/MWh)

	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Outra Coger.	91,4	103,0	100,1	121,6	97,8	104,2	118,9	132,8
Coger. Renov.	78,1	85,4	85,4	90,4	89,8	90,5	95,1	99,7
Biogás	94,9	106,2	105,7	109,0	106,4	107,2	110,5	115,5
Fotovoltaica	542,0	379,7	330,2	338,5	327,4	330,2	343,7	346,3
Hídrica PRE	81,5	84,3	88,6	88,7	87,5	88,6	91,4	93,9
Biomassa	102,1	110,3	109,9	111,9	110,1	108,1	112,9	116,1
RSU	74,7	76,9	78,2	80,9	80,3	80,8	84,0	85,8
Eólica	88,8	92,0	94,5	94,7	93,7	91,6	93,5	96,6

(6.5)

$$Tarifa = \frac{\sum_{2005}^{2012} RSU(\text{€/MWh})}{8} = 80,2\text{€/MWh}$$

Atendendo ao tipo de tecnologia o seu tempo de funcionamento é considerado em 24 horas por dia e 365 dias por ano perfazendo um total de 8.760 h/ano de funcionamento. No entanto somente foram consideradas 8500h/ano pois foi ponderada a paragem de 260 h/ano para manutenção.

Para proceder à análise económica do projeto assume-se ainda os seguintes pressupostos:

- Valor investimento (ex.): € 600.000,00
- Produção bruta: 160 kWe
- Horas de produção: 8.500 h/ano
- Vida útil do equipamento: 15 anos
- Manutenção: € 3.000,00 /ano

6.5.5 Ferramenta informática de auxílio à avaliação e de decisão de Investimentos

De forma a facilitar o processo de cálculo e minimizar o erro foi implementado na ferramenta informática um setor no programa que permite obter de forma prática os três indicadores económicos extremamente influentes no que se refere à tomada de decisão, o Valor Atual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) e o Período de Recuperação do Investimento (PRI ou Payback), segundo o método explicitado anteriormente.

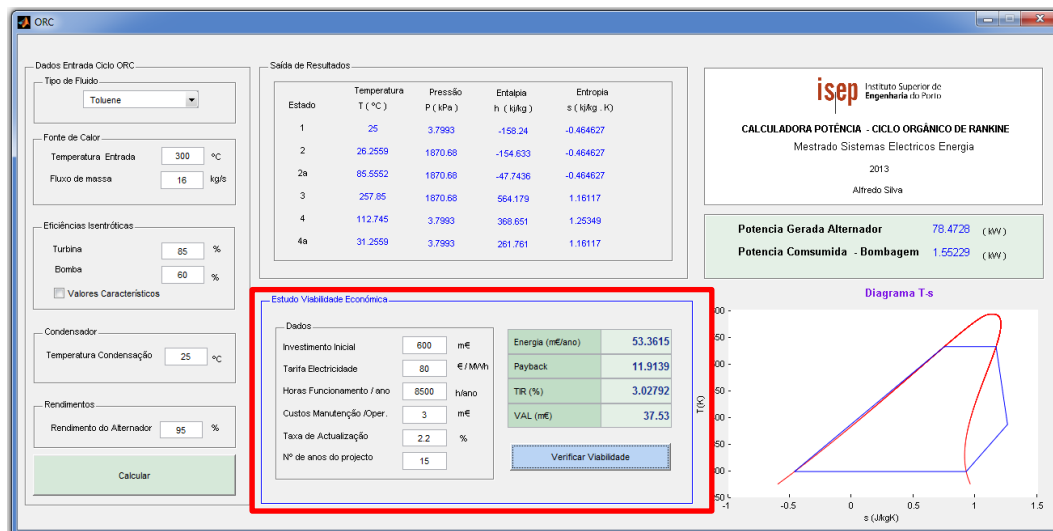


Figura 6.24 - Estudo de viabilidade económica

6.5.6 Análise de resultados.

O cálculo do VAL, do PRI e da TIR do projeto do sistema ORC encontra-se apresentado na tabela 6.7.

Tabela 6.8 - VAL, PRI, TIR do projeto

Valor Atual Líquido (VAL)	660 990 €
Período de Recuperação do Investimento (PRI)	6 anos
Taxa Interna de Rendibilidade (TIR)	14,4%

De acordo com os cálculos apresentados nas tabelas 6.6 e 6.7, tendo-se utilizado o somatório dos cash-flows líquidos, prevê-se que o projeto tenha um VAL positivo de 660 990€, o que significa que o projeto é rentável e portanto este critério de avaliação financeira aponta para a decisão de investir.

Segundo o PRI, o investimento é recuperado durante o ano N+5, ou seja, durante o 6^o ano. Presumindo que cada cash-flow aparece linearmente ao longo de cada período, podemos dizer que a altura aproximada em que se recupera totalmente o investimento inicial do projeto, de acordo com o cálculo é aproximadamente 6 anos.

Em relação a TIR e de acordo com os cálculos efetuados, constata-se que o capital investido na central ORC renderá a uma taxa de 14,4%, ou seja, conclui-se do ponto de vista deste critério de avaliação financeira, que a TIR é superior a taxa utilizada no cálculo do VAL, pelo que o investimento deverá ser realizado.

6.6 Análise de risco

6.6.1 Incerteza do projeto.

Em relação a outros sistemas de produção de energia, a central de recuperação de calor com aproveitamento com ORC têm a vantagem de evitar os custos de aquisição de combustível, bem como a incerteza no seu preço.

A partir do momento em que os custos totais de investimento e os custos de operação e manutenção são estimados com base na potência da central, os resultados operacionais podem ser calculados com base na redução da fatura energética, nomeadamente com a redução do custo de aquisição de energia elétrica à rede ou mesmo a venda da mesma à rede, ao abrigo da legislação da cogeração.

A estimativa do custo total do investimento da central de recuperação de calor e a sua integração com a instalação existente constitui um desafio devido a diversos

constrangimentos. Entre eles elencam-se os que desempenham um papel chave no sistema de recuperação de calor e que acrescentam um grau de incerteza ao projeto:

- Energia térmica disponível;
- Temperatura e tipo do vetor energético utilizado;
- Temperatura e tipo da fonte fria (ar ou água);
- Fluido de trabalho;
- Aspectos particulares do ciclo termodinâmico.

Temos ainda que o custo dos permutadores de calor está intimamente relacionado com as propriedades dos gases de exaustão - temperatura, teor de partículas, presença de poluentes agressivos – que influenciam a superfície de permuta, seleção do material a utilizar, geometria e, conseqüentemente, custo final do equipamento.

A avaliação da rentabilidade do projeto de investimento, nomeadamente, através dos indicadores financeiros VAL, PRI e TIR tem como base um cenário previsional que se estima que venha a ocorrer no futuro.

Contudo, sendo uma previsão futura não se tem certezas sobre a verificação de que determinado acontecimento ocorra exatamente como foi estimado.

Aliás, a probabilidade do cenário previsto ocorrer exatamente como foi estimado é teoricamente nula e, assim sendo, torna-se importante analisar o comportamento desses indicadores de rentabilidade quando confrontados com possíveis alterações de cenário.

6.6.2 Análise de sensibilidade.

A análise de sensibilidade serve essencialmente para verificar o comportamento dos indicadores de avaliação do projeto de investimento, perante a alteração das variáveis do projeto.

Foram efetuadas variações percentuais no preço da venda de energia à rede, nos custos de manutenção, na energia gerada ao longo do ano, de forma a poder avaliar-se o impacto em termos da sua rentabilidade, nomeadamente, o seu impacto nos indicadores VAL PRI e TIR.

Os comportamentos dos indicadores de rentabilidade, perante o cenário de variações da tarifa de venda da energia à rede ao abrigo da legislação da cogeração encontram-se apresentados na tabela 6.9.

Tabela 6.9 - Cenário de variação da tarifa de venda de energia à rede.

Cenários		Variações (%)	VAL (€)	PRI (anos)	TIR (%)
Tipo	Nº				
Cenários Alternativos	1	-30%	265 983	8,7	7,60
	2	-20%	395 120	7,6	9,93
	3	-10%	524 257	6,8	12,2
Cenário base	4	0%	653 395	6,1	14,3
Cenários Alternativos	5	10%	790 888	5,4	16,4
	6	20%	920 785	4,9	18,4
	7	30%	1 050 680	4,6	20,3

Verifica-se que mesmo que a tarifa de energia tenha uma variação negativa de 30 % o projeto apresenta um VAL positivo de 265 983€, portanto este critério de avaliação financeira continua a apontar para a decisão de investir.

O comportamento dos indicadores de rentabilidade, perante o cenário de variação do tempo de funcionamento (horas/ano) encontra-se apresentado na tabela 6.10.

Tabela 6.10 - Cenário de variação do tempo de funcionamento por ano.

Cenários		Variações (%)	VAL (€)	PRI (anos)	TIR (%)
Tipo	Nº				
Cenários Alternativos	1	-30	265 983	8,7	7,6
	2	-25	330 552	8,1	8,8
	3	-20	395 120	7,6	9,94
	4	15	459 689	7,2	11,1
	5	-10	524 257	6,7	12,2
	6	-5	588 826	6,3	13,3
Cenário base	7	0	653 395	6,1	14,3

Verifica-se que mesmo que a produção de energia tenha uma variação negativa de 30 % a avaliação financeira continua a apontar para a decisão de investir.

O comportamento dos indicadores de rentabilidade perante o cenário de variação nos custos de manutenção é apresentado na tabela 6.11.

Tabela 6.11 - Cenário de variação dos custos de manutenção.

Cenários		Variações (%)	VAL (€)	PRI (anos)	TIR (%)
Tipo	Nº				
Cenários Alternativos	1	50	265 983	6,15	13,9
	2	40	638 496	6,13	14,0
	3	30	642 294	6,11	14,1
	4	20	646 092	6,09	14,1
	5	10	649 890	6,07	14,2
Cenário base	7	0	653 395	6,1	14,3

Verifica-se que mesmo que os custos de manutenção tenham uma variação de 30 % a avaliação financeira continua a apontar para a decisão de investir.

7 CONCLUSÕES

7.1 Análise conclusiva

Nas últimas décadas o consumo de energia teve um aumento exponencial e é expectável que continue a aumentar nas próximas décadas daí a importância da concentração de esforços que solucionem algumas questões em aberto e que traduzam um equilíbrio entre a proteção ambiental e as necessidades de cada um, sendo necessária uma convergência sistemática para uma política energética eficiente, coerente e globalizante.

São assim necessárias novas tecnologias de conversão de energia que aproveite os recursos energéticos apropriados para a conversão de eletricidade, sem causar danos ambientais.

O investimento no aproveitamento do biogás apresenta grandes vantagens. Primeiro, diminui as emissões de gases com efeito de estufa, porque o metano constituinte do biogás é destruído através da combustão nos grupos geradores. Segundo, o biogás de aterro constitui um recurso energético passível de ser aproveitado, como combustível, em grupos moto geradores, para produzir eletricidade ou para produzir energia térmica, de origem renovável.

No estudo levado a cabo no aterro Sermonde foi possível apurar um aumento de eletricidade a partir da mesma quantidade de energia primária, gás metano, na ordem dos 7 %, verificando-se ao mesmo tempo uma redução da emissão de CO₂ de 700 ton por ORC por ano. O que implica uma maximização do aproveitamento energético proveniente do biogás.

Na análise de viabilidade económica foi traçado um cenário tendo em conta a previsão de produção de biogás estimando um regime de funcionamento de 8500 horas/ano e uma tarifa para a energia calculada com base na média dos últimos oito anos de 80€/MWh para RSU, para o cálculo da receita anual. Neste cenário e considerando um tempo de vida útil para o equipamento de 15 anos obteve-se um VAL de 660 990 € e uma TIR de 14,1%. Face aos resultados globais obtidos, conclui-se que o projeto apresenta rentabilidade. Na análise de sensibilidade foi verificado que mesmo com um decréscimo de produção de 30 % na produção a nível anual o projeto apresenta rentabilidade.

Para avaliação do potencial da recuperação energética dos gases de escape é avaliado o desempenho termodinâmico do ciclo ORC. Para tal foi desenvolvida uma ferramenta em *MATLAB* utilizando como modelo a configuração do ORC com recuperador de calor. O cálculo das propriedades termodinâmicas dos fluidos foi obtido através da criação de uma sub-rotina que chama o programa *CoolProp*. Este programa restitui propriedades como a entalpia, entropia, pressões e temperaturas em cada ponto do ciclo, permitindo assim ao utilizador otimizar o tempo na obtenção de resultados.

A utilização dos sistemas ORC e os seus benefícios não se esgotam na maximização dos aproveitamentos da valorização energética em aterros sanitários. Também na recuperação de calor para a produção de energia elétrica pode ter um impacto importante em muitos setores intensivos de energia, contribuindo, significativamente, para a redução do consumo e aumentando a eficiência de todo o processo de produção, sendo hoje em dia considerado na Europa e nos Estados Unidos um processo promissor de conversão de energia térmica de baixa e média temperatura em eletricidade.

O sucesso desta tecnologia é em parte explicado pelo tipo de construção modular, permitindo que o mesmo sistema partilhe várias fontes de calor. Este sucesso é reforçado pela maturidade da tecnologia da maioria dos seus componentes, devido ao seu amplo uso na indústria da refrigeração.

7.2 Trabalhos futuros

No âmbito do trabalho realizado, melhorias acrescidas poderiam ser feitas tanto ao nível do modelo e programa computacional como da análise realizada para o tema em estudo.

No modelo e programa computacional poder-se-á implementar as seguintes melhorias:

- Implementar uma barra de ferramentas com os botões de guardar, imprimir e ajuda, que permita ao utilizador aprender a utilizar o programa;
- Criar a opção de leitura de registos de temperaturas e fluxos de massa através de outros registos informáticos.

Com base na pesquisa realizada sobre o assunto tratado ao longo deste trabalho, a análise efetuada para tal poderia ser acrescida de algumas melhorias, mediante as seguintes sugestões:

- Aplicar outros métodos de otimização da eficiência do sistema, por exemplo implementar o ciclo ORC com recuperador, pré-aquecedor e superaquecedor.

Referências Bibliográficas

Brandão, Sérgio da Silva. Cogeração, 2004

Balanço Energético Sintético. DGEG, 2012

Ciclos Orgânicos de Rankine, Cogen, Dezembro 2011

Cesar Adolfo Rodriguez Sotomonte, Carlos Eymel Camposb, Marcio Lemec, Electo Silva Lorad, Osvaldo Jose Venturinee: "Thermoeconomic Analysis of Organic Rankine Cycle Cogeneration for Isolated Regions in Brazil", 1997

Decisão 406/2009/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009

Decreto-Lei 23/2010 de 25 de Março

Decreto-Lei n.º 118/2006 de 21 de Junho.

Decreto-Lei n.º 178/2006 de 5 de Setembro.

Decreto-Lei n.º 183/2009, de 10 de Agosto,

Decreto-Lei n.º 276/2009 de 2 de Outubro.

Decreto-Lei nº 239/97, de 9 de setembro,

Decreto-lei nº 73/2011, de 17 de Junho.

Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009

Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de Abril de 2009.

Diretiva 75/442/CEE do Conselho, de 15 de Julho de 1975.

Exhaust Wast Recovery from Stationary Engines Using Organic Rankine Cycles. P.Mago et al, 2010.

Energia primária em Portugal 2013, DGEGa 2013

International Energy Agency – Photovoltaics Power Systems, Trends in Photovoltaic Applications in Selected IEA Countries between 1992 and 2009.

Kyoung Hoon Kim: "Thermodynamic performance of regenerative organic rankine cycles".

Levy, J. e Cabeças A.J. Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e processos Associação das empresas Portuguesas para o setor do ambiente, 2006

MARTINHO, M. G.; FREITAS, H. Algumas considerações sobre o problema da gestão de resíduos. Ambiente Qualidade, 1999.

Misgav, A., Perl, N., Avnimelech, Y. *Selecting a compatible open space use for a closed landfill site*. Landscape and Planning, 2001.

Murphy, M.L. Waste-to-Energy technology. Encyclopedia of Energy, 2004.

Obernberger, I., P. Thonhofer, E. Reisenhofer. *BiosBioenergiesysteme*. Graz. Áustria, 2002.

Plano Estratégico de Gestão dos Resíduos Industriais

Plano Estratégico de Resíduos Hospitalares

Plano Estratégico de Resíduos Sólidos Urbanos, PERSU II. Agência portuguesa do Ambiente, 2011

Programa Nacional para as Alterações Climáticas

Quoilin, e Lemort, V., “Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems”, 5th European Conference Economics and Management of Energy in Industry, 2009

Renováveis - estáticas rápidas. Direção Geral de Energia e Geologia, julho 2013

Resíduos Urbanos. Agência portuguesa do Ambiente, 2012

Russo, M. A. T. *Tratamento de resíduos sólidos*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Coimbra, 2003.

S. Quoilin et al. / *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013.

Saleh, B., Koglbauer, G., Wendland, M., Fisher, J., “Working fluids for low-temperature organic Rankine cycles”, 2005

Sarsby, R. *Environmental geotechnics*. Thomas telford publishing, 2000

SCS Engineers, Washington, DC, 1997. Apud Bore, 2006.

Sylvain Quoilin and Vivent Lermort. *Technological and Economical Survey of Organic Cycle Systems*, 2009.

SIMARSUL, www.siamarsul.pt, acedido agosto 2013

T. Yang, G. J. Chen, and T. M. Guo: “Extension of the Wong- Sandler mixing rule to the three-parameter Patel-Teja equation of state: Application up to the near-critical region”. *Chem. Eng. J.* vol. 67, pp.27-36, 1997.

Taleghani, G.; Shabani Kia, A., *Technical-economical analysis of the saveh viogas power plant*. *Renew. Energ.*, 2004.

Tchobanoglous, G., Kreith, F. *Handbook of solid waste management*. McGraw-Hill Handbooks. 2ª edição, 2002.

Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, A. S. *Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues*. McGraw-Hill.4, 1993.

Themelis, N. J., Ulloa, P. A. *Methane generation in landfills*. *Renewable Energy* 32, 2007.

Themelis, N.J *Overview of the global waste-to-energy industry* . *Waste Manage. World* 3, 2003

Third International Landfill Symposium S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia, Italy : *Proceedings*. Vol. I, 1991.

Turboden, 2013 www.turboden.eu acedido em agosto 2013

US EPA, United States Environment Protection Agency. Air Emissions from Municipal Solid Waste Landfills – Background Information for Proposed Standards and Guidelines. Emission Standards Division, 199

Wellwatcher, <http://wellwatcher.wordpress.com>, acedido em agosto 2013

Yekoladio, P.J., Bello-Ochende, T. and Meyer J.P.: “Thermodynamic analysis and performance optimization of organic rankine cycles for the conversion of low-to-moderate grade geothermal heat”, 1999.

Yiping Dai, Jiangfeng Wang , Lin Gao: “Parametric optimization and comparative study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery.”, 2001

Anexos

A.1 m-file matlab cálculo parâmetros ORC

```
function Calcular_Callback(hObject, eventdata, handles)
clc;
T_env_ent=str2double(get(handles.T_env_ent, 'string'))+273.15;
two=T_env_ent-8;
mw=str2double(get(handles.mw, 'string'));
tci=str2double(get(handles.tci, 'string'))+273.15;
nt=str2double(get(handles.rend_t, 'string'))/100;
np=str2double(get(handles.rend_b, 'string'))/100;
Ren_alt=str2double(get(handles.Ren_alt, 'string'))/100;

t1=tci
pw=101.3
t3=298;
nth=0.001;
temp=0;
eEvap=0.1;
eCond=0.8;

itenSel=get(handles.Fluido, 'Value')

if (itenSel==1)
    f='toluene'
end
if (itenSel==2)
    f='Cyclopentane'
end
if (itenSel==3)
    f='isobutane'
end
if (itenSel==4)
    f='R22'
end
if (itenSel==5)
    f='R134a'
end
if (itenSel==6)
    f='R227ea'
end
if (itenSel==7)
    f='R245fa'
end

while(nth>temp && eEvap<0.8)
%clc;
temp=nth;
t3=t3+1
p1=Props('P', 'T', t1, 'Q', 0, f)
h1=Props('H', 'T', t1, 'Q', 0, f);
s1=Props('S', 'T', t1, 'Q', 0, f);

p2=Props('P', 'T', t3, 'Q', 1, f);
s3=Props('S', 'T', t3, 'Q', 1, f);
h3=Props('H', 'T', t3, 'Q', 1, f)
s4s=s3;
```

```

h4s=Props('H','S',s4s,'P',p1,f);
t4s=Props('T','P',p1,'S',s4s,f);

h4=h3-(nt*(h3-h4s));
t4=Props('T','P',p1,'H',h4,f);
s4=Props('S','T',t4,'P',p1,f);
s2s=s1;
t2s=Props('T','S',s2s,'P',p2,f);
h2s=Props('H','S',s2s,'P',p2,f);

h2=h1+((h2s-h1)/np)
t2=Props('T','P',p2,'H',h2,f);
t4a=t2+5;
h4a=Props('H','T',t4a,'P',p1,f);
h2a=h2+(h4-h4a)

s7=Props('S','T',t3,'Q',0,f);

s8=Props('S','T',t1,'Q',1,f);

s2=Props('S','T',t2,'Q',0,f);

t2a=Props('T','P',p2,'H',h2a,f);
s2a=Props('S','T',t2a,'Q',0,f);

hwi=Props('H','P',pw,'T',T_env_ent,f);
hwo=Props('H','P',pw,'T',two,f);

Qin=mw*(hwi-hwo)
mf=Qin/(h3-h2a)
wp=mf*abs((abs(h2)-abs(h1)))
wt=mf*(h3-h4);
wnet=wt-wp;
q=mf*(h3-h2a)
nth=wnet/Qin
Qout =mf*(h4a-h1)

wt1=wnet*Ren_alt

cpw=Props('C','P',pw,'T',T_env_ent,'CarbonDioxide');
cpf=Props('C','P',p2,'T',t2a,f);

if ((cpw*mw)>(cpf*mf));
Cmin=cpf*mf;
else
Cmin=cpw*mw;
end
eEvap=(mf*cpf*(t3-t2a))/(Cmin*(T_env_ent-t2a))
end

set(handles.t_1,'String',t1-273.15);
set(handles.t_2,'String',t2 - 273.15);
set(handles.t_2a,'String',t2a-273.15);
set(handles.t_3,'String',t3-273.15);
set(handles.t_4,'String',t4-273.15);
set(handles.t_4a,'String',t4a-273.15);

set(handles.p_1,'String',p1);

```

```

set(handles.p_2, 'String', p2);
set(handles.p_2a, 'String', p2);
set(handles.p_3, 'String', p2);
set(handles.p_4, 'String', p1);
set(handles.p_4a, 'String', p1)

set(handles.h_1, 'String', h1);
set(handles.h_2, 'String', h2);
set(handles.h_2a, 'String', h2a);
set(handles.h_3, 'String', h3);
set(handles.h_4, 'String', h4);
set(handles.h_4a, 'String', h4a);

set(handles.s_1, 'String', s1);
set(handles.s_2, 'String', s1);
set(handles.s_2a, 'String', s2s);
set(handles.s_3, 'String', s3);
set(handles.s_4, 'String', s4);
set(handles.s_4a, 'String', s4s);
set(handles.Poten_t, 'String', wt1);
set(handles.Poten_b, 'String', wp);
%set(handles.Efic_t, 'String', nth*100);

c1=Props('C', 'T', t1, 'Q', 0, f);
c4a=Props('C', 'T', t4a, 'P', p1, f);
ca=(c1+c4a)/2;
cc=Props('C', 'T', tci, 'P', 101, 'Water');

mc=(mf*ca*(t4a-t1))/(eCond*cc*(t4a-tci))
tco=tci+(mf*(t4a-t1)*ca)/(mc*cc);

L1x=[s1 s2];
L1y=[t1 t2];
L2x=[s2s s7];
L2y=[t2s t3];
L2=[t3 t4];
L3x=[s7 s3];
L3y=[t3 t3];
L4x=[s3 s4];
L4y=[t3 t4];
L5x=[s4 s4s];
L5y=[t4 t4s];
L6x=[s4s s8];
L6y=[t4s t1];
L7x=[s8 s1];
L7y=[t1 t1];

Tc = Props(f, 'Tcrit')

P_c=Props('P', 'T', Tc, 'Q', 1, f);

nsat=0;

for o=1:P_c;
    nsat=nsat+1;
    T(nsat)=Props('T', 'P', o, 'Q', 0, f);
    sl(nsat)=Props('S', 'P', o, 'Q', 0, f);

```

```

        sv(nsat)=Props('S','P',o,'Q',1,f);
    end

cla
hold on

axis on
ylabel('T(K)')
xlabel('s (J/kgK)')
plot(s1,T,'r-','linesmoothing','on')
plot(sv,T,'r-','linesmoothing','on')
plot(L1x,L1y,'b-','Linewidth',0.75,'linesmoothing','on')
plot(L2x,L2y,'b-','Linewidth',0.75,'linesmoothing','on')
plot(L3x,L3y,'b-','Linewidth',0.75,'linesmoothing','on')
plot(L4x,L4y,'b-','Linewidth',0.75,'linesmoothing','on')
plot(L5x,L5y,'b-','Linewidth',0.75,'linesmoothing','on')
plot(L6x,L6y,'b-','Linewidth',0.75,'linesmoothing','on')
plot(L7x,L7y,'b-','Linewidth',0.75,'linesmoothing','on')
hold off

figure(1)
clc;
hold on
imshow('esquema.png');
text(229,120,['\color{rgb}{0,0,0}Evaporador'],'FontSize',10);
text(500,80,['\color{rgb}{0,0,0}Turbina'],'FontSize',10);
text(229,400,['\color{rgb}{0,0,0}Bomba'],'FontSize',10);

text(515,410,['\color{rgb}{0,0,0}Condensador'],'FontSize',10);
text(375,270,['\color{rgb}{0,0,0}Recuperador de Calor
'],'FontSize',10);
text(60,100,['\color{rgb}{1,0.294,0.282}T=' ,num2str(round(T_env_ent-
273.15)), ' °C'],'FontSize',8);
text(60,115,['\color{rgb}{0.5176 0.1608
0.0627}Qin=' ,num2str(round(Qin)), ' kW'],'FontSize',8);
text(230,415,['\color{rgb}{0.5176 0.1608 0.0627}W bomba
=' ,num2str(wp), ' kW'],'FontSize',10);
text(60,130,['\color{rgb}{0.75,0.75,0.75}m=' ,num2str(round(mw)), '
kg/s'],'FontSize',8)
text(515,450,['\color{rgb}{0.5176 0.1608 0.0627}Q
out=' ,num2str(round(Qout)), ' kW'],'FontSize',8)
text(515,440,['\color{rgb}{0.75,0.75,0.75}m =' ,num2str(mc), '
kg/s'],'FontSize',8)
text(100,450,['\color{rgb}{0.745,0.294,0.282}T1=' ,num2str(round(t1-
273.15)), ' °C'],'FontSize',8)
text(100,465,['\color{rgb}{0.29,0.494,0.733}P1=' ,num2str(round(p1)), '
kPa'],'FontSize',8)
text(100,350,['\color{rgb}{0.745,0.294,0.282}T2=' ,num2str(round(t1-
273.15)), ' °C'],'FontSize',8)
text(100,365,['\color{rgb}{0.29,0.494,0.733}P2=' ,num2str(round(p2)), '
kPa'],'FontSize',8)
text(200,190,['\color{rgb}{0.745,0.294,0.282}T2a=' ,num2str(round(t2a-
273.15)), ' °C'],'FontSize',8)
text(200,205,['\color{rgb}{0.29,0.494,0.733}P2a=' ,num2str(round(p2)), '
kPa'],'FontSize',8)
text(200,15,['\color{rgb}{0.745,0.294,0.282}T3=' ,num2str(round(t3-
273.15)), ' °C'],'FontSize',8)
text(200,30,['\color{rgb}{0.29,0.494,0.733}P3=' ,num2str(round(p2)), '
kPa'],'FontSize',8)

```

```

text(500,180,['\color[rgb]{0.745,0.294,0.282}T4=',num2str(round(t4-
273.15)),' °C'],'FontSize',8)
text(500,150,['\color[rgb]{0.5176 0.1608 0.0627}W turbina
=',num2str(wt),' kW'],'FontSize',10);
text(500,195,['\color[rgb]{0.29,0.494,0.733}P4=',num2str(round(p1)),'
kPa'],'FontSize',8)
text(400,320,['\color[rgb]{0.745,0.294,0.282}T4a=',num2str(round(t4a-
273.15)),' °C'],'FontSize',8)
text(400,335,['\color[rgb]{0.29,0.494,0.733}P4a=',num2str(round(p1)),'
kPa'],'FontSize',8)
hold off
set(handles.pushbutton3,'Enable','on')

```


A.2 m-file *matlab* cálculo viabilidade económica

```
function Viabilidade_Economica_Callback(hObject, eventdata, handles)

Invin = str2double(get(handles.Invin, 'String'));
if isnan(Invin)
    errordlg('Insira o investimento inicial', 'Dados em Falta');
    return
end
Tarifa = str2double(get(handles.Tarifa, 'String'));
if isnan(Tarifa)
    errordlg('Insira a tarifa da eletricidade', 'Dados em Falta');
    return
end
Custma = str2double(get(handles.custma, 'String'));
if isnan(Custma)
    errordlg('Insira os custos de manutenção', 'Dados em Falta');
    return
end

h_ano = str2double(get(handles.h_ano, 'String'));
if isnan(h_ano)
    errordlg('Insira o numero de horas por ano de produção', 'Dados em
Falta');
    return
end

Taxa = str2double(get(handles.taxat, 'String'));
if isnan(Taxa)
    errordlg('Insira a taxa de actualização', 'Dados em Falta');
    return
end

Taxa=Taxa/100;

anos = str2double(get(handles.nanos, 'String'));
if isnan(anos)
    errordlg('Insira o numero de anos de utilização estimado', 'Dados
em Falta');
    return
end
Poten_t=str2double(get(handles.Poten_t, 'String'))
RCR=((Poten_t/1000)*h_ano*Tarifa)/1000

for n=1:anos;
ano(n)=n;
Receitas(n)=RCR/((1+Taxa)^n);
Custos(n)=(Custma)/((1+Taxa)^n);
CF(n)=Receitas(n)-Custos(n);
if n==1;
    VAL1(n)=-Invin+CF(n);
else
VAL1(n)=VAL1(n-1)+CF(n);
end
end

% Calculo da taxa interna de rentabilidade
TIR=0.20;
erro=1;
```

```

while erro>0,00001;

    TIR_1=((RCR-Custma)/Invin)*(((1+TIR)^anos-1)/(1+TIR)^anos);
    erro=abs(TIR_1-TIR);
    TIR=TIR_1;
end
TIR=TIR*100;

% payback

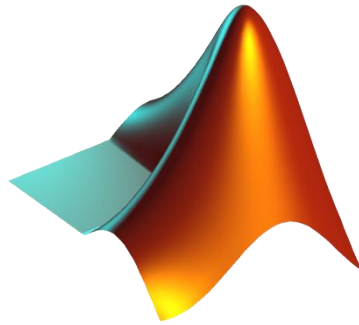
PAYBACK=Invin/(RCR-Custma);
VAL=VAL1(anos);

%escrever resultados
set(handles.Resultado_7, 'string',RCR);
set(handles.Resultado_8, 'string',PAYBACK);
set(handles.Resultado_9, 'string',TIR);
set(handles.Resultado_10, 'string',VAL);

```

A.3 Software utilizado.

MATLAB - é um ambiente de computação numérica e linguagem de programação de quarta geração. Desenvolvido pela MathWorks, MATLAB permite manipulações de matrizes, impressão de funções e dados, implementação de algoritmos, a criação de interfaces de utilizador, e interface com programas escritos noutras linguagens, incluindo C, C ++, Java, e Fortran.



CoolProp - É um open-source, multiplataforma, banco de dados de propriedade de fluidos, baseado em C++ que inclui fluidos puros, fluidos pseudo-puros, e as propriedades do ar húmido. É projetado para ser trivialmente simples de usar e possível usar de outras linguagens. Estão atualmente disponíveis para EES, Python, Microsoft Excel, C #, Octave, MATLAB.

