



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia de Sistemas e Potências e Automação



Estudo Técnico/Económico da instalação de uma central de cogeração numa serração de madeira

NUNO MIGUEL BILREIRO GONÇALVES
(Licenciado)

Dissertação para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica – Ramo de Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa
Professor Sérgio Miguel Redondo Faias

Júri:

Presidente: Professor Constantino Vital Soares (ISEL)

Vogais:

1ºVogal: Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa (ISEL)

2ºVogal: Professor Sérgio Miguel Redondo Faias (ISEL)

3ºVogal: Professor Fernando Jorge Gomes de Loureiro (ISEL)

Dezembro de 2011

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao professor Jorge Sousa e ao professor Sérgio Faias toda a orientação e disponibilidade prestada durante a realização do trabalho tanto na componente prática como teórica, bem como a cuidadosa e rigorosa revisão do manuscrito.

Aos meus pais, que sem eles não teria sido possível, da mesma forma, a realização deste trabalho. Muito Obrigado pelo apoio e confiança que em mim depositaram.

Ao meu cunhado pela ajuda em todo o trabalho, à minha irmã por nos deixar trabalhar e ao meu sobrinho, Pedro Nuno, pelos momentos de pausa causados.

Ao tio Luís, pela ideia na qual consiste esta dissertação, pelo apoio e pelos esclarecimentos prestados na estância industrial.

Ao Ruben e Hugo, companheiros e amigos de curso, obrigado pela amizade, pelos momentos de convívio, e pela discussão e partilha de ideias.

À Megane, por ter estado ao meu lado nesta caminhada, pela força, confiança e compreensão.

Aos meus colegas da comissão, Marta, “Pipo”, Cátia, Rudi, obrigado pelo apoio, paciência e afeição.

A todos os amigos! Obrigado a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho e cujo nome não mencionei.

Resumo

O pinheiro tem um papel importante na ecologia e economia nacional. O Pinheiro sofre de uma praga severa, denominada por doença da murchidão dos pinheiros, causada pelo nemátodo da madeira do pinheiro (NMP). Apresenta-se como um verme microscópico, invertebrado, medindo menos de 1,5 mm de comprimento. O contágio entre árvores deve-se a vectores biologicamente conhecidos por longicórneo e capricórneo do pinheiro.

Os produtores de madeira de pinho são desta forma obrigados a efectuar tratamentos térmicos (HT), de eliminação do NMP e dos seus vectores para que a exportação da madeira serrada cumpra com a norma NP 4487. De modo a manter a competitividade internacional das empresas nacionais, o impacto dos custos do HT deve ser minimizado.

O objectivo desta dissertação é efectuar o estudo técnico-económico da implementação de um sistema de cogeração capaz produzir calor para efectuar o tratamento ao NMP e simultaneamente energia eléctrica para vender à rede pública. As receitas da venda de energia eléctrica poderão contribuir para a minimização dos custos do HT.

Tendo em conta que os resíduos das serrações de madeira podem ser usados como combustível consideraram-se para avaliação duas tecnologias de cogeração, um sistema de turbina a vapor clássico (ciclo Rankine) e um sistema *Organic Rankine Cycle* (ORC), permitindo ambas a queima dos resíduos das serrações de madeira.

No que diz respeito à avaliação económica, foi desenvolvido um simulador de tecnologia/modalidade de remuneração que efectua cálculos consoante as necessidades térmicas de cada produtor, a potência eléctrica a instalar e indicadores económicos, VAL, TIR e PAYBACK da instalação do sistema de cogeração. O simulador desenvolvido aplica a nova legislação que enquadra o sistema jurídico e remuneratório da cogeração (DL 23/2010), na qual se consideram duas modalidades, geral e especial.

A metodologia desenvolvida foi aplicada num caso real de uma serração de madeira e os principais resultados mostram que as soluções apresentadas, turbina a vapor e sistema ORC, não apresentam viabilidade económica. Através da análise de sensibilidade, conclui-se que um dos factores que mais influencia a viabilidade económica do projecto é o tempo de funcionamento reduzido. Sendo uma das soluções apresentada a criação de uma central de cogeração para vários produtores de madeira. Uma possível solução para o problema do reduzido tempo de utilização seria o fornecimento do serviço de tratamentos térmicos a outros produtores de paletes de madeira que não possuem estufa própria.

Palavras-chave: Cogeração, NMP, Turbina a vapor, Sistema ORC, Avaliação económica, Biomassa.

Abstract

The pine tree has an important role in the national ecology and economy. The pine tree suffers from a severe plague, called by the pine tree wilt disease, caused by the pine wood nematode (PWN). It's presented as a microscopic worm, invertebrate, measuring less than 1.5 mm in length. The contagious between trees is due to biological vectors known as longicorne and capricorn of pine.

The producers of pine wood are in this way obliged to carry out heat treatment (HT), for removing the PWN and its vectors to the export of sawn timber according with the standard NP 4487. In order to maintain the international competitiveness of national firms, the cost of HT should be minimized.

This paper objective is to do the technical and economic study for the implementation of a cogeneration system able to produce heat to make PWN treatment and simultaneously produce electricity to sell to the public grid. The profits from electricity sale could contribute to minimizing the costs of HT.

Considering that the wood waste from sawmills can be used as fuel, were considered for evaluation two cogeneration technologies, steam turbine system (Rankine cycle) and Organic Rankine Cycle (ORC), both allowing the burning of wood waste from sawmills.

Regarding the economic evaluation, was developed a technology/tariff simulator that computer, according to heating requirements at each producer, the electrical power to install and the economic indicators, NPV, IRR and PAYBACK time. The developed simulator applies the new cogeneration tariff (DL 23/2010), which considers two different modes, general and special.

The procedure was applied to a real case and the main results show that the bath solutions considered, steam turbine and ORC system are not economically viable. However the sensitivity analysis, demonstrated that increasing the operation time it is possible turn the investment viable. As one of the solutions being presented is the creation of a cogeneration plant for several producers of wood.

As such, one of the solutions is to use the investment to provide heat treatments to the wood producers installed in the nearby.

Keywords: Cogeneration, PWN, Steam Turbine, ORC system, Economic Evaluation, Biomass.

Índice

Agradecimentos.....	2
Resumo.....	3
Abstract.....	5
Índice.....	6
Índice de figuras.....	8
Índice de tabelas.....	10
Abreviaturas.....	11
1. Introdução.....	13
1.1. Motivação.....	13
1.2. Objectivos.....	14
1.3. Estrutura da dissertação.....	14
2. Estado da arte.....	16
2.1. Floresta nacional.....	16
2.1.1. O nemátodo da madeira do pinheiro.....	16
2.1.1.1. Medidas de protecção contra o NMP.....	17
2.1.1.1.1. Tratamento com medição directa da temperatura no centro da madeira.....	19
2.1.1.1.2. Tratamento com medição da temperatura do ar.....	19
2.2. Biomassa.....	20
2.2.1. Biomassa florestal.....	22
2.2.2. Tecnologias de conversão de biomassa.....	25
2.2.3. Combustão de biomassa.....	25
2.2.3.1. Processo de combustão.....	25
2.2.4. Propriedades dos diversos tipos de biomassa.....	26
2.2.5. Tecnologias de combustão de biomassa.....	27
2.2.5.1. Caldeira de combustão em grelha.....	28
2.2.5.2. Caldeira de combustão em leito fluidizado.....	29
2.3. Cogeração.....	31
2.3.1. Cogeração no mundo.....	31
2.3.2. Evolução da cogeração em Portugal.....	34
2.3.3. Tipos de cogeração.....	35
2.3.4. Tecnologias de cogeração.....	36
2.3.4.1. Turbina a vapor (Ciclo Rankine).....	36

2.3.4.2. Ciclo Orgânico de Rankine (ORC)	38
2.3.5. Enquadramento legal do sector	42
2.3.5.1. Classificação quanto à eficiência (CEE)	44
2.3.5.2. Modalidade geral.....	45
2.3.5.3. Modalidade especial	46
3. Caso de estudo: Serração de Madeira.....	48
3.1. Caracterização	48
3.2. Soluções de cogeração propostas	50
3.2.1. Turbina a vapor	51
3.2.2. Sistema ORC.....	53
3.3. Custo das soluções de cogeração.....	55
3.3.1. Custos de investimento	55
3.3.2. Custos de operação e manutenção.....	57
3.3.3. Receitas	57
3.3.3.1. Classificação quanto à eficiência da central	57
3.3.3.2. Remuneração da energia térmica (RET)	58
3.3.3.3. Remuneração da energia eléctrica na modalidade geral (REEG).....	58
3.3.3.4. Remuneração da Energia Eléctrica na modalidade especial (REEE)	59
4. Avaliação económica das soluções de cogeração.....	60
4.1. Simulador: Metodologia e implementação	60
4.2 Pressupostos	64
4.3. Resultados	65
4.4. Análise de sensibilidade	67
4.4.1. Remuneração da energia eléctrica.....	68
4.4.2. Remuneração da energia térmica	70
4.4.3 Preço da biomassa	72
4.4.4. Tempo de funcionamento.....	74
5. Conclusões e perspectivas futuras	78
Referências bibliográficas	82

Índice de figuras

Figura 2.1 - Exemplares do NMP [6]	17
Figura 2.2 – Exemplar adulto do longicórnio do pinheiro [8]	17
Figura 2.3 – Ciclo de carbono [10].....	21
Figura 2.4 - Carrasca/ casca.....	23
Figura 2.5 – Serrim/serradura.....	23
Figura 2.6 – Raízes	24
Figura 2.7 – Resíduos provenientes de corte: pontas e ramos	24
Figura 2.8 – Perda de massa em função do tempo durante a combustão de madeira [16].....	26
Figura 2.9 – Caldeira de combustão em grelha móvel [16].....	29
Figura 2.10 – Representação de uma caldeira de leito fluidizado [18].....	30
Figura 2.11 – Primeira central de cogeração, em New York City, 1882 [19]	32
Figura 2.12 – Contribuição da cogeração no mix energético [21].....	33
Figura 2.13 – Contribuição da cogeração para o mix energético em Portugal [21].....	34
Figura 2.14 – Intervalos de temperatura de funcionamento do “topping system” e “bottoming system”[25]..	36
Figura 2.15 – Funcionamento base do sistema de cogeração com turbina a vapor [26].....	37
Figura 2.16 – Turbina a vapor segundo o ciclo de Rankine [27].....	37
Figura 2.17 – Perspectiva de uma instalação ORC [29]	39
Figura 2.18 – Representação esquemática da queima da biomassa e do aquecimento do fluido térmico.	40
Figura 2.19 – Representação esquemática de funcionamento do módulo ORC	41
Figura 2.20 – Diagrama do fluxo de energia do ciclo ORC	41
Figura 3.1 – Estufa de tratamento térmico.....	49
Figura 3.2 – Descrição do sistema de turbina a vapor aplicado ao processo industrial	51
Figura 3.3 – Diagrama de fluxo de energia de um sistema com turbina a vapor	52
Figura 3.4 – Descrição do sistema ORC aplicado ao processo industrial.....	53
Figura 3.5 – Diagrama de fluxo de energia do sistema ORC	54
Figura 4.1 – Folha de rosto do simulador	63
Figura 4.2 – Influência da remuneração da energia eléctrica no VAL para ambas as soluções	68
Figura 4.3 – Influência da remuneração da energia eléctrica naTIR para ambas as soluções	69
Figura 4.4 – Influência da remuneração da energia térmica no VAL para ambas as soluções	70
Figura 4.5 – Influência da remuneração da energia térmica na TIR para ambas as soluções	71
Figura 4.6 – Influência da tarifa da energia térmica no PAYBACK para o sistema ORC	71
Figura 4.6 – Influência do preço da biomassa no VAL para ambas as soluções	72
Figura 4.7 – Gráfico da influência do preço da biomassa na TIR para ambas as soluções	73
Figura 4.8 – Influência do número de horas de funcionamento no VAL para ambas as soluções	74
Figura 4.9 – Influência do número de horas de funcionamento na TIR para ambas as soluções	75
Figura 4.10 – Influência do número de horas de funcionamento no PAYBACK.....	76

Figura 4.11 – Influência do número de horas de funcionamento no PAYBACK..... 76

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades de várias biomassas florestais [14].....	27
Tabela 3.1 – Características da estufa térmica.....	49
Tabela 3.2 – Valores de rendimento da energia térmica e eléctrica para a turbina a vapor.....	53
Tabela 3.3 – Valores de rendimento da energia térmica e eléctrica para a sistema ORC.....	54
Tabela 3.4 – Custos de investimento da turbina a vapor [20].....	55
Tabela 3.5 – Custos de investimento do sistema ORC [20].....	56
Tabela 3.6 – Custos fixos de produção das soluções apresentadas [20].....	57
Tabela 3.7 – Custos de Produção variáveis do projecto.....	57
Tabela 3.8 – Valores de referência da directiva de 2007/74/CE.....	58
Tabela 3.9 – Poupança de energia primária para ambas as soluções.....	58
Tabela 4.1 – Valor dos parâmetros de entrada a introduzir no simulador.....	64
Tabela 4.2 – Valor dos parâmetros de saída obtidos pelo simulador.....	66

Abreviaturas

CE – Cogeração Eficiente

CEE – Cogeração de Elevada Eficiência

CF – Custos Fixos

C_{Fact} – Cash-Flow Actualizado

CFI/IPPC – Convenção Fitossanitária Internacional

CUR – Comercializador de Ultimo Recurso

CV – Custos Variáveis

DGEG – Direcção Geral de Energia e Geologia

E.U.A. – Estados Unidos da América

FAO – Organização Mundial para a Agricultura e Alimentação

GPL –

HT – Tratamento Térmico

IPQ – Instituto Português de Qualidade

IT – Investimento Total

MB – Brometo de Metilo

NIMF – Normas Internacionais para Medidas Fitossanitárias

NMP – Nemátodo da Madeira do Pinheiro

ORC – Organic Rankine Cycle

PAYBACK – Período de Recuperação de Investimento

P_{cal} – Potência da Caldeira

PCI – Poder Calorífico Inferior

P_E – Potência de Estufa

PE – Prémio de Eficiência

PEP – Poupança de Energia Primária

PER – Prémio de Energia Renovável

P_G – Potência do Gerador

PIB – Produto Interno Bruto

PM – Preço de Mercado

P_P – Potência do Condensador

PPM – Prémio de Participação de Mercado

P_T – Potência da Turbina
REE – Remuneração da Energia Eléctrica
REEE – Remuneração da Energia Eléctrica na Modalidade Especial
REEG – Remuneração da Energia Eléctrica na Modalidade Geral
RESP – Rede de Serviço Público
RET – Remuneração da Energia Térmica
RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
TIR – Taxa Interna de Rentabilidade
TR – Tarifa de Referência
UE – União Europeia
VAB – Valor Acrescentado Bruto
VAL – Valor Actual Líquido
 η_c – Rendimento da Caldeira
 η_g – Rendimento do Gerador
 η_p – Rendimento do Condensador
 η_T – Rendimento da Turbina

1. Introdução

Neste capítulo introdutório são apresentados os assuntos que serviram de incentivo à elaboração da dissertação, os objectivos, e a estrutura da mesma.

1.1. Motivação

A cogeração desempenha um papel fundamental na obtenção das necessidades energéticas de alguns países do nosso planeta. Reduzindo o impacto ambiental na geração de energia e apresentando uma eficiência de cerca de 85% [1], a cogeração será certamente a energia do futuro, beneficiando o ambiente e o ser humano. A cogeração é uma das soluções que podem contribuir para a redução de emissões de CO₂, uma vez que a produção de energia eléctrica é feita a rendimentos energéticos superiores do que os conseguidos pelas centrais termoeléctricas [1].

Para que a Europa se torne uma economia de baixo teor de carbono e com uma elevada eficiência energética, o Conselho Europeu, em Março de 2007, acordou os seguintes objectivos, para o horizonte 2020, chamado o 20-20-20: Reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 20%, aumentando até 30% caso se obtenha um acordo internacional que vincule outros países desenvolvidos a "atingir reduções de emissões comparáveis, e os países em desenvolvimento economicamente mais avançados contribuam adequadamente, de acordo com as suas responsabilidades e respectivas capacidades", elevar para 20% as contribuições das energias renováveis no consumo energético da UE e aumentar a eficiência energética em 20%. Estes objectivos levam a que as empresas vejam a cogeração como uma tecnologia benéfica e em que se deve investir.

Estando o mercado nacional em crise, a exportação é uma das principais vias para a sobrevivência das empresas. No sector da transformação de madeira verifica-se a mesma dificuldade, mas com uma condicionante, para se realizar a exportação de madeira é exigido um tratamento térmico para que seja certificado.

Actualmente, Portugal está sob a ameaça de um embargo devido à detecção da presença do NMP pelas autoridades, em lotes de casca de pinheiro e em paletes, no espaço da UE. Na última reunião de directores gerais das Florestas, em Budapeste, na segunda semana de

Maio, foi imposta a tolerância zero a Portugal. A França e a Suécia apoiavam o embargo imediato [2].

A produção combinada de energia eléctrica e térmica, cogeração, pode ser uma solução de redução de custos da empresa, aumento de competitividade e autonomia energética.

1.2. Objectivos

A presente dissertação de mestrado tem como objectivo o estudo da viabilidade técnica/económica da instalação de uma central de cogeração numa empresa de transformação de madeiras de modo a que a receita da venda de energia eléctrica permita reduzir o custo do tratamento térmico madeira. Com esta dissertação pretende incentivar-se os produtores de madeira de pinho a efectuar o tratamento térmico contra o Nemátodo da madeira do pinheiro, sem colocarem em risco esta importante actividade económica exportadora nacional.

Pretende-se assim com este trabalho determinar quais as tecnologias de cogeração aplicáveis do aproveitamento energético dos resíduos de serração de madeira, efectuar o dimensionamento dessas tecnologias de cogeração, avaliar a viabilidade económica dessas tecnologias, tendo em conta o novo tarifário aplicável à cogeração e, por fim, identificar quais os factores que mais contribuem para essa viabilidade económica.

1.3. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos.

O capítulo 1 visa enquadrar o trabalho, apresentando as motivações que levaram a elaboração da dissertação e os seus principais objectivos.

No capítulo 2 apresenta-se a caracterização do sector florestal em Portugal e a sua contribuição para a economia nacional e descreve-se a doença do Nemátodo da madeira do pinheiro e suas consequências. Neste capítulo faz-se ainda uma descrição da utilização de biomassa na produção de energia, bem como as diferentes tecnologias de cogeração disponíveis, nomeadamente a combustão da biomassa florestal.

No capítulo 3 descreve-se o caso prático de aplicação, apresentando-se os dados recolhidos junto dos técnico da empresa e que serão utilizados no dimensionamento e selecção do sistema de cogeração a utilizar.

No capítulo 4 apresenta-se a metodologia desenvolvida na presente dissertação para a avaliação técnico/económica do projecto, dando ênfase ao simulador implementado para o cálculo da tarifa da energia eléctrica segundo a nova legislação que vigora para a cogeração. Ao longo deste capítulo apresentam-se ainda resultados da aplicação da metodologia ao caso de estudo e a respectiva análise de sensibilidade.

Por último, no capítulo 5 apresentam-se as principais conclusões da dissertação e algumas sugestões para desenvolvimentos futuros.

2. Estado da arte

2.1. Floresta nacional

Portugal tem uma das maiores proporções de área florestal da Europa, representando 39% do território, o que corresponde aproximadamente a 3,6 milhões de hectares. Esta área é reminescente de florestas autóctones ou resultante de plantações. Cerca de 85% da floresta portuguesa é de propriedade privada, apenas 3% pertence ao Estado, e os restantes 12% são baldios, pertencendo a comunidades locais [3].

De acordo [4], o sector florestal ocupa um lugar de destaque entre os diferentes ramos da actividade económica, correspondendo a 3% do Valor Acrescentado Bruto (VAB) da economia, 3,2% do Produto Interno Bruto (PIB), 12% do PIB industrial, 3,3% do total do emprego e 11% das exportações nacionais.

A contribuição da floresta para a economia nacional é muito significativa e envolve um complexo grupo de indústrias que processam a madeira e outras indústrias relacionadas com produtos que não a madeira, nomeadamente a transformação da cortiça e derivados de resina.

Segundo [3], o pinheiro-bravo ocupa predominantemente a região a norte do rio Tejo e a costa Alentejana, representando aproximadamente 27% da área florestal. O pinheiro-bravo, apesar de autóctone, deve a sua distribuição e abundância às plantações.

Nos últimos anos, tem-se verificado uma diminuição da área florestal, essencialmente devido aos incêndios florestais e à doença do nemátodo da madeira do pinheiro. De acordo com dados da Secretária de Estado das Florestas confirmou recentemente à imprensa o abate de cerca de dois milhões de árvores devido a esta catástrofe, o NMP [5].

2.1.1. O nemátodo da madeira do pinheiro

Actualmente é conhecida uma praga que afecta o pinheiro bravo, vulgarmente denominado por nemátodo da madeira do pinheiro. O nome científico do NMP é *Bursaphelenchus xylophilus*, sendo um verme microscópico, invertebrado, medindo menos de 1,5 mm de comprimento. A Figura 2.1 mostra alguns exemplares do NMP. É considerado um dos organismos patogénicos mais perigosos para as coníferas a nível mundial, pois é o agente

causal da doença da murchidão dos pinheiros, originando a morte das árvores afectadas. O NMP é incapaz de contagiar novos hospedeiros por si só, pelo que é dependente de outros organismos (os seus vectores) para se deslocar [6].

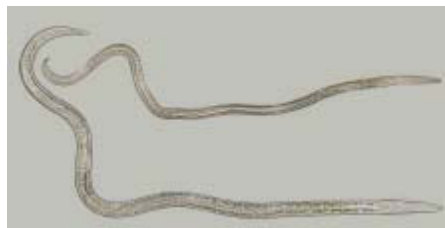


Figura 2.1 - Exemplos do NMP [6]

Os vectores constituem vários insectos pertencentes às famílias dos Cerambycidae, Buprestidae e Curculionidae, mas são sobretudo os escaravelhos do género *Monochamus* os principais agentes de disseminação do NMP. Em Portugal conhecem-se duas espécies de *Monochamus*, contudo de acordo com os estudos em curso, até à data só a espécie *Monochamus galloprovincialis* (longicórneo do pinheiro ou capricórneo do pinheiro) se revelou como responsável pela propagação do NMP no território nacional. A Figura 2.2 mostra um exemplar de um longicórneo do pinheiro [6].



Figura 2.2 – Exemplar adulto do longicórneo do pinheiro [8]

2.1.1.1. Medidas de protecção contra o NMP

A detecção da presença do NMP está a introduzir alterações de fundo em todo o sector industrial do pinheiro bravo, quer pela necessidade de assimilação de novos comportamentos e práticas culturais, quer pela aquisição de maquinaria por parte dos operadores (estufas para tratamento da madeira, maquinaria para tratamento dos sobrantes

no terreno, entre outras) e ainda pelas alterações na composição da floresta ao nível das espécies, caso o problema não seja devidamente tratado. O combate ao nemátodo, provavelmente terá o seu efeito nos preços da madeira de pinho, uma vez que os abates sanitários levarão à colocação súbita no mercado de grandes volumes de madeira, provocando assim dificuldades de escoamento. Desta forma, a oscilação dos preços pode ocorrer em dois planos, o aumento dos custos de produção e o descontrolo do planeamento da produção.

No sentido de minimizar o risco de introdução de organismos prejudiciais nos diferentes países através do material de embalagem de madeira, a Organização Mundial para a Agricultura e Alimentação através da Convenção Fitossanitária Internacional, aprovou a Norma Internacional para Medidas Fitossanitária nº 15 referente a embalagens de madeira não processada utilizadas no comércio internacional.

A norma exige que o material de embalagem de madeira não processada utilizado no suporte, protecção ou transporte de mercadorias (paletes, paletes-caixa, caixas, caixotes, engradados, barricas, estrados para carga, madeira de suporte e cobros de porão) deverá sofrer um dos seguintes tratamentos, o tratamento pelo calor ou choque térmico ou a fumigação com brometo de metilo.

Em Portugal, ao abrigo da Portaria n.º 1339-A/2008, alterada pelas Portaria n.º 230-B/2009 e Portaria n.º 1460/2009, a Norma Internacional para Medidas Fitossanitária (NIMF) nº 15 e a NP 4487 tornam-se de carácter obrigatório.

A norma portuguesa, NP 4487 dita quais as regras para o HT. Esta norma foi elaborada pela Comissão Técnica CT 14, “*Madeiras*”, cujo secretariado é assegurado pelo Instituto Português da Qualidade (IPQ), que por sua vez define um conjunto de requisitos que conduzam ao controlo dos processos de tratamento para a eliminação do NMP no material lenhoso. O tratamento fitossanitário adoptado nesta Norma também é válido para a eliminação do insecto vector do NMP.

Constata-se a existência de um sistema térmico nas serrações que realizam o tratamento térmico para a eliminação do NMP.

Consequentemente, a maioria das serrações de madeira que efectuem este tratamento, e são várias, utiliza como combustível os seus próprios resíduos industriais (serrim, aparas de madeira, carrasca de pinheiro, entre outros resíduos).

Existem duas formas para efectuar o tratamento por choque térmico: medição directa de temperatura e controlo da temperatura do ar da câmara de tratamento. A fonte de calor tem de fornecer energia térmica a uma temperatura de 80°C.

2.1.1.1.1. Tratamento com medição directa da temperatura no centro da madeira

Os sensores de temperatura devem ser colocados nas madeiras de maior espessura e de maior comprimento de forma a medir uma temperatura mínima de 56°C durante um período mínimo de 30 minutos, conforme os requisitos técnicos estabelecidos.

2.1.1.1.2. Tratamento com medição da temperatura do ar

Os tempos de tratamento estão relacionados com a temperatura inicial da madeira, a sua espessura e o teor em água.

As temperaturas de câmara devem estar compreendidas entre 64°C e 84°C, com uma duração mínima de uma hora e máxima de quatro horas para a madeira serrada, sendo a espessura da madeira um factor fundamental relacionado directamente com a permanência da mesma na câmara. O teor de humidade da matéria é outro aspecto primordial.

2.2. Biomassa

A Biomassa constitui uma importante reserva de energia, pois é constituída essencialmente por hidratos de carbono. Segundo a Directiva 2009/287CE, a biomassa representa “ a fracção biodegradável de produtos, resíduos e detritos de origem biológica provenientes da agricultura (incluindo substâncias de origem vegetal e animal), da exploração florestal e de indústrias afins, incluindo da pesca e da aquicultura, bem como a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”.

Na sua essência, o ciclo da biomassa, designamo-lo assim, é uma situação de dar e receber. É um ciclo tão abrangente que engloba toda a vida no planeta, como demonstra a Figura 2.3.

Com o uso massivo de combustíveis fósseis, a humanidade está a produzir uma incrível quantidade de gases carbónicos que se estão a alojar na atmosfera.

A biomassa não será uma fonte extra de poluições já que não poluirá ou libertará mais gases do que os próprios resíduos libertariam se auto-degradando [9].

Através da fotossíntese, geram-se carboidratos que fomentam o aumento da biomassa. A energia solar fica então arquivada nas plantas. Durante a combustão da biomassa, a combinação do oxigénio com o carbono gera a formação de Dióxido de Carbono e água, disponibilizando-se para promover o crescimento de novas plantas. Por ser um processo cíclico, a produção de bioenergia é tida como neutra em termos de libertação de carbono.

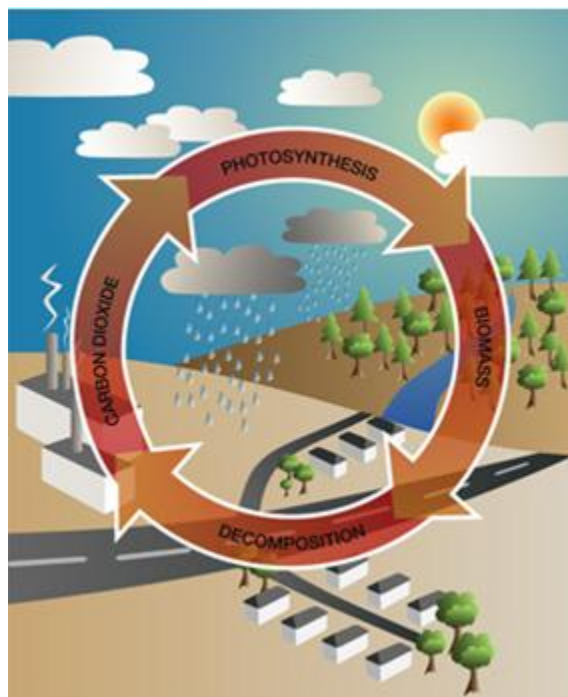


Figura 2.3 – Ciclo de carbono [10]

De uma forma geral a biomassa classifica-se segundo os seguinte tipos:

Biomassa sólida: tem como origem os produtos e resíduos de agricultura, os resíduos de floresta e das indústrias conexas e a fracção biodegradável dos resíduos industriais e urbanos.

Biocombustíveis gasosos ou biogás: tem origem nos efluentes agro-pecuários, agro-industriais e urbanos e ainda nos aterros de resíduos sólidos urbanos. O biogás resulta da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica contida nos resíduos anteriormente referidos. O biogás pode ser obtido por fermentação ou gaseificação.

Biocombustíveis líquidos: têm como origem as culturas energéticas. O biocombustível líquido mais comum é o biodiesel ou éter metílico, que pode ser obtido a partir do óleo de colza ou girassol. Outro exemplo é o etanol, obtido a partir da fermentação dos hidratos de carbono (açúcar, amido e celulose) presentes em culturas como a cana-de-açúcar ou através de processos sintéticos, e ainda o metanol, que resulta da síntese do gás natural ou da gaseificação da madeira.

Na presente dissertação o objecto de estudo é a biomassa sólida, mais propriamente a biomassa florestal.

2.2.1. Biomassa florestal

A biomassa florestal inclui a lenha resultante do abate de árvores, resíduos provenientes de áreas ardidas ou de limpeza das florestas, matos e desperdícios oriundos da indústria transformadora de madeira. O acumular de alguns destes subprodutos na floresta constitui um perigo constante para as manchas verdes, uma vez que as torna mais vulneráveis ao surgimento e à propagação de incêndios florestais. Assim, a sua remoção maximiza a produtividade das áreas florestais, a eficiência das operações no contexto da exploração florestal e previne-a da devastação dos incêndios. A correcta utilização do recurso biomassa potenciará o desenvolvimento regional, pela criação de postos de trabalho em zonas rurais em franca depressão demográfica e pelo incremento da produção energética endógena associada.

Os principais desperdícios provenientes das indústrias transformadoras são classificados da seguinte forma:

- Carrasca/ casca – descasque dos toros do pinheiro (Figura 2.4)
- Costaneiras/costaneiros/falheiros – secções longitudinais que sobram do corte dos toros
- Estilha – destroçamento ou estilhagem intencional de toros, costaneiras ou outra madeira (nomeadamente desperdícios florestais)
- Serrim /serradura – granulado mais ou menos fino da serração (Figura 2.5)
- Troços, restos – pedaços do corte e maquinação de pequena dimensão
- Aparas, fitas /tiras – bocados da maquinação de dimensões medianas



Figura 2.4 - Carrasca/ casca



Figura 2.5 – Serrim/serradura

Os principais desperdícios provenientes das florestas são classificados da seguinte forma:

- Toros finos ou contaminados sem outro aproveitamento
- Raízes (Figura 2.6)
- Resíduos provenientes de corte: casca, pontas e ramos (Figura 2.7)
- Resíduos provenientes da limpeza florestal.



Figura 2.6 – Raízes



Figura 2.7 – Resíduos provenientes de corte: pontas e ramos

Estes serão posteriormente transformados para que seja feito o seu aproveitamento energético. A granulometria, na biomassa florestal deve ser regulada e criteriosamente seleccionada. A uniformização deste parâmetro permitirá um aumento do rendimento da queima [11].

2.2.2. Tecnologias de conversão de biomassa

A utilização da biomassa pode ser feita de forma directa ou através da sua conversão num produto intermediário. Segundo [12], as tecnologias de maior relevo no âmbito da cogeração, a pirólise de biomassa e resíduos sólidos para produtos líquidos, sólidos e gasosos, a conversão de biomassa em metanol e etanol destinados a motores de combustão interna, a densificação de biomassa (produção de “pellet” e “briquetes”), a gaseificação de biomassa para produtos gasosos.

Na presente dissertação o objecto de estudo é a combustão directa da biomassa.

2.2.3. Combustão de biomassa

A combustão é a ciência das reacções químicas exotérmicas em escoamentos com transmissão de calor e massa [13].

A combustão é o principal processo de produção de energia da actualidade. Aproximadamente 90% dos recursos energéticos do planeta são recorrentes do processo de combustão [14]. Esta representa um papel fundamental em diversos sectores como a indústria, os transportes, os tratamentos dos RSU e doméstico.

2.2.3.1. Processo de combustão

O processo de combustão da biomassa integra um complexo conjunto de reacções, habitualmente enquadradas em quatro fases distintas: secagem; pirólise; gaseificação e combustão. Geralmente, no decorrer do processo de combustão, a biomassa começa por perder o seu teor em humidade, utilizando a energia térmica libertada por outros dos seus componentes. Após a secagem dá-se a libertação de monóxido de carbono e de compostos voláteis (numa primeira fase metano e outros hidrocarbonetos leves e posteriormente, com o aumento da temperatura, espécies de maior massa, como os alcatrões). Num processo de combustão estes gases podem representar cerca de 70 % do poder calorífico associado à biomassa [15]. O processo apronta-se com a oxidação do resíduo carbonoso e a retenção das cinzas.

A título de exemplo, é representada na Figura 2.7 a perda de massa em função do tempo durante a combustão de madeira.

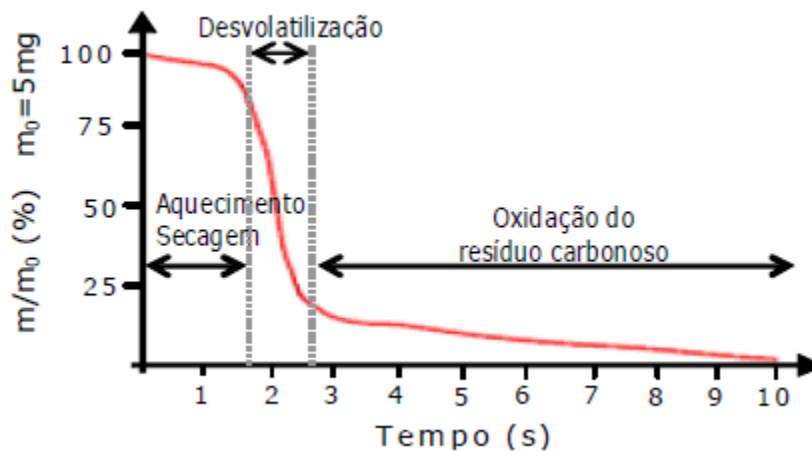


Figura 2.8 – Perda de massa em função do tempo durante a combustão de madeira [16]

2.2.4. Propriedades dos diversos tipos de biomassa

A indústria da madeira produz uma grande quantidade de resíduos durante as diversas fases de produção como mencionámos anteriormente, assim como na fase de corte e rechega da matéria-prima.

Existem duas formas de caracterização dos combustíveis sólidos como é o caso da biomassa, a análise imediata, baseada num processo físico de aquecimento do combustível a diferentes patamares de temperatura e respectiva pesagem e a análise elementar que recorre a processos químicos de identificação e qualificação dos diferentes elementos químicos que constituem o combustível.

Através dos resultados destas análises é possível determinar umas das características mais importantes para a valorização energética da biomassa, o poder calorífico.

Assim, a Tabela 2.1 lista as principais propriedades de várias biomassas florestais portuguesas, que têm sido objecto de estudo no Instituto Superior Técnico, em colaboração com a indústria portuguesa [14].

Tabela 2.1 – Propriedades de várias biomassas florestais [14]

	<i>Serrim/serradura</i>	<i>Casca de Pinheiro</i>	<i>Pontas e ramos de Pinheiro</i>
Análise imediata (% mássica)			
Humidade	14,0	16,7	12,5
Matéria volátil	73,2	57,6	63,7
Carbono fixo	12,6	24,5	21,2
Cinzas	0,2	1,2	2,6
Análise elementar (% mássica)			
Carbono	44,72	46,24	46,65
Hidrogénio	6,49	5,92	6,25
Azoto	0,06	0,19	0,94
Enxofre	0	0	0
Oxigénio	34,53	29,75	31,06
PCS (MJ/kg)	17,37	17,68	18,32
PCI (MJ/kg)	15,99	16,42	17,00

Estes dados serão utilizados como referência ao longo de todo o trabalho.

2.2.5. Tecnologias de combustão de biomassa

Os sistemas de queima mais comuns são os que recorrem à combustão de combustíveis sólidos. Para este tipo de combustível, a biomassa, a combustão numa caldeira em grelha ou em leito fluidizado são os mais apropriados [17].

A Tabela 2.2 compara algumas das características principais da combustão em grelha e em leito fluidizado.

Tabela 2.2 – Comparação das principais características principais dos processos de combustão em grelha e em leito fluidizado [17]

<i>Características</i>	<i>Processo de combustão</i>	
	Grelha	Leito fluidizado
Eficiência da combustão (%)	70-90	90-99
Eficiência térmica global (%)	25-35	40-55
Granulometria do combustível (mm)	12-20	8
Temperatura de operação (°C)	1400-1700	800-1000

2.2.5.1. Caldeira de combustão em grelha

A caldeira com combustão em grelha pode ser de diversos tipos, móvel ou fixa e dependendo de cada situação e o fim a que se destina, o seu posicionamento pode ser horizontal ou inclinado. Nesta situação o combustível é triturado em dimensões até cerca de 20mm. Normalmente são carregadas por transportadores de correias para uma das extremidades da grelha. O combustível é atravessado por uma corrente de ar de forma a reagir com o carbono fixo, outro fluxo de ar é introduzido acima da grelha para certificar a queima da matéria volátil. Este fluxo será proporcional à quantidade de matéria volátil a queimar, quanto maior for a matéria mais intensidade de ar será necessária. A Figura 2.9 ilustra o esquema de uma caldeira com combustão em grelha móvel.

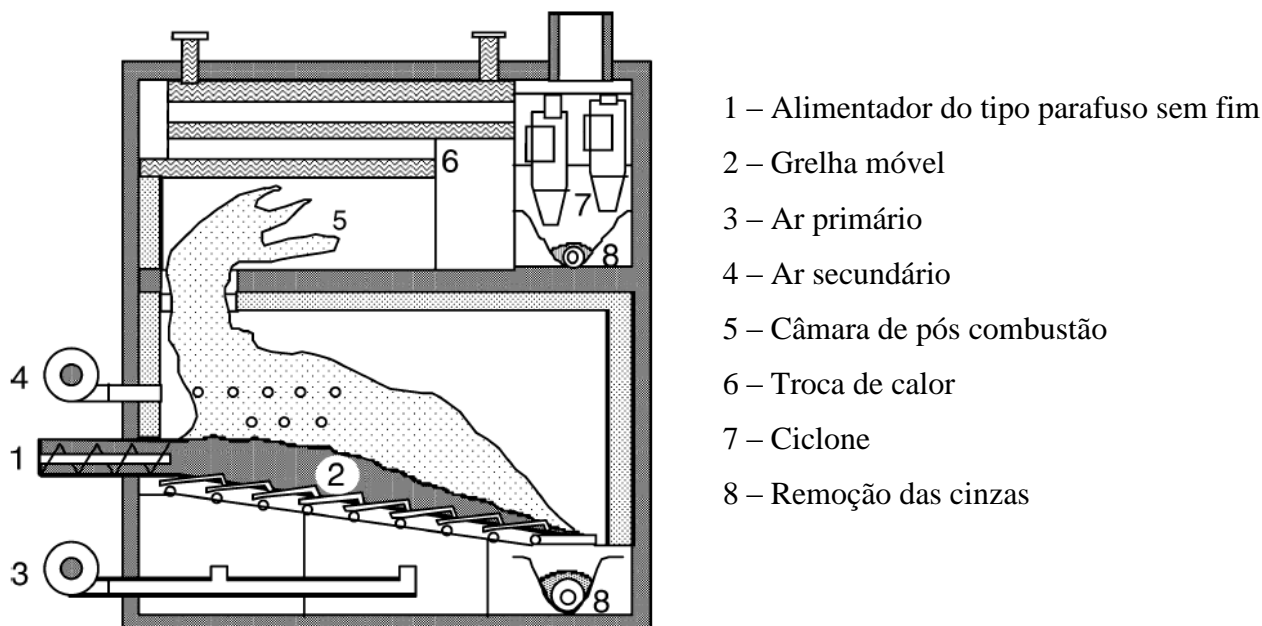


Figura 2.9 – Caldeira de combustão em grelha móvel [16]

2.2.5.2. Caldeira de combustão em leito fluidizado

A combustão de partículas em leito fluidizado é uma tecnologia particularmente adequada para a queima de combustíveis com altos teores de inertes e baixo poder calorífico, tais como carvões com altos teores de cinzas, resíduos agrícolas e urbanos, entre outros. A Figura 2.10 mostra esquematicamente uma caldeira com combustão em leito fluidizado. Neste processo a queima do combustível, geralmente com dimensões inferiores a 8 mm, ocorre no seio de um leito de material inerte, como areias, cascalhos e cinzas. Este material assenta numa base perfurada com muitos e pequenos orifícios, através dos quais é injectado ar a uma velocidade tal que o leito e o combustível se mantem em movimento permanente, daí o chamado leito fluidizado. Esta tecnologia proporciona um intenso contacto entre o combustível e o ar de combustão, de forma que quer as matérias voláteis quer o carbono fixo são queimados rapidamente. As partículas finas são recolhidas em equipamentos apropriados como ciclones, à semelhança do que acontece com caldeiras de combustão em grelha, enquanto as partículas maiores, são geralmente retiradas da caldeira imediatamente acima do leito.

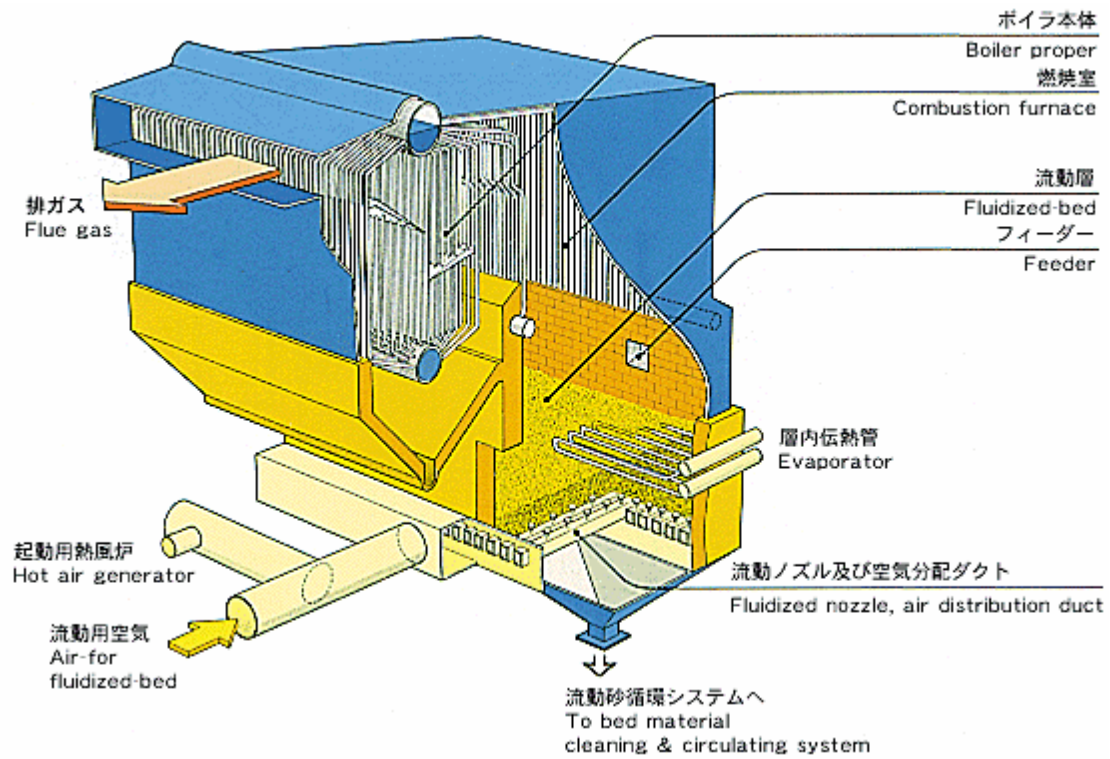


Figura 2.10 – Representação de uma caldeira de leito fluidizado [18]

2.3. Cogeração

De acordo com o decreto-lei n.º 186/95, a cogeração é definida como: *O processo de produção combinada de energia eléctrica e térmica, destinando-se ambas a consumo próprio ou de terceiros, com respeito pelas condições previstas na lei.*

Determinados tipos de indústrias utilizam energia eléctrica e térmica como fonte de alimentação para a realização dos seus processos. Normalmente recebem energia eléctrica da rede nacional e utilizam o fuelóleo, a biomassa, o GPL ou o gás natural como fonte de energia térmica. A utilização das fontes referidas, por vezes não é a mais eficiente, quer devido à forma como é processada a combustão, quer pelas enormes perdas caloríficas aquando da distribuição.

A cogeração surge como uma tecnologia que pode garantir economias de energia e competitividade acrescida às empresas. Esta tecnologia consiste na produção combinada de energia térmica e eléctrica num só equipamento. A energia destina-se ao próprio consumo por parte da empresa ou a terceiros, evitando ou atenuando a utilização de outros equipamentos direccionados para a produção de calor e aquisição de energia eléctrica à rede.

2.3.1. Cogeração no mundo

Os primeiros sistemas de cogeração apareceram no final do século XIX quando o fornecimento de energia eléctrica não era garantido pelas grandes centrais de energia, o que obrigava os consumidores elevadas potências instaladas a gerar toda a energia eléctrica necessária para os seus consumos.

A primeira central de produção de energia eléctrica e térmica em simultâneo foi em Pearl Street Station, em 1882. A central produzia electricidade e calor para as habitações em redor, a Figura 2.11 mostra como era a central [19].



Figura 2.11 – Primeira central de cogeração, em New York City, 1882 [19]

Estima-se que nos E.U.A., no início de 1900, da totalidade da energia térmica produzida localmente em centrais industriais, 58%, tinha origem em instalações de cogeração [20].

Até meados do século XX, a cogeração chegou a ser muito usada nas indústrias, perdendo depois competitividade para a electricidade produzida pelas concessionárias nas grandes centrais geradoras, resultando numa enorme diminuição da cogeração na indústria. Com a multiplicação das grandes centrais, a energia eléctrica tornou-se barata, fazendo com que os sistemas de cogeração não fossem viáveis.

No entanto esse quadro mudou com o primeiro choque do petróleo em 1973 e foi reforçado com o segundo choque em 1978. Por este motivo, os governos na Europa, E.U.A. e Japão tiveram um papel activo no aumento do uso da cogeração, através da implementação de medidas que estimulem a sua aplicação, de forma a reduzir o consumo e a dependência do petróleo.

Na Figura 2.12 podemos observar a diferença de produção eléctrica através da cogeração nos diversos países da UE.

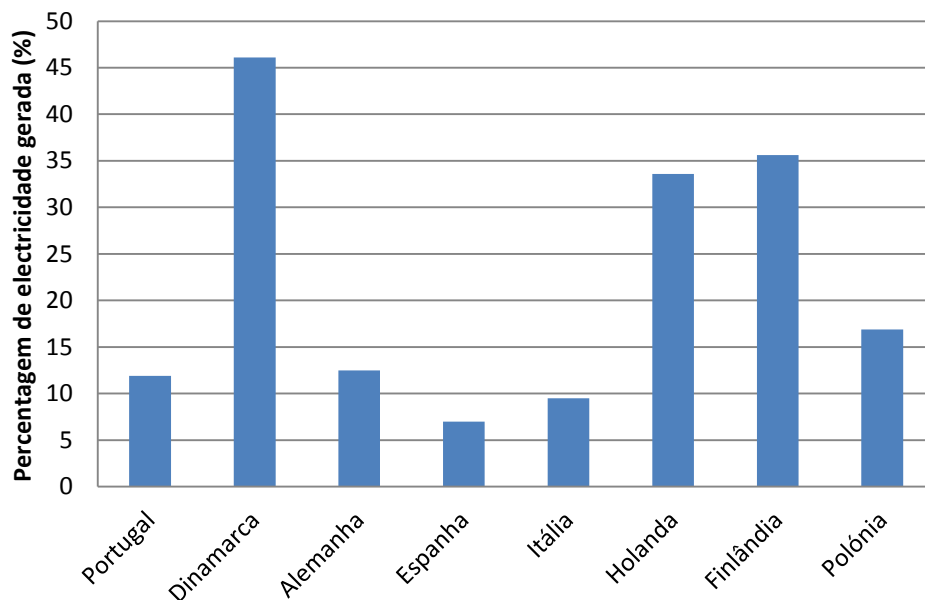


Figura 2.12 – Contribuição da cogeração no mix energético [21]

Actualmente na Dinamarca a cogeração representa 46,1% da energia eléctrica produzida, sendo o maior representante da Europa se verifica na Figura 2.12. Qualquer adição de novas unidades de geração só poderá ser feita por meio de sistemas de cogeração ou por emprego de fontes de energia alternativa, como energia eólica ou solar [20].

Na Holanda, a cogeração representa 33,6%, segundo [21], da energia eléctrica gerada pelo país, sendo este um dos percentuais mais elevados de cogeração na Europa, como se verifica na Figura 2.12.

Verifica-se hoje em todo o mundo um grande interesse e expressivos incentivos à cogeração, principalmente devido à elevada eficiência, exequível ao associar a geração eléctrica e térmica num único sistema [22].

Na Figura 2.12 podemos observar a diferença de produção eléctrica através da cogeração nos diversos países da União Europeia (UE).

No contexto europeu, Portugal encontra-se aproximadamente na média da UE, no que respeita à percentagem de electricidade produzida em cogeração (11% dos 27 estados membros).

2.3.2. Evolução da cogeração em Portugal

A tecnologia foi introduzida em Portugal no sector industrial nos anos quarenta, sendo as primeiras instalações baseadas em turbinas de vapor (contrapressão) que satisfaziam grandes necessidades de vapor de baixa pressão. Contudo, apenas na década de noventa a cogeração conheceu um crescimento significativo em termos de potência instalada e de energia produzida. Actualmente, a cogeração a gás natural é a única que apresenta crescimento, mantendo-se a capacidade instalada de cogeração a *diesel* e em contrapressão ou condensação.

Em 1997, com a introdução da rede de gás natural, combustível fóssil ideal para a produção de energia, foram criadas oportunidades para novas instalações de cogeração. Desde aí, foram desenvolvidos diversos projectos, utilizando turbina a gás com caldeira de recuperação e caldeira com turbina a vapor.

Assim, a potência instalada em Portugal em cogeração, no final de 2005, foi cerca de 1.207 MW de potência instalada [23].

A Figura 2.13 mostra a evolução da energia eléctrica produzida pelas centrais de cogeração ao longo dos anos.

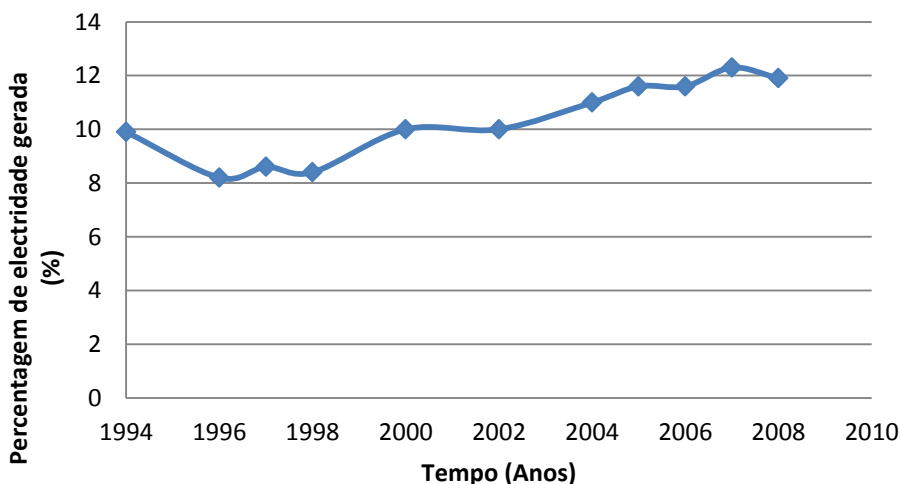


Figura 2.13 – Contribuição da cogeração para o mix energético em Portugal [21]

No ano, 2010, a energia produzida pelas centrais de cogeração foi de 6214GWh [24].

2.3.3. Tipos de cogeração

A cogeração é uma opção ou conceito associado à tecnologia de conversão de energia secundária, a tecnologia responsável pela conversão da energia primária na secundária. A energia primária representa a energia disponível no combustível que se utilizará no processo de combustão, enquanto a energia secundária representa a energia que fica disponível no final da cogeração. A mesma não pode ser vista independentemente das tecnologias de conversão de energia primária. No presente estudo é de maior interesse a combustão directa.

A combustão directa é a mais conhecida e divulgada para conversão de biomassa em calor. Para sistemas até cerca de 10MW_t , as caldeiras com fornalha de alimentação inferior e as de grelhas são soluções demonstradas e fiáveis, com custos de investimento relativamente reduzidos [20].

A aplicação da cogeração é feita de três formas em função da sequência relativa da utilização da energia térmica e eléctrica: ciclos superiores ou de cabeça (*Topping cycle*), ciclos inferiores ou de cauda (*Bottoming cycle*) e ciclos combinados.

a) – Ciclos superiores ou de cabeça (*Topping cycle*)

A energia proveniente do combustível é primeiramente utilizado produção de energia mecânica estando acoplado um alternador para a produção de energia eléctrica. Assim, o processo térmico aproveita a energia proveniente do aproveitamento anterior. Este sistema tem menores perdas se o sistema seguinte. Esta diminuição de perdas deve-se à troca de calor ser feita directamente com o processo térmico. A Figura 2.14 mostra os intervalos de temperaturas a que se dão as trocas de calor.

b) - Ciclos inferiores ou de cauda (*Bottoming cycle*)

Ao contrário do anterior, este sistema aproveita primeiramente a energia proveniente do combustível na aplicação do sistema térmico, em seguida é aproveitada a energia térmica para accionar uma turbina que por sua vez está acoplada a um alternador para gerar energia. Este sistema apresenta perdas superiores ao anterior porque efectua uma troca de calor com uma fonte fria. Deve-se ao facto de o vapor já não possuir energia suficiente para fazer girar a turbina. A Figura 2.14 mostra os intervalos de temperaturas a que se dão as trocas de calor.

Para além deste existe instalações que combinam os dois tipos.

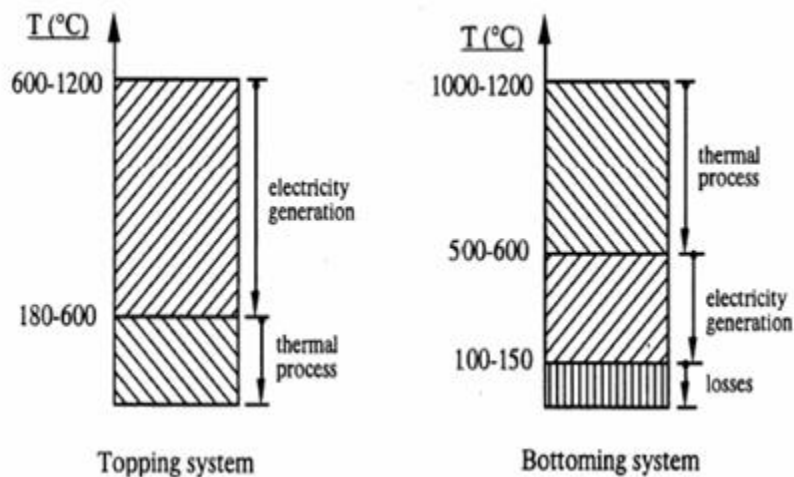


Figura 2.14 – Intervalos de temperatura de funcionamento do “*topping system*” e “*bottoming system*”[25]

2.3.4. Tecnologias de cogeração

A peça mais importante de uma instalação de cogeração é a máquina que produz energia mecânica e energia térmica, também chamado o accionador principal, que pode ser uma caldeira/turbina a vapor, turbinas a gás ou ciclo combinado. Esta máquina é que caracteriza o tipo de central de cogeração. De seguida apresentam-se os sistemas que serão utilizados para o presente projecto.

2.3.4.1. Turbina a vapor (Ciclo Rankine)

Um sistema baseado em turbinas a vapor é constituído por três componentes: fonte de calor, turbina de vapor e área de transferência de calor como se encontra descrito na Figura 2.15.

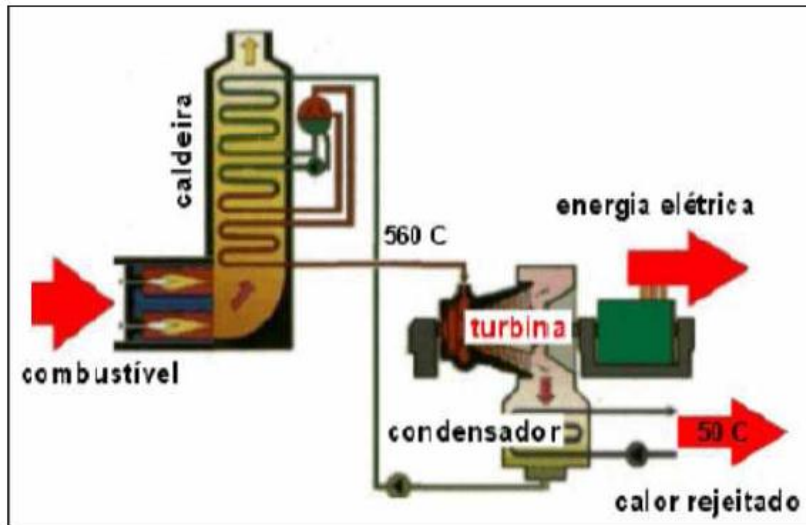


Figura 2.15 – Funcionamento base do sistema de cogeração com turbina a vapor [26]

O sistema opera segundo o ciclo de Rankine. Para uma melhor visualização das quatro transformações que o fluido sofre, a Figura 2.16 identifica os equipamentos utilizados.

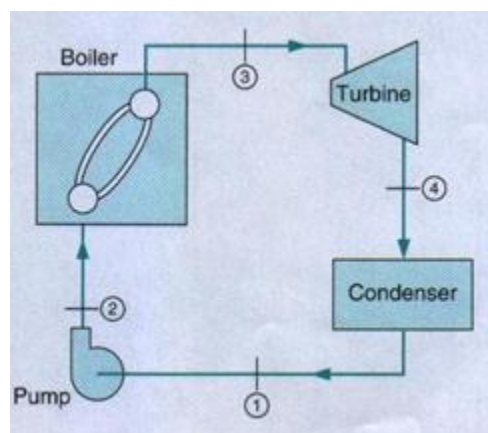


Figura 2.16 – Turbina a vapor segundo o ciclo de Rankine [27]

O fluido de trabalho é bombeado de uma pressão baixa para uma pressão alta, de seguida o fluido entra numa caldeira, onde é aquecido a uma pressão constante até se tornar vapor. O vapor expande através de uma turbina a vapor fazendo-a girar que estando acoplada a um alternador para a produção de energia eléctrica. Com a expansão, a pressão e a temperatura do vapor diminuem consideravelmente, entrando num condensador, onde é arrefecido até à

condição de líquido saturado para que o rendimento termodinâmico seja superior. Este líquido então volta à bomba e o ciclo repete-se continuamente.

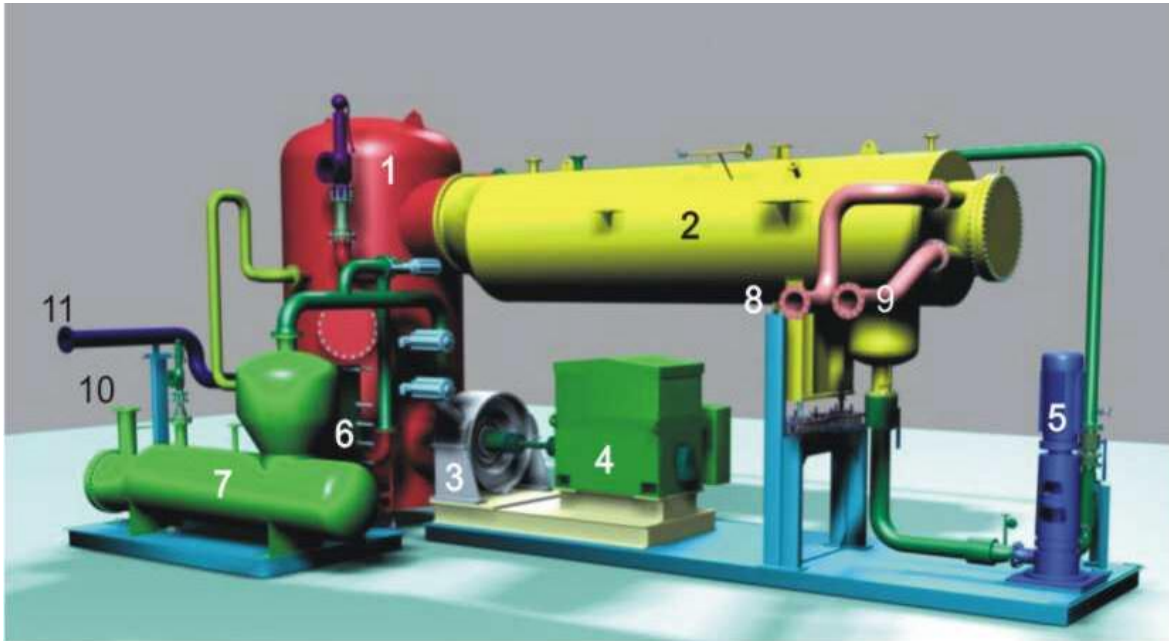
Para aplicações de cogeração a pressão do vapor pode variar entre os 40 e os 100bar. A temperatura do vapor está compreendida entre os 300°C e os 450°C. Nestes casos a potência de saída pode oscilar entre os 0,5 e os 100 MW [20].

Este tipo de sistema apresenta derivadas vantagens, fazendo ênfase apenas a algumas, o tempo de vida ser elevado, não necessita de vigilância constante, é um equipamento seguro, apresenta um rendimento global elevado, possui a capacidade de fornecer, aos processos térmicos, vapor a alta pressão e/ou pressão atmosférica. A manutenção deste tipo de centrais permite um elevado número de horas de serviço. Como qualquer sistema tem as suas desvantagens, nomeadamente o reduzido número de aplicações, um baixo rendimento eléctrico, arranque relativamente lento, problemas no controlo das emissões de poluentes, uma vez projectado a central esta fica dependente do tipo de combustível para o qual foi prevista, economicamente apresenta um investimento inicial elevado [26].

2.3.4.2. Ciclo Orgânico de Rankine (ORC)

O ORC é baseado no processo do ciclo *Rankine* com a diferença de utilizar um fluido orgânico (hidrocarbonetos, tais como iso-pentano, iso-octano, tolueno ou óleo de silicone) com propriedades termodinâmicas favoráveis, em vez de se utilizar água como o sistema de turbina a vapor.

Estes sistemas são muito utilizados para a produção de energia, principalmente em aplicações de biomassa, geotérmica e na recuperação do calor solar [28]. A Figura 2.17 apresenta uma perspectiva de um módulo ORC e os elementos que o constituem.



- | | | |
|----------------------|--------------------|-----------------------|
| 1 Regenerator | 5 Circulation pump | 9 Hot water outlet |
| 2 Condenser | 6 Pre-heater | 10 Thermal oil inlet |
| 3 Turbine | 7 Evaporator | 11 Thermal oil outlet |
| 4 Electric generator | 8 Hot water inlet | |

Figura 2.17 – Perspectiva de uma instalação ORC [29]

O ciclo termodinâmico do sistema ORC é semelhante ao de Rankine, conseqüentemente ao de Carnot.

A energia produzida pela combustão da biomassa é transferida para um fluido térmico através de uma caldeira como se verifica na Figura 2.18. A utilização do fluido térmico permite que a troca de calor seja efectuada praticamente à pressão atmosférica. O fluido térmico (representado a vermelho na Figura 2.19) é usado como meio de transferência de calor no processo de ORC através do permutador de calor 1 (temperatura 300°C da alimentação do fluido)

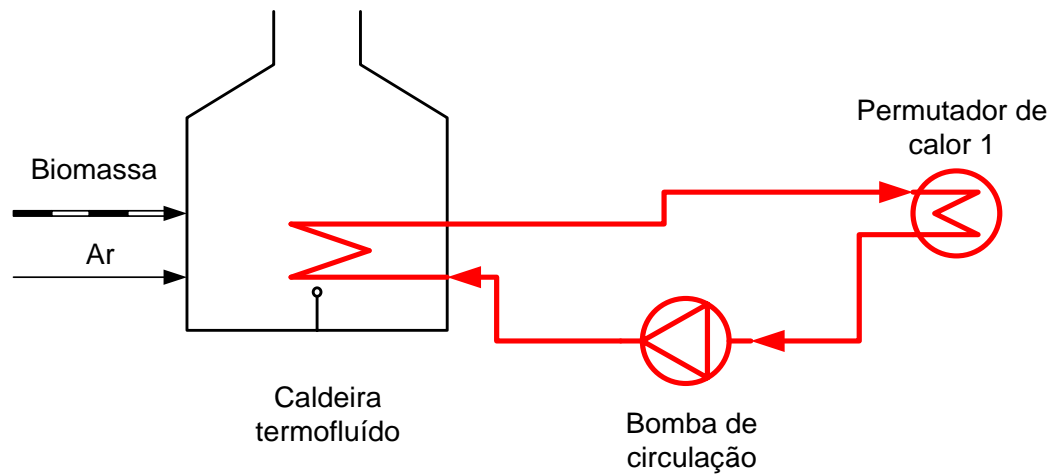


Figura 2.18 – Representação esquemática da queima da biomassa e do aquecimento do fluido térmico.

O fluido orgânico (representado a verde na Figura 2.19) é vaporizado no permutador de calor 1, sendo a energia proveniente do ciclo descrito na Figura 2.18. O fluido orgânico, vaporizado, é expandido numa turbina axial, que estando acoplada a um gerador assíncrono trifásico gera energia eléctrica. Consequentemente, o fluido expandido passa pelo regenerador, para pré-aquecer o fluido orgânico que está prestes a ser vaporizado novamente, fazendo, assim, com que o rendimento seja melhorado. No permutador de calor 2, dá-se o arrefecimento do fluido orgânico utilizando água, efectuando uma troca de calor com uma fonte fria que é o processo térmico, em que a temperatura de saída ronda os 80°C [28]. Este processo é descrito na Figura 2.19.

Um sistema ORC apresenta uma elevada eficiência (especialmente se for utilizada como central de cogeração), as turbinas utilizadas, a axial, apresenta rendimentos elevados, na ordem dos 90%, a utilização de um fluido orgânico evita a corrosão da turbina (devido ao oxigénio existente na água), é uma instalação simples e compacta com reduzidos custos de operação e manutenção, e investimento apresentando um tempo de vida útil elevado.

Como qualquer sistema tem inconvenientes, dos quais se destacam a não utilização para processos que requerem elevadas temperaturas e para potências eléctricas elevadas, existente no mercado até potências na ordem dos 3MW [28].

2.3.5. Enquadramento legal do sector

A publicação do Decreto-Lei nº 189/88, a primeira legislação orientada para a promoção da produção de energia eléctrica a partir de recursos renováveis, combustíveis nacionais ou resíduos industriais, agrícolas ou urbanos, bem como da cogeração, representou um marco fundamental na história da produção independente em Portugal.

Seguidamente é apresentada a evolução em termos cronológicos da legislação referente à cogeração em Portugal até os dias de hoje.

Decreto-Lei nº 189/88, de 27 de Maio;

- Regula a actividade de produção de energia eléctrica;
- Requisitos instaurados;
- Originou um acentuado desenvolvimento de utilização do processo de cogeração; Surgimento de muitas especialidades;
- Necessidade de autonomização do enquadramento legal da cogeração;

Decreto-Lei nº 186/95, de 27 de Julho

- Consagra a separação legislativa das formas de produção de energia eléctrica, aplicando-se exclusivamente à produção de energia em instalações de cogeração;
- Estabelecimento de regras quantitativas;

Decreto-Lei n.º 538/99, de 13 de Dezembro;

- A criação do mercado interno de electricidade;
- A defesa do ambiente – estreitamento das políticas ambientais e energéticas;

Revisões posteriores da legislação, em 2000, 2001, 2002 vieram impor critérios de eficiência aos projectos de cogeração o que valorizou e consagrou esta forma alternativa de produção de energia.

A actividade da cogeração, em Portugal, passou a ter um enquadramento legal adequado, com uma estrutura transparente de remuneração e que reconhece inequivocamente os benefícios energéticos e ambientais a toda a produção em cogeração.

No que respeita a questões ambientais, dependendo da natureza, dimensão e localização das instalações, importa referir os seguintes:

- Impacte Ambiental (Decreto- Lei n.º 69/2000, de 3 de Maio);
- Regulamento Geral do Ruído (Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro);
- Emissão de poluentes (Portaria n.º 1058/94, de 2 de Dezembro e Portaria n.º 268/93, de 12 de Março);
- Autorização para a queima de resíduos (Decreto- Lei n.º 239/97, de 9 de Setembro e Decreto-Lei n.º 273/98, de 2 de Setembro).

Em 2004, com a publicação da Directiva n.º 2004/8/CE do parlamento europeu e do conselho, de 11 de Fevereiro, relativo à promoção da cogeração, o governo, mais propriamente o ministério da economia começou a trabalhar numa nova legislação transpondo a directiva. O Governo aproveitou para rever as regras a aplicar no sector e o sistema de remuneração, levando a um atraso na publicação.

Decreto-Lei n.º 23/2010, de 25 de Março; Estabelece o sistema jurídico e remuneratório para instalações de cogeração.

Lei n.º 19/2010, de 23 de Agosto; Alteração do Decreto-Lei n.º 23/2010, de 25 Março

Com a legislação acima indicada, Portugal possui uma nova legislação que estabelece as regras jurídicas aplicáveis à electricidade produzida em cogeração e o regime remuneratório respectivo.

No novo regime, as instalações de cogeração podem optar por duas modalidades, especial e geral, permitindo o proprietário da instalação de cogeração obter a sua remuneração de energia eléctrica por parte do comercializador de último recurso (CUR) ou em mercados organizados. A admissão a cada modalidade depende da classificação de cada instalação, podendo ser eficiente ou de elevada eficiência.

2.3.5.1. Classificação quanto à eficiência (CEE)

Considera-se uma instalação de elevada eficiência quando a potência instalada é superior a 25 MW e cujo rendimento global seja superior a 70% existindo uma poupança da energia primária (produção separada de electricidade e calor) no mínimo de 10%. Considera-se também estar na presença de co-geração de elevada eficiência quando a potência instalada está compreendida entre 1 MW e 25 MW e onde se verifique simultaneamente uma poupança da energia primária de pelo menos 10%. Por fim, todas as instalações de pequena dimensão de onde resulte uma poupança de energia primária também são classificadas por este tipo de cogeração.

As restantes instalações que não se enquadrem nas condições acima descritas são denominadas de instalações de Cogeração Eficiente (CE).

Poupança de Energia Primária (PEP)

A determinação do PEP é obtida segundo a equação 2.1.

$$PEP = \left[1 - \frac{1}{\frac{CHPH_{\eta}}{RefH_{\eta}} + \frac{CHPE_{\eta}}{RefE_{\eta}}} \right] \quad (2.1)$$

- $CHPH_{\eta}$ é a eficiência térmica do processo, definida como a produção anual de calor útil dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor e de electricidade;

- Ref $H\eta$ é o valor de referência da eficiência para a produção separada de calor
- CHP $E\eta$ é a eficiência eléctrica, definida como a produção total anual de electricidade dividida pelo combustível utilizado na produção total de calor útil e de electricidade num processo de cogeração. Quando uma unidade de cogeração gerar energia mecânica, a quantidade anual de energia eléctrica proveniente da cogeração poderá ser acrescida de um elemento suplementar que represente a quantidade de energia eléctrica que é equivalente à da energia mecânica.
- Ref $E\eta$ é o valor de referência da eficiência para a produção separada de electricidade.

2.3.5.2. Modalidade geral

A modalidade geral é acessível a instalações de cogeração não abrangidas pela modalidade especial, sendo a remuneração estabelecida através das seguintes relações de mercado:

- Fornecimento de energia térmica a cliente (s), sendo o preço estabelecido contratualmente.
- Fornecimento de energia eléctrica a cliente (s) directamente ligados à instalação, com o preço de venda a ser estabelecido entre as partes, sendo aplicável a tarifa de uso global do sistema e a tarifa de comercialização.
- Fornecimentos estabelecidos em contratos bilaterais celebrados com clientes ou comercializadores, sendo o preço de venda livremente estabelecido entre as partes.
- Fornecimentos em mercados organizados, cujo preço resulta das vendas em mercado.
- Prémio de participação no mercado (percentagem da tarifa de referência) para instalações com potência instalada inferior ou igual a 100 MW.

O prémio de participação no mercado vigora durante os primeiros 120 meses após a entrada em exploração da instalação de cogeração, sendo este período prorrogado pela DGEG, por 120 meses, a pedido do proprietário da instalação de cogeração, desde que a unidade de

cogeração cumpra os requisitos de classificação e nas condições de aplicação de prémio de mercado.

2.3.5.3. Modalidade especial

A modalidade especial é apenas acessível a instalações de cogeração com uma potência instalada igual ou inferior a 100 MW.

Neste caso, é ainda obrigatória a prévia ligação da instalação de cogeração à Rede de Serviço Público (RESP), sendo aplicável o disposto no DL 312/2001, de 10 de Dezembro – Pedido Informação Prévia, atribuição de Ponto de Recepção.

A remuneração para a modalidade especial é estabelecida através das seguintes relações de mercado:

- Fornecimento de energia térmica a cliente (s), sendo o preço estabelecido contratualmente.
- Fornecimento de energia eléctrica ao comercializador de último recurso, com o preço de venda a ser igual a uma tarifa de referência (TR).
- Prémio de eficiência (PE), calculado em função da poupança de energia primária (PEP) de cada instalação.
- Prémio de energia renovável (PER), em função da proporção de combustíveis de origem renovável consumidos. Cogeração é renovável se, no mínimo, 50% da energia primária consumida for de origem renovável.

A tarifa de referência e o prémio de eficiência vigoram durante os primeiros 120 meses após a entrada em exploração da instalação de cogeração, sendo este período prorrogado pela DGEG, por 120 meses, a pedido do proprietário da instalação de cogeração, desde que a unidade de cogeração cumpra os requisitos de classificação e nas condições de aplicação de uma tarifa de referência.

A depreciação da tarifa de referência aplica-se a todas as instalações de cogeração que beneficiem da prorrogação do regime remuneratório, sendo a depreciação inferior 1 % por cada ano para os proprietários das instalações de cogeração cujas instalações tenham uma potência eléctrica instalada inferior ou igual a 20MW.

As instalações de cogeração com uma potência eléctrica instalada inferior ou igual a 20 MW que se encontre enquadrado na modalidade especial do regime remuneratório pode mudar para o regime geral, apenas podendo regressar à modalidade de origem após, pelo menos, um ano de permanência efectiva na modalidade geral. No caso de a potência eléctrica instalada for superior 20 MW e inferior ou igual a 100 MW pode mudar para a modalidade geral, apenas podendo regressar à modalidade de origem após três anos de permanência efectiva na modalidade geral.

3. Caso de estudo: Serração de Madeira

Neste capítulo apresenta-se uma breve caracterização da serração de madeira em estudo, apresentam-se as soluções de cogeração consideráveis aplicáveis a este estudo e faz-se a determinação dos custos e receitas associadas a cada uma das soluções de cogeração propostas.

3.1. Caracterização

A serração de madeira localiza-se na no distrito de Santarém, concelho de Ourém, freguesia da Ribeira do Fárrio no lugar da Reca, possuindo uma potência eléctrica instalada de 315kVA, com uma potência eléctrica contratada de 200kW. O seu mercado insere-se no mercado nacional, encontrando-se em expansão pela europa. A fábrica contém duas linhas de produção, uma primeira linha dedicada essencialmente à produção de tábuas e barrotes e uma segunda que se dedica à produção de tábuas para a elaboração de paletes e afins. Como se contemplou no subcapítulo 2.1.1.1 é necessário efectuar um tratamento à madeira para combater o NMP, como é exigido pela NP 4487, para que a madeira possa ser exportada.

A empresa produz cerca de 240m³/semanais de resíduos, nomeadamente serradura e carasca. Nestes 240m³ não se encontram compreendidos os destroços e resíduos provenientes das matas florestais.

A serração possui uma estufa térmica, cujo fabricante é a TORBEL, com a possibilidade de efectuar o tratamento a 40m³, normalmente 36 malotes, devidamente colocados para que a circulação do ar seja garantida em toda a madeira, em simultâneo. A circulação do ar na estufa é garantida por um conjunto de ventiladores instalados no seu interior sendo estes responsáveis pela extracção do calor gerado pelo aquecimento da água proveniente da caldeira. O controlo da temperatura no interior da estufa é efectuada por assistência computacional. O programa que auxilia este tratamento é o *WoodWizard*.

O programa tem o auxílio de 5 sensores de temperatura colocados estrategicamente no interior da madeira que é submetida ao tratamento. Com o auxílio de uma perfuradora, efectua-se um furo, com diâmetro suficiente no interior da paleta, coloca-se o sensor e o furo é selado com silicone, de modo a que a leitura seja o mais próximo possível da temperatura no interior da madeira.

Na Tabela 3.1, encontramos as principais características desta estufa e a figura 3.1 mostra como é a vista principal da mesma.

Tabela 3.1 – Características da estufa térmica

<i>Modelo</i>	<i>STBE 9mx6,4mx4,2m</i>
Nº série	1199 TB ano 2008
Potência	27kW (230/400 V 50Hz)



Figura 3.1 – Estufa de tratamento térmico

O tratamento é efectuado com a queima de resíduos industriais (serradura e carrasca) para o aquecimento de água numa caldeira. A caldeira é do tipo gás tubular com três tiragens, com uma fornalha espaçosa especialmente concebida para incinerar combustíveis sólidos de

qualidade inferior (biomassa) e produzir água quente por meio da energia calorífica libertada.

Segundo dados da serração, o tratamento consome cerca de $1\text{m}^3/\text{h}$ dos seus próprios resíduos indústrias, nomeadamente, serradura e carrasca. A densidade média do combustível utilizado é cerca de $377\text{kg}/\text{m}^3$ (fornecido pela serração).

Dado que a energia térmica do processo é obtida através da queima dos resíduos da serração, torna-se importante caracterizar o poder calorífico. De acordo com os dados recolhidos, o combustível utilizado é habitualmente constituído por uma mistura de 50% de serradura e 50% de carrasca. Com base nos valores apresentados na Tabela 2.1 estima-se que o Poder Calorífico Inferior do combustível (PCI) seja de $4,5\text{kWh}/\text{kg}$. De referir que este PCI se trata de um valor indicativo, pois o seu valor exacto depende do nível de humidade do combustível. A serração efectua em média um tratamento por semana, com uma duração de cerca de 10 horas. A maioria dos tratamentos feitos pela serração é em malotes, uma vez que a empresa não possui linha de montagem de paletes, apenas a produção das tabuas que constituem os paletes. Assim, considerando, o número de horas de funcionamento, o combustível consumido e o seu PCI, chega-se à conclusão que a potência térmica necessária para o funcionamento do sistema é de $1,7\text{MWt}$.

Actualmente, segundo dados da serração, cada tratamento representa um custo associado de 400€ a 500€ , dependendo do tipo de madeira serrada a tratar, paletes ou malotes, respectivamente.

3.2. Soluções de cogeração propostas

Apresenta-se em seguida o dimensionamento de duas soluções de cogeração aplicáveis ao caso em estudo. O dimensionamento destas soluções de cogeração tem em conta a energia térmica necessária ao tratamento, bem como a energia eléctrica para a produção de energia eléctrica para a venda à rede eléctrica.

3.2.1. Turbina a vapor

Esta solução, como se verifica na Figura 3.2, é constituída por dois circuitos: circuito primário e circuito secundário.

O circuito primário será constituído por uma caldeira, uma turbina a vapor, um condensador e uma bomba de circulação, normalmente denominado por fonte quente.

O circuito secundário é constituído por uma bomba de circulação e um conjunto de ventiladores e tem como objectivo fornecer calor necessário ao tratamento térmico, denominado de fonte fria.

O calor usado nesse tratamento tem origem no calor rejeitado pelo circuito primário, transferido através do condensador.

A potência eléctrica do sistema será proporcional ao valor da energia térmica necessária para a execução do tratamento térmico. [31] Tendo por base a figura 3.2, que descreve o processo térmico, verifica-se que é a fonte quente é o sistema representado a vermelho e a fonte fria é o processo de tratamento. A troca de calor dá-se no condensador, que apresentam rendimentos (η_p) que rondam os 50-60%. [30]

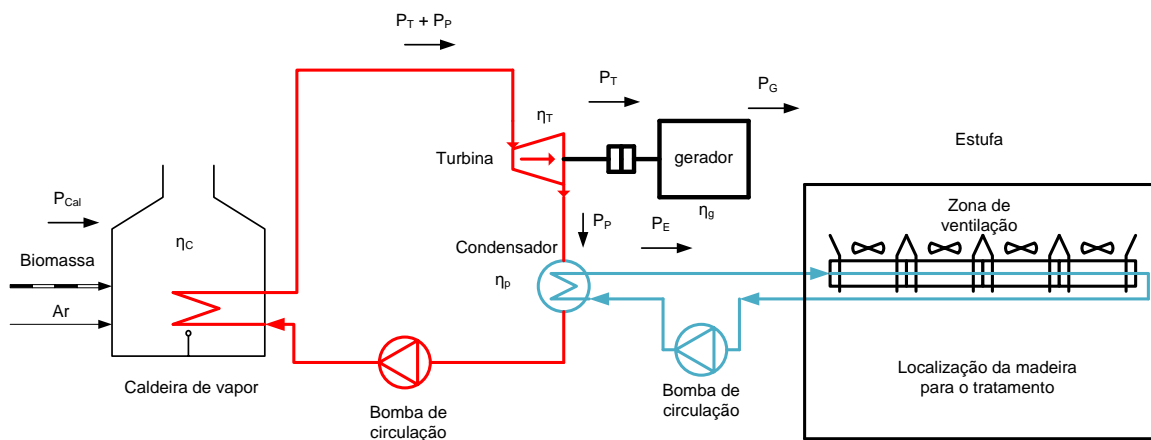


Figura 3.2 – Descrição do sistema de turbina a vapor aplicado ao processo industrial

Assim sendo, o vapor à saída da turbina tem de disponibilizar uma potência correspondente à potência do permutador de calor (P_p). Segundo [31], utilizam habitualmente uma razão entre o calor produzido e a energia eléctrica para sistemas de cogeração de turbina a vapor de contrapressão sendo de 2,4.

$$\gamma_{CG} = \frac{P_G}{P_E} \quad (3.1)$$

Deste modo conseguimos obter qual a potência eléctrica útil (P_G) da instalação tendo em conta o rendimento do gerador ($\eta_G=95\%$). Consequentemente obtêm-se a quantidade de combustível para satisfazer o HT e a produção de electricidade. Para a determinação da quantidade de combustível, ou a potência térmica total (P_{CAL}) a utilizar, é necessário definir os valores de rendimento da turbina axial a vapor, $\eta_T=90\%$ [26], e da caldeira $\eta_{cal}=86\%$.

A potência da eléctrica útil é obtida através da equação 3.2.

$$P_G = \eta_G \times \frac{P_E}{\eta_P} \times \frac{1}{\gamma_{CG}} \quad (3.2)$$

A potência entregue à caldeira (P_{cal}) é obtida pela equação 3.3

$$P_{cal} = \frac{\eta_G \times \frac{P_E}{\eta_T \times \eta_P} \times \frac{1}{\gamma_{CG}} + \frac{P_E}{\eta_P}}{\eta_{cal}} \quad (3.3)$$

A Figura 3.3 apresenta um diagrama, no qual se verifica o fluxo de energia de um sistema com turbina a vapor, representando todas as perdas do sistema.

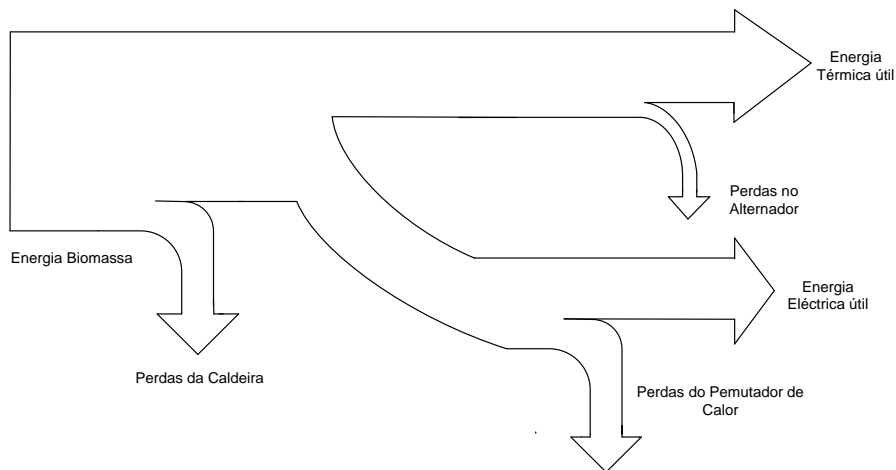


Figura 3.3 – Diagrama de fluxo de energia de um sistema com turbina a vapor

A Tabela 3.2 apresenta os valores de rendimento do sistema obtidos através da figura 3.3. Estes parâmetros irão permitir o cálculo do PEP, conforme dita a legislação.

Tabela 3.2 – Valores de rendimento da energia térmica e eléctrica para a turbina a vapor

$CHP H\eta$	35,3 %
$CHP E\eta$	23,3%

3.2.2. Sistema ORC

Esta solução é constituída por um sistema ORC, com um funcionamento muito semelhante à anterior, de modo a responder às necessidades térmicas da unidade industrial.

Após a análise de mercado, conclui-se que existem vários fabricantes de sistemas ORC e diversas empresas que fazem a sua implementação. Contactamos o seguinte fabricante, a TURBODEN, sediada na Itália, disponibilizou-se ao fornecimento de alguns dados importantes, entre os quais o funcionamento do seu sistema ORC e seus custos associados ao módulo ORC.

Tendo por base a Figura 3.4, que descreve o processo térmico, verifica-se que é a fonte quente é o sistema representado a vermelho e a fonte fria é o processo de tratamento.

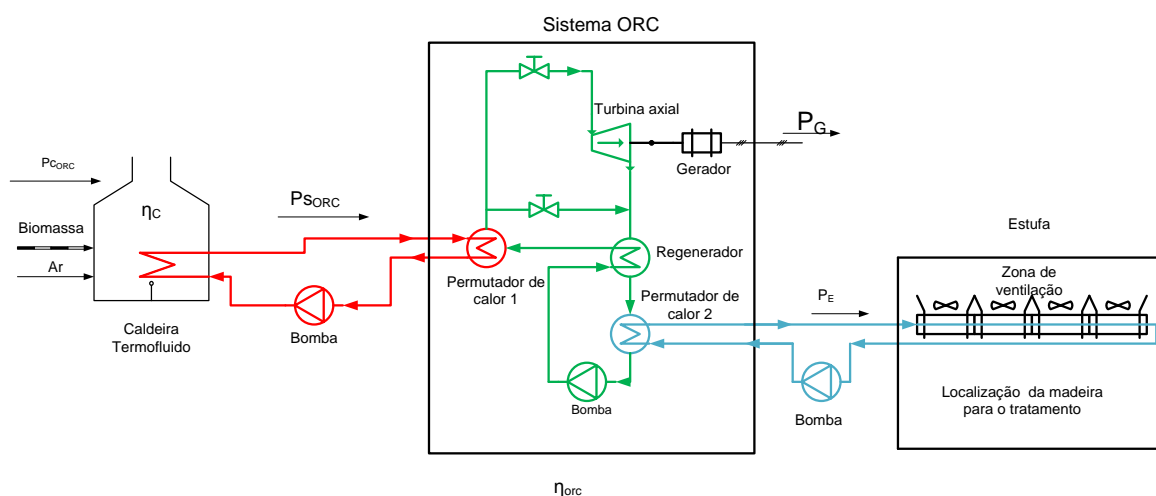


Figura 3.4 – Descrição do sistema ORC aplicado ao processo industrial

Portanto, sabendo qual o valor de energia térmica necessária para o processo industrial e aplicando os valores de rendimentos típicos dos sistemas ORC, nomeadamente os fornecidos pela TURBODEN indicados na Figura 2.20 chegamos aos valores de potência eléctrica a produzir e qual o consumo de combustível total para o processo.

Com os valores indicados na Figura 2.20, determina-se qual a energia térmica útil que a caldeira necessita de fornecer ao sistema ORC.

A caldeira a utilizar no sistema ORC permite a queima de biomassa florestal, utilizando óleo térmico como condutor, aquando a transferência do calor gerado na caldeira para o sistema ORC. A utilização deste óleo térmico permite que o sistema funcione a baixas pressões. Esta precisa de fornecer calor ao sistema ORC valores de temperatura na ordem dos 250°C aos 300°C.

A caldeira será do tipo vertical com a grelha fixa e inclinada. O rendimento desta caldeira ronda 86%, segundo a [32].

A Figura 3.5 estabelece um diagrama que relacione a energia disponível pelo combustível até à energia térmica que vai ser utilizada pela estufa e a energia eléctrica resultante.

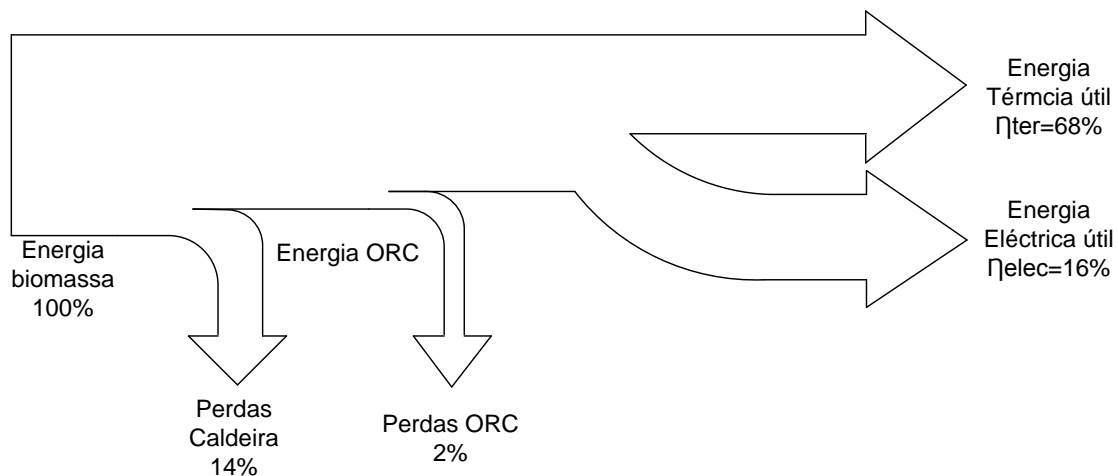


Figura 3.5 – Diagrama de fluxo de energia do sistema ORC

A Tabela 3.3 apresenta os valores de rendimento do sistema obtidos através segundo a Figura 3.5. Estes parâmetros permitirão o cálculo do PEP, conforme dita a legislação.

Tabela 3.3 – Valores de rendimento da energia térmica e eléctrica para a sistema ORC

<i>CHP Hη</i>	68,9 %
<i>CHP Eη</i>	15,6%

3.3. Custo das soluções de cogeração

Como qualquer avaliação económica, é necessário antes de mais determinar qual é o investimento necessário para a implementação do projecto, determinar as respectivas remunerações e qual a taxa de referência para o nosso projecto.

3.3.1. Custos de investimento

O investimento total é determinado através da soma do custo de todos os equipamentos e a respectiva instalação dos mesmos.

No da solução de turbina a vapor consideraram-se os valores apresentados na Tabela 3.4. Estes valores foram obtidos a partir de [20].

Tabela 3.4 – Custos de investimento da turbina a vapor [20]

<i>Custos de Investimento (€/kW)</i>	
Caldeira a vapor	1.000
Tubagem	150
Turbina a vapor	1.150
Sistema de controlo	32,5
Ligação à rede	110
Engenheira	250
Obras de construção civil e outros	400
Investimento Total	3.092,5

O preço da instalação para um sistema de turbina a vapor será considerado conforme indicado na Tabela 3.4.

No caso da solução do sistema ORC consideraram-se os valores indicados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Custos de investimento do sistema ORC [20]

<i>Custos de Investimento (€/kW)</i>	
Caldeira a vapor	667
Tubagem	61
Sistema ORC	1.278
Sistema de controlo	36
Ligação à rede	122
Engenheira	194
Obras de construção civil e outros	278
Investimento Total	2.636

A diferença entre o investimento do sistema ORC e a Turbina a vapor é 456,5€/kW, esta diferença verifica-se principalmente na diferença de custos das caldeiras. Esta diferença deve-se ao tipo de caldeiras que os sistemas necessitam, na caldeira para a turbina a vapor é necessário ter matérias que resistam a grandes pressões, o mesmo não se verifica para o sistema ORC, que com o uso do óleo térmico consegue funcionar quase à pressão atmosférica.

3.3.2. Custos de operação e manutenção

Os custos de operação podem ser divididos em duas partes, custos fixos e custos variáveis. A Tabela 3.6 apresenta os CF do projecto

Tabela 3.6 – Custos fixos de produção das soluções apresentadas [20]

Custos Fixos	Turbina a vapor	Sistema ORC
Custo com pessoal	4,8 (€/h)	3,6 (€/h)
Outros custos	1,2 % (IT)	1,2 % (IT)
Custo de manutenção	5 % (IT)	2 % (IT)

A Tabela 3.7 indica o custo variável para ambas as soluções apresentadas. Este valor obteve-se junto à serração, que adquire o combustível a 10€/m³.

Tabela 3.7 – Custos de Produção variáveis do projecto

Custos Variáveis	
Preço combustível (biomassa) [€/t]	27

3.3.3. Receitas

As receitas geradas são definidas pela nova legislação em vigor da cogeração, nomeadamente o **Decreto-Lei n.º 23/2010**, descrito no subcapítulo 2.3.5.

Para proceder à determinação das receitas, em primeiro lugar é preciso classificar a central e em seguida escolhermos qual o regime de remuneração.

3.3.3.1. Classificação quanto à eficiência da central

Considerando os valores apresentados da Tabela 3.8 e os valores representados nas tabelas 3.2 e 3.3, a PEP é determinada pela equação 2.1 resultando nos valores indicados na Tabela 3.9.

Tabela 3.8 – Valores de referência da directiva de 2007/74/CE

<i>Combustível tipo lenha</i>	
Ref H η	86%
Ref E η	33%

Tabela 3.9 – Poupança de energia primária para ambas as soluções

	<i>PEP (%)</i>
Turbina a vapor	10,3
Sistema ORC	21,5

3.3.3.2. Remuneração da energia térmica (RET)

No caso de estudo apresentado pretende-se que a energia térmica seja utilizada pelo próprio produtor. Desta forma não consideramos qualquer custo associado ao consumo de energia térmica. Mesmo considerando que a remuneração seja nula, a equação 3.4 representa o custo de cada tratamento em função da potência térmica.

$$C_{HT} = Pt \times RET \quad (3.5)$$

3.3.3.3. Remuneração da energia eléctrica na modalidade geral (REEG)

A remuneração de energia eléctrica, de acordo com o descrito em 2.3.5.2 pode ser determinado a partir de:

$$REEG = PM + PPM \quad (3.6)$$

O Preço de Mercado (PM) é determinado pelo mercado ibérico.

O Prémio de Participação de Mercado (PPM) será determinado por portaria, que segundo o [5], encontra-se para breve.

3.3.3.4. Remuneração da Energia Eléctrica na modalidade especial (REEE)

A remuneração de energia eléctrica, de acordo com o descrito em 2.3.5.3 pode ser determinado a partir de:

$$REEE = PE + PER + TR \quad (3.7)$$

O prémio de eficiência (PE) e o prémio de energia renovável (PER) será determinado por portaria, que segundo o [5], encontra-se para breve.

A tarifa de referência é determinada pelo CUR, que neste caso se trata da empresa EDP, encontrando-se igualmente pendente.

4. Avaliação económica das soluções de cogeração

Neste capítulo realiza-se a avaliação económica do projecto de instalação de um sistema de cogeração numa serração de madeira, na qual a energia térmica será usada no tratamento do NMP.

Esta avaliação económica efectuou-se com recurso a um simulador desenvolvido especificamente para o efeito.

O simulador desenvolvido permitiu ainda a realização de uma análise de sensibilidade para a determinação dos factores que mais influenciam os resultados económicos do caso em estudo.

4.1. Simulador: Metodologia e implementação

A metodologia que se utilizou ao longo deste projecto serviu para a implementação do simulador, onde definiram-se as entradas e saídas para a fácil utilização e compreensão do simulador. Neste subcapítulo descrevem-se as entradas e saídas explicando a sua importância, origem e definição.

Deste modo os dados de entrada obtiveram-se junto dos produtores de madeira, que efectuem ou pretendam efectuar o tratamento, em busca de informações e dados concretos acerca das necessidades térmicas requeridas para efectuar o tratamento à madeira devido ao NMP para que esta possa ser exportada. A necessidade térmica é uma entrada importante sendo determinada de diversas formas, no projecto utilizou-se a medição do combustível consumido por hora. No simulador esse dado é introduzido na forma de volume de madeira. Esta necessidade depende igualmente do poder calorífico do combustível utilizado, considerando-se mais uma entrada do simulador. Em seguida, o parâmetro a definir como mais um dado de entrada é o tempo de funcionamento, que no simulador se encontra dividido entre a quantidade de tratamentos efectuados semanalmente e o tempo de cada tratamento.

Uma vez que esta solução é para ser utilizada na sua maioria por serrações de madeira que produzem resíduos industriais, nomeadamente serradura e carrasca, o combustível a ser utilizado pela tecnologia escolhida tem que permitir a queima de biomassa florestal utilizando as caldeiras de grelha [16].

Uma vez determinados os parâmetros de entrada, tempo de funcionamento, volume de madeira da estufa, o poder calorífico do combustível a utilizar tem-se as condições reunidas para o dimensionamento da turbina a vapor ou do sistema ORC.

Com a actual legislação em vigor sobre a cogeração, existem duas modalidades distintas de remuneração, geral e especial, que definem os preços de energia eléctrica e térmica. O cogrador pode escolher qualquer uma dependendo da sua eficiência e potência.

A remuneração de energia térmica é definida por contratos entre o proprietário da instalação de cogeração e o cliente final.

O mesmo não se verifica para a remuneração da energia eléctrica. No caso da modalidade geral o preço é definido por contratos bilaterais ou em mercado, existindo prémios para a participação no mercado.

Após definição de todas as entradas, determina-se o consumo de energia térmica de todo o sistema, através das relações que se obtiveram em 3.2.1, para a turbina a vapor, e 3.2.2 para o sistema ORC. A energia eléctrica produzida depende das mesmas relações. A eficiência da instalação é obtida através da equação 2.1.

Para ambos os sistemas, determinam-se os custos associados, custos de investimento e produção, determinando-se o investimento que é necessário efectuar no início da instalação e os custos que a instalação apresentará ao longo dos anos de funcionamento, apresentado o investimento total.

Como em qualquer projecto, é necessário proceder a uma análise económica. Neste sentido há que apurar quais os fluxos anuais gerados pela exploração do projecto e depará-los com o período de vida do projecto e o investimento. A estes fluxos obtidos anualmente através do somatório dos resultados líquidos e amortizações damos o nome de *Cash-Flow*. Não nos indicam apenas valores de vendas e pagamentos do projecto em numerário, expõem-nos também o período de tempo em que se verifica esse mesmo fluxo (um euro hoje vale mais que um euro amanhã) apelidado de *Cash-Flow actualizado* (CFact). Esta abordagem é

necessária para transportar para o ano zero todos os fluxos previstos gerados ao longo do projecto, de modo a poder tomar a decisão de efectuar ou não o projecto.

Com este cálculo, podem ser obtidos critérios de avaliação extremamente influentes no que refere à tomada de decisão de implementar ou não o projecto.

No projecto abordam-se três indicadores económicos, o Valor Actual Líquido (VAL), a Taxa Interna de Rentabilidade (TIR) e o período de recuperação do investimento (Payback time)

O VAL resulta do somatório de todos os CFact, revela-nos se o projecto é capaz de gerar ou não receitas, sendo que um projecto só se diz rentável se o VAL for superior a zero.

A TIR é a taxa de actualização do projecto que dá o VAL nulo. A TIR enquanto critério de decisão exige sempre uma taxa de juro de referência, sendo esta, em geral, o custo de oportunidade do capital investido, isto é, o rendimento perdido na alternativa mais rentável ao investimento aplicado no projecto.

O PAYBACK atende ao período de tempo que o projecto leva a recuperar o capital investido.

De forma a facilitar a utilização da metodologia implementou-se um simulador que contempla todas as entradas e saídas referenciadas anteriormente. A sua implementação efectuou-se no *Microsoft Excel*.

O ficheiro é constituído por 9 subfolhas de cálculo, que permitem a modelização a qualquer outro projecto e mesmo a alteração de alguns dados.

A primeira folha, “Rosto”, terá um objectivo de interface com o utilizador comum. Nesta folha o utilizador introduzirá quantos metros cúbicos de madeira serão tratados, qual a duração de cada tratamento e quantos tratamentos serão efectuados por semana. Poderá definir o PCI do combustível utilizado, uma vez que este parâmetro é muito variável, e ainda definir qual a sua taxa de referência.

No simulador, o utilizador pode optar por duas tecnologias de cogeração distintas, assim como a escolha da modalidade de remuneração. A folha “indústria” tem como objectivo a indicação de alguns parâmetros da instalação à qual estará associada a central de cogeração. Por outro lado, a folha “decreto-lei” efectua os cálculos inerentes à nova legislação em vigor, nomeadamente a PEP.

Cada tecnologia tem um subficheiro associado, “sistema ORC” e “turbina a vapor”, no qual são apresentados os valores de rendimentos para a determinação da energia eléctrica produzida, a quantidade de combustível usado, assim como os valores de investimento total e custos de produção. Do mesmo modo que existem folhas de cálculo para as distintas tecnologias, o mesmo se verifica para as remunerações nas distintas modalidades, sendo que para a energia térmica a folha é identificada como “remuneração térmica”. Para a modalidade geral, a folha “remuneração geral”, contempla quais os valores necessários para o cálculo da tarifa. À semelhança desta, a modalidade especial tem uma folha de cálculo, “remuneração especial”, que tem nela inserida os prémios, PR, PE, e a tarifa do CUR. A folha “avaliação económica” efectua o cálculo dos fluxos monetários do projecto, para que posteriormente sejam indicados ao utilizador, na folha “Rosto”, os critérios de avaliação, VAL, TIR e PAYBACK. A mesma folha indica a potência térmica e eléctrica, o consumo de biomassa anual, a produção de energia eléctrica anual e o investimento. Atribui, conforme as indicações da nova legislação, a eficiência da instalação. São indicados os valores de remuneração de energia que o projecto terá para cada situação de modalidade assim como o tempo de funcionamento da instalação. A figura 4.1 apresenta a folha de rosto do simulador.



Instituto Superior de Engenharia de Lisboa - ISEL
 Área Departamental de Engenharia de Sistemas e Potências e Automação

Entradas	
metros cúbicos de madeira para tratarem	40 m ³
Número de HT feitos por semana	1
Tempo de cada HT	10 h
PCI do combustível (Biomassa)	4,5 kWh/kg
Taxa de referência	6%
Tecnologia a escolher	2
1-Turbina a vapor	
2-Sistema ORC	
Modalidade a escolher	2
1-Modalidade geral	
2-Modalidade especial	

Saídas	
Potência térmica	1.700 kW
Potência Eléctrica	385 kW
Consumo combustível anual	285 t
Energia eléctrica produzida	200.151 kWhe/ano
Investimento Total	1.014.611 €
Eficiência da instalação	elevada eficiência
Tempo funcionamento	520 h
Remuneração Térmica	0 €/kWht
Remuneração eléctrica	0,15 €/kWhe
Custo de operação	66 €/h
Receita de operação	58 €/h
Indicadores económicos	
VAL	-803.538 €
TIR	-21%
PAYBACK	FALSO

Figura 4.1 – Folha de rosto do simulador

4.2 Pressupostos

Atribuíram-se valores as entradas definidas no ponto 4.1, sendo a maioria indicada pela serração, em que apenas as remunerações da energia eléctrica, tanto na modalidade geral como na especial, atribuíram-se de forma arbitrária com base no sistema de remuneração da centrais de miniprodução, DL 34/2011.

As taxas de juro dos títulos do tesouro e as taxas de juro das operações passivas são, em geral, as taxas de referência utilizadas por constituírem taxas de juro sem risco existentes na economia, podendo os capitais serem investidos a essa taxa e constituindo, por isso, uma taxa de referência. A taxa de actualização escolhida para toda a análise do projecto foi de 6%.

Tabela 4.1 – Valor dos parâmetros de entrada a introduzir no simulador

<i>Parâmetros Entrada</i>	
Quantidade de madeira (m ³)	40
Número de HT feitos por semana	1
Tempo de cada HT (h)	10
PCI do combustível (kWh _t /kg)	4,5
Taxa de referência	6%
REEG (c€/kWh _e)	13
REEE (c€/kWh _e)	15

A remuneração de energia térmica considerou-se nula, dado o consumo dessa energia ser feito pela própria empresa. O mesmo raciocínio aplicou-se para o custo do combustível

utilizado nas duas soluções apresentadas, também se considerou nulo, dado que a biomassa usada na combustão se trata de resíduo da serração.

4.3. Resultados

Neste subcapítulo será analisada a viabilidade económica da instalação de uma central de cogeração na serração descrita no capítulo 3.1.

Havendo duas tecnologias diferentes e duas modalidades de remuneração, consideraram-se quatro combinações possíveis:

- Tipo 1: Turbina a vapor inserindo-se na modalidade geral
- Tipo 2: Turbina a vapor inserindo-se na modalidade especial
- Tipo 3: Sistema ORC inserindo-se na modalidade geral
- Tipo 4: Sistema ORC inserindo-se na modalidade Especial

Com a introdução dos valores indicados na tabela 4.1 o simulador processa a informação e fornece-nos os dados apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valor dos parâmetros de saída obtidos pelo simulador

<i>Parâmetros Saída</i>	<i>Opção 1</i>	<i>Opção 2</i>	<i>Opção 3</i>	<i>Opção 4</i>
Tempo funcionamento (h/ano)		520		
Potência térmica entregue à estufa (kWt)		1700		
Potência Eléctrica entregue à rede (kWe)	1.122		385	
Consumo combustível anual (t)	557		285	
Energia eléctrica produzida (kWh/ano)	583.194		200.151	
Investimento (€)	3.468.325		1.014.611	
Custo de operação (€/h)	418		66	
Receita (€/h)	146	168	50	58
Eficiência da instalação		CEE		
<i>Indicadores económicos</i>				
VAL (€)	-3.407.954	-3.347.163	-824.384	-803.538
TIR	-	-	-24%	-21%
PAYBACK (anos)	-	-	-	-

Após análise dos indicadores económicos apresentados na tabela 4.2, conclui-se que nenhuma solução é economicamente viável para a serração de madeira.

Dos valores apresentados, a potência eléctrica entregue a rede pelas opções 1 e 2 é muito superior as opções 3 e 4, esta diferença deve-se a dois factores, o rácio entre a produção de

energia eléctrica e térmica e o rendimento do condensador considerado. Esta diferença reflecte-se nos consumos de biomassa e na energia eléctrica produzida.

O investimento para ambas as soluções é diferente, primeiramente, a diferença deve-se ao custo por kW ser diferente, sensivelmente 450€/kW, a segunda deve-se à potência instalada.

As modalidades, geral e especial, não apresentam grande diferença para esta ordem de valores, reduzidos, verificando que a modalidade especial é a que apresenta uma tarifa superior.

Os resultados apresentam que para a mesma demanda de calor, 1700kW, o sistema ORC necessita de uma potência instala cerca de 3vezes inferior a turbina a vapor.

O tempo de funcionamento deste sistema é de 6% das horas anuais, o que para um sistema térmica é reduzido, segundo [28], o tempo de funcionamento deve ser superior a 50% das horas anuais.

Procurou-se entender os factores que conduzem a este resultado para a serração. No subcapítulo 4.4 efectua-se a análise de sensibilidade a determinados parâmetros do projecto.

4.4. Análise de sensibilidade

Na secção anterior as soluções técnicas apresentadas não atingem viabilidade económica. Assim, com o auxílio do simulador realiza-se uma análise de sensibilidade de modo a identificar os parâmetros que têm maior impacto na viabilidade económica das soluções apresentadas.

Os parâmetros analisados são a remuneração da energia eléctrica e a remuneração da energia térmica, preço da biomassa e o tempo de funcionamento das centrais.

A análise sensibilidade de cada parâmetro foi efectuada mantendo os restantes fixos nos valores de base adaptados em 4.2, na Tabela 4.1

4.4.1. Remuneração da energia eléctrica

A remuneração da energia eléctrica é uma das principais receitas do projecto. Esta remuneração é estabelecida a partir das modalidades existentes, geral e especial. Considerou-se um intervalo entre 0 €/kWh e 25c€/kWh, com incrementos de 1c€/kWh, na tarifa da energia eléctrica. Este valor limite foi atribuído conforme o que dita na actual legislação das centrais de miniprodução. Considerando-se o valor base de 14c€/kWh.

Assim elaboraram-se os gráficos das figuras 4.2 e 4.3, que representam a variação dos indicadores económicos VAL e TIR, respectivamente.

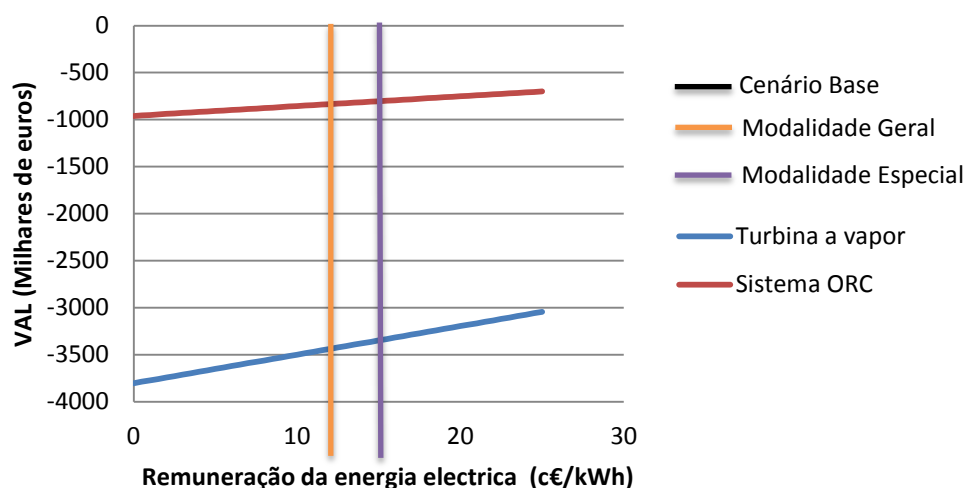


Figura 4.2 – Influência da remuneração da energia eléctrica no VAL para ambas as soluções

Verifica-se pela análise da Figura 4.3 que em situação alguma existe VAL positivo, levando à conclusão que apesar da remuneração da energia eléctrica influenciar o VAL do projecto, apenas a utilização de valores de remuneração irrealistas poderiam levar à sua viabilidade económica.

Dos resultados conclui-se que o sistema turbina a vapor é mais sensível às variações da remuneração da energia eléctrica do que o sistema ORC. Este facto justifica-se com a maior potência eléctrica instalada do sistema turbina a vapor.

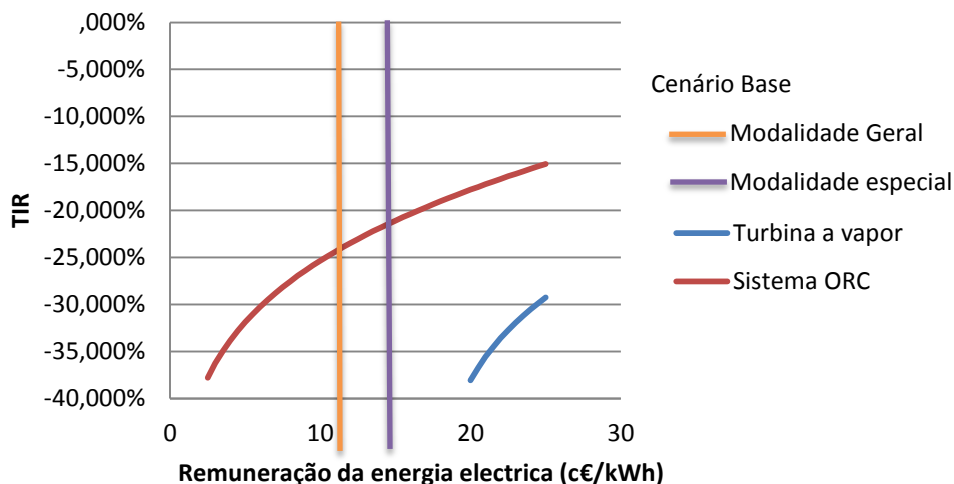


Figura 4.3 – Influência da remuneração da energia eléctrica na TIR para ambas as soluções

Da análise dos resultados pode-se concluir que para valores realistas de remuneração eléctrica não se obtêm TIR positivas

Relativamente ao retorno do investimento, tendo em conta o VAL do projecto nunca atingir valores positivos dentro da gama de remunerações da energia eléctrica considerada, este nunca é obtido. Como tal não faz sentido a apresentação da análise de sensibilidade do Payback time.

4.4.2. Remuneração da energia térmica

A remuneração da energia térmica, considerando-se nula no cenário base. No entanto, existe a possibilidade da serração fornecer calor a outras unidades ou em alternativa utilizar as suas instalações para efectuar tratamentos térmicos à madeira de outras serrações. Nesse sentido, apresenta-se de seguida a análise de sensibilidade resultante de diferentes valores de remuneração da energia térmica.

Considerando um intervalo entre 0c€/kWh e 25c€/kWh, com incrementos de 0,5c€/kWh, efectuaram-se os gráficos das figuras 4.4, 4.5 e 4.6, que representam a variação dos indicadores económicos VAL, TIR e PAYBACK, respectivamente.

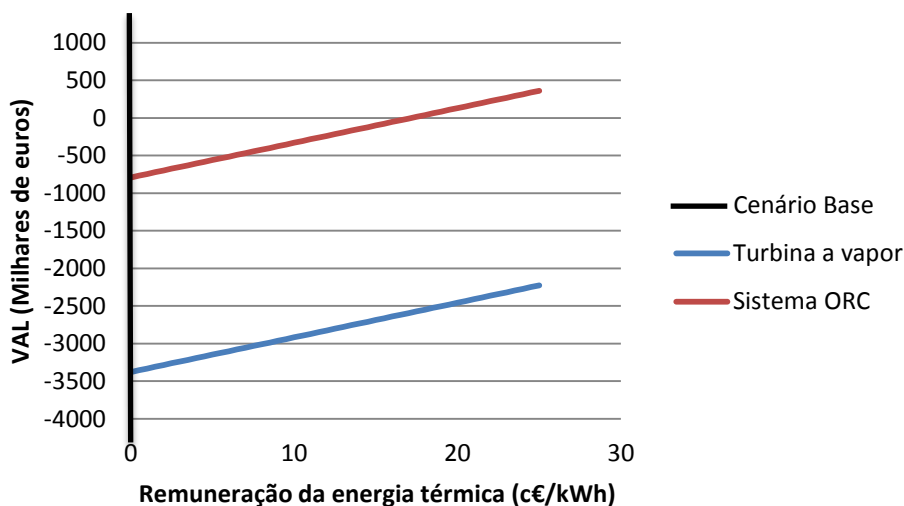


Figura 4.4 – Influência da remuneração da energia térmica no VAL para ambas as soluções

Os resultados da análise de sensibilidade demonstram que a venda de energia térmica a terceiros será positiva para a viabilidade económica do projecto e que o aumento da remuneração da energia térmica é directamente proporcional à evolução do VAL do projecto. Apesar de no intervalo considerado para a RET não ser atingida a viabilidade económica do sistema de turbina a vapor, no sistema ORC essa viabilidade é atingida para remunerações superiores a 17,5c€/kWh. Deve-se, no entanto, referir que a possibilidade de se obter uma RET de 17,5c€/kWh não parece muito provável, nomeadamente se compararmos este valor com o custo de cada tratamento térmico actualmente realizado na serração, que ronda os 2,9c€/kWh.

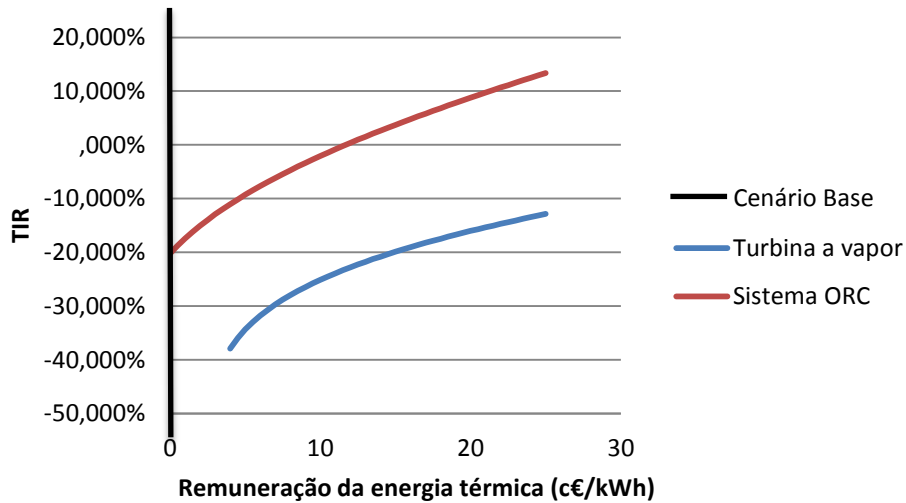


Figura 4.5 – Influência da remuneração da energia térmica na TIR para ambas as soluções

Com a análise da Figura 4.5, verifica-se que para valores acima de 12c€/kWh, é possível obter uma TIR positiva para o sistema ORC. No entanto, como seria de esperar, a TIR só ultrapassa a taxa de referência de 6% quando a RET atinge os 17,5c€/kWh.

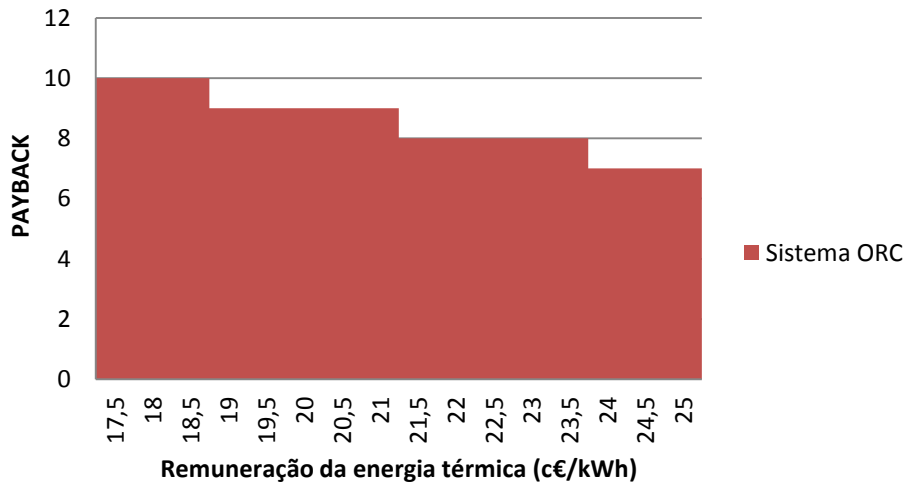


Figura 4.6 – Influência da tarifa da energia térmica no PAYBACK para o sistema ORC

Apenas se apresenta a influência da remuneração da energia térmica no sistema ORC, uma vez que, para o intervalo definido, não se verifica viabilidade económica no sistema ORC. Com uma RET de 17,5c€/kWh o projecto apresenta um retorno a 10 anos, o valor de tarifa é diferente ao indicado na gráfico da TIR, 12c€/kWh, porque existe uma taxa de referência

de 6% como valor de base para o projecto. Com o intervalo definido, obtêm-se períodos de retorno do investimento até 7 anos.

4.4.3 Preço da biomassa

O preço da biomassa, mesmo sendo considerado como valor nulo na situação base, poderá ser um dos principais custos do projecto, visto ser o combustível utilizado. A serração vende actualmente os seus resíduos a 27€/t. No entanto, este valor depende do mercado e poderá ser influenciado pelos constantes abates efectuados devido ao NMP.

Considerando um intervalo entre 0€/t e o dobro do valor acima indicado, 54€/t, com incrementos de 1€/t, efectuaram-se os gráficos das figuras 4.7, 4.8 e 4.9 que representam a variação dos indicadores económicos VAL, TIR e PAYBACK, respectivamente.

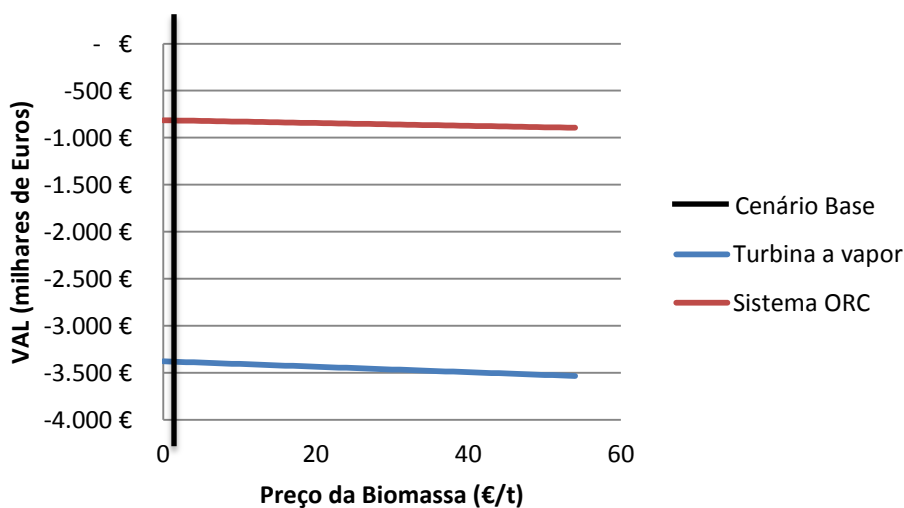


Figura 4.6 – Influência do preço da biomassa no VAL para ambas as soluções

Ao contrário das análises elaboradas anteriormente, este parâmetro tem uma influência negativa, no projecto, uma vez tratar-se de um custo. No entanto, comparativamente com os factores considerados anteriormente na análise de sensibilidade, o preço da biomassa não tem uma influência muito significativa nos resultados da viabilidade económica do projecto.

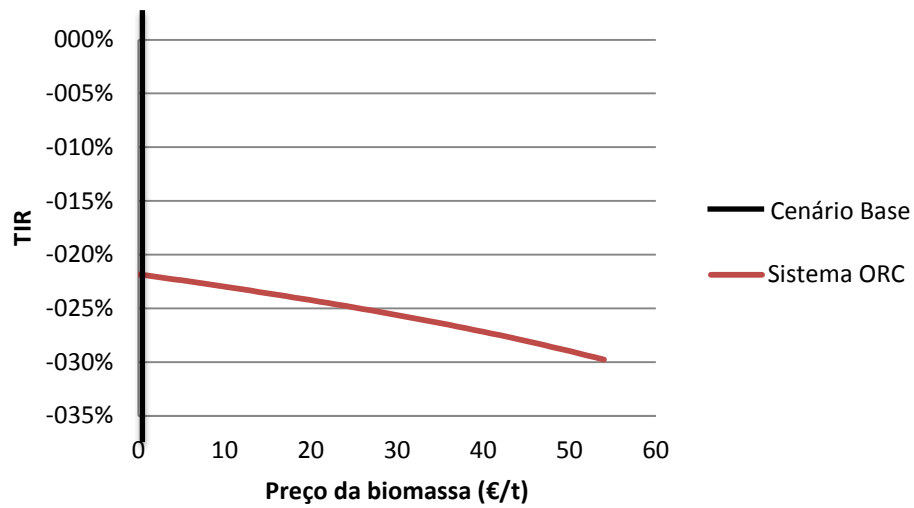


Figura 4.7 – Gráfico da influência do preço da biomassa na TIR para ambas as soluções

A TIR da turbina a vapor não é apresentada no Figura 4.7, uma vez que apresenta valores muito reduzidos.

Relativamente ao retorno do investimento, tendo em conta o VAL do projecto nunca atingir valores positivos dentro da gama de remunerações da energia eléctrica considerada, este nunca é obtido. Como tal não faz sentido a apresentação da análise de sensibilidade do Payback time.

4.4.4. Tempo de funcionamento

Tendo em conta que o projecto de instalação do sistema de cogeração implica um importante custo de investimento, o tempo de funcionamento do sistema torna-se um factor crítico na viabilidade do projecto. No cenário de base, tendo em conta as necessidades do tratamento térmico da serração considerada, o sistema apenas terá de funcionar 520h. No entanto pretende-se, com a análise de sensibilidade, determinar até que ponto a viabilidade económica do projecto poderá ser melhorada com o aumento do número de horas de funcionamento.

Considerando um intervalo entre 500 h até 8700 h, com incrementos de 100 h, efectuando-se os gráficos das figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11, que representam a variação dos indicadores económicos VAL, TIR e PAYBACK, respectivamente, em função do número de horas de funcionamento.

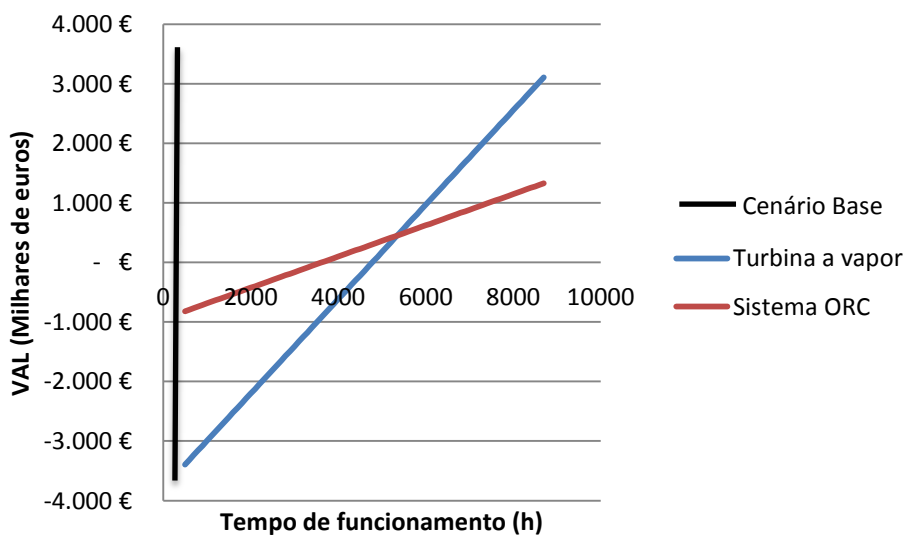


Figura 4.8 – Influência do número de horas de funcionamento no VAL para ambas as soluções

A análise deste gráfico, Figura 4.9, representa qual o problema do caso real em estudo, o seu tempo de funcionamento. Como se verifica, apenas para valores superiores a 3600h de tempo de funcionamento (cerca de 360 tratamentos por ano) o sistema ORC é sustentável, e para a turbina a vapor apenas para 4800h (sensivelmente mais 120 tratamentos). Destes

resultados conclui-se que para o investimento se torne viável, o nível de produção da serração teria de ser pelo menos 8(oito) vezes superior, ou, tal como já foi referido, a serração poderia fornecer tratamentos térmicos a outras unidades de produção de madeira. O sistema ORC tem uma elasticidade menor ao tempo de funcionamento em comparação a turbina a vapor.

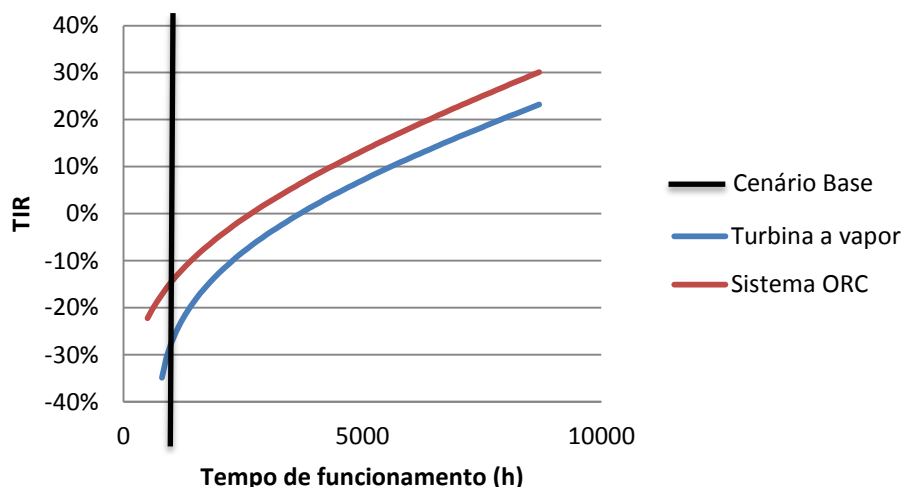


Figura 4.9 – Influência do número de horas de funcionamento na TIR para ambas as soluções

A análise do gráfico da Figura 4.9, indica o mesmo que a figura anterior, apenas com a particularidade que para valores de taxa de referência inferiores a 6% as soluções apresentadas tem viabilidade económica, que para o sistema ORC verifica-se com 2700h de funcionamento (270 tratamentos) e para a turbina a vapor com 3700h de funcionamento (370 tratamentos). A relação entre valores não é linear, como se comprova para os valores referenciados anteriormente.

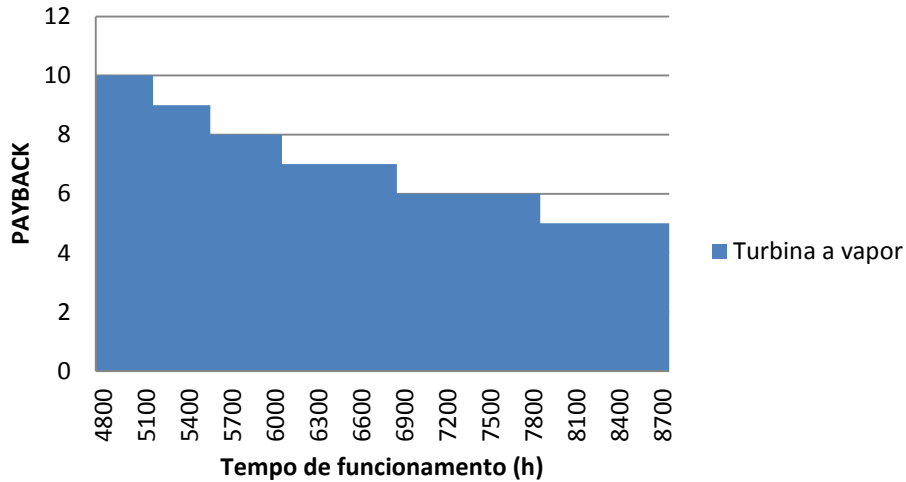


Figura 4.10 – Influência do número de horas de funcionamento no PAYBACK

Verifica-se pela análise da Figura 4.10 que para valores acima de 4800h de funcionamento o projecto apresenta um retorno a 10 anos, o valor de tarifa é diferente ao indicado na gráfico da TIR, 3700h, porque existe a taxa de referência de 6% como valor de base para o projecto. Com o intervalo definido, obtém-se períodos de retorno do investimento até 5 anos.

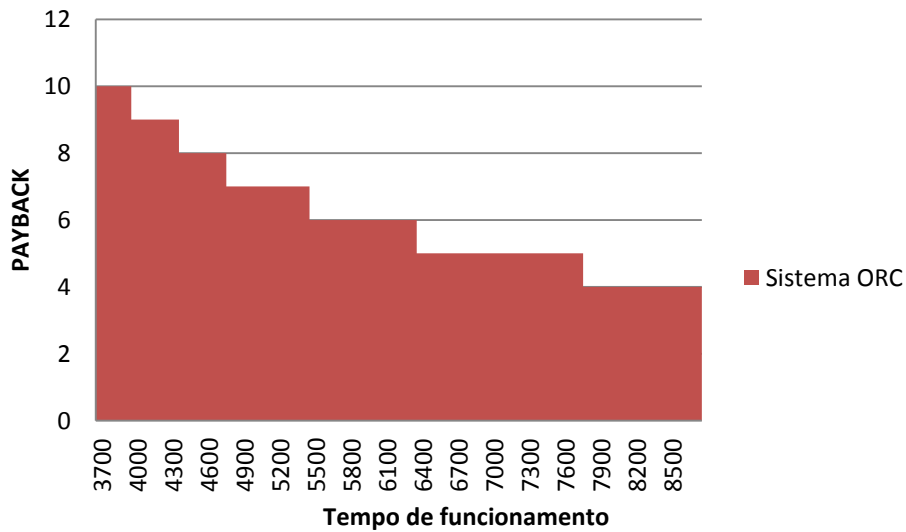


Figura 4.11 – Influência do número de horas de funcionamento no PAYBACK

Com a análise da Figura 4.11, verifica-se que para valores acima de 3700h de funcionamento o projecto apresenta um retorno a 10 anos, o valor de tarifa é diferente ao indicado na gráfico da TIR, 2700h, porque existe a taxa de referência de 6% como valor de base para o projecto. Com o intervalo definido, obtém-se períodos de retorno do investimento até 4 anos.

5. Conclusões e perspectivas futuras

Portugal é um país com uma elevada área florestal, esta contribui para o PIB, emprego e exportações do país. Os principais produtos extraídos da floresta nacional são o pinheiro-bravo e o eucalipto. Sendo o eucalipto utilizado principalmente para a produção de pasta de papel, enquanto a madeira do pinheiro-bravo é utilizada na produção de diversos materiais, tais como mobiliário ou paletes para transporte de mercadorias.

As paletes, tipicamente usadas para embalagem e mais fácil manuseamento das mercadorias, são muitas vezes aplicadas em mercadorias para exportação ou são elas próprias objecto de exportação. No entanto, devido à existência de Nemátodo da madeira do pinheiro em Portugal, a exportação de madeira de pinho e seus derivados encontra-se em risco de embargo pelas autoridades competentes da EU. Assim, só é possível realizar a exportação de madeira e derivados após a realização do respectivo tratamento térmico. Este tratamento térmico implica um processo de produção de calor e consequentemente um acréscimo dos custos de produção.

Com o objectivo de transformar esta ameaça de perda de competitividade dos produtores de madeira numa oportunidade de negócio, propôs-se, ao longo do presente trabalho, a instalação de um sistema de cogeração nas serrações de madeira capaz de produzir o calor necessário ao tratamento fitossanitário da madeira de pinho e energia eléctrica para venda à rede, usando os respectivos resíduos como combustível. Neste sentido, desenvolveu-se e implementou-se uma metodologia capaz de fazer o dimensionamento e a avaliação económica da instalação de um sistema de cogeração em serrações de madeira que possuam uma unidade para realização do tratamento térmico da madeira de pinho. Do módulo de avaliação económica da metodologia faz parte um simulador para o cálculo da tarifa de remuneração da energia eléctrica produzida a partir de cogeração.

A metodologia desenvolvida foi aplicada a um caso de estudo. Este caso de estudo corresponde a uma serração de madeira localizada no centro na zona de Ourém que possui uma estufa própria para tratamentos térmicos.

No que diz respeito às tecnologias de cogeração aplicáveis ao caso de estudo, o facto de se pretender aproveitar os resíduos da serração de madeira para o processo de combustão limita a opção para tecnologias em que seja possível utilizar uma caldeira para a queima de

biomassa. Das soluções existentes, identificaram-se duas tecnologias de cogeração que possibilitam a utilização desta fonte de calor, sendo elas a turbina a vapor e o sistema ORC. Relativamente à avaliação económica, esta teve em conta a nova legislação sobre as instalações de cogeração, dando especial atenção aos valores da remuneração de energia eléctrica, dado que no caso de estudo a energia térmica é para consumo próprio.

Os resultados da avaliação económica da aplicação do sistema de cogeração mostram que a viabilidade económica não é garantida para as condições de base admitidas, resultando em VAL negativos para ambas as soluções tecnológicas consideradas. Estes resultados são consequência dos elevados custos de investimento dos sistemas de cogeração.

Apesar de nenhuma das tecnologias apresentar viabilidade económica para o cenário base, é o sistema ORC aquele que apresenta menores custos de investimento e consequentemente se encontra mais próximo da viabilidade. Assim, o custo de investimento no sistema turbina a vapor é de 3092,5€/kW enquanto no sistema ORC é de 2636€/kW. Para além das diferentes temperaturas e pressões de operação que resultam em diferentes custos dos equipamentos, as diferenças nos custos totais também podem ser justificadas pelas diferentes potências eléctricas dimensionadas para cada uma das tecnologias. Enquanto a potência eléctrica dimensionada no sistema ORC é de 385 kW, no sistema de turbina a vapor essa potência corresponde a 1122 kW.

Com o objectivo de determinar quais os factores que poderiam levar à viabilidade económica das soluções apresentadas, realizou-se uma análise de sensibilidade. Para ambas as soluções tecnológicas a análise de sensibilidade incidiu sobre os seguintes parâmetros: a remuneração da energia eléctrica, a remuneração da energia térmica, o preço da biomassa e o tempo de funcionamento.

Com a análise de sensibilidade conclui-se que o sistema ORC, a todos os parâmetros, apresenta uma elasticidade menor que a turbina a vapor. No que diz respeito à remuneração da energia eléctrica verificou-se que tem influência nas soluções, mas não viabilizando o cenário base. Situação semelhante verifica-se com a remuneração da energia térmica, com a particularidade de para valores de remuneração da energia térmica elevados, superiores a 17,5c€/kWh, o sistema ORC se tornar viável. No entanto, é pouco provável que se consiga estes valores de remuneração, nomeadamente quando comparado com o valor actualmente

praticado na serração, 2,9c€/kWh. O preço da biomassa apresenta uma influência reduzida nas soluções, neste caso negativa por se tratar de um custo.

O parâmetro que tem com maior influência nos indicadores económicos é o tempo de funcionamento, viabilizando ambas as soluções. Desta análise pode concluir-se que o sistema ORC se torna viável com tempos de funcionamento superiores a 3600h (representando cerca de 360 tratamentos anualmente) enquanto a turbina a vapor se torna viável para valores superiores a 4800h (cerca de 480 tratamentos anualmente). Para valores superiores a 5400h de funcionamento verifica-se uma inversão do mérito das soluções, sendo a turbina a vapor aquela que apresenta melhores resultados económicos.

Conclui-se que as soluções apresentadas dependem principalmente da remuneração da energia eléctrica e do tempo de funcionamento para serem economicamente viáveis. Relativamente à remuneração da energia eléctrica existe ainda alguma incerteza sobre o seu valor exacto, dado que o Ministério da Economia ainda não publicou todos os termos que constituem a respectiva tarifa. No que diz respeito ao tempo de funcionamento, as serrações que pretendam investir num destes sistemas terão de apresentar indicadores de utilização da estufa para o tratamento térmico superiores a 50% das horas anuais, ou seja que efectuem mais de 400 tratamentos anualmente. A escolha da tecnologia a utilizar dependerá principalmente do valor que as empresas estarão dispostas a investirem, uma vez que ambas apresentam bons resultados.

Uma solução para os pequenos produtores de uma região seria a união dos mesmos para conseguirem obter indicadores superiores a 50% das horas anuais, ou seja que numa região seja possível efectuar mais de 400 tratamentos térmicos com as mesmas características que forma indicadas ao longo do projecto, 40m³ de madeira por cada tratamento com uma necessidade térmica de 1700kWt.

Com a realização deste estudo, surgiram algumas conclusões que, inevitavelmente, se tornaram em novos desafios. Sugere-se, assim, para trabalhos futuros:

- Levantamento das serrações das imediações da região de ourem, para o estudo de viabilidade de união das serrações para efectuarem o tratamento térmico.

- Avaliação complementar dos resíduos produzidos na transformação da madeira da região onde se pretende instalar a central de cogeração, com o intuito de uma maior veracidade dos PCI da serradura e carrasca.
- Aproveitamento da estufa, resíduos e da central de cogeração para a produção de *pellets*

Referências bibliográficas

- [1] – FRANÇA, Ana Filipa – Cogeração e Trigeriação – Lisboa – IST - 2008
- [2] – Edição do Jornal Correio da Manhã do dia 27 Maio de 2011
- [3] – Autoridade Florestal Nacional – www.afn.min-agricultura.pt
- [4] – Direcção Geral dos Recursos Florestais. (2007). Estratégia Nacional para as florestas. DGRF. Lisboa.
- [5] – ANEFA – Revista da Associação Nacional de empresas florestais, agrícolas e ambiente
- [6] – AMARAL, Miguel – O Nemátodo da Madeira do Pinheiro – Voz da Terra, Confederação nacional da agricultura - 2009
- [7] – Eisenback, J. D.
- [8] – INRB – Instituto Nacional de recursos naturais - www.inrb.pt – Foto retirada de [6]
- [9] – Centro de Biomassa para a energia – www.centrodabiomassa.pt
- [10] – (www.treco.co.uk/fuel/, visitado em Maio 2011)
- [11] – LOUÇÃO, Ilídio José Gomes – Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença de nemátodo de pinheiro, para produção de *pellets* (dissertação de mestrado), 2008.
- [12] –DEMIRBAS, Ayhan – “Combustion characteristics of different biomass fuels”, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, 2004.

[13] – Liñán, A. e Williams, F.A. – 1993 – “Fundamental Aspects of combustion”. Oxford University Press.

[14] – Casaca, C. e Costa, M. – 2003- “Co-combustion of biomass in Natural Gas-fired Furnace”, Combustion Science and Technology, Vol.175.

[15] – COM 2004. Commission of the European Communities. Communication from the Commission to the Council and the European Parliament. Commission Report accordance with Article 3 of Directive 2001/77/EC, evaluation of the effect of legislative instruments and other Community policies on the development of the contribution of renewable energy sources in the EU and proposals for concrete actions.

Disponível: <<http://www.iea.org>>. Acesso: 01 Nov. 2010.

[16] – Nussbaumer T., (2002), “Combustion and co-combustion of biomass”, Proceedings of the 12th Conference and technology exhibition on biomass for energy, industry and climate protection.

[17] – Coelho, P. e Costa, M. – 2007- “Combustão” 1^o edição Orion (livro).

[18] – (Babcock & Wilcox Company. (2005, May).B&W IR-CFB Operating Experience and New Development. Presented at the 18th International Conference on Fluidized Bed Combustion.

[19] - WADE, 2011 – <http://www.localpower.org> visitado em Dezembro de 2010

[20] – Freitas, Manuel Rodrigues de – 2007 – Avaliação do potencial energético dos resíduos sólidos dos lagares do Alentejo (dissertação de mestrado).

[21] – Eurostat - <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home> visitado em Março de 2011

- [22] – SANTOS, L., M. J. F. Silva, J. Chaveiro, 2003. COGERAÇÃO. Produção e Planeamento de Energia Eléctrica. Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra.
- [23] – COGEN PORTUGAL – www.cogenportugal.pt visitado em Outubro de 2010
- [24] – ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos – www.erse.pt visitado em Outubro 2010
- [25] – Educogen, 2001 - The European Educational Tool on Cogeneration
- [26] – BRANDÃO, Sérgio da Silva – Cogeração – 2004 – Universidade de Coimbra
- [27] – SONNATAG R.E and Borgnakke, Introduction to engineering thermodynamics (Seconds Edition)
- [28] – Turboden – www.turboden.eu – Consulta de artigos publicados em Maio de 2011.
- [29] - Obernberger, I., P. Thonhofer, E. Reisenhofer, 2002. *BiosBioenergiesysteme*. Graz. Áustria. Disponível em: <http://bios-bionergy.at>. Acesso em Março de 2011
- [30] – SILVA, Reginaldo Ferreira – Análises energéticas e exergetica de uma micro central de cogeração inserida em uma planta de carbonização de madeira reflorestada – Belo-Horizonte, 2009.
- [31] – AZEVEDO, João Luís Toste – Apontamentos sobre Cogeração – Instituto Superior Técnico, 2001
- [32] – AMBITERMO – www.ambitermo.pt visitado em Março de 2011