



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

MANUEL ANTÓNIO MARTINS BESSA MENESES

Licenciado em Produção Animal

MICRO-ESTILHA, UMA ALTERNATIVA AO USO DE PELLETS EM CONTEXTO INDUSTRIAL

ANÁLISE À VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE MICRO-ESTILHA
EM QUEIMADORES INDUSTRIAIS DE BIOMASSA

MESTRADO EM BIOENERGIA E TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2023



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

MICRO-ESTILHA, UMA ALTERNATIVA AO USO DE PELLETS EM CONTEXTO INDUSTRIAL

ANÁLISE À VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE MICRO-ESTILHA EM QUEIMADORES INDUSTRIAIS DE BIOMASSA

MANUEL ANTÓNIO MARTINS BESSA MENESES

Licenciado em Produção Animal

Orientador: José Carlos Fernandes Teixeira,
Professor Catedrático, Universidade do Minho

Coorientadora: Maria Margarida Boavida Ponte Gonçalves,
Professora Associada, Universidade NOVA de Lisboa

Júri:

Presidente: Nuno Carlos Lapa dos Santos Nunes,
Professor Catedrático, Universidade NOVA de Lisboa

Arguente: Maria Cândida Lobo Guerra Vilarinho,
Professora Auxiliar, Universidade do Minho

Orientador: José Carlos Fernandes Teixeira,
Professor Catedrático, Universidade do Minho

Coorientadora: Maria Margarida Boavida Ponte Gonçalves,
Professora Associada, Universidade NOVA de Lisboa

MESTRADO EM BIOENERGIA E TECNOLOGIAS SUSTENTÁVEIS

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2023

Micro-estilha, uma alternativa ao uso de pellets em contexto industrial

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

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai, o homem que me inspirou na seriedade, na honestidade, na paixão pela terra e pelo trabalho, que me ajudou a chegar aqui. Onde quer que estejas, obrigado.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro quero agradecer à Professora Margarida Gonçalves, que foi fulcral no momento da decisão de me inscrever neste mestrado. Agradeço-lhe igualmente pelo apoio e orientação nesta tese. Agradeço também ao Professor José Carlos Teixeira, da Universidade do Minho, pelo apoio na coorientação desta tese.

A pandemia de COVID-19 condicionou fortemente o desenvolvimento dos primeiros semestres deste curso, pelo que tenho de agradecer à FCT, em particular ao Departamento de Química e aos seus professores, pelo esforço de se reinventarem, adaptar às exigências do ensino remoto, com colegas tão dispersos geograficamente, em diferentes fusos horários.

A todas as pessoas nos laboratórios do Departamento de Química da FCT, e do Laboratório de Calor e Fluídos do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho envolvidas neste trabalho, nomeadamente ao Eng.º Carlos Eduardo, e aos colaboradores do CVR, muito obrigada por toda a disponibilidade, ajuda e atenção que me foram dadas durante a execução deste trabalho.

Agradecer ainda à FTC FUELS & TECHNOLOGIES CONCEPT, Lda., na pessoa do Eng.º Joaquim Costa, pela cedência das amostras para a realização dos ensaios, e à Milega - Serviços Têxteis Lda, na pessoa do Sr. Roldão Lucas, pela colaboração nos ensaios na caldeira industrial.

Por fim, mas igualmente importante, agradecer o apoio da minha família que sofreu com as minhas indisponibilidades em tantos momentos, e dos colegas com quem partilhei este caminho, e que acredito ficaram a ser amigos para a vida.

"A essência do conhecimento consiste em aplicá-lo, uma vez possuído." - (Confúcio)

RESUMO

A crise energética que se começou a fazer sentir na indústria portuguesa em final de 2021 e se agudizou ao longo de 2022, criou uma disrupção no mercado de pellets. O embargo aos combustíveis russos atingiu não só o gás natural e o petróleo bruto, mas também os seus derivados refinados, madeiras processadas e pellets de madeira.

Associado à escassez dos combustíveis fósseis, a seca e a escassez de vento, reduziram brutalmente a produção elétrica a partir de fontes renováveis, introduzindo uma inflação nunca vista nos mercados energéticos grossistas por toda a Europa.

O pellet sofreu assim, pela primeira vez na história, um brutal aumento de preço, juntamente com uma crise de oferta no mercado nacional, tradicionalmente abundante, o que levou muitas empresas a interrogarem-se sobre a viabilidade de continuar a usar pellets nas suas caldeiras e queimadores.

Surgiu assim a necessidade de avaliar uma alternativa ao uso de pellets em escala industrial, sem gerar necessidades de alteração dos equipamentos de queima, silos e sistemas de transporte, mas que apresente um preço inferior e estável a medio-longo prazo.

A micro-estilha apresenta-se como uma hipótese que cumpre esses requisitos. Em termos de granulometria e humidade relativa, mas este formato pode colocar alguns problemas ao funcionamento dos sistemas, já o facto de não exigir um processamento industrial tão intenso, reduz o input de energia e desgaste de equipamentos, permitindo proporcionar um produto final de elevada concentração energética, a um preço bastante mais reduzido do que o pellets.

Importa assim fazer uma validação técnica, baseada numa análise laboratorial aos principais parâmetros com relevância no processo de combustão, nomeadamente com recurso ao macro TGA, de modo a obter conclusões sobre a viabilidade da utilização da micro-estilha em substituição do uso de pellets em queimadores industriais.

Os ensaios permitiram constatar que a micro-estilha apresenta velocidades de perda de massa superiores às do pellet de madeira, com menores teores de carbono residual. O teor de cinzas e a sua composição são similares ao obtido na queima do pellet.

Em termos de compatibilidade mecânica do formato micro-estilha com os equipamentos, foram registadas várias dificuldades nos sistemas de alimentação, desde a falta de fluidez para o ponto de extração até a diversos encravamentos devidos à heterogeneidade das partículas, em especial pela presença de algumas partículas de formato alongado numa das dimensões.

Conclui-se assim pela não viabilidade da utilização deste tipo de micro-estilha em equipamentos de queima originalmente concebidos para uso de pellets.

Palavas chave: Micro-Estilha, Pellets, Queimadores, Macro TGA, Gaseificação, Caldeiras,...

ABSTRACT

The energy crisis that began to be felt in the Portuguese industry at the end of 2021 and worsened throughout 2022, created a disruption in the pellets market. The embargo on consumed fuels is not only natural gas and crude oil, but also their organic derivatives, processed wood and wood pellets.

Associated with the scarcity of fossil fuels, drought and lack of wind, they brutally reduced electrical production from renewable sources, introducing never-before-seen inflation in wholesale energy markets across Europe.

Pellets thus suffered, for the first time in history, a brutal price increase, along with a supply crisis in the traditionally abundant national market, which led many companies to question their plans to continue using pellets in their boilers. and burners.

Thus, the need arose to evaluate an alternative to the use of pellets on an industrial scale, without generating the need to change burning equipment, silos and transport systems, but which have a lower and stable price in the medium-long term.

The microchip presents itself as a hypothesis that meets these requirements. In terms of granulometry and relative humidity, this format can pose some problems to the functioning of the systems, as the fact that it does not require such intense industrial processing reduces energy consumption and equipment wear, allowing a high concentration final product to be provided. energy, at a much more limited price than pellets.

It is therefore important to carry out a technical validation, based on a laboratory analysis of the main parameters relevant to the combustion process, particularly using the TGA macro, in order to obtain explanations on the supervision of the use of microchips to replace the use of pellets in industrial burners.

The tests revealed that the micro-chip presents higher mass loss rates than the wood pellet, with lower levels of residual carbon. The ash content and its composition are similar to that obtained when burning pellets.

In terms of mechanical compatibility of the micro-chip format with the equipment, several difficulties were recorded in the feeding systems, from the lack of fluidity to the extraction point to several jams due to the heterogeneity of the particles, in particular due to the presence of some elongated particles in one of the dimensions.

It is therefore concluded that the use of this type of micro-chip in burning equipment originally designed for the use of pellets is not viable.

Keywords: Micro-Chip, Pellets, Burners, Macro TGA, Gasification, Boilers,...

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Evolução do mercado energético	1
1.2	Políticas energéticas na União Europeia	6
1.3	Enquadramento energético do país	11
1.3.1	Importações	11
1.3.2	Produção interna.....	13
1.4	O papel dos biocombustíveis sólidos na descarbonização	17
1.5	Normas de qualidade e de certificação da biomassa sólida	21
1.6	Micro-estilha	23
1.7	Porquê estudar esta alternativa ao pellet?	26
2	MATERIAIS E MÉTODOS	31
2.1	Amostra de micro-estilha.....	31
2.2	Caracterização da amostra	32
2.3	Ensaio de Macro TGA	35
2.4	Caldeira laboratorial.....	37
2.5	Caldeira industrial	39
3	RESULTADOS	41
3.1	Caracterização da amostra de micro-estilha	41
3.2	Macro TGA.....	42
3.3	Análise DTG aos resultados obtidos no Macro-TGA	45

3.4	Caldeira laboratorial.....	52
3.5	Caldeira industrial	53
4	CONCLUSÕES.....	59
4.1	MACRO TGA.....	59
4.2	Caldeira laboratorial.....	60
4.3	Caldeira industrial	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do investimento em infraestruturas energéticas vs. PIB [1].	2
Figura 2 - Evolução dos preços da energia em 2022, em 6 regiões [1].	3
Figura 3 - Evolução dos preços da alimentação vs. energia [1].	3
Figura 4 - Previsões de evolução de consumo de energia por fonte [1].	4
Figura 5 - Quotas dos combustíveis fósseis no total de energia consumida [1].	4
Figura 6 - Perspectivas de evolução dos consumos energia em 2030 [1].	5
Figura 7 - Marcos históricos na política da UE para as energias renováveis [2].	6
Figura 8 - Quota de energia consumida proveniente de renováveis em 2021 [4].	10
Figura 9 - Evolução das importações e exportações de energia, e saldo [5].	11
Figura 10 - Evolução da dependência energética de Portugal nos últimos 20 anos [5].	12
Figura 11 - Estrutura das importações por fonte de energia, em % [5].	12
Figura 12 - Evolução do consumo de energia primária, por fonte, 2000 vs 2020 [5].	13
Figura 13 - Evolução da produção de energia primária em Portugal, 2010, 2019 e 2020 [5].	14
Figura 14 - Detalhe das fontes de energia primária utilizadas, entre 2010 a 2020 [5].	15
Figura 15 - Evolução das fontes para produção de eletricidade em Portugal, 2010-2020 [5].	16
Figura 16 - Evolução dos usos de biomassa em Portugal, entre 2010 a 2020 [5].	16
Figura 17 - Esquema de princípio da "Bateria de Biomassa" [14].	20
Figura 18 - Esquema de produção da micro-estilha na FTC Fuels.	24
Figura 19 - Unidade de produção da FTC Fuels, em Vouzela.	25
Figura 20 - Evolução dos preços no MIBEL, de 2007 a 2022 [17].	27
Figura 21 - Evolução das cotações de pellets, 2012 a 2023 [18].	28
Figura 22 - Aspeto de uma subamostra de micro-estilha fornecida para a realização dos ensaios.	32

Figura 23 - Aspeto das frações de granulometria 1, 2 e 3 separadas a partir da micro-estilha e utilizadas em ensaios de macro-TGA.....	33
Figura 24 - Layout do sistema de análise Macro-TGA.	36
Figura 25 - Aspeto da caldeira laboratorial e sistemas analíticos utilizados nos ensaios de combustão da micro-estilha.....	38
Figura 26 - Caldeira industrial da central térmica da Milega Lda.	40
Figura 27 - Comparativo da composição elementar entre a micro-estilha e outros combustíveis [19].	41
Figura 28 - Evolução da perda de massa a 700°C.	42
Figura 29 - Evolução da perda de massa a 900°C.	44
Figura 30 - Comparação da velocidade de perda de massa a 700°C dos pellets de referência e das diferentes granulometrias da micro-estilha, utilizando a configuração original do macro-TGA.	45
Figura 31 - Comparação da velocidade de perda de massa a 700°C dos pellets de referência variando a colocação da amostra no reator e a massa da amostra.....	47
Figura 32 - Comparação da velocidade de perda de massa a 700°C dos pellets de referência e as diferentes granulometrias da micro-estilha.....	48
Figura 33 - Comparação da velocidade de perda de massa a 900°C dos pellets de referência e as diferentes granulometrias de micro-estilha.....	49
Figura 34 - Gráfico do ensaio na caldeira laboratorial.....	52
Figura 35 - Silo porta-bigbag (à esquerda) e ponto de extração de combustível (à direita)....	54
Figura 36 - Sem-fim de maior débito instalado diretamente na tremonha.....	55
Figura 37 - Encravamento na válvula anti-retorno de chama.	56
Figura 38 - Encravamento entre a válvula rotativa e o sem-fim horizontal.....	57
Figura 39 - Origem do encravamento entre a válvula rotativa e o sem-fim horizontal.....	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Emissões de CO ₂ eq/MJ de acordo com o Anexo VI do RED II [3].....	9
Tabela 2 - Classes de estilha segundo a Norma ISO 17225-4 [16].....	23
Tabela 3 - Distribuição granulométrica da amostra nas três granulometrias.....	33
Tabela 4 - Densidade Aparente das amostras classificadas.....	34
Tabela 5 - Teores de humidade e de cinzas, e composição elementar da amostra de micro-estilha.....	35
Tabela 6 - Caracterização das amostras a submeter a Macro-TGA.....	36
Tabela 7 - Taxa de desvolatilização e Carbono residual em T e % massa.....	49
Tabela 8 - Resíduos da combustão das amostras avaliadas em macro TGA, a 700 °C e a 900 °C, com uma massa inicial de 10g e um tempo de residência de 20 min, bem como o respetivo teor de carbono oxidável.....	50
Tabela 9 - Composição das cinzas obtidas nos ensaios de macro-TGA a 900°C, com uma massa inicial de 10g e um tempo de residência de 20 min.....	51

GLOSSÁRIO

Pellets de Madeira	Granulado cilíndrico, com diâmetro de 6 a 8 mm, comprimento de 10 a 40 mm, obtido pela prensagem de pequenas partículas (pó ou serrim) de madeira ou resíduos agro-florestais, humidade inferior a 10%.
Micro-estilha	Aparas de madeira, obtidas por estilhaçamento ou trituração de madeiras e/ou resíduos agro-florestais, com granulometria média inferior a 25 mm.
Briquetes	Granulado cilíndrico, com diâmetro superior a 50 mm, resultante da compactação de serrim, estilha, carvão, resíduos agro-florestais ou de outra natureza.
Descarbonização	Processo de redução de emissões de carbono de um processo, produto ou economia, medido através do balanço de carbono.
Biomassa	Toda a matéria-orgânica de origem animal ou vegetal, destinada a valorização energética.
Macro TGA	Macro Analisador Termo Gravimétrico analisa com elevada precisão a perda de massa de uma amostra de biomassa ao longo do tempo de exposição a elevadas temperaturas.

SIGLAS

IAE	Agência Internacional de Energia
UE	União Europeia
RU	Reino Unido
EUA	Estados Unidos da América
TEP	Toneladas Equivalentes de Petróleo
KTEP	Quilo Toneladas Equivalentes de Petróleo
GN	Gás Natural
ORCU	Organic Rankine Cycle Unit
OMIE	Operador de Mercado Ibérico de Eletricidade
KG	Quilograma
MS	Matéria Seca
CO₂	Dióxido de Carbono
O₂	Oxigénio
NO_x	Óxidos de enxofre
CO	Monóxido de Carbono
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
kW	Quilowatt
PIB	Produto Interno Bruto
DGEG	Direção Geral de Energia e Geologia



INTRODUÇÃO

1.1 Evolução do mercado energético

O mundo está em permanente mudança, e o mercado energético não foge a essa regra.

Seja por motivos ambientais, económicos ou políticos, os cidadãos e as empresas vão alterando os seus perfis de consumo, vão procurando alternativas mais baratas nuns casos, mais eficientes noutros casos, ou simplesmente mais cómodas ou sustentáveis noutros cenários.

Estas variações podem ser bruscas ou mais suaves, consoante a sua origem, mas provocam sempre uma necessidade de ajuste dos mercados, para que se atinja um novo equilíbrio entre a oferta e a procura.

Os últimos dois anos na Europa representam um dos períodos mais complexos na história recente em termos energéticos, principalmente em consequência da invasão da Ucrânia por parte da Federação Russa. As respostas da União Europeia incluíram uma série de embargos à importação de gás natural, petróleo bruto, produtos petrolíferos refinados, mas também madeira e seus derivados, onde se inclui os pellets de madeira.

O cancelamento do projeto Nordstream 2 e a desativação do Nordstream 1, entre outros oleodutos e gasodutos menores, retiraram do mercado europeu milhões de GWh que será necessário compensar com fontes de energia alternativas.

Ao mesmo tempo, o sul da Europa registava uma seca inédita, com forte redução da produção de energia hídrica, e também de energia eólica, porque à falta de chuva somou-se uma escassez de vento.

Por outro lado, as alterações da atividade industrial e dos hábitos de consumo provocados pela crise sanitária do COVID 19, provocaram um perturbação relevante do lado da

procura, introduzindo maiores incertezas e dificuldades aos gestores de redes para assegurar o normal abastecimento energético.

Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a atual crise energética está a alterar as tendências de procura anteriormente bem estabelecidas. As indústrias expostas aos preços globais enfrentam ameaças reais de racionamento e estão a reduzir a produção. Os consumidores estão a ajustar os seus padrões de consumo de energia em resposta aos altos preços e, em alguns casos, há campanhas emergenciais de redução da procura. As respostas políticas variam, mas em muitos casos incluem esforços determinados para acelerar o investimento em energia limpa. Isso significa um impulso ainda mais forte para as energias renováveis e uma eletrificação mais rápida de processos industriais, dos veículos e do setor do aquecimento. Como muitas das soluções para a crise atual coincidem com as medidas necessárias para atender às metas climáticas globais, a crise pode acabar por ser vista em retrospectiva, como marcando um ponto de viragem crítico na direção da segurança energética e das reduções de emissões [1].

Podemos ver que mesmo antes da crise, as políticas de investimento em energias apresentavam uma clara orientação no sentido de favorecer as energias renováveis em detrimento das fontes fósseis. Ao mesmo tempo podemos ver que o esforço de investimento em energias superou entre 2020 e 2021, na proporção, os ganhos gerais de crescimento do PIB, o que significa uma clara aposta ou prioridade dos investimentos na área da energia (Figura 1).

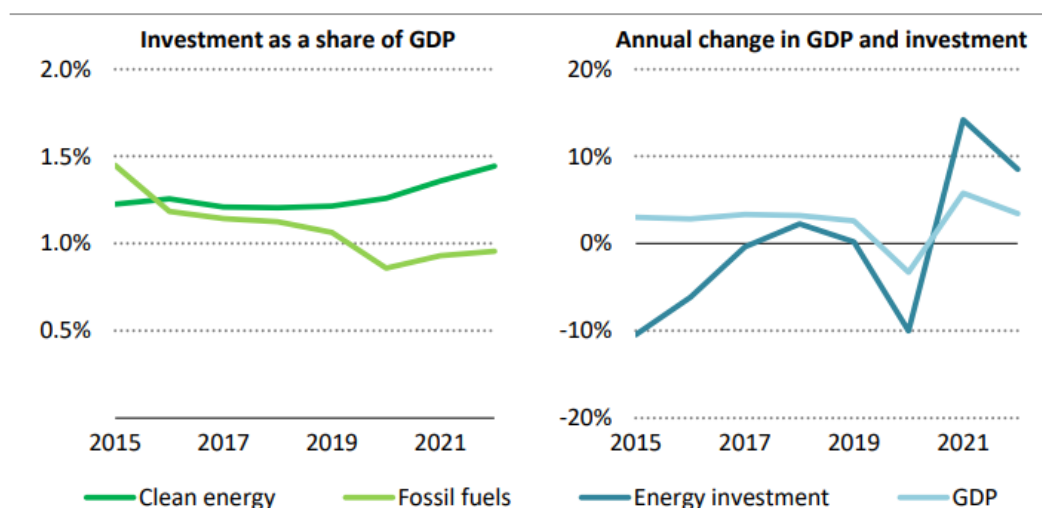


Figura 1 - Evolução do investimento em infraestruturas energéticas vs. PIB [1].

Se analisarmos o aumento anual de custos de geração de energia elétrica em 2022, podemos ver que a Europa sofreu um enorme agravamento de custos, muito superior ao de outras economias ou regiões (figura 2).

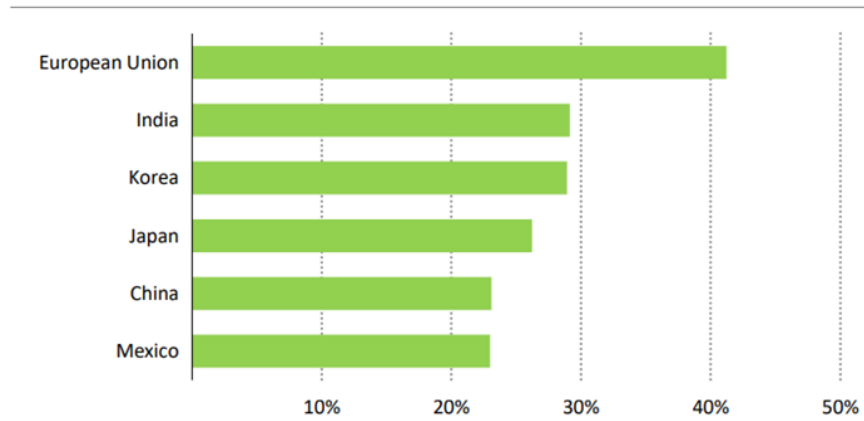


Figura 2 - Evolução dos preços da energia em 2022, em 6 regiões [1].

Se parte deste aumento se deve à dependência externa, nomeadamente do carvão e do gás natural, outra parte deve-se claramente ao esforço de investimento em novas tecnologias de produção de energia a partir das fontes renováveis. Este agravamento de custos está a ter um forte impacto na produção industrial e no consumo das famílias, mas poderá ser uma excelente alavanca para o futuro, porque está a reduzir fortemente as importações, e a fortalecer politicamente o bloco europeu no contexto mundial.

A brutal inflação de preços ao consumidor que se tem verificado na Europa ao longo dos dois últimos anos, está claramente impulsionada pelos preços da energia. Ao passo que noutros países com menor rendimento *per capita*, é a alimentação que mais contribui para a inflação, na União Europeia + Reino Unido é a energia que sobressai, com um impacto muito superior na origem da inflação.

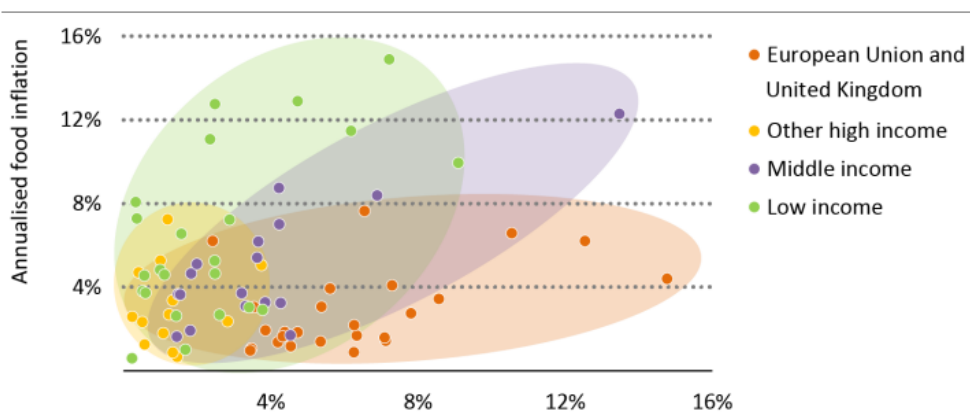


Figura 3 - Evolução dos preços da alimentação vs. energia [1].

Em termos de cenários futuros de médio-prazo, e em consequência dos acordos e compromissos assumidos pela esmagadora maioria dos países, está prevista uma forte redução dos consumos de combustíveis fósseis, sobretudo do gás natural utilizado para produção de energia elétrica, mesmo considerando cenários de crescimento económico mundial.

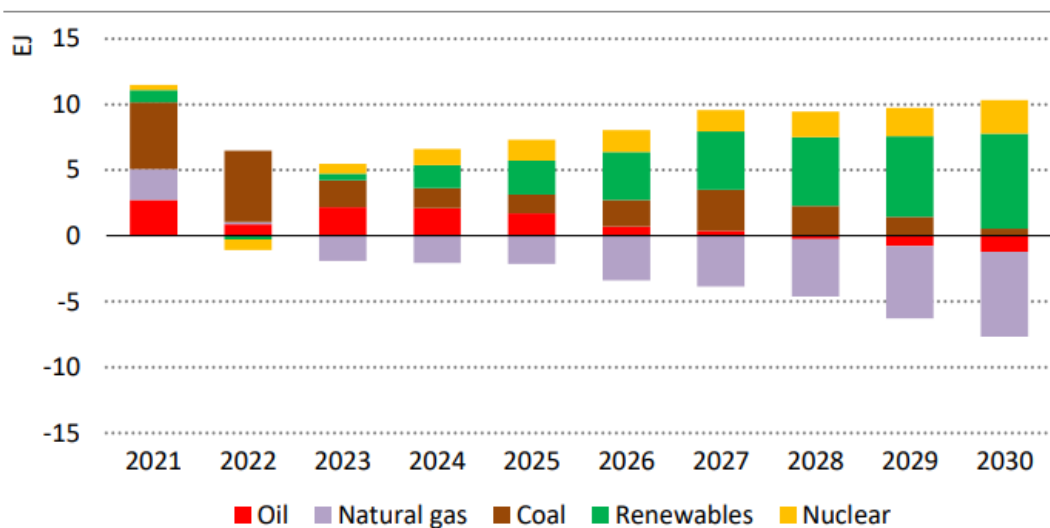


Figura 4 - Previsões de evolução de consumo de energia por fonte [1].

A verificar-se esta evolução, ela representará pela primeira vez na história, uma redução estável e duradoura do consumo de combustíveis fósseis, que poderá ser de cerca de 40% em 2050, face aos valores atuais. Esta tendência será uma inversão nunca antes registada, pois desde a massificação do uso dos combustíveis fósseis, todos os períodos de análise registaram um crescente de consumo destes combustíveis, nuns momentos com maiores crescimentos, noutros com menores, com maior preferência de um ou de outro tipo de combustível, mas sempre com crescimento no seu somatório.

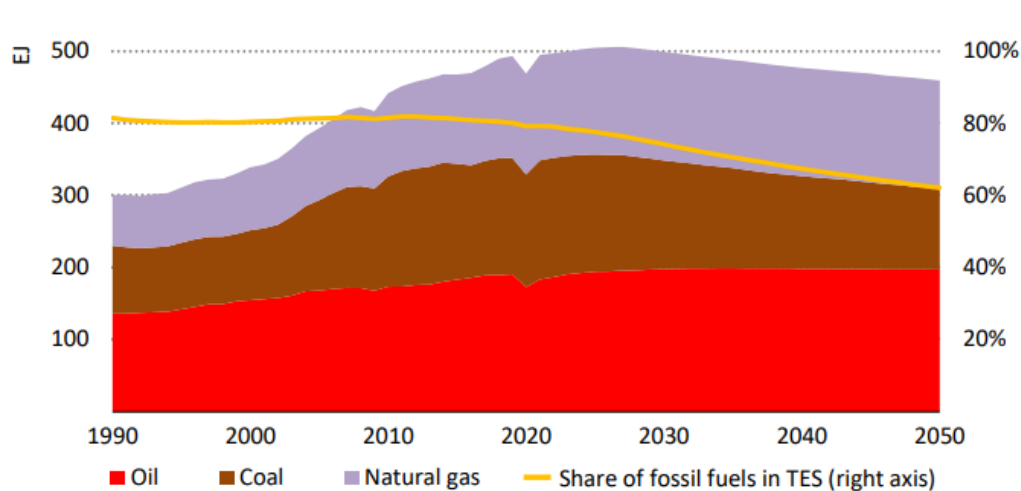


Figura 5 - Quotas dos combustíveis fósseis no total de energia consumida [1].

Analisando com maior detalhe onde se vão produzir os esforços de redução de consumo de combustíveis fósseis, vemos que há setores como a produção de energia elétrica e de calor onde a biomassa irá ter um contributo muito significativo, conquistando um volume muito significativo de quota. Já no setor dos transportes, a redução prevista é menos expressiva, continuando assente na utilização dos combustíveis tradicionais, sem grande margem de penetração, em termos percentuais, das novas tecnologias de eletrificação, biocombustíveis e hidrogénio verde.

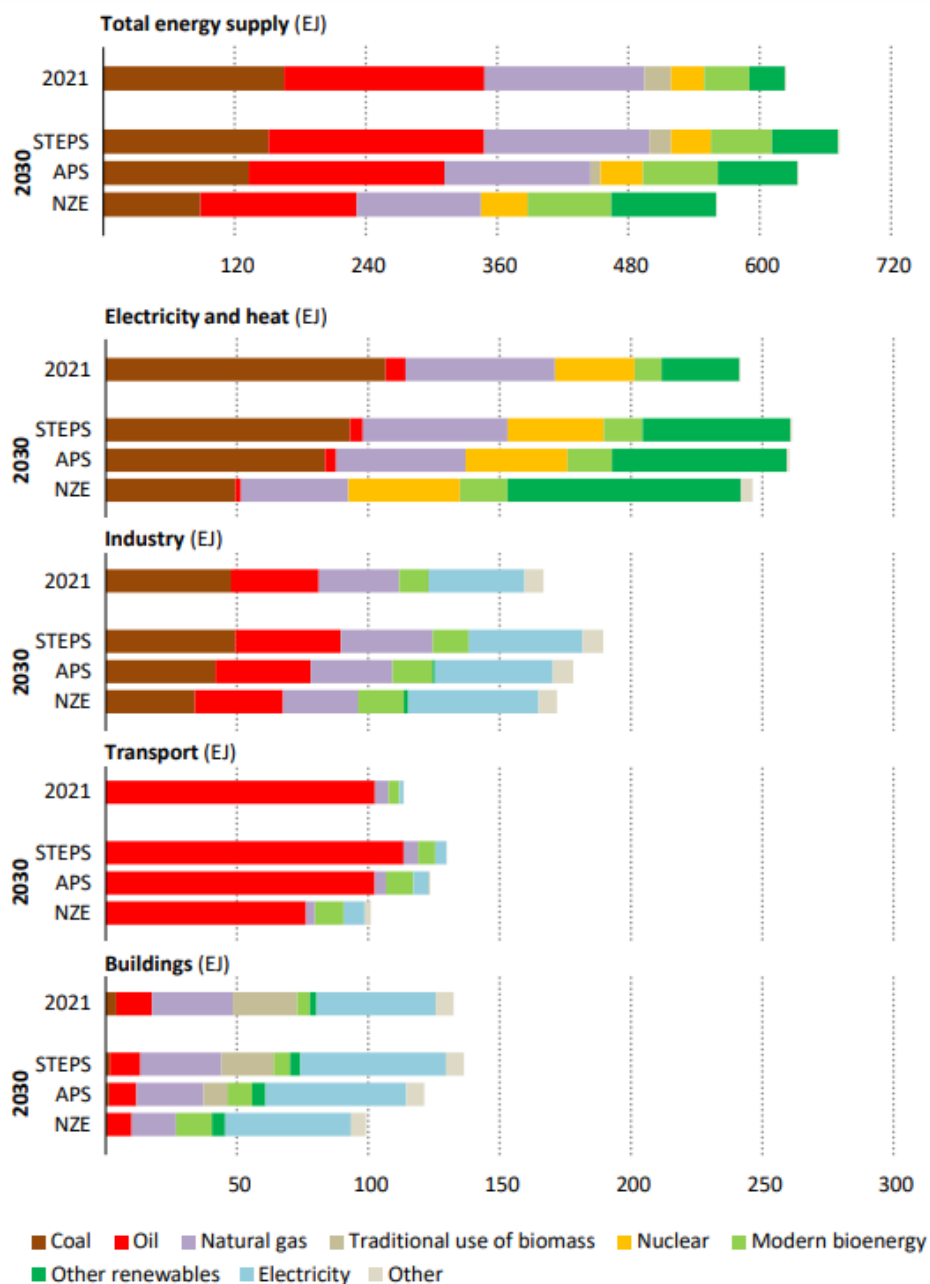


Figura 6 - Perspectivas de evolução dos consumos energia em 2030 [1].

1.2 Políticas energéticas na União Europeia

As políticas energéticas na União Europeia têm vindo a trilhar um caminho já longo rumo à redução da dependência externa, mas também rumo à sustentabilidade ambiental. Estas opções estratégicas constituem também parte de um plano de fortalecimento económico da Europa, pois menores importações significarão menor desequilíbrio da balança comercial. Tal como outros assuntos na União Europeia, também as políticas energéticas precisam de muita negociação até se atingir um consenso, e depois de atingido, a sua implementação é sempre feita em prazos alongados, o que implica uma visão de médio-longo prazo.

A história da política para as energias renováveis é assim complexa, porém, não sendo o foco principal deste trabalho, pode resumir-se a sua evolução destacando alguns dos marcos históricos mais relevantes nesta trajetória.

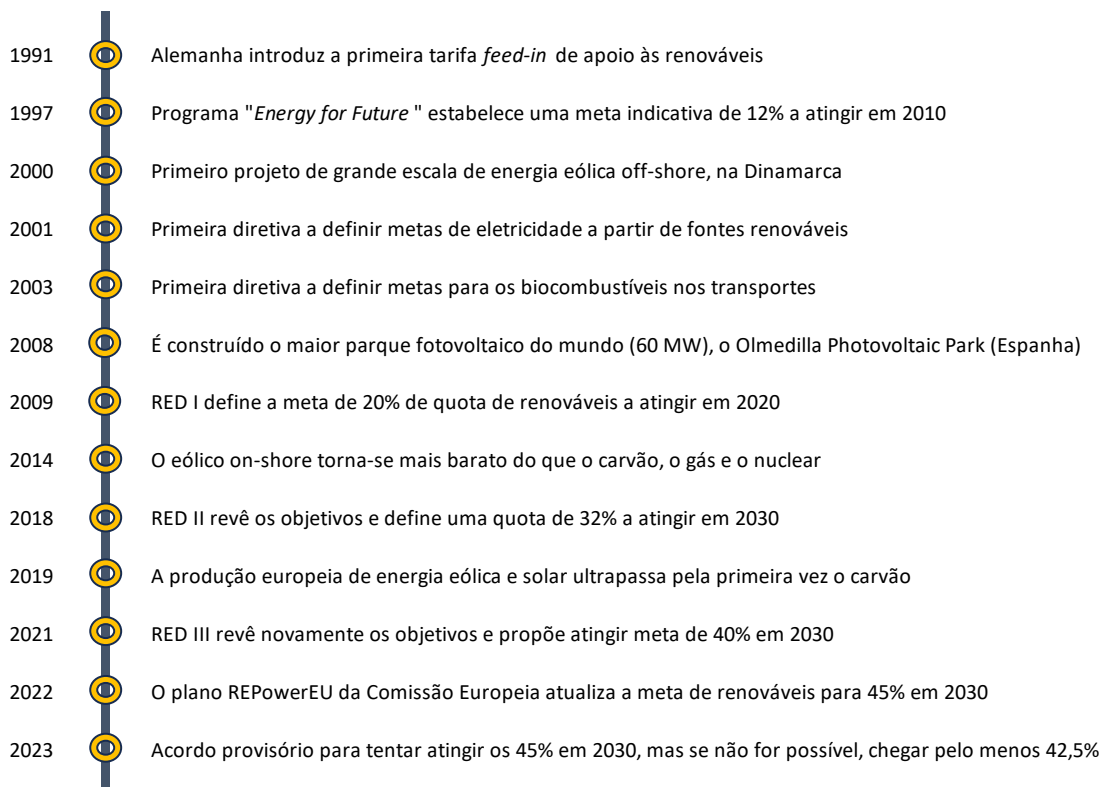


Figura 7 - Marcos históricos na política da UE para as energias renováveis [2].

Relativamente a biomassa, importa centrarmos a atenção na Diretiva UE 2018/2001; RED II, que entrou em vigor em Julho de 2021. Esta diretiva veio atualizar ou substituir a anterior Diretiva Europeia das Renováveis (Renewable Energy Directive - RED), de 2009/28/EC (RED), e foca-se, na sua parte inicial, na necessidade de os Estados Membros incrementarem a quota de energia renovável no respetivo mix energético, definindo a nova meta de 32%, a atingir em 2030 [3].

Para tal, considera-se nesta Diretiva que para o apuramento do total de energia renovável bruta consumida, devem ser somados:

- a) O consumo final bruto de eletricidade de fontes renováveis;
- b) O consumo final bruto de energia de fontes renováveis no setor do aquecimento e arrefecimento;
- c) O consumo final de energia de fontes renováveis pelo setor dos transportes.

Uma das novidades na RED II, é a introdução de critérios de sustentabilidade para os combustíveis biomássicos sólidos e gasosos quando utilizados para fins de eletricidade e calor, muito à semelhança do que já existe para os biocombustíveis usados no sector dos transportes desde 2009. Assim, passam a ser aplicáveis critérios de sustentabilidade à eletricidade e calor em instalações com uma potência térmica nominal total igual ou superior a 20 MW, para os combustíveis sólidos (biomassa), e igual ou superior a 2 MW, para os combustíveis gasosos (biogás) [3].

Relativamente aos critérios de sustentabilidade, existe a obrigatoriedade de uma redução mínima das emissões de GEE de, pelo menos, 70% em instalações que entrem em funcionamento a partir 1 de janeiro de 2021 até 31 de dezembro de 2025, e de 80% para aquelas que entrem em funcionamento a partir de 1 de janeiro de 2026 [3].

O outro critério principal de sustentabilidade assenta no princípio da análise baseada no risco, para garantir que apenas biomassa sustentável seja utilizada para fins energéticos.

Assim, o artigo (29(6)) da RED II, relativo à extração de biomassa florestal, vem estabelecer regras para minimizar o risco de utilização de biomassa não sustentável. Para isso, indica que o país de origem da biomassa florestal deverá ter em vigor legislação nacional ou regional e sistemas de controlo e aplicação implementados que garantam: a legalidade das operações de colheita, a regeneração da floresta nas zonas de colheita, a proteção das áreas designadas/protegidas, a preservação da qualidade dos solos e da biodiversidade e a manutenção/melhoria da capacidade de produção da floresta, a longo prazo. Os sistemas de gestão florestal deverão ser utilizados pelos operadores económicos como forma de demonstrar que a origem da biomassa garante a sua sustentabilidade, devendo garantir-se que são precisos, fiáveis e protegidos quanto a fraude [3].

No número seguinte do mesmo artigo (29(7)), identificam-se os critérios no que respeita à utilização e reafecção dos solos, e à silvicultura (USRSS). Define-se que é necessário garantir que o país de origem ou a região da biomassa florestal: i) faz parte do Acordo de Paris, ii) apresentou um Contributo Determinado a Nível nacional (CDN) na Convenção-Quadro das

Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas que assegure que as alterações na reserva de carbono relacionadas com a colheita de biomassa são contabilizadas para efeitos do cumprimento das obrigações nacionais de redução das emissões GEE, tal como especificado no CDN, e iii) possui legislação que garanta a preservação e aumento das reservas e sumidouros de carbono, provando que as emissões do sector USRSS não excedem as remoções [3].

Significa isto que terá de ser desenvolvido um mecanismo de inventariação e registo dos movimentos de constituição, crescimento e remoções de carbono, assegurando um correto uso da biomassa com preservação dos habitats naturais e prevenindo a depleção de reservas de carbono devidas a colheitas excessivas de biomassa florestal.

Apesar de se considerar em termos gerais que a biomassa é uma fonte de energia renovável e que tem um balanço neutro de carbono ao nível das emissões, importa distinguir que a utilização de biomassa também implica emissões relacionadas com a sua colheita, processamento e transporte. Para uniformizar os cálculos da redução das emissões, a RED II definiu então diversos valores a considerar (valor típico e valor por defeito em g CO₂ eq/MJ), consoante:

- a) a origem da biomassa (resíduos florestais, agrícolas ou industriais);
- b) o nível de processamento (aparas, pellets ou briquetes);
- c) o modo de produção (resíduo, talhadia de curta rotação (eucalipto e choupo), ou troncos de árvores);
- d) a distância à instalação de consumo (4 escalões):
 - I. 1 a 500 km
 - II. 500 a 2.500 km
 - III. 2.500 a 10.000 km
 - IV. Mais de 10.000 km [3]

A conjugação dos elementos acima referidos, faz com que a taxa de substituição final apurada possa variar desde: i) 4 g CO₂ no caso de briquetes ou pellets de resíduos industriais utilizados num raio inferior até 2.500 km; ii) 6 g CO₂ no caso de estilha de resíduos florestais recolhidos a menos de 500 km; iii) até às 43 g CO₂ no caso de briquetes ou pellets de madeira provenientes de plantação dedicada, localizada a mais de 10.000 km da instalação de destino (Tabela 1).

Tabela 1 - Emissões de CO₂ eq/MJ de acordo com o Anexo VI do RED II [3].

Sistema de produção de combustíveis biomássicos	Distância de transporte	Emissões de gases com efeito de estufa — valor típico (g CO ₂ eq/MJ)	Emissões de gases com efeito de estufa — valor por defeito (g CO ₂ eq/MJ)
Aparas de madeira provenientes de resíduos florestais	1 a 500 km	5	6
	500 a 2 500 km	7	9
	2 500 a 10 000 km	12	15
	mais de 10 000 km	22	27
Briquetes de madeira ou péletes provenientes de talhadia de curta rotação (choupo — fertilizado — caso 1)	1 a 500 km	31	37
	500 a 10 000 km	32	38
	mais de 10 000 km	36	43
Briquetes de madeira ou péletes a partir de resíduos industriais (caso 3a)	1 a 500 km	3	4
	500 a 2 500 km	3	4
	2 500 a 10 000 km	5	6
	mais de 10 000 km	8	10

Fica assim evidente que há uma intenção de favorecer a utilização de biomassas residuais, em detrimento de biomassas de plantação dedicada, ou de troncos que podem ser valorizados noutras cadeias de maior valor acrescentado. Simultaneamente, penaliza-se o fator distância entre o local de origem e de consumo da biomassa, tentando onerar as cadeias de logística mais longas e complexas, face às emissões implícitas ao transporte de graneis sólidos.

No preâmbulo do RED II, define-se ainda que *"Na elaboração dos regimes de apoio às fontes de energia renováveis, os Estados-Membros deverão tomar em consideração a disponibilidade de uma oferta sustentável de biomassa e ter devidamente em conta os princípios da economia circular e a hierarquia de resíduos estabelecida na Diretiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho (1), a fim de evitar distorções desnecessárias dos mercados de matérias-primas. A prevenção e a reciclagem de resíduos deverão ser a opção prioritária (...)"* [3].

Neste contexto, e numa avaliação do potencial de descarbonização, por exemplo, de um projeto de substituição de uso de gás natural por biomassa, o benefício líquido da redução de emissões de CO₂, terá de ser calculado considerando o diferencial entre as emissões do

gás, e as emissões correspondentes da fonte de biomassa (matéria-prima, processamento e geografia) que estiver a ser consideradas.

Abre-se assim um caminho para a discriminação positiva da biomassa residual, consumida na proximidade da sua produção, procurando assim introduzir maior razoabilidade na valorização dos resíduos disponíveis em cada região, como primeira opção, em oposição às lógicas de importação intercontinental de biomassa, residual ou de plantação dedicada, reduzindo a pressão sobre biomas noutras regiões do planeta.

Contudo a RED II foi já substituída pela RED III e por outras medidas, destinadas a responder aos desafios dos últimos anos. Em consequência da pandemia de COVID 19 e da surpreendente invasão da Ucrânia pela Rússia, a fragilidade da economia europeia foi colocada em evidência no que diz respeito à dependência energética e à segurança de abastecimento. A Rússia constituía um dos mais importantes exportadores energéticos da UE, contando com uma quota de 46% das importações de carvão, 40% das importações do gás natural e 27% das importações de petróleo [4].

Soma-se a isto, o ponto de situação que já se verificava em 2021, em que 4 países já ultrapassavam a meta definida para 2030 (Noruega, Áustria, Dinamarca e Portugal).

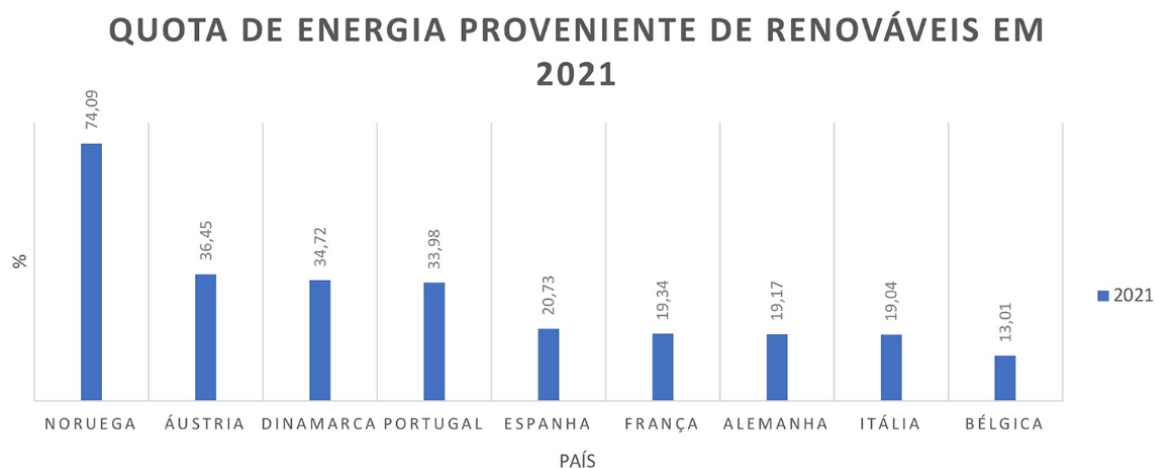


Figura 8 - Quota de energia consumida proveniente de renováveis em 2021 [4].

É neste contexto que surge em 2022 o plano REPowerEU que vêm definir objetivos de 40% de quota de renováveis do mix energético europeu, e mais recentemente as negociações já apontam para a fixação de metas de 42,5 a 45% a serem atingidas em 2030 [4].

A União Europeia revela uma forte ambição e aposta nas energias renováveis, passando assim, e em menos de 14 anos, de um objetivo de 20% de quota de renováveis definido em

2009, para um compromisso de 45% assumido em 2023, para ser alcançado em menos de 7 anos, já em 2030.

1.3 Enquadramento energético do país

1.3.1 Importações

Analisando as estatísticas publicadas pela DGEG relativas ao ano 2020, verificamos que apesar de produzirmos e de até exportarmos energia, o volume que importamos é três vezes superior, pelo que no global somos fortemente dependentes da importação de energia para, para o funcionamento da nossa economia e da sociedade (Figura 7) .

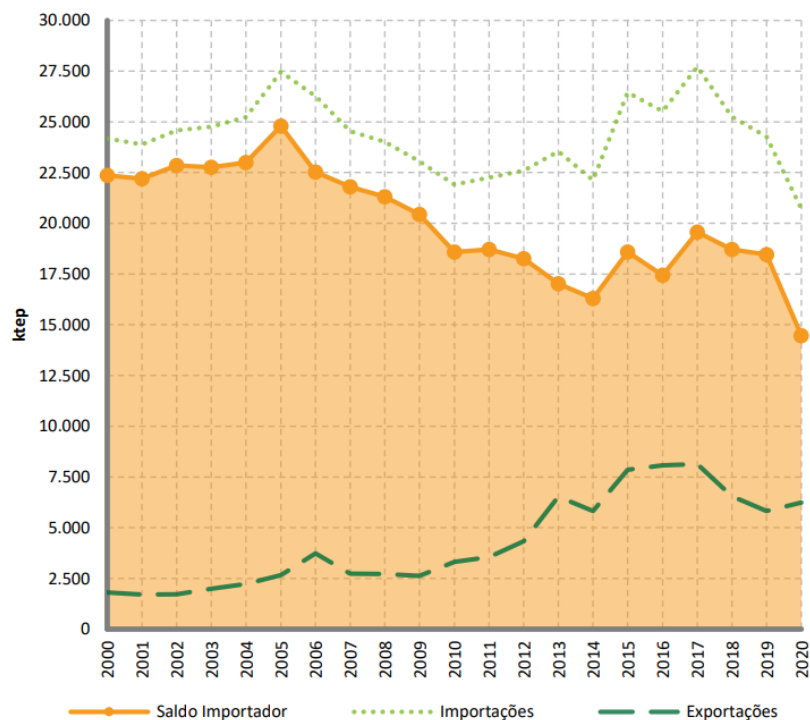


Figura 9 - Evolução das importações e exportações de energia, e saldo [5].

É, porém, verdade que essa dependência se tem vindo a reduzir ao longo dos últimos anos, mas ainda se situa acima dos 65%, depois de em 2005 ter atingido quase 90% (Figura 8).

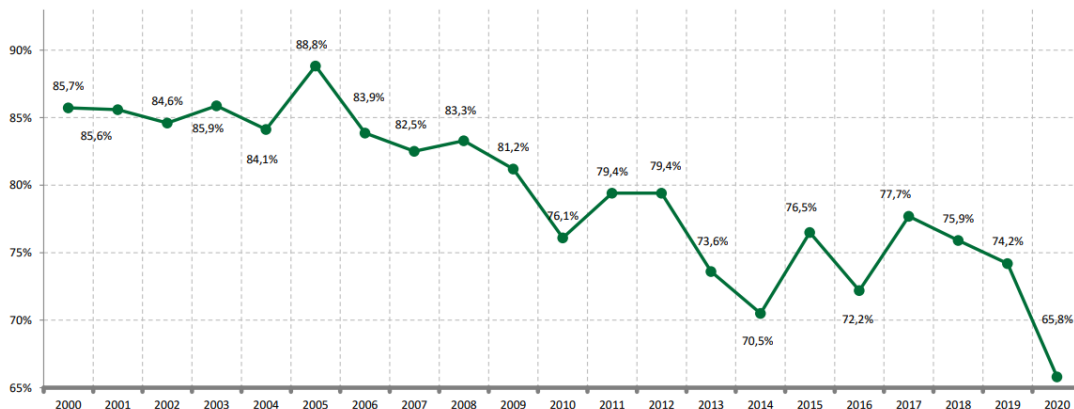


Figura 10 - Evolução da dependência energética de Portugal nos últimos 20 anos [5].

Mas os gráficos anteriores, não distinguem as formas de energia, pelo que importa no âmbito deste trabalho perceber mais em detalhe, como se decompõe o nosso consumo energético, e quais as suas fontes principais (Figura 9).

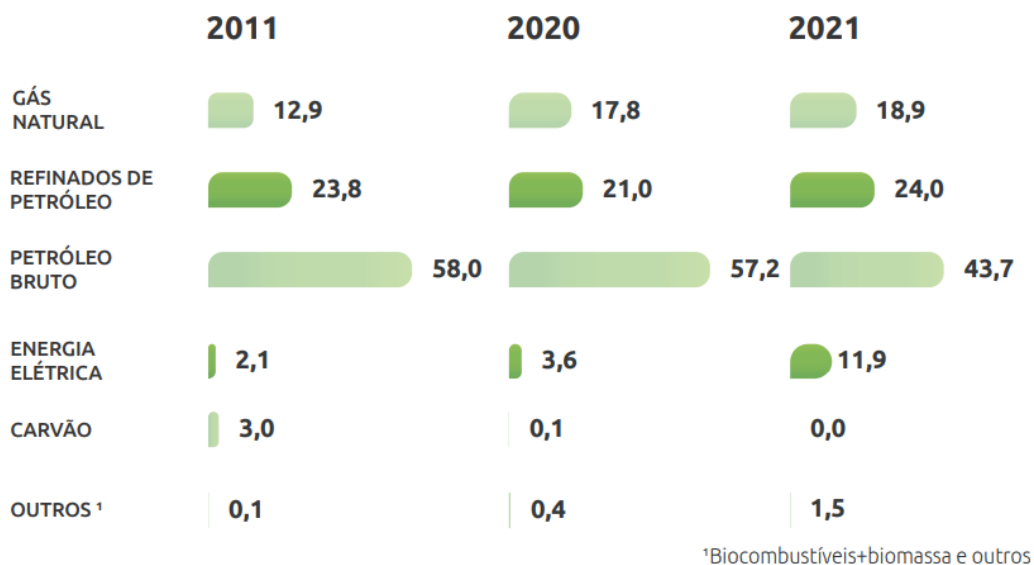


Figura 11 - Estrutura das importações por fonte de energia, em % [5].

Como se pode verificar na Figura 9, os valores de importação de energias de base biológica, são muito reduzidos, e incluem os biocombustíveis, biomassa e outros não especificados [5].

Se por outro lado formos verificar o contributo da biomassa para a produção interna de energia, o cenário é o oposto, a biomassa assume um papel de destaque, até mesmo de liderança.

O peso do petróleo tem vindo a decrescer nos últimos anos (61,4% em 2000 vs. 40,9% em 2020), enquanto o peso das renováveis (14,7% em 2000 vs. 29,9% em 2020) e do gás natural (8,1% em 2000 vs. 25,0% em 2020) aumentaram consideravelmente [5].

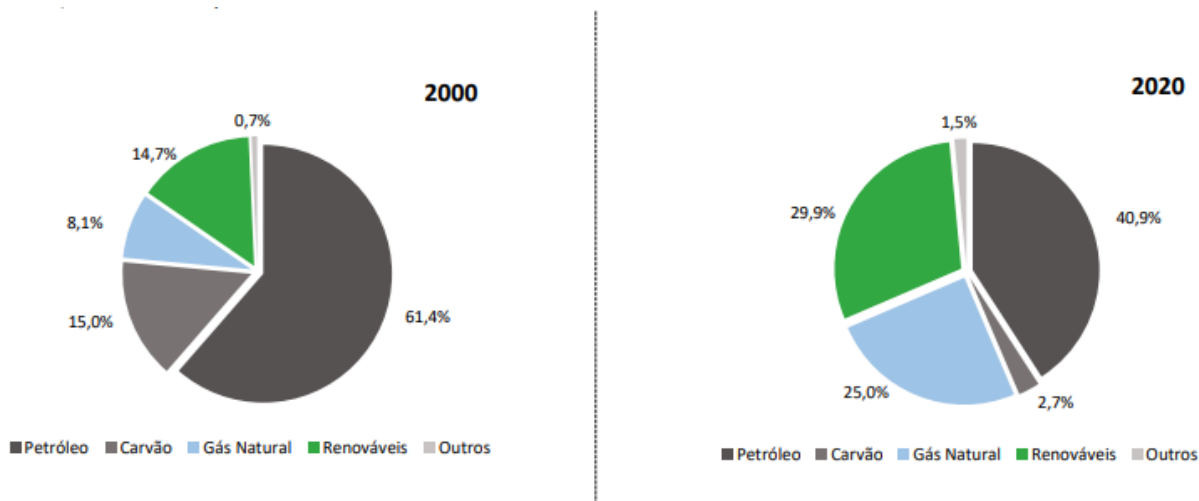


Figura 12 - Evolução do consumo de energia primária, por fonte, 2000 vs 2020 [5].

1.3.2 Produção interna

Constatamos que quando convertida em Toneladas Equivalentes de Petróleo (tep), a energia da biomassa constitui mesmo a maior fonte de energia primária produzida em Portugal, com mais 30% de volume do que o somatório de toda a energia elétrica gerada entre fontes renováveis e não renováveis.

Significa isto que no contexto do esforço pela descarbonização da economia, pela neutralidade carbónica, a biomassa já assegura um esforço muito significativo, mas que tem ainda um potencial de crescimento.

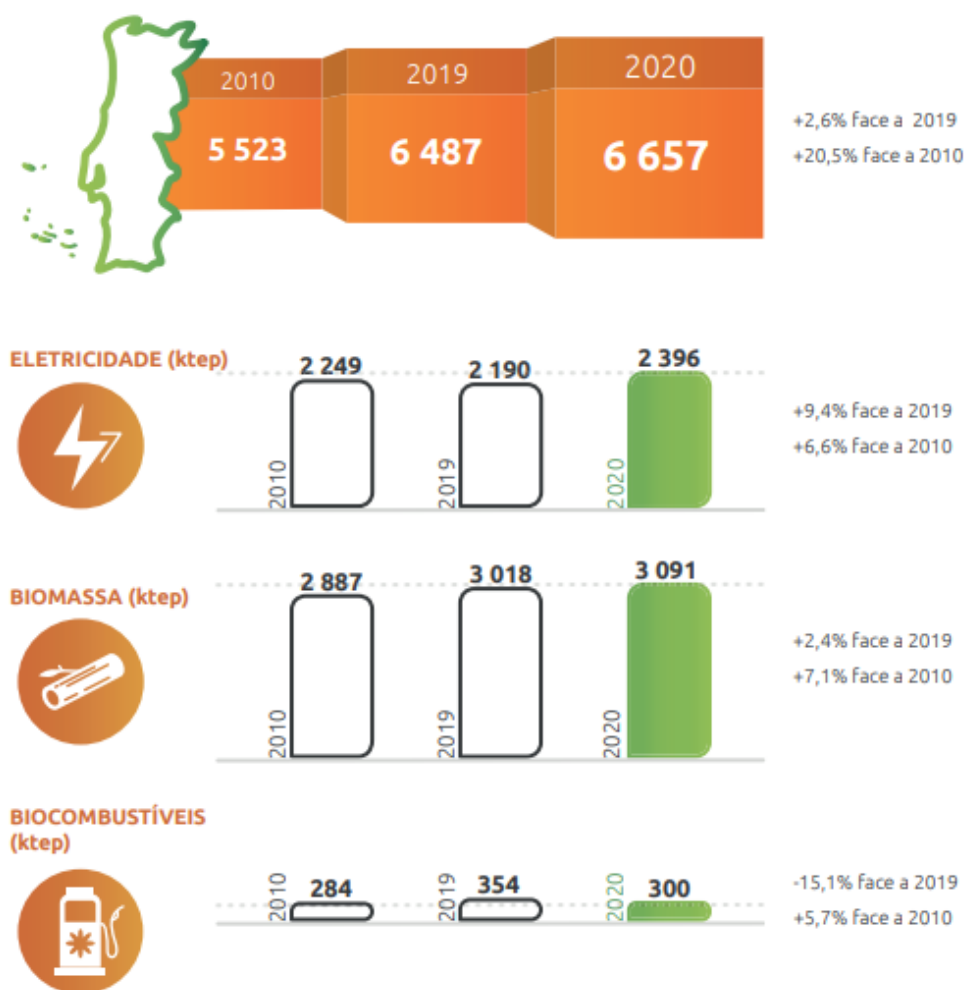


Figura 13 - Evolução da produção de energia primária em Portugal, 2010, 2019 e 2020 [5].

Como refere o gráfico anterior, em 2020, a produção doméstica de energia foi de 6 657 ktep, mais 2,6% em relação ao ano anterior. Este crescimento resulta de maior produção de eletricidade e de biomassa, com mais 9,4% e 2,4%, respetivamente, face a 2019. Em relação a 2010, a produção doméstica cresceu 20,5%. Em 2020, a produção de calor em cogeração foi de 1 336 ktep, tendo como principal fonte primária a biomassa com 60%, seguida do gás natural com uma contribuição de 36%. Em 2010, a biomassa representava 51% e o gás natural 31%, da energia necessária para a produção de calor, o que revela que a biomassa não só manteve a posição de liderança, como ainda a conseguiu reforçar e consolidar.

A produção doméstica de energia, corresponde a toda a energia extraída e utilizável a partir de recursos naturais do país [5]. Estes recursos tanto podem ter proveniência de minas de carvão, jazidas de petróleo ou gás natural, biomassa, centrais hídricas, eólicas, fotovoltaicas, fabrico de biocombustíveis, etc. Uma forma energética produzida a partir de outra, não é

considerada Produção Doméstica, mas sim Transformação [5]. É o caso da produção de eletricidade a partir do carvão, do petróleo, do gás natural (GN), da biomassa, etc.

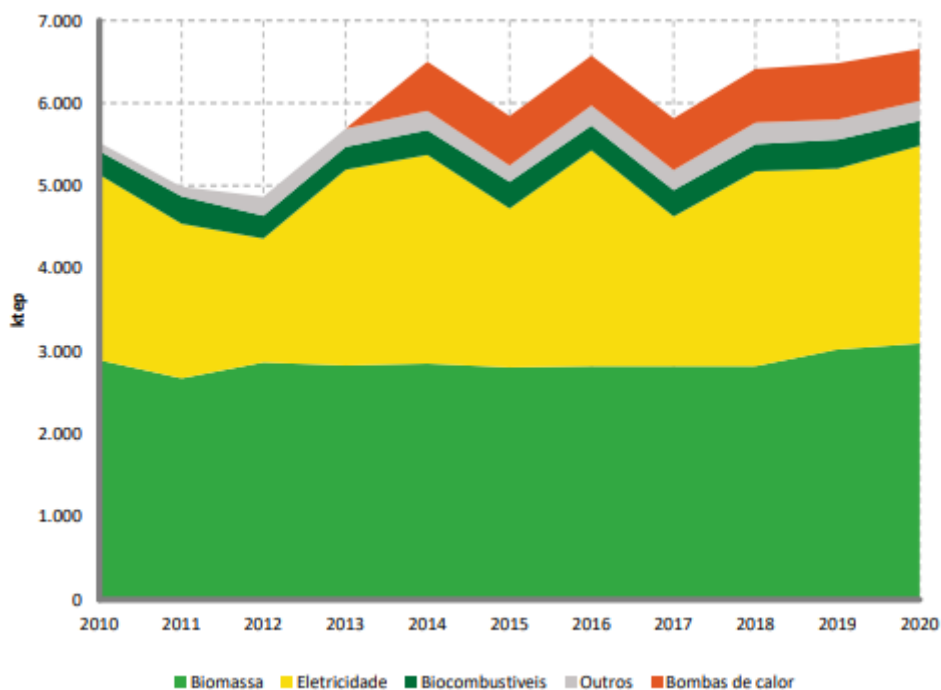


Figura 14 - Detalhe das fontes de energia primária utilizadas, entre 2010 a 2020 [5].

Em 2020, a principal fonte endógena, foi a biomassa com uma contribuição de 46,4% do total da produção. A eletricidade, foi a segunda fonte endógena com 36,0%, fundamentalmente obtida através da produção hídrica e eólica. O contributo renovável das bombas de calor representou 9,4%, a tecnologia fotovoltaica contribuiu com 2,2% e os biocombustíveis com 4,5% para a produção doméstica. O item "Outros" engloba solar térmico, resíduos não renováveis e geotermia de baixa entalpia, que no seu conjunto, em 2020, representaram 3,7% da produção doméstica [5].

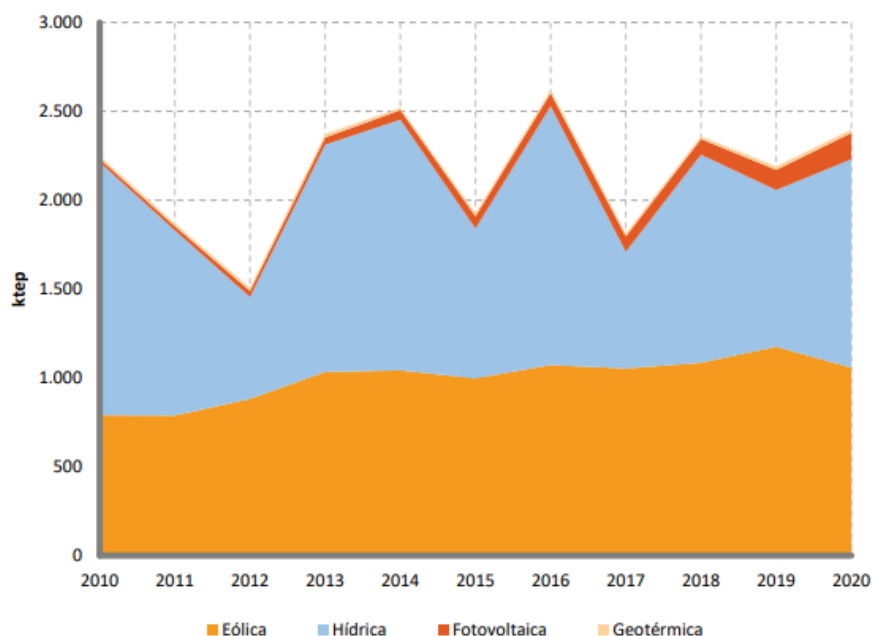


Figura 15 - Evolução das fontes para produção de eletricidade em Portugal, 2010-2020 [5].

A produção de eletricidade a partir de fontes primárias, é maioritariamente proveniente das tecnologias hídrica e eólica, com 93,1% do total. A produção de eletricidade utilizando a tecnologia fotovoltaica, tem vindo a crescer de forma significativa, tendo em 2020 crescido 28% face a 2019. A eletricidade produzida por geotermia, tendo um peso baixo no contexto nacional (0,8%), assume particular relevância na Região Autónoma dos Açores, onde assegura cerca de 30% do consumo final de eletricidade desta Região Autónoma [5].

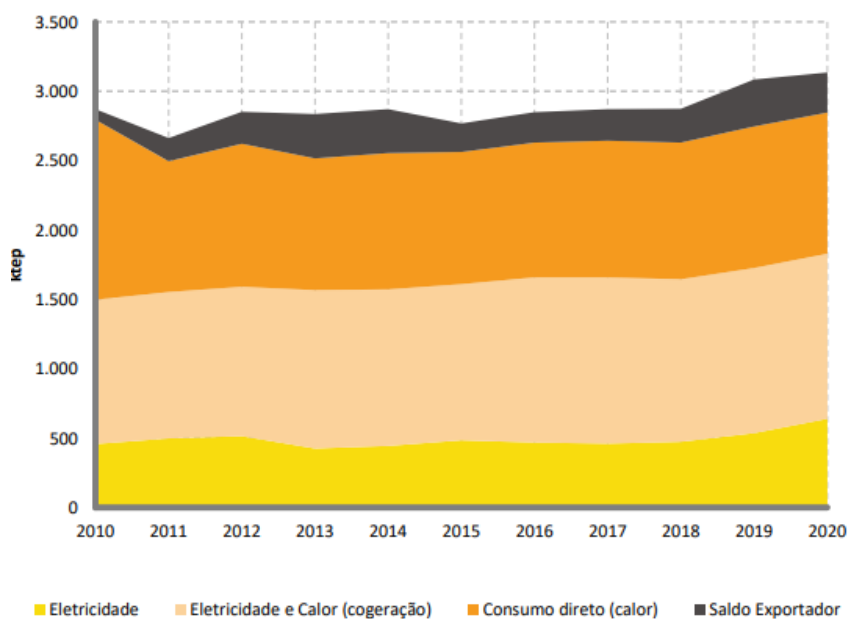


Figura 16 - Evolução dos usos de biomassa em Portugal, entre 2010 a 2020 [5].

Em 2020, o consumo de biomassa representou 46,5% (3 092 ktep) da produção doméstica de energia. Nos últimos 5 anos, cerca de 59% da biomassa produzida foi utilizada para transformação em centrais termoelétricas (térmicas dedicadas, cogeração e outras), enquanto 33% foi utilizada diretamente para produção de calor, maioritariamente no setor residencial. Neste mesmo ano, 8% da biomassa foi exportada sob a forma de pellets e briquetes [5].

1.4 O papel dos biocombustíveis sólidos na descarbonização

A descarbonização tornou-se uma questão crítica nos últimos anos devido ao aumento da demanda por energia e à diminuição dos recursos petrolíferos. Os sistemas de descarbonização baseados em biotecnologia provaram ser uma técnica económica e ambientalmente benigna de reduzir as emissões de carbono. A geração de bioenergia é uma técnica ambientalmente amigável para mitigar as mudanças climáticas no setor de energia, e prevê-se que desempenhe um papel importante na redução das emissões globais de carbono [6].

Com a transição energética em curso na Europa, a participação das energias renováveis variáveis (VRE) no sistema elétrico aumenta constantemente e diferentes opções de flexibilidade ganham importância. O futuro sistema de energia europeu será focado em tecnologias clássicas de armazenamento de energia, armazenamento de hidrogénio, geração por biomassa e expansão da rede. Em todos os cenários, é encontrada uma necessidade crescente de opções adicionais de flexibilidade para níveis moderados de descarbonização com parcelas de VRE superiores a 50%. A partir daí, a implantação de armazenamentos de energia cresce de forma não linear e, eventualmente, apresenta um salto notável ao se aproximar de um sistema de emissão zero, impulsionado principalmente por investimentos em armazenamento de hidrogénio. Isso também vem junto com um salto nos custos totais do sistema. Quando a expansão das capacidades de biomassa está disponível, a biomassa assume parcialmente a função do hidrogénio como uma opção de flexibilidade de longo prazo. Ao permitir a expansão da rede, as capacidades de transmissão adicionais levam a uma integração mais forte da geração eólica, enquanto (especialmente a curto prazo) os requisitos de armazenamento para níveis mais altos de descarbonização diminuem. Ambos os investimentos adicionais na geração de biomassa e na rede de transmissão resultam em custos totais do sistema até 4% menores, sem substituir completamente qualquer outra opção de flexibilidade [7].

Num estudo realizado por *Lund H. et al, 2022*, sobre descarbonização da economia dinamarquesa, as principais conclusões são que uma sociedade dinamarquesa totalmente descarbonizada até 2045, incluindo a participação da Dinamarca na aviação internacional e transporte, é tecnicamente viável dentro das limitações da Dinamarca e dos recursos sustentáveis de biomassa no mundo. Comparado a uma referência de negócios como sempre, os custos sociais não precisam aumentar. No entanto, os custos de importação de combustíveis fósseis são substituídos por investimentos, levando assim ao aumento do emprego e ao crescimento da economia. Os benefícios de novos tipos de emprego e um desenvolvimento industrial mais verde também serão cruciais para o futuro desenvolvimento económico geral dinamarquês [8].

A biomassa sólida afirma-se assim como uma via para a descarbonização, sobretudo em processos de geração de energia térmica, onde apresenta grande facilidade de adaptação aos sistemas existentes, em produção geograficamente distribuída. Em processos de produção de energia elétrica, onde tem a grande vantagem de poder comportar-se como uma bateria, dada a facilidade de armazenamento e rápida conversão em energia elétrica para injeção nas redes de distribuição [8].

A exploração e uso de sistemas e ciclos de energia com dois ou mais produtos de saída úteis é uma proposta muito interessante sugerida por cientistas de energia [9]. Tais sistemas, que são concebidos na forma de ciclos de energia de cogeração, trigeração, poligeração e multigeração, podem ser implementados nas escalas de usinas de energia e/ou geração distribuída [8]. Além disso, foi relatado em muitas publicações que o uso de energias renováveis e tecnologias verdes pode resultar em maior produtividade e aumento dos níveis de produção de energia [8]. Isso pode ser mais evidente ao coletar a energia térmica disponível da exaustão de alguns sistemas de energia e utilizá-la em ciclos a jusante. Por outras palavras, confiar em tais processos de produção de energia pode aumentar o uso de recursos de energia primária, além de reduzir as perdas de energia [9].

A energia solar e a biomassa são fontes renováveis populares que podem ser combinadas para produzir diversas formas de energia [9]. A natureza intermitente da energia de biomassa é menor em comparação com a energia solar. No entanto, o uso de energia solar pode ser mais simples do que a energia de biomassa e requer tecnologias mais simples. Portanto, combinar os dois pode ser muito interessante e superar muitas das limitações da sua utilização isolada [9]. Os processos de gaseificação e combustão podem ser usados para converter energia de biomassa em energia térmica [8]. Além disso, utilizando coletores e concentradores

solares, os raios solares podem ser transformados em energia [10]. A energia térmica obtida de ambas as formas pode ser transformada em energia elétrica em muitos ciclos e sistemas (como ciclos baseados em turbinas a vapor e a gás, ORCU, células de combustível, unidades de dessalinização, etc.). O uso de células de combustível pode resultar em melhor desempenho em comparação com outros ciclos de energia; porque são de baixo carbono (mesmo livres de carbono, tecnologias eficientes e modernas) [13]. Além disso, eles podem atuar como um sistema de armazenamento de energia de hidrogênio. Esse tipo de unidade funciona em diferentes temperaturas de 80 °C a 1000 °C. Estes sistemas estão entre as células de combustível de alta temperatura mais populares, que podem superar muitas limitações de produção de energia devido à sua alta temperatura operacional. Também podem oferecer até 80% de eficiência [13].

Segundo diversos investigadores, num futuro próximo, a eletricidade e o hidrogênio podem atuar como portadores de energia complementares; porque essas duas formas de energia podem ser facilmente convertidas uma na outra. Por outras palavras, a energia do hidrogênio pode transportar uma elevada quantidade de energia e depois ser convertida novamente em energia elétrica quando a demanda de eletricidade é alta [11]. No entanto, o hidrogênio deve ser produzido usando tecnologias especiais [9]. Abordagens baseadas em energia fóssil podem levar a um aumento das emissões de gases com efeito estufa. Porém, se a eletricidade da eletrólise da água puder ser captada através de tecnologias limpas, esse processo pode ser encarado como um ciclo verde, moderno e eficiente. Os eletrolisadores podem ser operados em gamas de temperaturas baixas e altas [12]. A unidade de eletrólise alcalina (AEU) é a tecnologia mais antiga para produzir energia de hidrogênio. Por outro lado, a falta de água doce tornou-se um dos maiores problemas em muitas sociedades. A solução sugerida é empregar unidades de dessalinização para converter a água salgada do mar em água doce e potável [12]. As unidades de dessalinização comuns incluem: unidade de osmose reversa, unidade de dessalinização de múltiplos efeitos e unidade de dessalinização baseada em processos de desumidificação e umidificação. Portanto, projetar um sistema de energia que possa atender às necessidades básicas de energia das sociedades pode ser muito vantajoso para alcançar um desenvolvimento sustentável.

Baterias de biomassa

O aumento da penetração de fontes de energia renovável é notório em todo o mundo. No entanto, essas fontes de energia dependem de condições climáticas e sazonais que

comprometem o equilíbrio da rede e a segurança do abastecimento. Assim, o armazenamento de energia é fulcral, em especial o armazenamento de energia a longo prazo para garantir um fornecimento de energia confiável [14].

Uma solução promissora é o sistema de bateria baseado em biomassa, que atua como uma bateria gigante, grande o suficiente para garantir um armazenamento sazonal, uma "bateria de biomassa". Para entender os possíveis ganhos desse novo conceito, estão a ser investigadas diferentes soluções de processamento de biomassa, incluindo resíduos agrícolas. Um exemplo é o "Power-to-X" com capacidade de armazenamento de energia verde. Na conceção atual, a bateria de biomassa usa biogás ou biometano num sistema combinado de calor e energia mecânica para produzir eletricidade, quando há falta de energia renovável. O biogás ou biometano queimado libera CO₂ que é capturado e armazenado antes de ser usado na última parte da cadeia de valor do Power-to-X para produzir e-querosene, quando há eletricidade excedente disponível. O custo nivelado do e-querosene é usado para avaliar o desempenho económico da bateria de biomassa. Globalmente, estima-se que, num cenário ótimo, possam ser facilmente produzidos 91 milhões de litros de e-querosene a um custo nivelado de 47 €/MWh, em comparação com 95 €/MWh quando não é utilizada a operação flexível. Portanto, o conceito de bateria de biomassa poderia muito bem ser uma opção competitiva num cenário futuro com disponibilidade suficiente de energia renovável e alta demanda por combustíveis verdes líquidos [14].

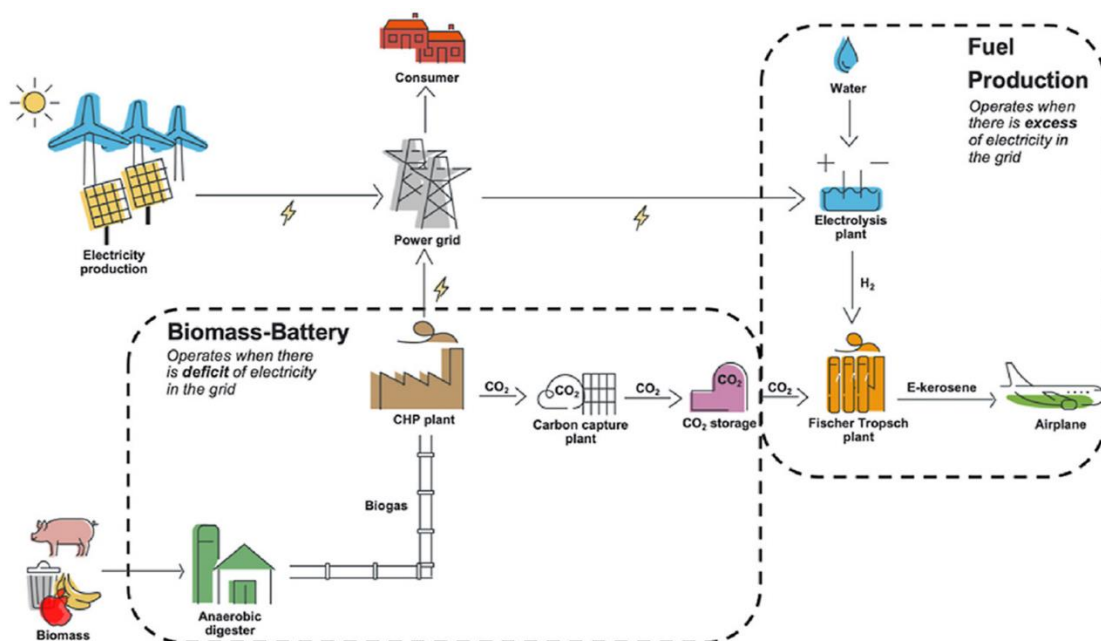


Figura 17 - Esquema de princípio da "Bateria de Biomassa" [14].

Temos assim a biomassa sólida a funcionar triplamente como bateria e a apoiar a des-carbonização: i) primeiro porque permite ser armazenada no estado sólido, fazendo com que o seu processamento ocorra de acordo com as necessidades do sistema, libertando energia apenas e só quando esta é realmente necessária; ii) depois, já convertida biometano ou biogás, pode também ser armazenada e gerida; iii) e por fim, já convertida em e-querosene, na forma líquida, podendo ser armazenada de forma convencional como qualquer combustível líquido, com elevada densidade energética.

1.5 Normas de qualidade e de certificação da biomassa sólida

Na área da biomassa a primeira certificação na europa surge em 2011.

O sucesso dos pellets de madeira trouxe consigo preocupações importantes. Como estruturar devidamente o mercado dos pellets e garantir condições de comércio justas? Como garantir a transparência e comparabilidade ao consumidor? E, mais importante ainda, como promover o aumento da qualidade dos pellets, globalmente? Estas preocupações levaram à criação de uma Norma Europeia para pellets de madeira em 2011 (EN14961-2).

Anos depois, em 2014, a EN 14961-2 foi substituída pela norma ISO 17225-2:2014. Com o manual 3.0 o ENplus passa a seguir a norma ISO. Já em 2021 ocorre a última atualização com a publicação da ISO 17225-2:2021.

Portanto, e numa perspetiva histórica, a certificação ENplus® estabeleceu-se em 2011. Originalmente projetada pelo Deutsches Pelletinstitut, a certificação ENplus® estabeleceu classes de qualidade e requisitos mais exigentes que os definidos pelas normas europeia e internacional. Devido, em parte, ao apoio ativo de parceiros europeus, a certificação ENplus® tornou-se uma marca de renome na Europa e em todo o mundo. O sucesso da certificação contribuiu, amplamente, para a harmonização e normalização do mercado de pellets.

A história de um sistema de certificação líder mundial está, obviamente, fortemente ligada à história do produto que certifica. Os pellets de madeira surgiram durante a crise do

petróleo da década de 70, quando a procura por alternativas aos combustíveis fósseis era elevada. No entanto, só na década de 90, no seio de uma crescente consciencialização ambiental, é que os pellets de madeira foram reconhecidos como uma fonte energética alternativa fiável, no espaço Europeu. Desde então, a produção e o consumo têm aumentando progressivamente e os pellets de madeira são vistos, atualmente, como um combustível renovável de elevada qualidade [15].

O ENplus difundiu-se rapidamente desde a sua primeira introdução na Alemanha em 2011. Em 2015, existiam produtores de pellets certificados ENplus em 34 países (Áustria, Bósnia e Herzegovina, Bélgica, Bulgária, Brasil, Bielorrússia, Canadá, Chile, Croácia, República Tcheca, Dinamarca, Estónia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Irlanda, Itália, Letónia, Lituânia, Montenegro, Malásia, Holanda, Polónia, Portugal, Romênia, Rússia, Sérvia, Suíça, Espanha, Suécia, Eslovênia, Eslováquia, Ucrânia, Reino Unido e EUA). A produção total de pellets ENplus é de cerca de 8 milhões de toneladas por ano [15].

Entretanto, e paralelamente ao processo dos pellets, percorreu-se também um caminho de harmonização da qualidade e de formatação na área da estilha, com a definição de critérios, intervalos, valores máximos e/ou mínimos a cumprir para obter determinada classificação.

Norma para biocombustíveis sólidos

A ISO 17225:2021 “Especificações e classes de combustíveis” define as especificações a cumprir pelos combustíveis de biomassa, de forma a serem classificados.

Neste sentido, esta norma está dividida em 7 partes:

- **ISO 17225-1:2021: Requisitos gerais.**
- **ISO 17225-2:2021: Classes de pellets de madeira (A1, A2 ou B).**
- **ISO 17225-3:2021: Classes de briquetes de madeira (A1, A2 e B).**
- **ISO 17225-4:2021: Classes de estilha de madeira (A1, A2, B1 e B2).**
- **ISO 17225-5:2021: Classes de lenha (A1, A2 ou B).**
- **ISO 17225-6:2021: Classes de paletes não-lenhosos (A ou B).**
- **ISO 17225-7:2021: Classes de briquetes não-lenhosos (A e B).**

Esta norma não classifica a qualidade de alguns biocombustíveis mediterrâneos importantes, como o caroço de azeitona e as cascas de frutos secos [16].

Focando então a atenção na parte 4 da norma ISO 17225 - Classes de estilha de madeira, verificamos que foram estabelecidas quatro classes de estilha: A1, A2, B1 e B2 [16].

Porém não há uma grande densificação dos critérios, nomeadamente no que concerne à identificação das categorias de distribuição granulométrica, denotando uma maior preocupação em definir os critérios de qualidade para enquadramento na classe com base na origem da matéria prima, nos teores de humidade relativa e teores de cinzas, conforme podemos observar na tabela seguinte.

Tabela 2 - Classes de estilha segundo a Norma ISO 17225-4 [16].

Propriedade / Classe	A1	A2	B1	B2
Origem e fonte da matéria prima	Árvores completas sem raiz, fuste, restos de corte, resíduos e subprodutos de madeira não tratados quimicamente		Biomassa lenhosa procedente da floresta, plantação dedicada ou outra madeira virgem, resíduos e subprodutos de madeira não tratada quimicamente	Todos os incluídos na classe B1, mais os subprodutos tratados quimicamente e madeira usada não tratada quimicamente
Granulometria	A especificar, nomeadamente P16S, P31S, e P45S			
Humidade relativa	M ≤ 25%	< 25% M ≤ 55%	M ≤ 35%	< 15% M ≤ 55%
Teor de cinzas (% MS)	A1.0 ≤ 1,0%	A1.5 ≤ 1,5%	A3.0 ≤ 3,0%	
Composição	-----	-----	N 1.0 ≤ 1,0% ; S 0.1 ≤ 1,5% ; CL 0.05 ≤ 0,05% * AS ≤ 1,0% ; Cd ≤ 2,0% ; Cr ≤ 10% ; Cu ≤ 10% ; Pb ≤ 10% ; Hg ≤ 0,1% ; Ni ≤ 10% ; Zn ≤ 100% **	
Densidade*** (conforme recebida)	BD 150 ≥ 250 kg/m ³	BD 150 ≥ 300 kg/m ³	Sem valor mínimo definido	
Poder Calorífico*** (MJ/kg ou kWh/kg conforme recebida)	Sem valor mínimo definido			

* - N, S e CL - expressos em % de matéria seca

** - Restantes elementos expressos em mg/kg de matéria seca

*** - Parâmetros não normativos, apenas informativos.

Temos assim um normativo que permite enquadrar minimamente os produtos de estilha, para que seja possível estabelecer as bases de contratos de fornecimento, permitindo a verificação do cumprimento dos critérios de qualidade, através de metodologias universais e devidamente conhecidas.

1.6 Micro-estilha

A micro-estilha que se aborda neste trabalho corresponde a um conceito inovador implementado pela start-up portuguesa FTC FUELS & TECHNOLOGIES CONCEPT, de aplicar um índice mais elevado de trituração da matéria prima, e selecionar a menor das frações da estilha, obtendo um produto com maior homogeneidade, dentro de uma gama de granulometrias pouco usual na área da estilha.

À luz dos padrões definidos pela ISO 17827-1:2021, esta estilha encaixa numa classificação de P31S, com uma fração claramente maioritária entre os 3 e os 31 mm, uma baixa percentagem de finos, e uma muito reduzida percentagem de peças com até 120 mm.

Em termos de humidade relativa, e como forma de incrementar o poder calorífico e a velocidade de gaseificação, esta biomassa passa por um processo de secagem forçada, com recurso a um tromel rotativo e uma fornalha alimentada com a fração mais grosseira da estilha, fração essa que foi rejeitada na primeira crivagem.

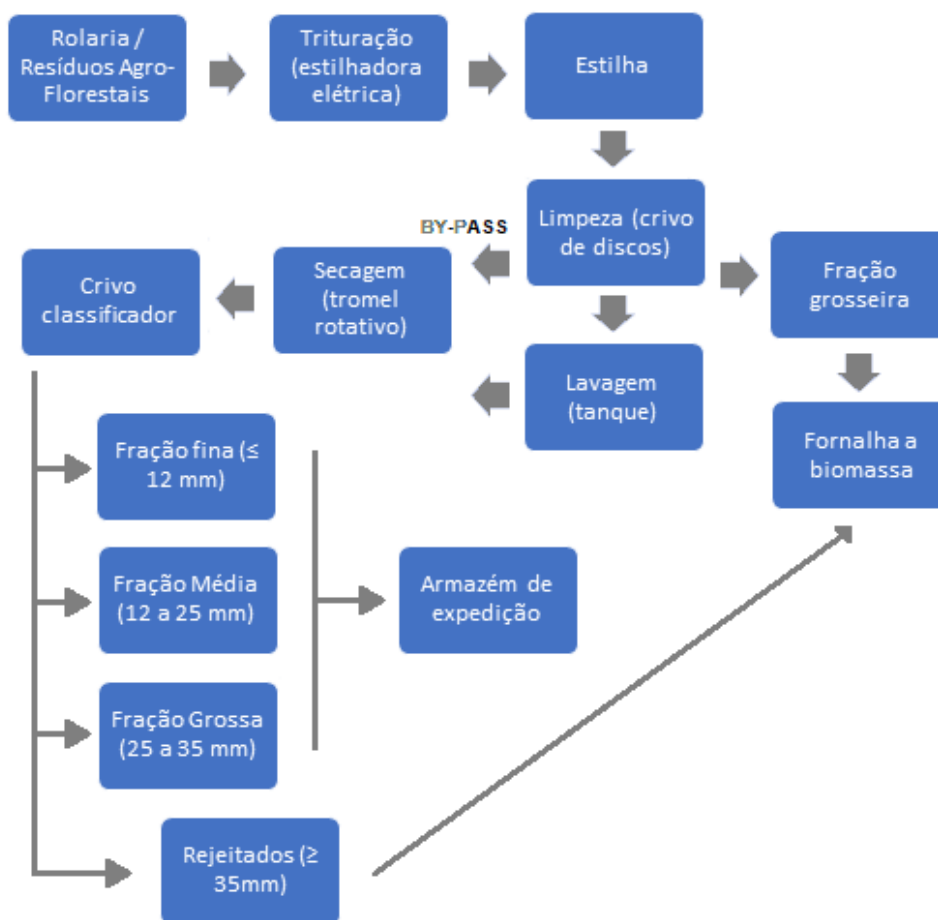


Figura 18 - Esquema de produção da micro-estilha na FTC Fuels.

A unidade de produção da FTC Fuels foi inaugurada recentemente, estando ainda a decorrer trabalhos de acabamentos e arranjos exteriores.



Figura 19 - Unidade de produção da FTC Fuels, em Vouzela.

1.6.1 Produto inovador

O mercado dos produtos de biomassa tem respondido ao longo dos últimos anos aos desafios de abastecimento da indústria termoelétrica e da co-geração, assim como de caldeiras de grande potência, equipadas com ante-fornalhas de grelhas móveis e sistemas de alimentação robustos, que lhes permite lidar com estilhas de elevadas granulometrias e elevada heterogeneidade, com teores de humidade muito variáveis, consoante a época do ano e as condições climatéricas.

A inovação deste projeto da FCT Fuels consiste assim em apresentar pela primeira vez ao mercado nacional, uma estilha selecionada, crivada, com reduzida granulometria e grande homogeneidade, com um teor de humidade controlado e estável ao longo de todo o ano, assegurando aos seus clientes um produto padronizado, com um poder calorífico idêntico elevado, fácil de compatibilizar com sistemas de armazenamento e movimentação de pellets, para que se possa afirmar como uma alternativa ao pellets de madeira.

O elevado grau de inovação deste projeto foi avaliado pelo IAPMEI, através da candidatura apresentada ao programa Compete 2020, que reconheceu o mérito e potencial da ideia, tendo aprovado um significativo apoio ao investimento.

1.7 Porquê estudar esta alternativa ao pellet?

A transição energética na indústria portuguesa seguiu nos últimos anos um caminho de forte incremento de utilização de biomassa para a substituição do uso de gás natural, gasóleo e nafta em caldeiras de vapor e de óleo térmico.

Estas caldeiras industriais começam em potências de algumas centenas de kW's, mas em indústrias como os matadouros, lavandarias e tinturarias, facilmente encontramos caldeiras com potências de 3, 5, ou mesmo 10 MW térmicos. Devido a fortes constrangimentos de espaço nas centrais térmicas, e de capital para investimento, as empresas foram optando por sistemas alimentados a pellets, dada a maior densidade energética e sobretudo à facilidade de logística, visto permitir utilizar silos de menor volumetria, sistemas compactos de transporte, e trasfega pneumática. Por oposição, utilizar estilha ou outras biomassas não peletizadas, implica criar condições de cais de descarga para receber camiões com sistemas de descarga basculantes ou por piso móvel, instalar elevadores para a trasfega até ao silo, ou a construção de silos tipo bunker. A baixa densidade exige grandes volumetrias de armazenamento para atingir uma autonomia aceitável, e exige ainda sistemas mais complexos de agitação e extração da estilha e transporte até às caldeiras.

Por sua vez, os preços do pellet industrial iam rivalizando com os preços da estilha, quando devidamente comparadas as densidades energéticas, teores de humidade e percentagem de cinzas.

Deste modo a industria portuguesa foi-se tornando um consumidor de pellets com alguma expressão face à capacidade de produção instalada nas fábricas de pellet portuguesas.

Com o início da pandemia de COVID 19 o mercado de energia elétrica começou a mostrar os primeiros sinais de instabilidade, associado a outros fatores como a seca e escassez de vento nos países mediterrânicos, ocorrem as primeiras variações significativas, e que se vão agudizando até ao início da guerra na Ucrânia, em fevereiro de 2022. Gera-se então uma crise energética por toda a Europa, que teve o seu reflexo nos preços da energia elétrica, com o mercado ibérico (OMIE) a atingir valores nunca antes registados.

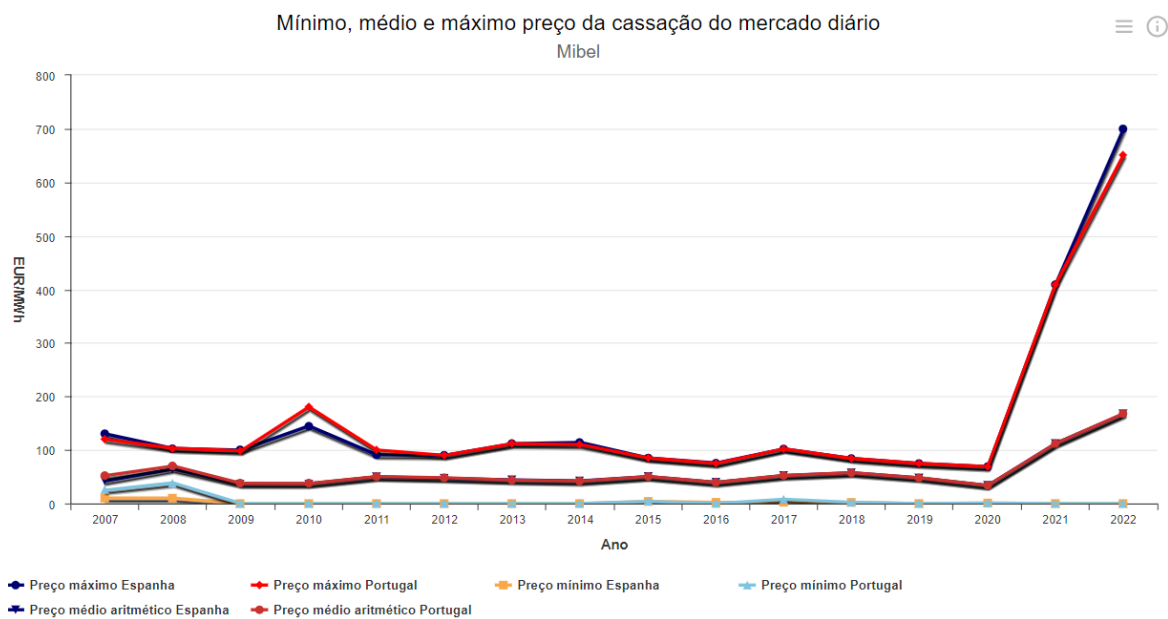


Figura 20 - Evolução dos preços no MIBEL, de 2007 a 2022 [17].

Sendo a energia elétrica um recurso fortemente utilizado na produção de pellets, desde os processos de pré-tratamento mecânico, movimentação da matéria-prima, e finalmente no processo de peletização, as fábricas de pellets da península ibérica viram os seus custos de produção a sofrer um brutal aumento, tendo sido forçadas a refletir de imediato esse aumento aos seus clientes.

Ao mesmo tempo, a União Europeia impunha embargos à importação de diversos produtos russos, desde os produtos petrolíferos, brutos e refinados, mas incluindo também madeira e derivados, onde se incluíam os pellets.

Este fenómeno de escassez e perturbação da oferta de combustíveis, sobretudo nos países do leste e centro da Europa, gerou uma pressão inflacionista no mercado dos pellets, que pela primeira vez registou variações muito significativas de preço, com máximos que ultrapassaram o dobro da média dos últimos 10 anos.

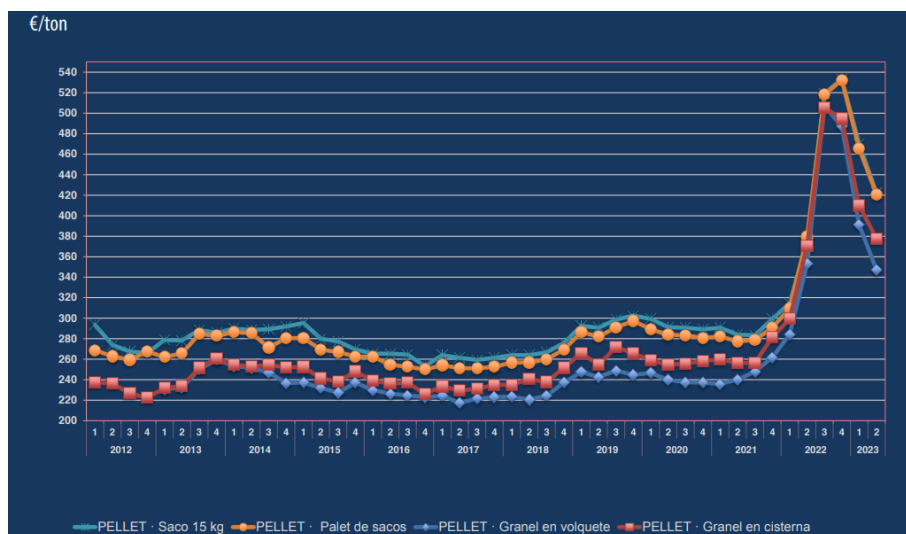


Figura 21 - Evolução das cotações de pellets, 2012 a 2023 [18].

Neste período, o mercado do gás natural também sofreu as suas convulsões, mas dependendo dos clientes, dos contratos em vigor e do patamares de consumos, houve empresas a sofrer aumentos exponenciais, ao passo que outras continuaram a pagar os valores contratualizados até ao termo do prazo do respetivo contrato.

Houve assim empresas em que a utilização do pellet se tornou inoportável, tendo optado por reativar as caldeiras a gás natural, e até mesmo de nafta.

Este novo paradigma de volatilidade de preços levou a que muitos empresários questionassem a viabilidade de continuar a utilizar biomassa como fonte de energia primária para as suas empresas, e gerou um movimento de procura por combustíveis alternativos, desde a procura por biomassas residuais, como o caroço de azeitona ou a casca de amêndoa, e sobretudo por estilha de madeira.

Ao analisar as implicações da migração do pellet para a estilha convencional disponível no mercado, muitas empresas tiveram uma desilusão, ao constatarem que os seus sistemas de queima (queimadores e/ou fornalhas), não estão preparados para poder queimar estilha de granulometrias elevadas (P60, P100), e com teores de humidade variáveis (M40, M50), além de os silos e sistemas de transporte também não serem compatíveis com estes formatos.

Surgiu assim a necessidade de avaliarmos tecnicamente a viabilidade de substituição do pellet em caldeiras industriais, não com estilhas convencionais, mas com o novo conceito de micro-estilha, um produto mais competitivo em termos de preço face ao pellet, dada a menor necessidade de input de energia no seu processamento, mas capaz de apresentar estabilidade

ao nível da densidade energética, dos teores de humidade relativa, e com uma granulometria mais aproximada à do pellet, exigindo menores alterações nas cadeias de logística e nos equipamentos de movimentação e combustão instalados nas caldeiras .

Portanto, pretende-se apurar se é possível de forma rápida e simples, compatibilizar os atuais sistemas de queima concebidos para utilização de pellets, com este produto alternativo, a micro-estilha.

1.8 Objetivos gerais

Pretende-se assim com este trabalho, e antes de mais, caracterizar a micro-estilha ao nível físico e químico, assim como as cinzas resultantes da sua combustão, de modo a permitir a sua comparação com outras biomassas combustíveis.

Num segundo momento, o trabalho irá centrar-se na testagem em contexto real de combustão em caldeiras, de modo a apurar a compatibilidade mecânica da micro-estilha com equipamentos concebidos de raiz para a utilização de pellets e com os respetivos sistemas de alimentação e leitos de gaseificação.

No final espera-se responder à questão se é ou não viável utilizar a micro-estilha como alternativa ao uso de pellets, podendo apresentar uma alternativa de menor custo para utilização em contexto industrial.



MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo aborda-se a preparação das amostras para os ensaios, descrevendo toda a manipulação do material base, assim como os equipamentos utilizados e ensaios realizados.

2.1 Amostra de micro-estilha

Como já referido anteriormente o material foi cedido pela FTC FUELS & TECHNOLOGIES CONCEPT, LDA., sediada na Zona Industrial de Campia, em Vouzela.

Este material tem como matéria-prima resíduos de exploração florestal, nomeadamente ramos e bicadas, assim como árvores de menores diâmetros, com menor valor comercial para outras aplicações. Depois de um pré-processamento mecânico, uma trituração, o material segue para lavagem, de forma a reduzir a presença de inertes e eliminar finos. Segue-se um processo de secagem num tromel rotativo, terminando num processo de crivagem, de modo a remover partículas de dimensão superior a 20 mm. O produto final obtido é assim designado como micro-estilha, e apresenta um humidade relativa a rondar os 20%, e uma densidade aparente de 245 kg/m³.



Figura 22 - Aspeto de uma subamostra de micro-estilha fornecida para a realização dos ensaios.

A amostra recebida tinha o peso de 1.470 kg e foi utilizada em todos os ensaios realizados neste trabalho. Como termo de comparação, foi também utilizada uma amostra de pellets de madeira certificados pela norma EN Plus A1, do Fabricante PT003 - José Afonso & Filhos S.A., com a dimensão de um saco de 15 kg (apresentação comercial).

2.2 Caracterização da amostra

O processo de caracterização da amostra começou com a análise da distribuição granulométrica. Foram utilizados dois crivos, um de 30 mm e outro de 3,0 mm.

Entretanto verificou-se que apesar do crivo de 30 mm selecionar a maioria das partículas com dimensão superior, algumas partículas com mais de 30 mm numa das suas dimensões X,Y, ou Z conseguiam passar no crivo. Procedeu-se assim uma inspeção visual, removendo essas partículas e verificando a sua dimensão máxima com recurso a um paquímetro modelo

Insize, da marca Vernier Caliper, 0-150 x 0,05 mm, reclassificando essas partículas e realocando-as ao intervalo correspondente.

A tabela 3 apresenta a distribuição em percentagem das diferentes frações que foram definidas.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica da amostra nas três granulometrias.

n.º	Distribuição granulométrica (g/100g)		
	Granulometria 1	Granulometria 2	Granulometria 3
1	40,0	53,0	7,0
2	32,0	61,0	7,0
3	39,0	56,0	5,0
4	41,0	55,0	4,0
5	36,0	58,0	6,0
Média	37,6	56,6	5,8
Desvio Padrão	3,6	3,0	1,3

Foi processada uma quantidade suficiente de micro-estilha para obter amostras das granulometrias 1, 2 e 3 em quantidade suficiente para a realização de ensaios de macro-TGA e assim avaliar o efeito do tamanho de partícula nos processos de desvolatilização e oxidação dos diversos componentes da micro-estilha.



Figura 23 - Aspeto das frações de granulometria 1, 2 e 3 separadas a partir da micro-estilha e utilizadas em ensaios de macro-TGA..

A amostra de micro-estilha e as subamostras com as granulometrias 1, 2 e 3 foram também caracterizadas quanto à sua densidade aparente (Tabela 4).

Tabela 4 - Densidade Aparente das amostras classificadas.

n.º	Densidade Aparente (g/dm ³)				
	Granulometria 1	Granulometria 2	Granulometria 3	Micro-estilha	Pellet EN Plus A1
1	212,0	236,0	188,0	244,0	644,0
2	228,0	248,0	176,0	252,0	632,0
3	236,0	216,0	220,0	236,0	652,0
Média	225,3	233,3	194,7	244,0	642,7
Desvio Padrão	12,2	16,2	22,7	8,0	10,1

A amostra de micro-estilha foi ainda caracterizada quanto à sua composição elementar, teores de humidade e cinzas e composição mineral das cinzas. Uma subamostra de 20 g foi triturada mecanicamente e crivada a dimensão inferior a 500 µm, antes de se proceder à determinação dos teores de humidade, cinzas e composição elementar.

Os teores de humidade e de cinzas foram determinados gravimetricamente após respetivamente secagem a 105 °C durante 12h e calcinação a 700 °C durante 2h. Os teores de humidade e de cinzas foram calculados de acordo com as equações:

$$\text{Teor de humidade da microestilha (\%)} = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 2.1}$$

Onde m_0 é a massa da caixa de Petri vazia, m_1 é a massa da caixa de Petri com amostra e m_2 é a massa da caixa de Petri após aquecimento em estufa a 105 °C durante 12h.

$$\text{Teor de Cinzas da microestilha (\%)} = \left(\frac{m_3 - m_0}{m_1 - m_0} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 2.2}$$

Onde m_0 é a massa do cadinho vazio, m_1 é a massa do cadinho com micro-estilha seca e m_3 é a massa da caixa de Petri após calcinação a 700 °C durante 2h.

A composição elementar foi determinada num analisador elementar ThermoFinnigan – CE Instruments, série FlashEA 1112, utilizando as amostras previamente secas.

Tabela 5 - Teores de humidade e de cinzas, e composição elementar da amostra de micro-estilha.

Composição Elementar (% bs)					Teor de Cinzas (%bs)	Teor de Humidade (%bh)
C	H	N	S	O		
5,04 ± 0,14	43,93 ± 0,27	0,36 ± 0,01	-	49,49 ± 0,40	1,18 ± 0,19	9,4 ± 0,1

2.3 Ensaio de Macro TGA

A experiência foi realizada no Laboratório de Fluidos e Calor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Um reator de Macro TGA construído especificamente foi projetado para realizar os testes. O forno (200 mm de diâmetro e 350 mm de altura) foi aquecido até 700°C usando uma resistência elétrica de 2 kW. Num segundo momento o forno foi aquecido até aos 900°C. Para minimizar as perdas de calor, a resistência foi envolvida por material refratário juntamente com lã de rocha. O controlador de temperatura Nanodec Eurotherm foi ligado a dois termopares tipo K que foram usados para controlar a temperatura do reator.

Dentro do reator existe um cesto em aço inoxidável perfurado lateralmente onde são depositadas as amostras. O cesto tem 62 mm de diâmetro e 55 mm de altura. A este cesto foi adicionada uma rede metálica com malha quadrada de 0,6 x 0,6 mm, de modo a permitir a circulação de ar quente por toda a base da amostra. O cesto está conectado por um cabo de aço inoxidável de 3 mm a uma balança Shinko Denshi AJ-620CE para medir continuamente a massa da amostra durante o teste. Esta balança tem um erro de 0,01 g e um desvio de 0,001 g. De modo a permitir posicionar o cesto dentro do reator, foi rasgada uma ranhura de 10 mm na tampa giratória do reator. Um controlador de fluxo TSI G4043 foi usado para controlar o fluxo de ar injetado no reator. Este controlador foi capaz de medir numa faixa entre 0 e 200 L/min com 2% precisão e resolução de 0,01 L/min.

Tanto a balança como o medidor de fluxo foram ligados a um computador portátil com o software LabView para aquisição de dados. A temperatura pode ser ajustada no controlador Nanodec. Cada ensaio teve a duração de 20 minutos.

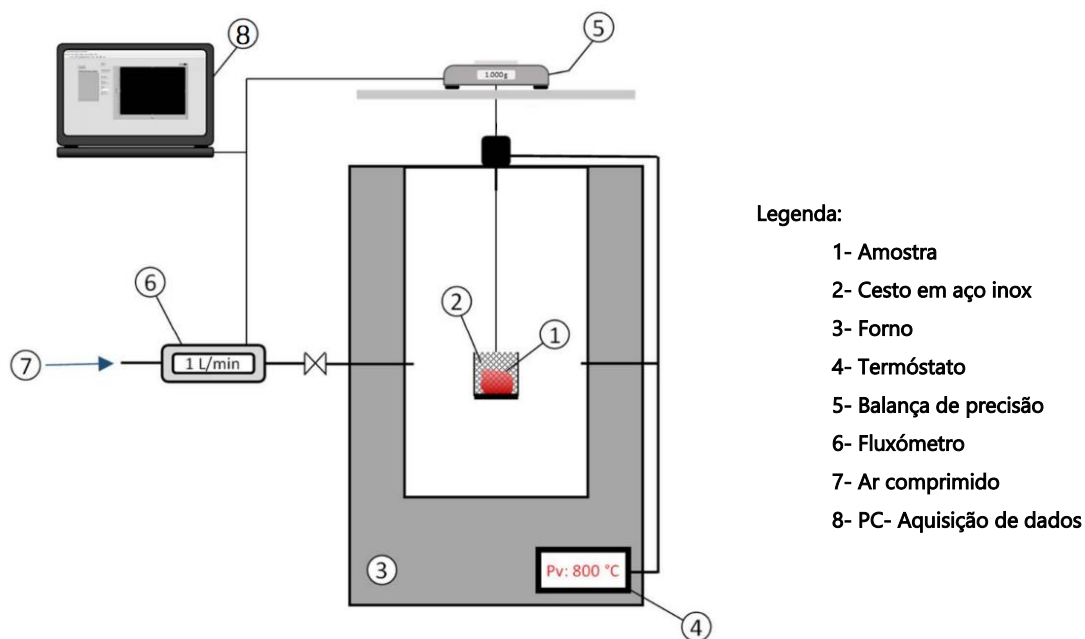


Figura 24 - Layout do sistema de análise Macro-TGA.

Passou-se então à preparação de cinco lotes de amostras com as características apresentadas na Tabela 6 para a realização dos ensaios de macro-TGA. Cada amostra tinha 10,0 g e foi pesada numa balança de precisão.

Tabela 6 - Caracterização das amostras a submeter a Macro-TGA.

Amostras para Macro TGA			
n.º	Designação	Intervalo	Peso
1	Micro-estilha original	0,0 mm > x < 75 mm	10 g
2	Granulometria 1	x < 3,0 mm	10 g
3	Granulometria 2	3,0 mm > x < 30,0 mm	10 g
4	Granulometria 3	30,0 mm < x	10 g
5	Pellets	6,0 mm	10 g

Foi registada a perda de peso da amostra ao longo do ensaio como resultado da sua desvolatilização e oxidação. O resíduo que restou no recipiente da amostra após o ensaio foi recolhido e analisado quanto ao seu teor de carbono residual e teor de cinzas por calcinação a 700 °C durante 2h. O teor de cinzas e o teor de carbono residual foram calculados de acordo com as fórmulas:

$$\text{Teor de Cinzas no resíduo (\%)} = \left(\frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \right) \times 100 \quad \text{Eq 2.3}$$

$$\text{Teor de Carbono no resíduo (\%)} = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 - m_0} \right) \times 100 \quad \text{Eq 2.4}$$

Onde m_0 é a massa do cadinho vazio, m_1 é a massa do cadinho com resíduo e m_2 é a massa do cadinho com cinzas após a calcinação.

A composição das cinzas foi também determinada por Espectroscopia de Emissão Atômica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-AES). A análise foi realizada num equipamento Horiba Jobin Yvon ULTIMA, utilizando o Software Horiba Jobin Yvon ICP Analyst 5.4. Um monocromador com espectrômetro Czerny Turner foi usado. O gás de arraste utilizado foi argon. A amostra de cinzas (cerca de 100 mg) foi dissolvida em 10 mL de ácido nítrico (50%) numa cápsula cerâmica que foi aquecida a 90 °C durante 15 min em banho de água. A solução foi filtrada por papel de filtro e aferida a 100 mL em balão volumétrico antes de proceder à análise por ICP-AES.

2.4 Caldeira laboratorial

Para obter uma caracterização das emissões gasosas resultantes da combustão, optou-se por fazer um ensaio de queima na caldeira laboratorial existente no laboratório de Fluidos e Calor do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade do Minho. Esta caldeira está equipada com diversos sensores termopares, permitindo monitorizar as temperaturas em diversos pontos da câmara de combustão e dos fluidos. Está ainda interligada a uma complexa rede de analisadores de gases, que permite que se determinem parâmetros tais como: CO; CO₂; NOx; Excesso de Ar.



Figura 255 - Aspetto da caldeira laboratorial e sistemas analíticos utilizados nos ensaios de combustão da micro-estilha..

Foi realizada uma primeira tentativa na caldeira, mas o ensaio foi abortado quando se constatou que o débito de alimentação do sem-fim era demasiado reduzido para manter as condições normais de combustão no queimador. O braseiro era consumido rapidamente, sem que o volume de micro-estilha que chegava ao queimador fosse suficiente para haver um ritmo constante de gaseificação. Procedeu-se então à substituição do sem-fim de alimentação à caldeira, instalando um modelo com um débito superior, de modo a ultrapassar este constrangimento.

Procedeu-se ao arranque da caldeira, com o apoio à ignição através de uma resistência cerâmica de 400 W, e após calibração dos tempos de funcionamento do alimentador (T On vs T Off) e de estabilização das temperaturas no corpo da caldeira, considerou-se estarem reunidas condições para dar início ao ensaio.

O ensaio decorreu ao longo de 20 minutos, e foi consumido um total de 1,5 kg de amostra de micro-estilha retirada aleatoriamente da amostra inicial.

Durante o ensaio foi necessário manter uma atenção permanente ao circuito de alimentação da micro-estilha, para garantir por um lado a entrada de combustível na zona de extração do sem-fim, e por outro lado que não ocorria encravamento na descarga por gravidade até à câmara de combustão da caldeira.

2.5 Caldeira industrial

Os derradeiros testes de compatibilidade foram realizados numa caldeira industrial, um gerador de vapor LG 150, do fabricante português Luís Gonçalves e Irmão, capaz de produzir até 2.800 kg/h de vapor a 8 bar, e que está equipada com um queimador de biomassa Y-2000 LA, fabricado pela Natural Fire S.L., com a capacidade máxima para debitar 2.500 kW, e habitualmente utilizado com pellets de madeira EN Plus A1.

Dado o avultado investimento realizado recentemente na caldeira, entendeu-se que uma eventual alternativa viável de utilização de uma fonte de biomassa largamente disponível e com preço estável e vantajoso, seria a utilização de micro-estilha, com reduzido teor de humidade, de modo a obter uma velocidade de perda de massa similar à do pellet, de modo a que a área de leito de gaseificação disponível no queimador de chama horizontal permitisse atingir um nível de potência minimamente satisfatório, sem desequilíbrios de estequiometria provocados por acumulação de combustível na câmara de combustão do queimador.

Os testes de alimentação foram realizados utilizando um lote de micro-estilha a granel com 1 tonelada (peso aproximado), igualmente fornecido pela empresa FTC Fuels & Technologies Concept, Lda., embalado em bigbags.

O comportamento da micro-estilha durante estes testes e as alterações propostas são apresentadas na secção de resultados desta dissertação.



Figura 26 - Caldeira industrial da central térmica da Milega Lda.

RESULTADOS

3.1 Caracterização da amostra de micro-estilha

Com os resultados obtidos de caracterização da micro-estilha, considerou-se pertinente proceder a uma comparação desta amostra com outros combustíveis similares e já conhecidos de outros trabalhos, elaborando um diagrama de Van Krevelen, que nos permite uma visão muito interessante do posicionamento desta amostra relativamente aos outros combustíveis.

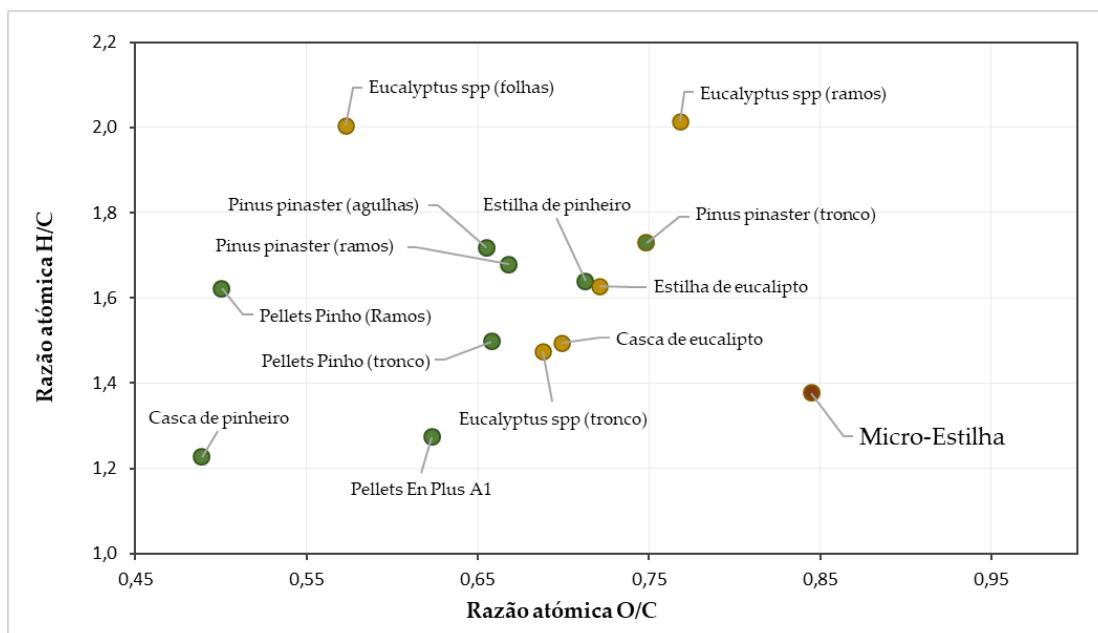


Figura 277 - Comparativo da composição elementar entre a micro-estilha e outros combustíveis [19].

A realçar dois aspetos, em termos de razão H/C o valor apresentado está perfeitamente alinhado com combustíveis similares, produzidos a partir de troncos de madeira. Já na relação O/C o valor está cerca de 20% acima do que seria espectável, considerando que as matérias

primas utilizadas para a produção desta micro-estilha são essencialmente troncos e ramos de eucalipto. Não se encontra assim uma explicação coerente para este desvio.

3.2 Macro TGA

A perda de massa das diferentes sub-amostras consideradas nos ensaios de macro-TGA (Pellets EN Plus A1, micro-estilha original, Granulometria 1 ($d < 3$ mm), Granulometria 2 (3 mm $< d < 30$ mm) e Granulometria 3 ($d > 30$ mm) foi avaliada e representada graficamente para as temperaturas de 700 °C e 900 °C (Figuras 24 e 25)..

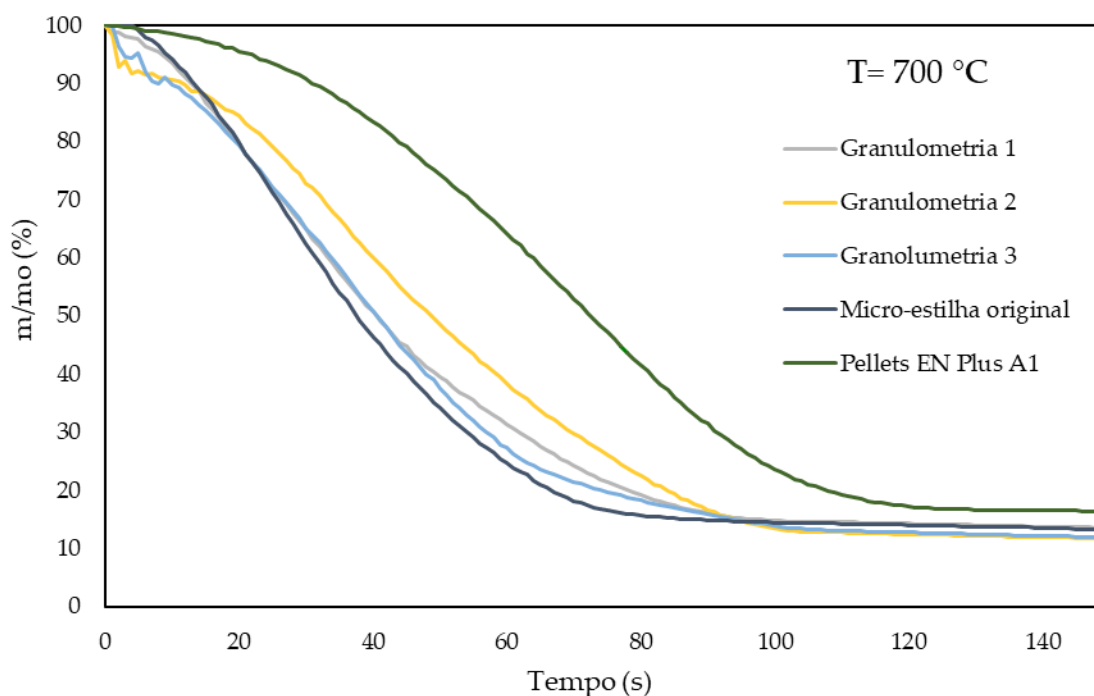


Figura 28 - Evolução da perda de massa a 700°C.

Neste primeiro grupo de ensaios, com o forno pré-aquecido a 700°C, verificou-se que o pellet é claramente o combustível que apresenta menor velocidade de gaseificação, tanto no início do processo, como ao longo de todo o período de análise, mantendo mesmo no final ainda um índice de massa bastante superior ao verificado em qualquer uma das outras amostras. Só aos 180 segundos se atingem os 85% de perda de massa, e a partir daí o processo torna-se muito lento, demorando 17 minutos a perder mais 12% de massa, que correspondem já ao carbono fixo. Denota-se ao retirar a amostra do forno, que o resíduo ainda apresenta

traços de carvão e uma forma cilíndrica, correspondente ao formato inicial da partícula peletizada.

Por oposição, é a amostra original de micro-estilha, com a três frações de diferentes granulometrias, a que apresenta a maior velocidade de perda de massa. Na análise das 3 granulometrias que foram submetidas a ensaio individualizado, as diferenças não são muito expressivas, mas ainda assim são assinaláveis. Aos 78 segundos esta amostra já tinha atingido o mesmo índice de perda de massa do que a amostra de pellet em 180 segundos, o que configura uma taxa média de gaseificação mais de duas vezes superior à verificada com o pellet.

A granulometria maior (Granulometria 3) é a que apresenta uma perda de massa mais rápida e consistente ao longo do tempo. Uma das justificações possíveis é o facto de o tamanho destas partículas ser apenas caracterizado por um comprimento muito superior às outras duas dimensões, ou seja, partículas muito longas, mas delgadas, com pouca espessura, apresentando grande superfície de exposição à temperatura ambiente por unidade de massa. O facto de serem partículas maiores, e neste ensaio não haver partículas mais pequenas misturadas, faz com que haja muito espaço entre as partículas, o que favorece a exposição das partículas ao calor e oxigénio.

A granulometria mais fina (Granulometria 1) apresenta um comportamento muito semelhante e aproximado, com as curvas sobrepostas em boa parte do tempo (entre os 20 e os 45 segundos), atrasando-se depois ligeiramente e voltando a convergir aos 90 segundos, ocorrendo aí uma inversão de posições. Neste caso as partículas da amostra apresentavam bastante compactação na sua distribuição no cesto, o que poderá ter influenciado a sua exposição ao oxigénio e a transferência de calor.

A granulometria intermédia (Granulometria 2) apresenta um comportamento mais lento do que todas as outras amostras de micro-estilha, embora com três particularidades: i) num primeiro momento acompanha a Granulometria 3 ($d > 30 \text{ mm}$), com um início de gaseificação rápido; ii) depois o processo abranda mas mantém uma velocidade constante por um período mais longo; iii) ao final de 90 segundos apresenta a mesma perda de massa que as outras frações ou a mistura original. Ou seja, apesar de percursos diferentes, as linhas encontram-se neste ponto t , que representa os 85% de perda de massa, ao passo que neste mesmo ponto t a amostra de pellet ainda não atinge os 70% de perda de massa.

De registar que ocorre uma sinergia entre granulometrias de micro-estilha, pelo que a reação de oxidação é claramente favorecida quando ocorre a mistura das granulometrias, em que as vantagens de cada uma se somam, levando a que esta seja a amostra que apresenta melhores índices de eficiência de oxidação, atingindo a maior velocidade de perda de massa.

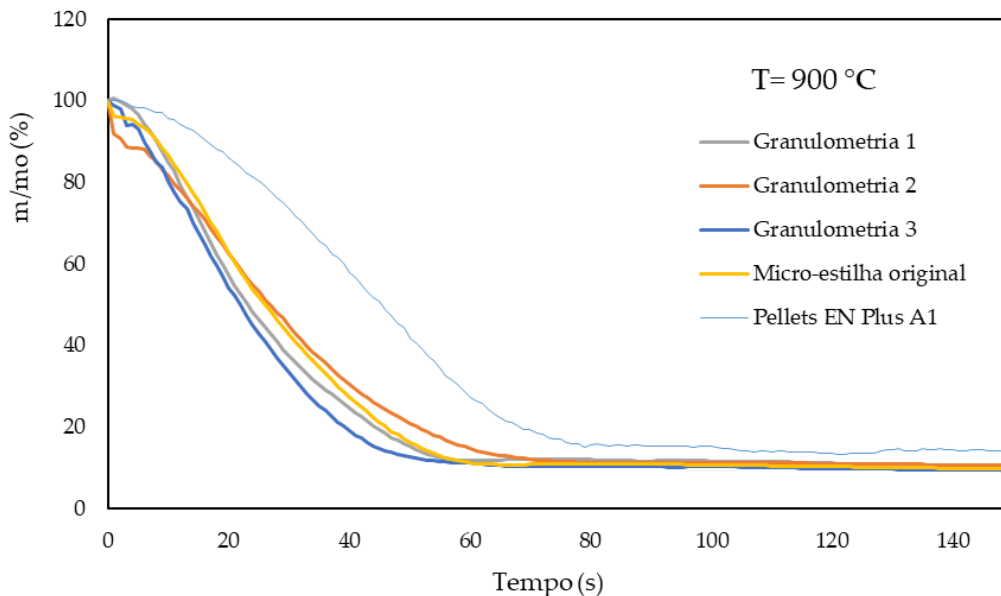


Figura 29 - Evolução da perda de massa a 900°C.

Os resultados apurados neste segundo ensaio a 900°C estão perfeitamente alinhados com os registados a 700°C, apenas com uma diferença significativa, tudo ocorreu mais rapidamente. Todas as amostras revelaram um comportamento muito semelhante e consistente com o que havia sucedido no ensaio anterior a 700°C.

As diferenças refletem uma maior velocidade de transferência de calor entre o meio e as amostras, desencadeando um processo mais rápido de gaseificação, registando-se apenas algumas diferenças nas curvas de perda de massa entre as diversas granulometrias de micro-estilha, mas mantendo-se no essencial a mesma diferença entre estas e a curva dos pellets.

O aumento médio de velocidade de gaseificação ronda o dobro do verificado no ensaio anterior. Se nos testes a 700°C só aos 90 segundos se atingia uma perda de massa de 85%, nestes ensaios esse valor foi atingido por volta dos 50 segundos.

Uma grande diferença a registar é que neste mesmo momento t, a diferença de perda de massa registada no ensaio com pellets era de apenas 55% contra os 85% das micro-estilhas, o que representa uma diferença muito superior ao que foi apurado nos ensaios a 700°C, em que a diferença aos 90 segundos rondava apenas os 15% de atraso na reação com os pellets.

Podemos assim que a temperatura a que ocorre a reação afeta significativamente a velocidade a que ocorre a perda de massa, a gaseificação e combustão da biomassa, acentuando-se essa à medida que a temperatura aumenta.

O facto de não terem sido realizados ensaios a outras temperaturas impede que se infira se este resultado é diretamente proporcional, ou seja, que quanto mais aumentamos a temperatura da fornalha, mais rapidamente ocorrem as reações nas diferentes biomassas, mas que essa aceleração é ainda mais evidente nas micro-estilhas do que nos pellets.

Podemos assim constatar que a temperatura a que ocorre a reação afeta significativamente a velocidade a que ocorre a perda de massa, a gaseificação e combustão da biomassa, acentuando-se essa à medida que a temperatura aumenta. Este comportamento é expectável pois a velocidade da transferência de calor para as partículas de combustível deverá ser proporcional ao gradiente entre a temperatura ambiente e a temperatura do forno.

3.3 Análise DTG aos resultados obtidos no Macro-TGA

Calculando a derivada das curvas de perda de massa é possível determinar a velocidade de perda de massa ao longo dos ensaios realizados.

Numa primeira fase foram realizados ensaios utilizando o equipamento de macro-TGA no seu formato original e os resultados da velocidade de perda de massa apresentam-se na Figura seguinte:

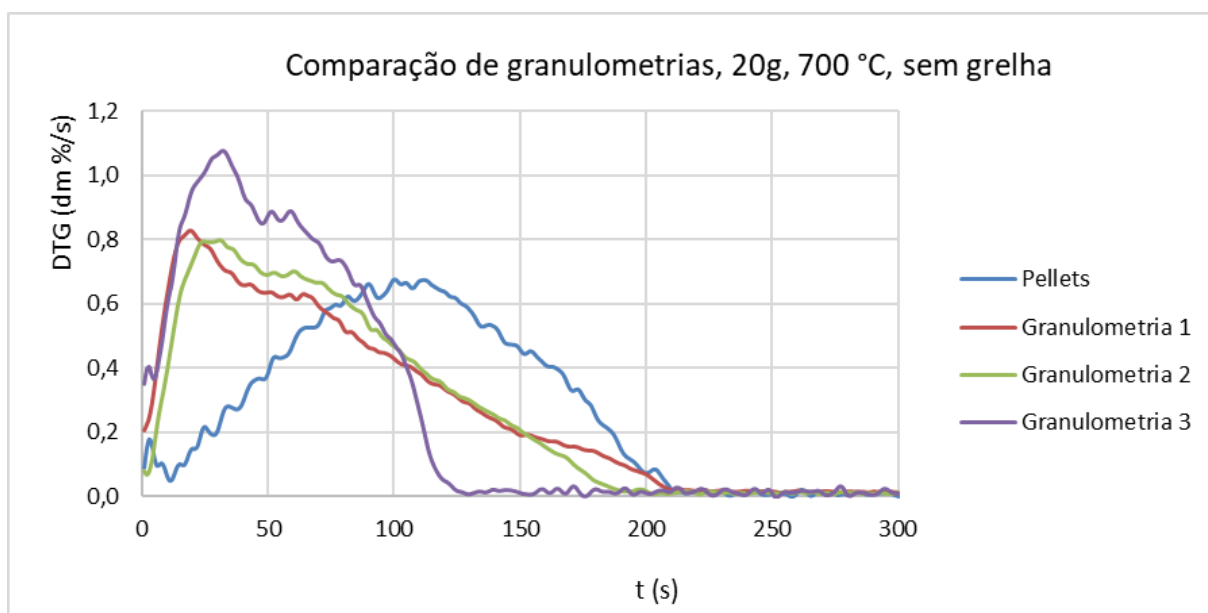


Figura 30 - Comparação da velocidade de perda de massa a 700°C dos pellets de referência e das diferentes granulometrias da micro-estilha, utilizando a configuração original do macro-TGA.

Os resultados obtidos evidenciam uma diferença de comportamento fundamental entre os pellets de madeira e as várias frações da micro-estilha:

- a velocidade de desvolatilização foi superior para todas as granulometrias da micro-estilha quando comparada com a velocidade de desvolatilização dos pellets.

- o tempo necessário para ocorrer 85% de perda de massa foi superior para os pellets de biomassa (465 s) seguido da granulometria 1 (374 s), granulometria 2 (280 s) e em último lugar a granulometria 3 (115 s).

- a granulometria 3 distinguiu-se das restantes granulometrias e dos pellets por apresentar a maior velocidade de perda de massa (1,08 dm%/s).

- a velocidade inicial de desvolatilização (durante os primeiros 10 a 20 segundos) é bastante superior para as frações da micro-estilha do que para os pellets, indicando que o processo envolve comportamentos diversos em termos de transferência de calor e de exposição ao agente oxidante.

No entanto nesta sequência de ensaios observou-se uma retenção significativa de carbono no resíduo que restou no reator após o ensaio de macro-TGA, o que no caso da amostra de pellets resultou num resíduo com 86% de carbono residual, que correspondeu a 5,7% m/m da massa inicial de amostra. Este comportamento foi associado à pouca exposição da parte inferior da amostra ao agente oxidante, durante o ensaio como resultado da massa total utilizada e pelo facto da parte inferior do cesto onde a amostra é colocada no reator não ser perfurada pelo que a amostra que está colocada nessa zona não está exposta de forma muito direta à atmosfera oxidante. Assim procurou-se garantir uma melhor exposição das amostras ao agente oxidante adaptando uma grelha metálica ao cesto de colocação da amostra, com o objetivo de permitir a circulação de ar na zona inferior do cesto e desta forma tornar mais homogénea a exposição das diferentes partes da amostra ao agente oxidante. A amostra passou a ser colocada sobre essa grelha de forma a não estar em contacto direto com o fundo metálico do cesto.

Esta nova configuração foi testada com a amostra de pellets de biomassa que tinha apresentado a maior retenção de carbono residual.

Por outro lado, avaliou-se a possibilidade de utilizar uma menor massa de amostra (10g) para que a exposição das diferentes zonas da amostra ao agente oxidante fosse mais homogénea. Os resultados da velocidade de perda de massa da amostra de pellets de referência nestas três condições de ensaios apresenta-se na Figura 30

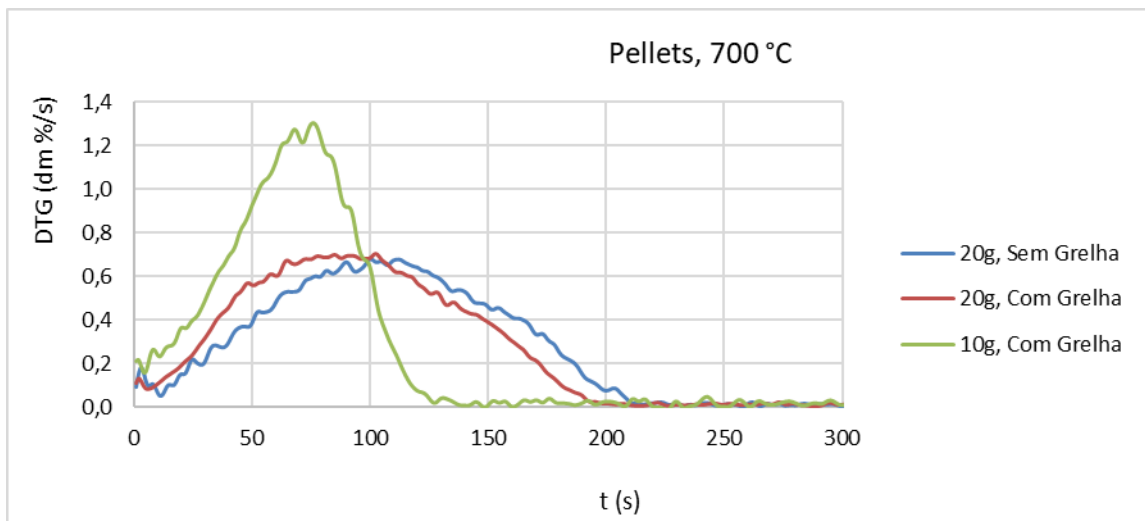


Figura 31 - Comparação da velocidade de perda de massa a 700°C dos pellets de referência variando a colocação da amostra no reator e a massa da amostra.

Na condição de 20g de amostra, a 700 °C, com a colocação da amostra na grelha de suporte, observou-se uma oxidação mais completa tendo sido obtido um resíduo com apenas 1,3 % de carbono residual o que corresponde a 3,2 % da massa inicial de amostra. Por outro lado, a redução da massa inicial de 20g para 10 g levou a uma redução do tempo necessário para a oxidação de 85% da amostra que passou de 392 s para 135 s, o que sugere menores limitações à transferência de calor e de massa. Assim esta condição de ensaio com a colocação da amostra na grelha e uma massa de 10g, foi adotada nos ensaios seguintes.

Os perfis de velocidade de perda de massa para os pellets de biomassa e as diferentes granulometrias da micro-estilha apresentam-se na Figura 32:

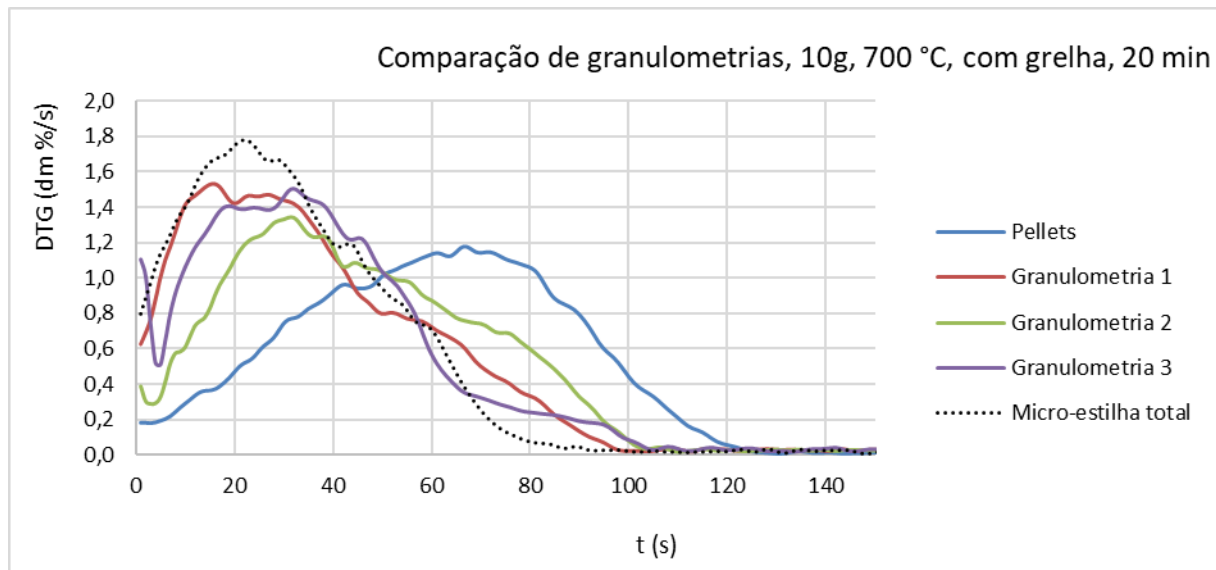


Figura 32 - Comparação da velocidade de perda de massa a 700°C dos pellets de referência e as diferentes granulometrias da micro-estilha.

Utilizando uma massa de 10g, observou-se que a desvolatilização e oxidação foram mais rápidas, mas mantiveram-se as diferenças observadas entre o comportamento dos pellets e das várias frações da micro-estilha, com uma taxa mais elevada de desvolatilização e oxidação para este último biocombustível. Nas condições testadas, as granulometrias 1 e 3 (menor e maior, respetivamente) apresentaram velocidades máximas de perda de massa superiores à verificada para a granulometria intermédia (granulometria 2). Este comportamento parece indicar que não só a granulometria, mas também o formato das partículas pode influenciar o seu comportamento termoquímico na medida em que afeta a sua compactação e as suas várias dimensões, afetando indiretamente a transferência de calor e a exposição ao oxigénio. As partículas de granulometria 3 apresentam um formato alongado que corresponde a um diâmetro elevado numa das dimensões (comprimento) mas frequentemente apresentaram dimensões muito inferiores quer na largura, quer na espessura o que se traduz numa área superficial elevada. As partículas de granulometria 1 ($d < 3$ mm) correspondem à fração de menores dimensões com formato predominantemente esférico e uma área superficial também elevada enquanto a granulometria 2 ($3 \text{ mm} < d < 30 \text{ mm}$) é a fração mais heterogénea composta por partículas de formatos variados, mas com uma menor área superficial pelo que mais sujeita a limitações cinéticas no processo de desvolatilização e oxidação.

A decomposição da micro-estilha integral pareceu apresentar um efeito sinérgico pois atingiu a maior velocidade de perda de massa ultrapassando as velocidades atingidas pelas granulometrias individuais.

Quando a decomposição termoquímica das amostras foi avaliada a 900 °C obtiveram-se as curvas de velocidade de perda de massa apresentadas na figura 33.

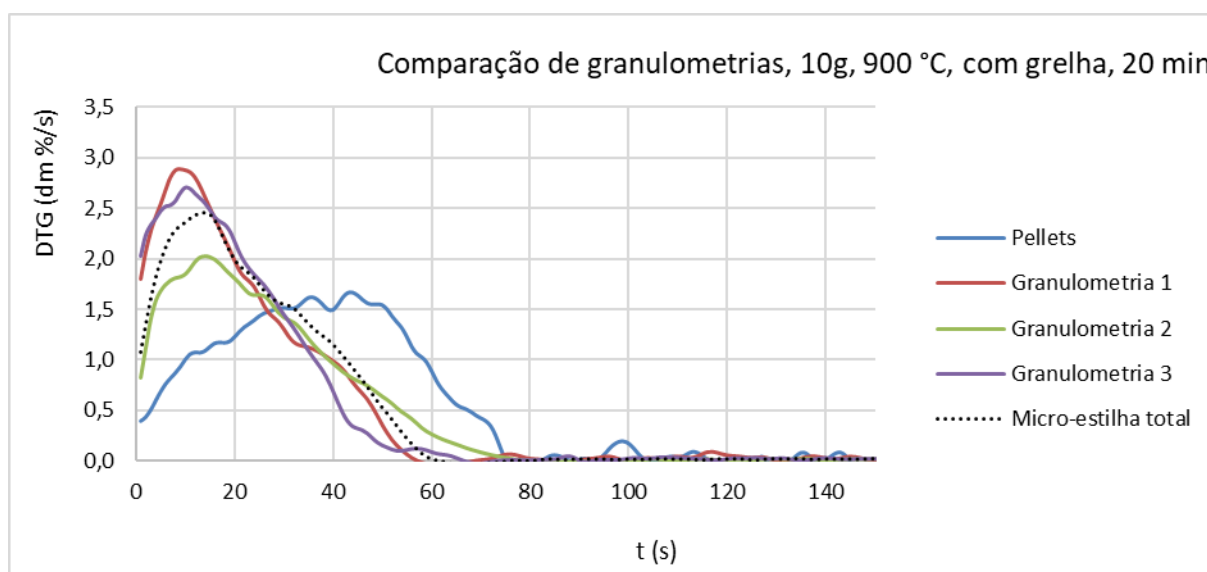


Figura 33 - Comparação da velocidade de perda de massa a 900°C dos pellets de referência e as diferentes granulometrias de micro-estilha.

Como seria de esperar a utilização de uma maior temperatura acelerou o processo de desvolatilização e oxidação para todas as amostras avaliadas. Também a esta temperatura se observou uma maior velocidade de perda de massa para a micro-estilha e suas frações relativamente aos pellets e também a esta temperatura é a fração de granulometria 2 que se decompõe mais lentamente quando comparada com as restantes granulometrias e com a micro-estilha integral.

A partir das curvas de TG e DTG é possível caracterizar as etapas de desvolatilização e de oxidação observadas para as diferentes amostras a 700 °C e 900 °C e determinar a velocidade máxima de perda de massa bem como o tempo necessário para completar cada uma destas etapas e a % de perda de massa associada. Os resultados apresentam-se na tabela seguinte, e podem conduzir a várias comparações interessantes:

Tabela 7 - Taxa de desvolatilização e Carbono residual em T e % massa.

Temperatura (°C)	Amostra	DESVOLATILIZAÇÃO			OXIDAÇÃO	
		Tempo (s)	Massa (%)	Taxa máxima (mg/s)	Tempo (s)	Massa (%)
700	Pellets	61	63,06	1,21	129	16,68
	Micro-estilha original	25	71,21	1,80	96	14,59
	Granulometria 1	19	81,05	1,56	110	14,55
	Granulometria 2	35	66,69	1,39	115	12,55
	Granulometria 3	35	58,41	1,55	115	12,86
900	Pellets	46	48,89	1,69	78	15,72
	Micro-estilha original	18	67,87	2,48	65	10,75
	Granulometria 1	11	82,80	2,95	60	11,75
	Granulometria 2	16	70,96	2,04	80	11,22
	Granulometria 3	13	73,44	2,81	68	10,30

- a) O pellet de madeira apresenta a menor das taxas máximas de gaseificação, e essa taxa é atingida num tempo mais tardio do que o que se verifica com todas as outras amostras;
- b) De igual forma, é a amostra que apresenta maior massa de carbono residual, atingida num tempo mais longo do que as restantes amostras;
- c) A Granulometria 2 é a que apresenta resultados mais parecidos com o pellets, embora com um taxa máxima mais elevada, e com menor tempo para atingir o carbono residual;
- d) A micro-estilha original apresenta um comportamento ligeiramente diferente entre os dois ensaios, sendo que a 700 °C apresentou a maior taxa máxima, enquanto no ensaio a 900 °C já registou um valor inferior às Granulometrias 1 e 3;
- e) A temperatura do ensaio influencia diretamente na taxa máxima de gaseificação atingida e na massa de carbono residual, transversalmente a todas as amostras;

Os resíduos resultantes dos ensaios de combustão em Macro-TGA continham ainda carbono residual, pelo que foram submetidos a um processo de calcinação a 550°C, durante 2 horas. Os teores de resíduos antes e após a calcinação a 550°C bem como o teor de carbono presente nesses resíduos foram avaliados e os resultados apresentam-se na Tabela 8.

Tabela 8 - Resíduos da combustão das amostras avaliadas em macro TGA, a 700 °C e a 900 °C, com uma massa inicial de 10g e um tempo de residência de 20 min, bem como o respetivo teor de carbono oxidável .

Amostra	Difusão do ar	Temperatura (°C)	Teor de Resíduo (% m/m)	Teor de Cinzas após calcinação a 700 °C (% m/m)	Carbono oxidável no resíduo (% m/m)
Pellets de pinho	Sem grelha	700 °C	5,7	0,8	86,2
Pellets de pinho	Com grelha		3,2	3,1	1,3
Estilha, Granulometria 1			0,8	0,7	17,7
Estilha, Granulometria 2			0,7	0,6	16,4
Estilha, Granulometria 3			0,7	0,6	22,1
Estilha total (Mix)			0,8	0,7	19,3
Pellets de pinho	Sem grelha	900 °C	2,9	1,9	36,6
Pellets de pinho	Com grelha		1,4	1,3	7,8
Estilha, Granulometria 1			2,0	1,9	3,6
Estilha, Granulometria 2			1,8	2,0	3,5
Estilha, Granulometria 3			1,6	1,5	5,5
Estilha total (Mix)			2,3	2,3	1,7

Os resultados evidenciam o efeito positivo da introdução da grelha na eficiência de oxidação da amostra traduzida numa menor quantidade de resíduo carbonoso obtido na combustão dos pellets de pinho, a 700°C e 900 °C (3,2% e 1,4%, respetivamente) em comparação com os valores obtidos sem grelha (5,7% e 2,9%, respetivamente).

Relativamente à micro-estilha e suas frações, obteve-se uma menor quantidade relativa de resíduo a 700 °C do que a 900 °C mas com uma maior fração de carbono oxidável. O resíduo obtido a 900 °C foi ligeiramente superior ao obtido a 700 °C mas com uma maior componente inorgânica, ou seja a oxidação da amostra foi mais completa. As frações com diferentes granulometrias e a micro-estilha integral apresentaram resultados comparáveis de teor de resíduo e de carbono oxidável no resíduo, a qualquer das temperaturas, apesar das diferenças observadas nas taxas de perda de massa.

Estes resultados indicam que a micro-estilha integral apresenta um comportamento termoquímico comparável com as suas diferentes frações granulométricas pelo que no que se refere ao seu comportamento termoquímico não se justifica um maior fracionamento por diâmetro de partícula.

Por outro lado, os resultados indicam que a cinética de desvolatilização e oxidação deste biocombustível é mais rápida do que a de pellets de referência pelo que se deverá adaptar o fluxo de alimentação e o fluxo de ar admitido na caldeira de forma a garantir uma combustão completa e regular.

Para encerrar a caracterização da amostra, procedeu-se à análise da composição das cinzas, obtidas a 900 °C nos ensaios de macro-TGA, com as diferentes amostras.

Os resultados obtidos estão expressos na tabela seguinte.

Tabela 9 - Composição das cinzas obtidas nos ensaios de macro-TGA a 900°C, com uma massa inicial de 10g e um tempo de residência de 20 min.

Amostra	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SiO ₂	SEI
Pellets sem grelha	7,6	29,8	29,7	22,6	12,4	88,6	7,2	7.35	2,38
Pellets com grelha	6,4	20,9	11,4	19,1	10,0	78,8	5,9	5.92	1.66
Granulometria 1, com grelha	11,0	31,5	9,5	22,3	9,7	67,1	9,1	12.13	1,52
Granulometria 2, com grelha	8,0	20,6	16,2	19,3	10,0	85,8	9,5	8.50	1,71
Granulometria 3, com grelha	6,9	26,5	13,0	13,8	9,6	85,8	8,5	6.47	2,36
Micro-estilha com grelha	9,5	24,5	13,6	22,9	10,5	70,7	9,9	9.02	1,50

Os resultados obtidos na avaliação da tendência para aglomeração das cinzas através do da razão entre componentes básicos e ácidos (B/A), apresentaram valores entre 1,5 a 2,4, que correspondem a tendência alta ou muito alta para agregação das cinzas. No entanto, estes resultados poderão estar afetados de contaminação das cinzas pois os teores de diferentes óxidos como o N₂O ou o F₂O₃ apresentam valores muito distintos dos expectáveis para pellets de referência ou mesmo diversas biomassas [20]. Assim considera-se que este aspeto do comportamento da micro-estilha deverá ser avaliado em ensaios adicionais em condições adequadas.

3.4 Caldeira laboratorial

A combustão da micro-estilha foi avaliada na sua forma original e integral em caldeira laboratorial, de modo a observar o comportamento do combustível em termos de acumulação no queimador, e analisar os principais gases produzidos. Os resultados obtidos foram os seguintes:

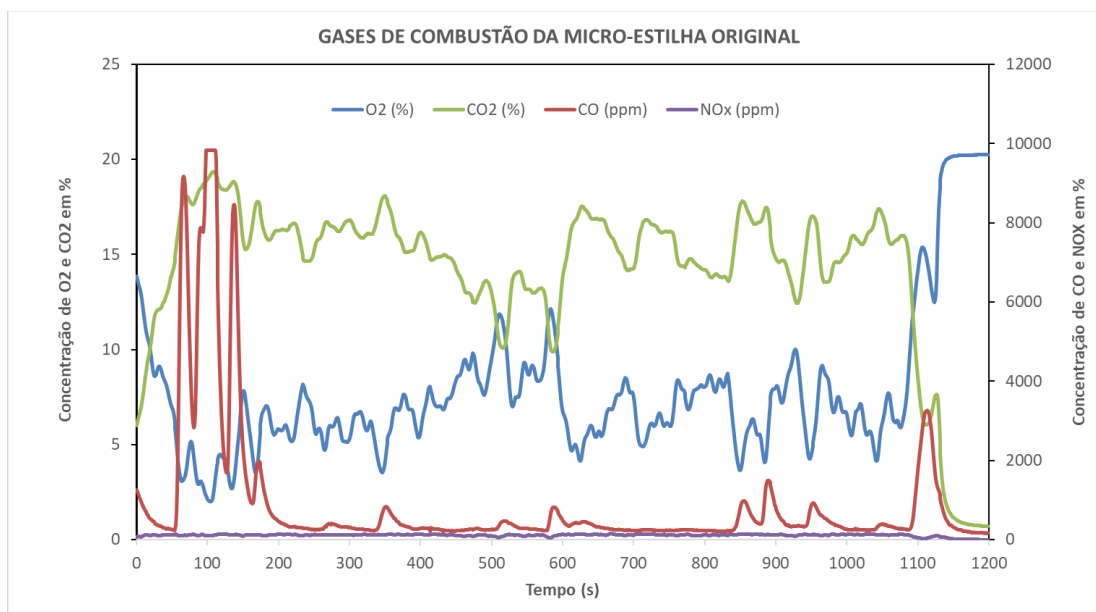


Figura 34 - Gráfico do ensaio na caldeira laboratorial.

Observa-se uma relação de evolução inversamente proporcional entre os valores de O₂ e CO₂. Num período inicial registou-se alguma oscilação, mais evidente nos valores do CO, mas a partir dos 200 segundos a combustão entrou numa fase de estabilidade, com os valores

de CO a reduzirem-se para 250 a 500 ppm, em linha portanto com os limiares máximos definidos no Anexo 1 da Portaria 677/2009 de 23 de Junho [21] , enquanto o NOx estabilizou em valores entre 100 a 130 ppm.

Entre os 500 a 600 segundos ocorreu uma ligeira turbulência na câmara de combustão a que correspondeu um ligeiro pico de O₂ e um conseqüente quebra de CO₂, no entanto os parâmetros de CO e NOx não registaram variação relevante.

O pico final de O₂ corresponde já à fase de extinção da combustão por interrupção da alimentação de micro-estilha.

Verifica-se assim que o ensaio não revela nenhum problema relevante ao nível dos efluentes gasosos resultantes da queima da amostra de micro-estilha que estava a ser analisada e que, portanto, é possível utilizar este biocombustível em condições de combustão completa. Este resultado é relevante na medida em que indica que este biocombustível poderá ser utilizado sem impactos negativos relevantes no que se refere a emissões de partículas e gases hidrocarboneto, pois apesar de não terem sido diretamente determinados, estes poluentes só ocorrem de forma significativa em condições de combustão incompleta, nas quais se observam também concentrações elevadas de CO.

3.5 Caldeira industrial

Os ensaios de combustão em caldeira industrial permitiram avaliar o comportamento real deste biocombustível tanto a nível mecânico como termoquímico.

A primeira dificuldade surgiu na descarga do bigbag. Ao contrário do que sucede na descarga de pellets, ao abirmos o tubo de descarga inferior do bigbag, a micro-estilha não flui de forma contínua. As tensões laterais e verticais provocadas pelas paredes do saco e a compactação gerada pela vibração e outros movimentos no processo de logística dos bigbags, provocou um arranjo das partículas ao ponto de se ter atingido um equilíbrio, no qual o material parou de fluir, sendo necessário agitar manualmente a zona de descarga com bastante frequência, de modo a conseguir provocar a queda do material para a tremonha que está por baixo do bigbag.

A segunda dificuldade, tem a mesma origem, mas está relacionada com o facto de o produto não fluir como o pellet na direção do ponto de extração onde a espiral do sem-fim está a iniciar o transporte das lascas de madeira. Forma-se uma abóbada na zona

imediatamente por cima da espiral do sem-fim, obrigando mais uma vez a uma atenção e intervenção manual permanentes, de modo a garantir um fluxo contínuo de material na zona de carga do sem-fim (Figura 35).



Figura 35 - Silo porta-bigbag (à esquerda) e ponto de extração de combustível (à direita).

A terceira dificuldade foi o débito do sem-fim. A reduzida densidade da micro-estilha comparada com a densidade do pellets, faz com que um sem-fim que foi dimensionado para alimentar até 550 kg de pellets por hora, não tenha sido capaz de transportar mais do que 170 kg/h. Este facto limita de imediato a potência máxima que o queimador iria ser capaz de produzir.

Para tentar minimizar estes problemas, procedeu-se à instalação de um novo sem-fim, de maior diâmetro, com maior área de exposição no ponto de carga, uma boca de descarga maior e com maior débito, de modo a assegurar um fluxo constante e abundante de combustível ao queimador.



Figura 36 - Sem-fim de maior débito instalado diretamente na tremonha.

A quarta dificuldade surgiu no ponto de descarga deste novo sem-fim. Ao fim de cerca de uma hora de funcionamento, ocorreu um fenómeno de acumulação de material no interior da espiral, sem que tenha caído, esse material começou a criar uma pressão na boca de descarga, empurrando o material contra a zona final do sem-fim, bloqueando o motor.

Foi então necessário proceder a uma modificação da espiral no ponto de descarga, para evitar que este fenómeno se repetisse.

Uma vez instalado este novo alimentador, verificou-se que o débito passou a ser de 350 kg/hora, o que permitiria atingir potências a rondar os 1.400 KW.

Com este novo valor de débito de alimentação, parametrizou-se o quadro de comando do queimador, para que o software efetuasse as devidas correções aos tempos de trabalho do alimentador sem-fim externo para cada um dos níveis de potência. A válvula rotativa de anti-retorno de chama e o sem-fim alimentador interno funcionaram em contínuo.

Verificou-se que a ignição é mais lenta do que o que sucedia com o pellets, o que era expectável sobretudo atendendo ao maior teor de humidade relativa, o que implica fornecer mais energia para o processo de secagem realizado pelas resistências de ignição, até se atingirem temperaturas que favoreçam a inflamação (auto-ignição). No entanto, este facto não foi um constrangimento relevante, pois o autómato que controla o queimador permitiu redefinir os parâmetros de duração da fase de ignição.

Entrou-se então na fase de combustão com a subida gradual de potência, aumentando progressivamente o ritmo de entrada de micro-estilha e a rotação do ventilador do queimador.

Através do visor existente na porta de explosão situada na parte posterior do tubo de fogo, foi possível ir acompanhando por observação, o comportamento do braseiro, a velocidade de gaseificação, de modo a ir procedendo a ajustes de ventilação.

Uma vez realizadas todas as afinações, estabilizou-se a combustão num nível de potência de 1.250 kWh. Esta potência máxima corresponde a 50 % da potência nominal do queimador.

Foi neste momento que surgiu o derradeiro problema mecânico: o encravamento da válvula rotativa antiretorno de chama.

Numa primeira análise suspeitou-se que o problema fosse devido a eventual falta de débito do sem-fim horizontal, que não tivesse conseguido evacuar o caudal de combustível debitado pela válvula.

Iniciou-se a desmontagem do circuito de alimentação, começando por remover a mangueira de fusão translúcida, que se sabia ter combustível acumulado.

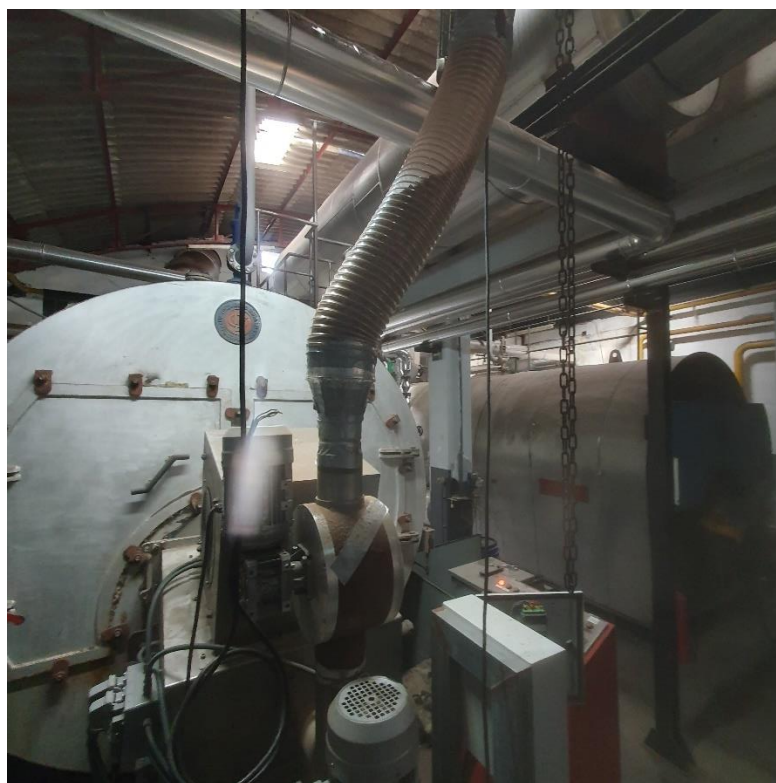


Figura 377 - Encravamento na válvula anti-retorno de chama.

A entrada da válvula rotativa apresentava-se livre e desimpedida. Passou-se então à desmontagem desta peça, de modo a averiguar o que poderia estar a motivar o encravamento a jusante da válvula.



Figura 38 - Encravamento entre a válvula rotativa e o sem-fim horizontal.

Verificou-se que o encravamento tinha motivo ainda mais a jusante, pelo que se foram removendo cuidadosamente as partículas de micro-estilha que aí se encontravam, até que foi encontrada a causa do encravamento.

Uma partícula de micro-estilha, de maior granulometria, embora de reduzido tamanho em duas das suas dimensões, apresentava na terceira dimensão um comprimento de cerca de 100 mm, exatamente o valor do diâmetro interno do tubo de alimentação do queimador.

Sucedeu que uma pequena saliência na soldadura entre o pequeno tramo vertical de tubo de alimentação e o tramo do sem-fim horizontal, foi suficiente para que esta partícula tivesse ficado retida. De seguida, outras partículas de maior dimensão foram encontrando este obstáculo, começando a bloquear o normal fluxo até que o tubo ficou totalmente obstruído.



Figura 39 - Origem do encravamento entre a válvula rotativa e o sem-fim horizontal.

Constatou-se assim que apesar dos processos de crivagem a que a estilha é sujeita na unidade transformadora, o processo permite que ocorra a passagem de partículas que apesar de finas, são suficientemente longas ao ponto de conseguirem produzir encravamentos de fluxo nalguns dos diversos pontos críticos do sistema de alimentação do queimador.

Perante esta situação, decidiu-se pelo encerramento do ensaio, dado não haver nenhuma intervenção rápida e de custo razoável, que fosse viável de ser realizada, tendente à eliminação do risco de repetição de encravamentos similares.

CONCLUSÕES

4.1 MACRO TGA

Os resultados em Macro TGA surpreenderam por se terem verificado em todas as amostras de micro-estilha, índices de perda de massa superiores aos do pellets. A madeira in natura, teoricamente poderia apresentar processos de gaseificação mais lentos, dado obrigar a "quebrar" a estrutura original das fibras vegetais, ao passo que no pellets já houve um processamento mecânico que destruiu essas estruturas a um nível muito reduzido. Porém há dois fatores que pode ajudar a explicar esta diferença: 1) A existência de partículas com diâmetro inferior ao do pellets, faz com que o processo de redução de espessura ocorra mais rapidamente; b) A superfície de gaseificação por unidade de volume e de massa, é notoriamente superior ao verificado no pellets, pelo que pode ser um fator de aceleração do processo de gaseificação.

Conclui-se que existe na gama de granulometrias analisadas uma relação direta entre o tamanho da partícula e a eficiência da oxidação, sendo que a reação de oxidação é claramente favorecida pelo maior espaçamento entre partículas na deposição na amostra, isto é, nas partículas de maior granulometria o arranjo tridimensional favorece a exposição ao calor do forno e ao agente oxidante, ao passo que a menor granulometria tem o efeito inverso, provocando um atraso das partículas que estão no seio da amostra na exposição ao calor e ao oxigênio.

4.2 Caldeira laboratorial

A utilização de micro-estilha em caldeiras de baixa potência, tipicamente de aplicação ao mercado residencial, é possível, mas de difícil concretização.

Os silos são normalmente de pequena capacidade volumétrica, e não possuem qualquer sistema de agitação. Os sem-fins estão dimensionados para um débito de um volume reduzido, dada a densidade do pellet normalizado. Seria necessário substituir os sem-fins por modelos com maior capacidade de transporte em kg/h, cerca de 3 a 4 vezes, bem como aumentar o diâmetro das espirais e/ou a velocidade de rotação.

A maioria dos equipamentos desta gama, vêm equipados com programadores eletrônicos pré-programados e com menus de acesso restrito, pelo que a alteração das configurações de funcionamento, nomeadamente os tempos de "on" e "off" do sem-fim de alimentação.

Mas a maior limitação de todas, tem ainda a ver com a possibilidade de ocorrerem encravamentos por acumulação de combustível no percurso de alimentação entre o silo e a câmara de combustão, que além do transtorno que poderiam criar, geram a possibilidade de danos severos nos motorreductores dos sem-fins de alimentação, além de um risco moderado de retorno de chama, devido à possibilidade de ignição do combustível no percurso de alimentação.

Contudo, as análises aos parâmetros de combustão, foram positivas, revelando que nesse aspeto este combustível poderia ser perfeitamente considerado como alternativa.

Conclui-se assim que não será recomendável a utilização desta tipologia de micro-estilha para a substituição de pellets em caldeiras de gama doméstica.

4.3 Caldeira industrial

À semelhança dos resultados obtidos na caldeira laboratorial, os ensaios na caldeira industrial revelaram uma forte incompatibilidade da micro-estilha com o sistema de alimentação e com o mecanismo interno do queimador.

Apesar de se tratar de um queimador de gama industrial, com uma potência de 2.5 MW, este equipamento e os seus acessórios foram concebidos para utilizar combustíveis com elevada densidade, essencialmente pellets de madeira, caroço de azeitona e casca de amêndoa.

As várias adaptações que foram introduzidas tentaram ultrapassar os conflitos, mas a aleatoriedade das partículas maiores do que 30 mm que conseguem passar no crivo de seleção utilizado na produção da micro-estilha, geram um risco elevado de encravamento do sistema.

Considerando que estamos perante um equipamento que é o "coração" da unidade industrial, que dele dependem vários processos e dezenas de postos de trabalho, não seria sensato prosseguir com esta substituição, dado o risco de paragem da caldeira e conseqüente bloqueio dos processo produtivos de toda a unidade industrial.

Além deste risco, existem questões de segurança que poderiam ser relevantes e comprometedoras, considerando que estas caldeiras funcionam sem presença permanente do fogueiro, e que existiria risco elevado de encravamentos mecânicos, que implicariam depois trabalhos relevantes de desmontagem de componentes para conseguir ultrapassar tais encravamentos.

Relativamente à combustão da micro-estilha, do comportamento do combustível na câmara de combustão do queimador, os resultados observados (nos períodos em que foi possível manter o queimador em funcionamento) foram bastante satisfatórios. A rapidez na ignição, o aspeto da chama e dos gases na saída da chaminé, indicaram um bom comportamento do combustível, e que prometia resultados animadores.

Contudo, as questões mecânicas no sistema de alimentação, levam-nos a concluir que nesta tipologia de queimador de chama horizontal, não será viável ou recomendável a utilização desta tipologia de micro-estilha.

Foi finalmente lançado um desafio à FTC Fuels, no sentido de avaliar a possibilidade de ser alterado ou melhorado o sistema de crivagem na linha de produção, de modo a evitar ou remover a presença da componente de partículas com tamanho superior a 30 mm.

Em suma, podemos afirmar que em termos de reação de combustão, apesar das diferenças de densidade, humidade relativa e granulometria, a micro-estilha é passível de ser utilizada em substituição do pellet de madeira. As velocidades de gaseificação e os produtos da combustão não geram qualquer problema.

Porém, as incompatibilidades mecânicas, geradas essencialmente pela reduzida densidade, e a presença de partículas com dimensão superior a 30 mm, constituem uma barreira demasiado complexa e difícil de ultrapassar, mantendo condições razoáveis de operacionalidade e segurança no funcionamento dos equipamentos.

Conclui-se assim pela não viabilidade da utilização de micro-estilha no formato em que é produzida atualmente em substituição do pellet de madeira, para as duas tipologias de caldeiras analisadas.

De referir, no entanto que a necessidade de encontrar fontes diversificadas de biocombustíveis alternativos e em particular, os derivados de resíduos, poderá motivar a otimização

das propriedades mecânicas da micro-estilha de forma a melhor se adequar aos sistemas de alimentação existentes uma vez que a nível do comportamento termoquímico não exibiu limitações que invalidem a sua utilização em alternativa a pellets de biomassa.

4.4 Trabalhos futuros

Face às conclusões obtidas, e após diálogo com os diversos intervenientes, nomeadamente responsáveis da empresa FTC Fuels, foi definido que logo que possível serão efetuadas alterações aos crivos de modo a tentar eliminar ou minimizar a presença de partículas aqui identificadas como de dimensões problemáticas (agulhas). Após essa intervenção será possível obter novos lotes de micro-estilha e repetir os ensaios de combustão em caldeira industrial, de modo a tentar ultrapassar os constrangimentos verificados ao longo deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

[1] IEA, World Energy Outlook 2022 (2022), IEA - International Energy Agency. Acedido a 14 de Julho de 2023. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/830fe099-5530-48f2-a7c1-11f35d510983/WorldEnergyOutlook2022.pdf>.

[2] European Commission, "Renewable Energy Directive". Acedido em 21 de Julho de 2023. Disponível em: https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en.

[3] JOUE, "Diretiva (UE) 2018/2001 do Parlamento Europeu e do Conselho de 11 de Dezembro de 2018", (2018). Acedido em 22 de Julho de 2023. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001&from=ES>.

[4]. M. C. Carvalho e J. Tomaz, "Diretiva das Energias Renováveis – de 2009 a 2023", (2023) Acedido a 18 de Julho de 2023. Disponível em: <https://www.interplast.pt/Artigos/472938-Diretiva-das-Energias-Renovaveis-de-2009-a-2023.html>.

[5] Observatório da Energia, DGEG e ADENE, "Energia em Números - Edição 2022", (2022). ISBN: 978-972-8521-30-1.

[6] P.R. Yaashikaa, P. Senthil Kumar, A. Saravanan, S. Karishma e Gayathri Rangasamy, "A biotechnological roadmap for decarbonization systems combined into bioenergy production: Prelude of environmental life-cycle assessment", (2023), Chemosphere, Vol. 329, 138670. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523009372>.

[7] J. Mutke, L. S. Plaga e V. Bertsch, "Influence of bioenergy and transmission expansion on electrical energy storage requirements in a gradually decarbonized European power system",

(2023), *Journal of Cleaner Production*, Vol. 419, 138133. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652623022916>.

[8] H. Lund, J. Z. Thellufsen, P. Sorknæs, B. V. Mathiesen, M. Chang, P. T. Madsen, M. S. Kany e I. R. Skov, "Smart energy Denmark. A consistent and detailed strategy for a fully decarbonized society", (2022), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 168, 112777. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403212200661X>.

[9] Y. Bai, H. Lin, A. M. Abed, M. Fayed, I. Mahariq, B. Salah, W. Saleem e A. Deifalla, "An innovative biomass-driven energy systems for green energy and freshwater production with less CO₂ emission: Environmental and technical approaches", (2023), *Chemosphere*, Vol. 334, 139008. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523012754>.

[10] K. Altayib e I. Dincer, "Design and evaluation of a new solar-biomass based energy system for a small sustainable residential community", (2022), *Journal of Cleaner Production*, Vol. 369, 133275. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095965262202861X>.

[11] H. Hematpur, R. Abdollahi, S. Rostami, M. Haghghi e M. J. Blunt, "Review of underground hydrogen storage: Concepts and challenges", (2023), *Advances in Geo-Energy Research*, Vol. 7, No. 2. https://www.researchgate.net/publication/366640556_Review_of_underground_hydrogen_storage_Concepts_and_challenges

[12] L. Bai, M. Asadollahzadeh, B. S. Chauhan, M. Abdrabboh, M. Fayed, H. Aayed, A. Mouldi e M. Marefati, "A new biomass-natural gas dual fuel hybrid cooling and power process integrated with waste heat recovery process: Exergoenvironmental and exergoeconomic assessments", (2023), *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 176. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582023005232>.

[13] Y. Bai, H. Lin, A. M. Abed, M. Fayed, I. Mahariq, B. Salah, W. Saleem e A. Deifalla, "An innovative biomass-driven energy systems for green energy and freshwater production with less CO₂ emission: Environmental and technical approaches", (2023), *Chemosphere*, Vol 334, 139008. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139008>.

[14] E. Jacobsen, S. M. Skov, A. Singlitico e H. L. Frandsen, "Techno-economic analysis of green aviation fuel production using an integrated electrolyzer and a "biomass-battery" storage system", (2023), *International Journal of Hydrogen Energy*, disponível online em 28 de Junho de 2023. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319923028318>

[15] www.enplus-pellets.eu. Acedido em 02 de Agosto de 2023, Disponível em: <https://www.enplus-pellets.eu/en-in/about-us-en-in/history-of-enplus.html>

[16] Asociación Española de Normalización, "Biocombustibles sólidos - Especificaciones y clases de combustibles - Parte 4: Clases de astillas de madera - (ISO 17225-4:2021), (2021), Extracto del documento UNE-EN ISO 17225-4. Acedido em 04 de Agosto de 2023, Disponível em <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0067999>.

[17] www.omie.es/pt. Acedido em 16 de Agosto de 2023. Disponível em: <https://www.omie.es/pt/market-results/interannual/daily-market/daily-prices?scope=interannual>.

[18] www.avebiom.org. Acedido em 16 de Agosto de 2023. Disponível em: <https://www.avebiom.org/sites/default/files/ipb/IPB-Indice-precios-pellet-AVEBIOM.pdf>.

[19] A. I. Canabal, J. P. Castiñeiras, J. A. R. Añón, C. E. Fraga e R. R. Soalleiro, "Elemental composition of raw and torrefied pellets made from pine and pine-eucalyptus blends", (2023). *Biomass and Bioenergy*, Vol. 177, 106951. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953423002507?dgcid=rss_sd_all.

[20] C. Chen, Y. Bi, Y. Huang, H. Huang, "Review on slagging evaluation methods of biomass fuel combustion", (2021). *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, Vol. 155, 105082. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237021000681>.

[21].Decreto-Lei 39/2018, de 11 de Junho, Diário da República n.º 111/2018, Série I de 2018-06-11.

|



2023

MANUEL MENESES

MICRO-ESTILHA, UMA ALTRNATIVA AO USO DE
PELLETS EM CONTEXTO INDUSTRIAL