



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

**Estudo da viabilidade de uma mini central
a biomassa com forno rotativo**

ALEXANDRE JORGE CORTES

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra

Júri:

Presidente: Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Vogais:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra

dezembro de 2023



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Mecânica

**Estudo da viabilidade de uma mini central
a biomassa com forno rotativo**

ALEXANDRE JORGE CORTES

(Licenciado em Engenharia Mecânica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica

Orientadores:

Doutor Nuno Alexandre Soares Domingues

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra

Júri:

Presidente: Doutor Gonçalo Nuno de Oliveira Duarte

Vogais:

Doutora Cláudia Sofia Séneca da Luz Casaca

Doutor Nuno Ricardo da Piedade Antunes Serra

dezembro de 2023

Agradecimentos

Nesta secção pretendo dar os agradecimentos a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, me auxiliaram no decorrer do percurso académico e na realização desta dissertação.

Quero agradecer aos meus orientadores, professor Nuno Domingues e professor Nuno Serra, quer pela escolha do tema, que se revelou desafiante e interessante, quer pela continua disponibilidade e partilha de conhecimento.

Ao engenheiro Paulo Lourenço da empresa Termogreen pela simpatia, disponibilidade e ajuda oferecida, que foram fulcrais para entender alguns aspetos técnicos relacionados à operação do forno rotativo.

À minha família por todo o apoio. Um grande agradecimento especial aos meus pais pela confiança depositada e pela motivação incessante. Sem eles, nada disto seria possível.

À minha namorada, Beatriz, por todo o apoio, paciência e companhia ao longo de todos estes anos.

Aos amigos que criei durante o percurso académico e àqueles de longa data, pela amizade, companhia e como, de uma forma ou de outra, me ajudaram a divagar nos períodos mais difíceis. Bruno, Pedro e Rafa, um agradecimento especial.

RESUMO

Este trabalho tem como intuito analisar a viabilidade de uma mini central a biomassa com forno rotativo. O estudo centrou-se na importância da biomassa, nas características do forno, na sua aplicação numa mini central a biomassa e na averiguação da viabilidade destas centrais.

A biomassa destaca-se como uma fonte de energia despachável, neutra em carbono e renovável, quando utilizada de forma sustentável, tornando-se uma alternativa promissora para substituir as energias fósseis no setor eletroprodutor.

Analisaram-se as mini centrais com forno rotativo ao nível do funcionamento, equipamentos, otimização e dificuldades operacionais. Avaliou-se a combustão no forno rotativo, revelando-se a necessidade de uma câmara de pós-combustão para garantir a oxidação total dos gases e conformidade com regulamentos ambientais. Demonstrou-se ser preferível utilizar o estagiamento de ar devido à redução simultânea de emissões de uma combustão incompleta e de NO_x. Relativamente a aspetos particulares destas instalações, mostrou-se a importância de controlar o tempo de residência e assegurar uma mistura adequada dos sólidos, para permitir uma combustão completa e uniforme, e a necessidade de observar regularmente o estado do tijolo refratário, e a presença de fissuras e desalinhamento no forno, para garantir o seu bom funcionamento.

A avaliação da viabilidade abrangeu os pontos de vista técnico, ambiental, económico e social. No ponto de vista técnico o forno destaca-se na versatilidade de queima de combustível, mas tem uma baixa eficiência térmica. Sob a perspetiva ambiental e social não se verificaram diferenças para outras tecnologias de combustão, mas evidenciou-se ser vantajoso, de uma forma geral, utilizar a biomassa. Economicamente, o forno tem um custo de investimento relativamente baixo, mas um custo de manutenção elevado. A baixa eficiência térmica e os custos de manutenção podem justificar a baixa utilização do forno rotativo em centrais termoelétricas a biomassa.

Palavras-chave: Biomassa, Forno Rotativo, Mini central termoelétrica, Estudo de viabilidade

ABSTRACT

This work aims to conduct a feasibility analysis of a small scale biomass power plant with a rotary kiln. The study focused on the value of biomass, the characteristics of the kiln, its application in a small scale biomass plant, and the assessment of the feasibility of such facilities.

Biomass stands out as a dispatchable, carbon-neutral, and renewable energy source, when utilized sustainably, emerging as a promising alternative to replace fossil fuels in the power generation sector.

Small scale power plants with rotary kilns were analyzed, concerning their functioning, equipment, optimization, and operational challenges. Combustion in the kiln was also evaluated, revealing the need for a post-combustion chamber to ensure the complete oxidation of gases and compliance with environmental regulations. It proved preferable to implement air staging due to the simultaneous reduction of emissions from incomplete combustion and NO_x. Regarding specific aspects of these facilities, the importance of monitoring residence time and ensuring an adequate mixture of solids was emphasized to enable complete and uniform combustion, and regular observation of the state of the refractory brick, along with the detection of cracks and misalignment in the kiln, was underscored to ensure its proper functioning.

The feasibility assessment encompassed technical, environmental, economic, and social perspectives. From a technical standpoint, the kiln stands out in its versatility of fuel burning but has a low thermal efficiency. Regarding environmental and social aspects, no significant differences were observed compared to other combustion technologies, but it was generally evident that utilizing biomass is advantageous. Economically, the kiln has a relatively low initial investment cost, but high maintenance expenses. The combination of low thermal efficiency and maintenance costs may account for the limited utilization of rotary kilns in biomass power plants.

Keywords: Biomass, Rotary Kiln, Small scale thermoelectric plant, Feasibility study

ÍNDICE

1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Resumo bibliográfico.....	6
1.3. Objetivos da dissertação	7
1.4. Estrutura da dissertação	8
2. Forno rotativo	9
2.1. Enquadramento histórico	9
2.2. Características de funcionamento	10
2.2.1. Componentes e características.....	10
2.2.2. Parâmetros	12
2.3. Utilização da biomassa em fornos rotativos	21
2.3.1. Biomassa.....	21
2.3.2. Exemplos de aplicação	29
3. Aplicação do forno rotativo em mini centrais	35
3.1. Descrição do funcionamento	36
3.1.1. Fluxograma da instalação	36
3.1.2. Princípio físico.....	38
3.2. Descrição dos componentes.....	40
3.2.1. Pré-tratamento da biomassa.....	40
3.2.2. Combustão.....	41
3.2.3. Produção de vapor	44
3.2.4. Geração de eletricidade	45
3.2.5. Tratamento de efluentes gasosos	46
3.2.6. Arrefecimento.....	49
3.2.7. Outros equipamentos e acessórios.....	50

3.3.	Processo de combustão	52
3.3.1.	Análise do coeficiente de combustão completa.....	53
3.3.2.	Estágios de combustão	56
3.4.	Otimização do desempenho	58
3.4.1.	Combustão.....	58
3.4.2.	Redundância de equipamentos	60
3.4.3.	Condições do vapor	60
3.4.4.	Recuperação de calor.....	61
3.4.5.	Escolha do combustível.....	62
3.4.6.	Monitorização, controlo, manutenção e limpeza.....	62
3.4.7.	Técnicas de captura e armazenamento de carbono.....	62
3.5.	Desafios de operação	63
3.5.1.	Slagging, fouling e corrosão.....	63
3.5.2.	Controlo da quantidade de ar.....	68
3.5.3.	Tempo de residência.....	69
3.5.4.	Tijolo refratário.....	70
3.5.5.	Desgaste, fratura e desalinhamento do forno.....	71
3.5.6.	Disponibilidade da biomassa.....	73
3.5.7.	Logística da biomassa.....	73
3.5.8.	Emissões e cinzas	73
4.	Viabilidade	75
4.1.	Viabilidade técnica	75
4.1.1.	Localização da central e cadeia de abastecimento de biomassa.....	75
4.1.2.	Análise técnica qualitativa.....	77
4.2.	Viabilidade ambiental	79
4.3.	Viabilidade económica	81

4.4. Viabilidade social	83
5. Conclusão e trabalhos futuros.....	87
5.1. Conclusão geral.....	87
5.2. Trabalhos futuros	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Principais indicadores de energia e clima para o período 2021-2030. Adaptado de [12]	2
Figura 2 – Evolução das energias renováveis no consumo final bruto [7].....	3
Figura 3 – Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental em 2022 [14]	3
Figura 4 – Representação esquemática de um FR. Adaptado de [57].....	11
Figura 5 – Diagrama do escoamento num FR contracorrente com aquecimento direto. Adaptado de [24]	12
Figura 6 – Movimento transversal da carga no interior do FR. Adaptado de [28].....	15
Figura 7 – Secção transversal do FR com algumas características geométricas. Adaptado de [24].....	18
Figura 8 – Mecanismos de transferência de calor num FR. Adaptado de [29]	20
Figura 9 – Formas de valorização da biomassa	31
Figura 10 – Fluxograma do funcionamento da central.....	36
Figura 11 – Conversões de energia	38
Figura 12 – Princípio de funcionamento do ciclo de Rankine	39
Figura 13 – Esquema das unidades de combustão. Adaptado de [86]	42
Figura 14 – Ligação forno rotativo–câmara de pós-combustão, vista do interior da câmara [36].....	44
Figura 15 – Scrubber húmido vertical com aspersores. Adaptado de [38].....	46
Figura 16 – Ciclone para o tratamento de efluentes gasosos. Adaptado de [38].....	48
Figura 17 – Gráfico de previsão do coeficiente de combustão completa. Adaptado de [37]	54
Figura 18 – Processos de transformação da biomassa em gases de combustão	56
Figura 19 – Custo e rendimento em função da pressão e temperatura do vapor [39]	60
Figura 20 – Fouling num permutador de calor [92]	64
Figura 21 – Colocação do refratário no interior do FR [22].....	70
Figura 22 – Propagação de uma fissura na soldadura [41].....	72
Figura 23 – Perfil defletido durante a rotação	72
Figura 24 – Cadeia de abastecimento de biomassa. Adaptado de [55]	77

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Movimento transversal e o intervalo do número de Froude associado [28].	17
Tabela 2 – Fases e respectivos processos/componentes.....	40

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Abreviaturas

AQS	Água quente sanitária
FR	Forno rotativo
GEE	Gases com efeito de estufa
GICC	Gaseificação integrada com ciclo combinado
HC	Hidrocarbonetos
PCI	Poder calorífico inferior
PCS	Poder calorífico superior
PICC	Pirólise integrada com ciclo combinado
PICR	Pirólise integrada com ciclo regenerativo
PNEC 2030	Plano Nacional de Energia e Clima 2030
RNC 2050	Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050
UE	União Europeia
UPP	Unidade de Pequena Produção

Símbolos latinos

CH ₄	Metano
CC _{FR}	Coefficiente de combustão completa [%]
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _{2,eq}	Dióxido de carbono equivalente
D	Diâmetro interno do forno [m]
D _{abert,}	Diâmetro de abertura de saída efetivo [m]
g	Aceleração da gravidade [m/s ²]
H	Altura do leito de sólidos [m]
H ₂	Hidrogénio
H ₂ O	Água
k	Constante que depende do número e formato das pás internas
L	Comprimento do forno [m]
M	Massa [kg]
ṁ	Caudal mássico [kg/s]

$\dot{m}_{ar,FR}$	Rácio de caudal mássico de ar [kg_a/kg_b]
$\dot{m}_{CO,FR}$	Caudal mássico de CO à saída do forno rotativo [kg/h]
$\dot{m}_{CO_2,FR}$	Caudal mássico de CO ₂ à saída do forno rotativo [kg/h]
N	Velocidade de rotação [rpm]
NO _x	Óxidos de azoto
Q	Taxa de transferência de calor [W]
Q _{in}	Calor fornecido à caldeira [W]
Q _{out}	Calor cedido pelo condensador [W]
R	Raio interno do forno [m]
S	Inclinação do forno
S _{pás}	Secção do forno não coberta por partículas sólidas contidas nas pás internas [m ²]
SO ₂	Dióxido de enxofre
W _{bomba,in}	Trabalho mecânico fornecido à bomba [W]
W _{turbina,out}	Trabalho mecânico produzido pela turbina [W]

Símbolos gregos

α_{1-8}	Parâmetros de ajuste
ΔH	Variação de entalpia [J/mol]
Θ	Ângulo de repouso
ρ_{ap}	Massa volúmica aparente [kg/m ³]
$\rho_{ap,c}$	Massa volúmica aparente compacta [kg/m ³]
σ	Ângulo de enchimento
τ	Tempo médio de residência [min]
ω	Velocidade angular [rad/s]

1. Introdução

1.1. Enquadramento

A implementação de energias renováveis tem vindo a aumentar [1]. No ponto de vista energético esta forma de obtenção de energia apresenta duas vantagens: a introdução de uma fonte de energia ilimitada e a diminuição da dependência energética externa que atualmente se observa por parte dos principais produtores de eletricidade. Ambientalmente algumas fontes de energia renovável, que incluem a solar, eólica e hídrica, são também mais vantajosas do que as energias fósseis, já que têm uma menor emissão de gases com efeito de estufa (GEE), pelo que podem ajudar a desacelerar as alterações climáticas [1, 2].

Apesar de não existir consenso na existência de mudanças climáticas, e se estas alterações são antropogénicas, neste trabalho final de mestrado (TFM) foram aceites as conclusões apresentadas no trabalho Borrego et al. [2], onde é reconhecida a existência de mudanças climáticas, e são diferenciadas as mudanças causadas pelo Homem (alterações climáticas) e as mudanças de causa natural (variabilidade climática). A causa assinalada para a alteração climática está relacionada com o aumento da concentração de GEE na atmosfera, que intensificam o efeito de estufa [2]. O setor de produção e transformação de energia é precisamente um dos maiores emissores deste tipo de gases [3]. Portugal é um exemplo deste facto, já que este setor é o segundo maior emissor de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2,\text{eq}}$) a nível nacional, perfazendo 18% das emissões em 2020 [4].

Na União Europeia (UE) têm sido criados planos que visam beneficiar a utilização das energias renováveis, eliminando a dependência dos combustíveis fósseis. O plano energético mais recente foi em 2020, intitulado “20-20-20”, onde se pretendia atingir uma redução de 20% na emissão dos GEE (face aos valores de 1990), atingir o patamar de 20% da energia consumida proveniente de fontes renováveis e aumentar a eficiência energética, de modo a reduzir em 20% o consumo de energia primária, face a projeções realizadas para o ano de 2020 [5]. Tendo em conta estes marcos gerais, Portugal propôs o Plano Nacional de Ação para as Energias Renováveis 2020 (PNAER 2020), onde estabeleceu os próprios objetivos: 31% do consumo final bruto proveniente de fontes renováveis e a redução em 25% do consumo de energia primária [6]. Verificou-se que tanto as metas gerais estabelecidas pela UE, como as de Portugal, foram cumpridas [5,

7]. No entanto, estes valores podem não ser tão satisfatórios quanto aparentam, já que a pandemia COVID-19 causou uma redução da utilização combustíveis fósseis e do consumo energético, pelo que, sem este fator, muitos países da UE poderiam não ter alcançado os objetivos traçados para 2020, inclusive Portugal [7, 8, 9].

Para 2030 e 2050 foram propostas novas políticas energéticas e climáticas pela UE, tendo sido traçadas metas e estratégias específicas por cada estado-membro. Os objetivos passam novamente, na generalidade, pela redução do consumo de energia, diminuição da emissão dos GEE e aumento do contributo das fontes renováveis. Em Portugal as metas encontram-se estabelecidas no Plano Nacional de Energia e Clima 2030 (PNEC 2030) e no Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC 2050). Este último tem como finalidade atingir a neutralidade carbónica e reduzir a emissão dos GEE entre 85 a 90%, até 2050 [10, 11]. Já o PNEC 2030 inclui os objetivos a atingir até 2030, alguns dos quais estão indicados na Figura 1.

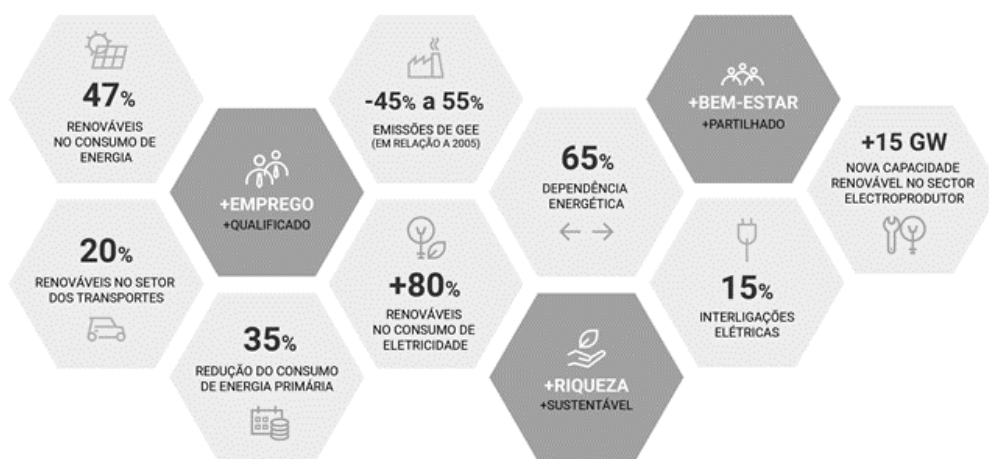


Figura 1 – Principais indicadores de energia e clima para o período 2021-2030.
Adaptado de [12]

Destes onze objetivos que Portugal traçou até 2030, os que mais importam referir para esta dissertação são os que se relacionam com o consumo ou produção de energia que envolva fontes renováveis. Desta forma, retiram-se como indicadores mais importantes os 47% de energia renovável no consumo de energia (refere-se à energia final), 80% de energia renovável no consumo de eletricidade e uma capacidade renovável de 15 GW no setor electroprodutor [10]. Em cada um dos pontos que se apresentam a seguir, é demonstrado o ponto de situação atual de Portugal relativamente a estas três metas.

- **47% de renováveis no consumo de energia final**

Como se verifica pela Figura 2, em 2020 atingiu-se o valor de 34,1% de energia renovável no consumo final bruto, que representa um aumento de 9,5 pontos percentuais face aos valores de 2011. Igualando esta evolução, não será possível atingir os objetivos traçados até 2030 .

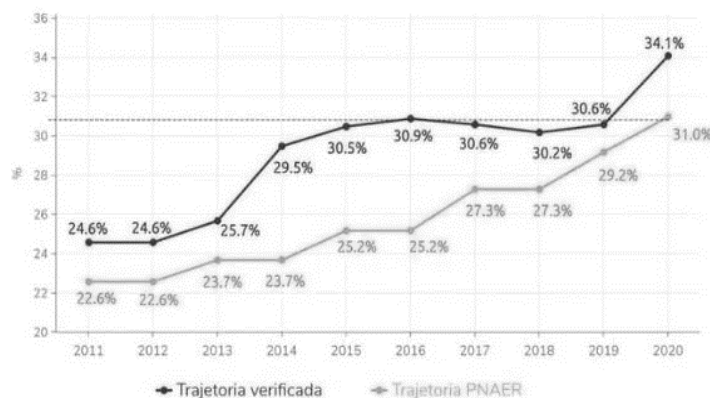


Figura 2 – Evolução das energias renováveis no consumo final bruto [7]

- **80% de renováveis no consumo de eletricidade**

Este valor flutua significativamente. A Figura 3 ilustra o mix da produção de eletricidade em Portugal Continental no ano de 2022. Como se verifica, a energia renovável foi responsável por apenas 57,2% da eletricidade consumida. Este valor encontra-se abaixo dos valores obtidos nos anos 2020 e 2021: 60,8% e 62,2%, respetivamente, e severamente abaixo dos objetivos traçados até 2030 [13].

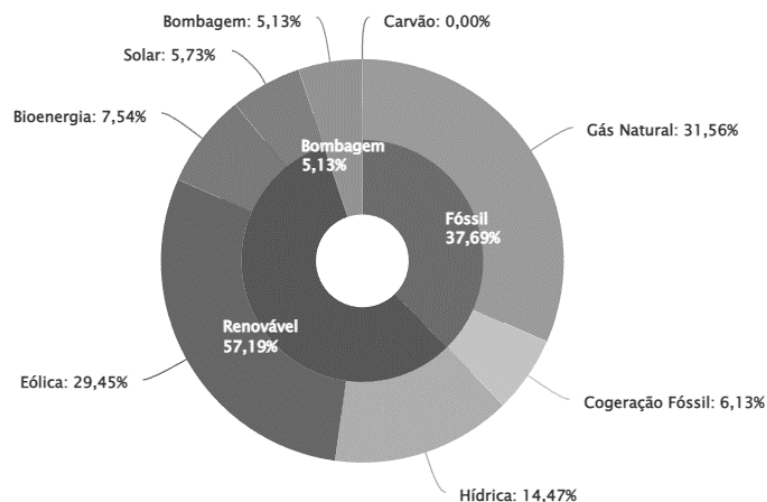


Figura 3 – Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental em 2022 [14]

- **Capacidade renovável superior a 15 GW no setor electroprodutor**

Este valor de capacidade já foi atingido, e ultrapassado, em 2020, onde se situava nos 15,4 GW [15].

Apesar da capacidade renovável instalada representar cerca de 70% da capacidade de produção nacional, a eletricidade consumida proveniente de fontes renováveis encontra-se abaixo deste valor, principalmente em 2022 onde foi 57,2%, [15]. Isto demonstra uma grande inconveniência das fontes de energia renovável: o facto da sua produção ser muitas vezes intermitente e incontrolável. Intermitente pois as fontes renováveis não têm a capacidade de produzir continuamente ao longo do dia, nem ao longo do ano, com a renovável no verão a apresentar, nalguns dias, menos de 30% do consumo de eletricidade [16]. Incontrolável devido à dependência das condições climáticas. Independentemente da capacidade instalada, se não existir incidência solar suficiente, a velocidade do vento for baixa e a chuva for escassa, estas energias renováveis, como principal fonte de energia, são insuficientes sem coexistir com uma forma de armazenamento energético capaz de amenizar estas flutuações de produção, ou fontes de energia alternativas com capacidade de produção de eletricidade contínua e despachável. Porém, há uma fonte renovável mais independente das condições climáticas, que é a biomassa. O aproveitamento da biomassa enquanto combustível é visto como uma fonte de energia renovável, pois ao contrário dos combustíveis fósseis, a sua utilização sustentada permite que a mesma se volte a gerar num curto espaço de tempo [17]. Outro fator que distingue a biomassa dos combustíveis fósseis, é que o balanço de emissões de CO₂ no seu aproveitamento pode ser considerado nulo, já que as plantas absorvem a mesma quantidade de CO₂ do ar, através da fotossíntese, que o que emitem para a atmosfera durante a combustão [13, 18]. Esta premissa foi aceite com base no visado em McKendry [18], onde se refere que a queima de biomassa não contribui como “novo” CO₂ para a atmosfera, ao contrário da queima de combustíveis fósseis, e só assim o é, se forem dadas condições para o recrescimento das espécies para que voltem a absorver o CO₂ emitido.

A biomassa representa, segundo a Diretiva 2001/77/EC, a “fração biodegradável de produtos e resíduos de agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), floresta e indústrias conexas, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e

urbanos”. A biomassa inclui, portanto, toda a matéria orgânica e biodegradável. A tipologia de biomassa mais utilizada para fins energéticos é a biomassa de origem florestal, enquanto a biomassa proveniente de resíduos industriais e urbanos é muitas vezes inviável sob uma perspectiva económica, podendo ainda ser passível de ser utilizada num ponto de vista social ou ambiental [17].

Pelos dados estatísticos da eletricidade produzida, a biomassa demonstra-se como uma fonte de energia que contraria as flutuações climatéricas, representando uma produção constante ao longo do dia, e cobrindo 6 a 7% do consumo de eletricidade nacional, que corresponde a 12% das energias renováveis no setor electroprodutor [16]. Pelo que se conclui que a biomassa é uma valiosa substituição renovável dos combustíveis fósseis, já que esta também apresenta a possibilidade de produção de energia despachável, contribui para o mix energético e o seu aproveitamento sustentável, se provir de resíduos florestais, demonstra-se como uma solução para manter as florestas limpas, por forma a diminuir o risco de incêndios florestais [19].

A forma mais comum e antiga de aproveitamento de biomassa para produção elétrica, dedicada ou em cogeração, é a combustão [20]. Porém, existem também outras formas de aproveitamento mais avançadas que utilizam a pirólise ou gaseificação. Todas estas formas de aproveitamento de biomassa têm em comum a utilização de tecnologias de queima. Existem diferentes tipos de tecnologias, sendo as mais utilizadas as grelhas e os leitos fluidizados [21]. Outra tecnologia que se revela promissora é o forno rotativo (FR), que ainda se encontra pouco difundido no setor de produção de eletricidade [22]. O FR tem um longo historial de aplicação na indústria cimenteira. Vantagens como o controlo do tempo de residência e, por sua vez, a flexibilidade do tipo de combustível e da granulometria, tornam este tipo de tecnologia apelativa para o uso em centrais para operar com diferentes tipos de biomassa [23]. É pois evidente, do atrás elencado, a pertinência da temática associada à queima de biomassa, não só no tipo de tecnologia utilizada, mas também, e acima de tudo, nos processos envolvidos na transferência de energia e impactes destes no resultado final. É nesta vertente que este TFM se centrará.

1.2. Resumo bibliográfico

Neste resumo bibliográfico estão indicadas as principais fontes consultadas ao longo do TFM. Para melhor organização, estas fontes estão distribuídas pelos quatro parágrafos da seguinte forma: o primeiro parágrafo é referente aos fundamentos do FR (capítulo 2), o segundo à caracterização da biomassa, que é mencionada ao longo do TFM, o terceiro ao FR aplicado em mini centrais a biomassa (capítulo 3) e o quarto à viabilidade deste tipo de instalações (capítulo 4). Naturalmente, em determinados conteúdos, foram adicionadas outras referências que apresentaram detalhes adicionais relevantes, e que não são aqui mencionadas. Os trabalhos indicados abaixo são apenas os que mais relevância tiveram e serviram de base para a escrita deste TFM.

Os trabalhos de Boateng [24] e Peray [25] foram as referências utilizadas para realizar o contexto histórico do FR. Para além de ser utilizada para a contextualização, a referência Boateng [24], que retrata desde os componentes e aplicações do forno, até ao processo complexo do movimento dos sólidos e da transferência de calor, foi utilizada recorrentemente ao longo do TFM, já que centraliza muita informação que se encontra dispersa por outras referências. As bibliografias Donatelli et al. [26], Lasek et al. [27], Mellman [28] e Liu et al. [29] aprofundam ou adicionam particularidades ao indicado em Boateng [24], no que diz respeito às características de funcionamento do forno, pelo que foram muitas vezes utilizadas como alternativa a esta última referência. Bojanovský et al. [23] é um dos trabalhos consultados mais recentes, de 2022, e dos mais relevantes, tanto no capítulo 2, como nos que lhe dão seguimento. Neste, resume-se o estado atual do FR e as prospeções futuras, faz-se uma síntese dos princípios e características do forno, e analisam-se as áreas de utilização. Adicionalmente, em cada área de utilização, esta referência realiza uma revisão bibliográfica própria, adicionando múltiplos trabalhos relacionados.

No que concerne à teoria relativa à biomassa e aos métodos de conversão termoquímica, as principais bibliografias foram: Loo et al. [17], McKendry [18, 30, 31], Ferreira et al. [19], Adams et al. [21], Lewandowski et al. [32] e Speight [33].

As referências Fosgitt [34], Amodeo [35] e a informação fornecida pela empresa portuguesa Termogreen [22, 36], foram cruciais para o entendimento inicial, pois foram dos poucos trabalhos encontrados que relatavam centrais com FR e biomassa para

produção de eletricidade. Em Bujak et al. [37] é exposto o tipo e a qualidade de combustão esperada num FR. O processo de funcionamento da central, a indicação dos componentes e a respetiva função, foram derivados das seguintes referências: Loo et al. [17], Termogreen [36], Cooper et al. [38] (especificamente para os equipamentos de controlo de emissões) e Rajput [39] (a base para o entendimento de grande parte dos equipamentos numa central de biomassa). Outros trabalhos importantes foram os de Rosendahl [40], onde são relatadas as principais dificuldades na combustão de biomassa, e Basri et al. [41] e Samanta et al. [42], onde as complicações esperadas na utilização do FR são elencadas. Apesar de não terem servido como base, algumas referências que indicavam o uso do FR como equipamento para a incineração ou gaseificação de resíduos, foram extremamente importantes para compreender o processo de combustão, bem como formas de otimização e dificuldades de operação. Alguns destes trabalhos foram Jiang et al. [43], Bosmans et al. [44], Stehlík [45], Weinberg et al. [46] e Bujak et al. [47].

Bojanovský et al. [23], Arena [48], Al-Salem [49], El-Haggag [50], Molino et al. [51] e Leckner [52] foram as referências utilizadas no capítulo da viabilidade que fazem a comparação entre várias tecnologias de queima. Todas elas se referem à queima ou gaseificação de resíduos, tendo sido utilizadas apenas por falta de mais informação relativamente a centrais termoelétricas a biomassa. Trabalhos adicionais foram Nunes et al. [53], que explicita a cadeia de abastecimento de biomassa, e Carneiro et al. [54], Cambero et al. [55] e Malico et al. [56], que analisam a viabilidade de utilização de biomassa sob várias perspetivas.

1.3. Objetivos da dissertação

O tema central da dissertação é o estudo teórico de uma mini central a biomassa com foco no FR. No entanto, o trabalho pode ser dividido em objetivos menores que são apresentados em cada um dos seguintes pontos:

- Estudar e enfatizar a utilização de biomassa como uma forma de energia renovável e despachável, vantajosa como alternativa aos combustíveis fósseis e amenizadora da intermitência de outras fontes de energia renovável.
- Dar a conhecer uma nova tecnologia de queima pouco difundida no setor electroprodutor (FR).

- Averiguar o funcionamento de uma mini central termoelétrica a biomassa com FR.
- Avaliar a viabilidade da utilização do FR, quando comparado com outras tecnologias de queima tradicionais.
- Concluir relativamente à aplicabilidade deste tipo de instalações.

1.4. Estrutura da dissertação

O presente TFM está organizado em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é feito um enquadramento do tema que se insere o trabalho, o resumo bibliográfico, os objetivos a alcançar e a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 realiza-se a revisão bibliográfica do FR e da biomassa. Encontram-se presentes o enquadramento histórico do forno, os principais componentes que o constituem, as características de funcionamento e os parâmetros que influenciam o seu desempenho. Por fim, é feita uma caracterização da biomassa, com a sua definição, tipos e propriedades, e revelam-se as principais utilizações do forno rotativo com o combustível de biomassa.

O capítulo 3 centra-se na aplicação do forno rotativo numa mini central a biomassa. Na primeira parte deste capítulo procede-se à descrição do funcionamento e indicação dos principais componentes que compõem a central termoelétrica. Numa segunda parte explica-se o processo de combustão de biomassa nestes fornos. Nas últimas partes demonstram-se formas de otimização de desempenho e principais dificuldades de operação.

No capítulo 4 discute-se a viabilidade deste tipo de instalações e, quando assim é possível, faz-se uma comparação com centrais com outras tecnologias de queima. A viabilidade é avaliada por quatro vias: técnica, ambiental, económica e social.

O capítulo 5 é o culminar de todo o trabalho, onde se encontram as principais conclusões do mesmo e indicação de possíveis trabalhos futuros.

2. Forno rotativo

Este capítulo apresenta uma descrição pormenorizada do FR e biomassa. Encontra-se presente o enquadramento histórico e as características de funcionamento do forno, a definição da biomassa e as principais aplicações do FR com a biomassa.

2.1. Enquadramento histórico

O século XIX foi marcado por um forte crescimento na utilização de cimento. Projetos grandiosos dessa época, como a construção do canal de Erie em 1818, tornaram a indústria cimenteira mais chamativa e competitiva. Adveio, portanto, a necessidade das empresas se destacarem e revolucionarem neste mercado, por forma a conseguirem desenvolver mais produto e com melhor qualidade. A invenção do cimento Portland, em 1824, ainda o mais utilizado até hoje, permitiu criar um cimento com melhores propriedades. A tecnologia de processamento da matéria-prima, porém, continuava antiquada e ineficiente, e o processo de produção era moroso, características que criavam um produto com baixa qualidade e mais dispendioso. Verificou-se que o foco de investigação deveria ser a produção de uma nova tecnologia que permitisse, por um lado, contrariar as desvantagens dos fornos utilizados, por outro, conseguir acompanhar a crescente necessidade deste material. A tecnologia revolucionária veio a ser o FR [24].

A primeira experimentação relatada, na produção de cimento, com uma tecnologia semelhante a um FR, ocorreu em 1877 por Thomas Millen e os seus dois filhos [24, 25]. Porém, só anos mais tarde, em 1885, foi patenteado um FR horizontal ligeiramente inclinado, pelo inglês Frederick Ransome, a primeira patente registada deste forno [24]. Até então o cimento era produzido em fornos verticais fixos [25]. Face a estes, o FR permitia processar uma maior quantidade de material e queimar a matéria-prima completa e uniformemente, produzindo um cimento de maior qualidade, características que destacavam este forno de outros utilizados nessa época [24]. Apesar desta revolução tecnológica, só dez anos depois da primeira patente, em 1895, foi desenvolvido o primeiro modelo economicamente viável [25]. A invenção do FR revolucionou totalmente esta indústria, conseguindo depor todos os fornos usados até então, sendo ainda, até hoje, a tecnologia com maior presença na produção de cimento [24].

As características geométricas destes equipamentos no fim do século XIX e início do século XX, diferiam muito dos utilizados nos dias de hoje [24]. Inicialmente tinham cerca de 45 cm de diâmetro e 4,5 m de comprimento [25]. Porém, revelou-se, em meados século XX, que o aumento das dimensões permitia obter um produto com maior qualidade, devido a um maior tempo de residência da matéria-prima, para além de possibilitar processar uma maior quantidade de matéria [24, 25]. Neste século já se produziam fornos com 1,8 m de diâmetro e até 18 m de comprimento [25]. Hoje, os aplicados na indústria do cimento, podem ter mais de 150 m de comprimento [24].

As vantagens gerais do FR são o controlo do tempo de residência, a possibilidade de processar diversos tipos de matéria-prima, líquida ou sólida, um vasto conhecimento da combustão no FR devido ao longo historial na aplicação na indústria cimenteira, a resistência a temperaturas elevadas e um custo de investimento relativamente baixo [23, 48, 51]. As desvantagens são o tempo de residência mais longo, a dificuldade no controlo de temperatura, que pode tornar também a qualidade da reação instável, a baixa eficiência térmica e os custos de manutenção elevados [23, 24, 48, 51].

Outras indústrias, para além da indústria cimenteira, vieram também a utilizar esta tecnologia de queima, de modo a tirar partido dos seus benefícios. Hoje em dia o FR é aplicado para a redução de minérios, na produção de cal e coque de petróleo, na incineração de resíduos perigosos e lamas provenientes do tratamento de águas residuais, e na combustão, gaseificação e pirólise de biomassa [23, 24]. São operados para os mais diversos propósitos: secagem, combustão, calcinação, pirólise, gaseificação e moagem [23].

2.2. Características de funcionamento

Neste subcapítulo pretende-se estudar as características que tornam o FR uma tecnologia notória nalgumas áreas de aplicação, bem como indicar os componentes e parâmetros que regem o seu funcionamento.

2.2.1. Componentes e características

O FR típico apresenta-se na Figura 4. É composto por um corpo principal cilíndrico que gira sobre o seu eixo longitudinal, com uma ligeira inclinação relativamente ao plano horizontal. A rotação varia consoante a finalidade e a matéria-prima a processar.

Para regular a rotação é necessário um motor com velocidade variável que está mecanicamente ligado a uma engrenagem motora [24]. A inclinação (representada pela letra *S* na Figura 4) pode ter um valor fixo, configurado durante a montagem do forno, ou pode incluir um sistema de regulação de inclinação [23, 24]. O interior do cilindro é revestido por tijolos refratários que garantem a integridade do forno quando opera a temperaturas elevadas. A carapaça externa é constituída por um material isolante, para reduzir as perdas de calor pela parede. O FR necessita de uma fonte de calor suplementar para iniciar a combustão ou para fornecer energia continuamente a uma reação endotérmica, podendo esta fonte quente ser proveniente de gases quentes, que aquecem a superfície externa do forno, ou de um queimador, localizado numa das extremidades, no interior do forno, como demonstra a Figura 4 [23]. Para manter a sua estabilidade, devido ao peso e comprimento, necessita de suportes rolantes que permitam a rotação com o mínimo de atrito [24]. A introdução do material no interior é feita através de um sistema de alimentação pelo lado mais elevado do forno, e o escoamento até à parte inferior é conseguido através da ação conjunta da gravidade e do movimento rotacional.

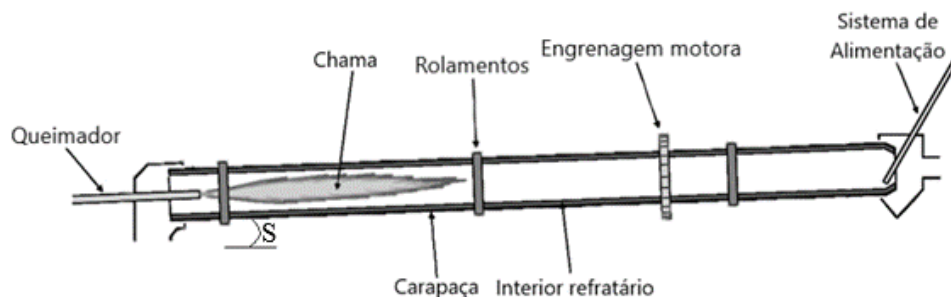


Figura 4 – Representação esquemática de um FR. Adaptado de [57]

Os componentes expostos anteriormente são a base de qualquer FR, sendo transversais a qualquer aplicação. Porém, outras aplicações podem exigir componentes complementares com outras particularidades, como por exemplo a introdução de pás, feita num FR secador, que possibilitam uma melhor mistura da carga, auxiliam no transporte e permitem uma melhor transferência de calor através de um maior contacto com a parede interior [23, 58], ou ainda sistemas de injeção de ar, para processos que exijam a presença de oxigénio, como a combustão ou gaseificação [30].

Dependendo do objetivo e do sistema de alimentação, o FR pode operar em modo contínuo ou intermitente. O regime de operação mais comum é o contínuo, onde existe um fluxo constante de material a ser introduzido, com um sistema de alimentação e

descarga automatizados. No regime intermitente o material é introduzido em fornadas. Pode existir também um sistema misto, ou semi-contínuo, onde a alimentação é feita em intervalos de tempo mais curtos, mas não contínuos [23].

Existem duas configurações possíveis: concorrente e contracorrente. Na primeira configuração o material e gases circulam no mesmo sentido, na segunda circulam em sentidos contrários. A configuração mais comum no processamento de matéria-prima é a contracorrente [24], que se encontra na Figura 5. Já em processos de obtenção de energia é a concorrente, devido à necessidade de introdução de uma câmara de pós-combustão à saída dos gases [22, 43]. Apesar de não ser muito comum nestas aplicações, a configuração contracorrente também é possível [59].

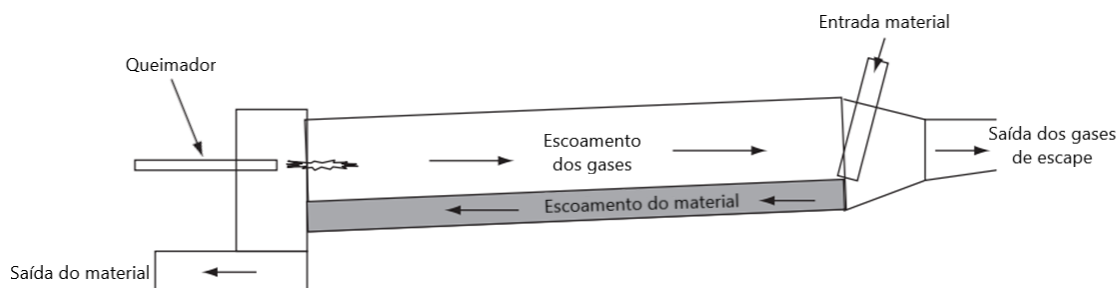


Figura 5 – Diagrama do escoamento num FR contracorrente com aquecimento direto.
Adaptado de [24]

Os fornos podem também discernir na forma como é trocado o calor entre os sólidos e os gases, podendo haver, ou não, contacto direto entre os mesmos [24]. No aquecimento direto o queimador está presente no interior do forno, já no aquecimento indireto, a transferência de calor é feita através da superfície do FR, que é aquecida externamente [23, 24]. O aquecimento direto é o mais aplicado, sendo o método indireto empregue no processo de pirólise ou quando a reação termoquímica possa gerar gases perigosos que devem ser estritamente isolados do ambiente exterior [24].

2.2.2. Parâmetros

2.2.2.1. Tempo de residência

O tempo de residência é uma das características mais importantes do FR, que se traduz no tempo de permanência dos sólidos no interior do forno [26]. Este parâmetro influencia a transferência de massa e calor, e determina a fração de gás, sólidos e líquidos resultantes da reação termoquímica [26, 27]. A transferência de calor é importante pois

está diretamente associada à distribuição de temperatura e, portanto, à eficiência de combustão e as respetivas emissões. O controlo do tempo de residência é fulcral para garantir uma combustão completa e uma qualidade uniforme dos produtos da reação [24].

O tempo de residência (τ) [s] pode ser obtido a partir da Equação 1 [26]:

$$\tau = \frac{M}{\dot{m}} \quad (1)$$

onde M é a quantidade mássica de combustível no interior do forno [kg] e \dot{m} o caudal mássico de combustível fornecido [kg/s].

Porém esta equação não é suficiente para prever a dependência do tempo de residência com outras variáveis. Existem, para tal, diversas expressões empíricas que explicitam esta dependência. Estas variáveis podem ser divididas em dois grupos: parâmetros relacionados com o forno (como a geometria, a velocidade de rotação e a inclinação) e parâmetros do material (como o tipo de material, a granulometria e a massa volúmica) [27]. Os autores Lasek et al. [27] determinaram experimentalmente o tempo de residência ótimo para cinco tipos de biomassa, e compararam os valores com seis expressões empíricas. Concluíram ser a proposta apresentada por Njeng et al. (Equação 2), a que melhor se ajustou aos dados obtidos experimentalmente.

$$\tau = k \frac{\rho_{ap} L D^2}{\dot{m}} \left(\frac{N^2 D}{g} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{D_{abert.}}{D} \right)^{\alpha_2} (\theta)^{\alpha_3} (S)^{\alpha_4} \left(\frac{\dot{m}}{\rho_{ap} N L D^2} \right)^{\alpha_5} \left(\frac{4 S_{pás}}{\pi D^2} \right)^{\alpha_6} \left(\frac{\rho_{ap}}{\rho_{ap,c}} \right)^{\alpha_7} \left(\frac{L}{D} \right)^{\alpha_8} \quad (2)$$

onde τ é o tempo médio de residência [min], k é uma constante que depende do número e formato das pás internas, ρ_{ap} a massa volúmica aparente [kg/m³], L o comprimento do forno [m], D o diâmetro interno do forno [m], \dot{m} o caudal mássico de material [kg/s], N a velocidade de rotação [rpm], g a aceleração da gravidade [m/s²], $D_{abert.}$ o diâmetro de abertura de saída efetivo [m], θ o ângulo de repouso [°], S a inclinação do forno [°], $S_{pás}$ a secção do forno não coberta por partículas sólidas contidas nas pás internas [m²], $\rho_{ap,c}$ a massa volúmica aparente compacta [kg/m³] e α_{1-8} representam parâmetros de ajuste.

A análise de cada uma das variáveis que afetam o tempo de residência permite aferir uma das vantagens deste forno: a possibilidade de regular o tempo de residência, sem modificar a geometria do mesmo nem as propriedades do combustível. Apesar de noutros fornos também ser possível modificar este parâmetro, por exemplo num forno de

leito fluidizado é possível variar a velocidade dos gases, ou num forno de grelha móvel é possível aumentar a velocidade da grelha, o controlo é limitado [48]. Num FR o controlo é mais flexível e é conseguido ajustando os parâmetros de operação: velocidade de rotação, caudal mássico e, caso seja possível, inclinação [27]. A possibilidade de ajustar este parâmetro é o principal motivo da versatilidade do FR, já que cada material possui características físicas e geométricas distintas, e assim necessitam de tempos de residência ótimos diferentes para a reação termoquímica finalizar [24, 27]. A alteração do tempo de residência permite que o FR tenha maior capacidade de se adaptar a diversos tipos de matérias-primas ou combustíveis.

O estudo apresentado em Lasek et al. [27], para além de analisar a capacidade previsional das equações empíricas que preveem o tempo de residência, avalia também a correlação deste termo com os parâmetros de operação mencionados. Os autores concluíram que um aumento da velocidade de rotação, ou da inclinação, permite diminuir o tempo de residência e a fração de enchimento do forno (fração da secção transversal do FR ocupada pelos sólidos). Mellmann [28] verificou que um aumento do caudal mássico causa uma diminuição do tempo de residência, até atingir um ponto crítico, depois do qual o tempo de residência aumenta com o aumento do caudal. Este ponto crítico define o instante em que o caudal mássico, e a fração de enchimento do forno, são tais que sucede uma transição na forma como os sólidos se deslocam no plano transversal – passam de um movimento de escorregamento ao longo das paredes, para um movimento em queda, onde já existe alguma agregação dos sólidos às superfícies do forno. Devido à importância da forma como os sólidos se movimentam no interior do forno, tanto para o tempo de residência, como para a qualidade da combustão, serão estudados com mais detalhe no subcapítulo 2.2.2.2.

2.2.2.2. Movimento da matéria no interior do forno

O movimento da matéria no interior do forno é outra das ferramentas para avaliar e melhorar o desempenho do FR [24, 28]. Determinados tipos de movimento podem ser propícios a tornar a reação incompleta, não sendo os desejados, enquanto outros garantem uma boa mistura do combustível, possibilitando uma combustão com qualidade [28, 29].

O movimento dos sólidos ocorre sobre duas componentes: o movimento na direção axial e o movimento no plano transversal. O movimento na direção axial está

relacionado com o tempo de residência; um movimento mais célere, implica tempos de residência menores. O movimento no plano transversal influencia a velocidade que ocorre a reação termoquímica e a qualidade da mistura e transferência de calor entre a carga, os gases e as paredes do forno [24]. Apesar de serem dois fenômenos interligados, na literatura consultada [23, 24, 26] são tratados de forma independente.

O movimento axial representa o escoamento da matéria na direção longitudinal. O avanço é dependente da ação simultânea da gravidade e da rotação do forno. O auxílio da gravidade no escoamento é feito através da inclinação do FR. Esta combinação de efeitos permite criar um ângulo aparente de avanço que possibilita o escoamento da carga [24].

O movimento transversal está associado à forma de movimento dos sólidos no plano transversal. Tem impacto na qualidade da combustão, nomeadamente na mistura dos sólidos e na transferência de calor, e no próprio movimento axial, e, portanto, no tempo de residência. Assim, é importante estudar e identificar as formas de movimento transversal que possam existir, de forma a averiguar as que mais beneficiam o desempenho [24]. Bojanovský et al. [23] e Mellmann [28] identificam sete tipos de movimento e categorizam-nos em três grupos, que se encontram na Figura 6.

Grupo	Movimento de escorregamento		Movimento em queda			Movimento em catarata	
Subtipo	Escorregamento Constante	Escorregamento Intermitente	Avalanche	Rolamento	Cascata	Catarata	Centrifugo
Esquema							

Figura 6 – Movimento transversal da carga no interior do FR. Adaptado de [28]

Com base na Figura 6 e nas referências [23, 24, 28], encontram-se a seguir explanados os três grupos e indicados os subtipos de movimento respetivos.

- **Movimento de escorregamento**

Inclui o movimento de escorregamento constante e escorregamento intermitente. Ocorre em condições de atrito desfavoráveis entre a parede interna do forno e o leito de sólidos. É um efeito indesejável que deve ser evitado, já que é caracterizado por não haver

propriamente uma mistura. Como resultado, a camada de sólidos exposta é sempre a mesma, prejudicando a transferência de calor e, por consequência, o gradiente de temperatura, gerando uma reação incompleta. A diferença entre os dois tipos de escorregamento está no atrito entre o forno e o leito de sólidos – no escorregamento intermitente o atrito da parede interna é superior. Também o ângulo de repouso, isto é, o ângulo entre o plano horizontal e o leito de sólidos durante a rotação, varia nos dois modos. No movimento de escorregamento constante o ângulo de repouso é baixo e aproximadamente constante, no escorregamento intermitente o ângulo varia em períodos alternados conjuntamente com a rotação do forno, atingindo valores máximos superiores (o leito de sólidos adere à parede em rotação até um determinado ângulo de repouso, e volta a escorregar um tempo depois). As formas de evitar estes movimentos passam por garantir uma maior velocidade de rotação e uma maior rugosidade nas paredes internas.

- **Movimento em queda**

Inclui os movimentos de avalanche, rolamento e cascata. É caracterizado por velocidades de rotação mais elevadas que as presentes no efeito de escorregamento, e um atrito suficiente das paredes internas do forno que permite a adesão entre estas e a matéria-prima, evitando o escorregamento. Desta forma, existe uma mistura contínua da carga. É a categoria de movimento mais comum e desejada num FR. Entre os vários tipos de movimento, o rolamento é o preferido, já que proporciona as melhores condições de operação, nomeadamente uma melhor transferência de calor, que origina uma reação mais uniforme e completa. O que difere os três subtipos de movimento é a velocidade de rotação e a fração de enchimento. Com maiores velocidades de rotação e maior fração de enchimento, o movimento tende a ser em cascata, com a diminuição destes parâmetros tende a ser em avalanche.

- **Movimento em catarata**

Inclui os movimentos em catarata e centrífugo. Estes tipos de movimento ocorrem com velocidades de rotação superiores aos movimentos de queda. Este aumento de velocidade causa o “desprendimento” de partículas que estavam aderidas às paredes do forno, que acabam por ser projetadas para outra zona da parede que não estava previamente ocupada pelo leito material. A diferença entre os dois subtipos de movimento está no quão pronunciado este efeito o é. Nos casos mais extremos ocorre o movimento

centrífugo, onde se observa que o material sólido cobre completamente as paredes internas do FR. Os movimentos em catarata são habitualmente desaconselhados num FR, já que não trazem vantagens adicionais face ao movimento de rolamento. Para além disso, requerem velocidades de rotação elevadas e ainda pode submeter o FR a danos estruturais internamente. Há, no entanto, casos em que este movimento é desejado, como por exemplo na moagem de materiais.

O tipo de movimento transversal pode ser caracterizado recorrendo ao número de Froude (Fr), que representa o rácio entre as forças centrífuga e gravítica. O cálculo deste parâmetro encontra-se na Equação 3 [23].

$$Fr = \frac{\omega^2 \cdot R}{g} = \frac{(2\pi N)^2 \cdot R}{3600 \cdot g} \quad (3)$$

onde ω é a velocidade angular [rad/s], R o raio interno do FR [m], g a aceleração da gravidade [m/s^2] e N a velocidade de rotação [rpm].

Na Tabela 1 encontram-se os valores do número de Froude, a título de exemplo, típicos de cada movimento. De notar que os valores apresentados não são fixos, dependem do tipo de material a ser processado [24, 28].

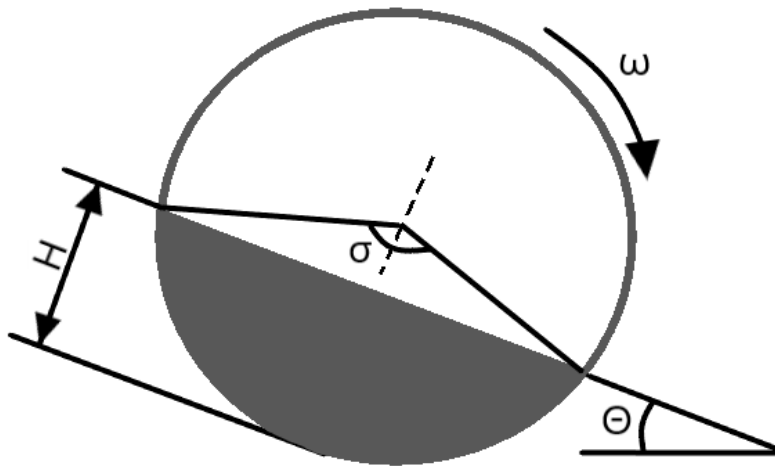
Tabela 1 – Movimento transversal e o intervalo do número de Froude associado [28]

Tipo de movimento	Número de Froude
1. Escorregamento constante	$0 < Fr < 10^{-4}$
2. Escorregamento intermitente	
3. Avalanche	$10^{-5} < Fr < 10^{-3}$
4. Rolamento	$10^{-4} < Fr < 10^{-2}$
5. Cascata	$10^{-3} < Fr < 10^{-1}$
6. Catarata	$0,1 < Fr < 1$
7. Centrífugo	$Fr \geq 1$

Existem muitos outros parâmetros que ajudam a caracterizar um FR [24, 28]. Contudo, os parâmetros que melhor definem o seu desempenho são o número de Froude, que indica o tipo de movimento transversal, e o tempo de residência, parâmetro fulcral para controlar a qualidade do produto [23], ambos já elucidados. Porém, outros dois parâmetros já referidos, o ângulo de repouso e a fração de enchimento, têm também a sua devida importância quando se analisa o movimento da matéria no interior do forno,

principalmente porque o número de Froude, por si só, pode não ser suficiente para prever o tipo de movimento. Por este motivo, será feito um esclarecimento mais pormenorizado destas duas variáveis.

O ângulo de repouso é o ângulo que ocorre durante a rotação entre o plano horizontal e o leito de sólidos. Numa definição mais física, pode ser definido como o ângulo que diferencia a transição entre as fases de adesão, quando o material está aderido à superfície do forno, e deslizamento, o instante em que os sólidos se desprendem dessa superfície e voltam para o leito [60]. É uma variável muito presente sempre que se menciona o escoamento de sólidos no FR já que se relaciona com o fenómeno de mistura dos materiais [27]. O ângulo de repouso está representado na Figura 7 pela letra Θ .



**Figura 7 – Seção transversal do FR com algumas características geométricas.
Adaptado de [24]**

Para além do ângulo de repouso, na Figura 7 encontra-se também o ângulo de enchimento, σ , a velocidade angular, ω , e a altura do leito do material, H . A altura do leito do material e o ângulo de enchimento são parâmetros também utilizados para auxiliar a identificação do tipo de movimento de sólidos [24].

Dos autores revistos [27, 61, 62] é consensual que o ângulo de repouso seja dependente, quase na totalidade, da coesão e adesão das partículas às paredes internas do FR, isto é, depende das características do material a ser processado e também das características construtivas do FR. Também é consensual, entre as referências revistas, que, contraintuitivamente, o ângulo de repouso não depende da velocidade de rotação.

O ângulo de repouso, geralmente, não tem um valor fixo, variando ao longo do tempo durante o processamento do material. No movimento de avalanche, por exemplo, o comportamento é mais cíclico, e o ângulo de repouso pode ser caracterizado pela forma de um intervalo, onde o valor máximo é atingido imediatamente antes de ocorrer um deslizamento [62]. No movimento de rolamento também ocorre deslizamento, contudo é constante, e não periódico, por conseguinte o ângulo de repouso é aproximadamente invariável. Os valores variam comumente entre 30-50°, apenas diferindo deste intervalo para casos excepcionais [27].

A fração de enchimento representa a percentagem da área transversal ocupada pelos sólidos [24]. Outros autores, como Bojanovský et al. [23], descrevem a fração de enchimento como a percentagem de volume do FR preenchida com o material sólido. Esta variável pode ser determinada com o ângulo de enchimento (σ) [28], representado na Figura 7. A fração de enchimento influencia os tipos de movimento originados e a transferência de calor [28]. Em Henein et al. [58] são introduzidos diagramas que permitem identificar alguns tipos de movimento da matéria-prima (avalanche, rolamento ou a transição entre estes), para determinados materiais, como função do número de Froude e da fração de enchimento. Identificaram também que é possível fazer a mesma análise mas em função da altura do leito do material (representado pela letra H na Figura 7) e da velocidade de rotação.

2.2.2.3. Transferência de calor no forno

Uma das vantagens desta tecnologia é a transferência de calor mais eficiente relativamente a outros fornos. Isto ocorre, em parte, devido à forma como a matéria-prima se movimenta no interior do forno [24].

O fenómeno de transferência de calor, tal como o movimento da matéria no interior do forno, é bastante complexo, quer seja pelo próprio movimento da matéria, ou pela existência de inúmeros processos de transferência de calor, o que torna difícil criar modelos adequados [24]. Adicionalmente, introduzir sistemas de medição num FR é difícil devido às suas características construtivas. Portanto, a criação de modelos de transferência de calor requer muitas simplificações que podem ser, por exemplo, reduzir o fenómeno tridimensional a uma, ou duas, dimensões, ou considerar um regime

estacionário em vez de transiente. Entender este processo é um passo para melhorar a reação final e diminuir o tempo de residência, otimizando a produtividade [29].

No interior do FR ocorrem os três fenômenos principais de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Alguns destes mecanismos de transmissão foram identificados por Liu et al. [29] e encontram-se na Figura 8.

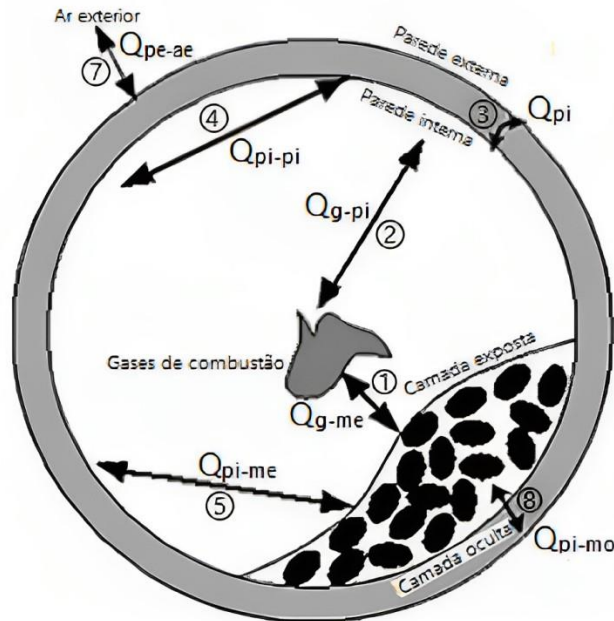


Figura 8 – Mecanismos de transferência de calor num FR. Adaptado de [29]

Os mecanismos de transferência de calor num FR descritos pelo trabalho referido são os seguintes [29]:

- 1) Q_{g-me} : convecção e radiação dos gases de combustão do combustível com a camada do material exposta;
- 2) Q_{g-pi} : condução e convecção dos gases de combustão do combustível com a parede interna do forno;
- 3) Q_{pi} : condução entre a parede interna e parede externa;
- 4) Q_{pi-pi} : convecção e radiação entre as paredes internas;
- 5) Q_{pi-me} : convecção e radiação entre as paredes internas e a camada material exposta, ou ativa;
- 6) Q_{pi-mo} : condução entre parede interna e a camada material oculta, ou passiva;
- 7) Q_{pe-ae} : convecção e radiação da parede externa com o ar exterior.

Alguns destes mecanismos ocorrem apenas em fornos rotativos com aquecimento direto. Nos fornos com aquecimento indireto, o calor é transferido para o interior do forno apenas pelas superfícies internas do mesmo. Os mecanismos de condução, convecção e radiação encontram-se também presentes [24].

Existem também transferências de calor no interior do leito do material. Boateng [24] indica dois destes fenómenos para materiais granulares: a condução e radiação entre partículas, e a convecção intersticial entre o gás e partícula. O autor refere ainda a importância do movimento transversal para o processo de transferência de calor (causado pela rotação do forno): a mistura dos sólidos possibilita uma mistura entre as partículas do material, criando uma nova camada exposta continuamente, e proporcionando às partículas com maior energia térmica, ingressarem em zonas do leito mais frias, fornecendo-lhes calor. Este processo é conhecido como advecção. Segundo o autor, este fenómeno é um dos grandes influentes para a boa transferência de calor no FR.

2.3. Utilização da biomassa em fornos rotativos

Neste subcapítulo é descrito o conceito, tipos e métodos de conversão da biomassa, e são indicados exemplos da aplicação da biomassa no FR.

2.3.1. Biomassa

2.3.1.1. Definição e tipos de biomassa

Segundo o que já foi referido, a biomassa representa, na Diretiva 2001/77/EC, a “fração biodegradável de produtos e resíduos de agricultura (incluindo substâncias vegetais e animais), floresta e indústrias conexas, bem como a fração biodegradável dos resíduos industriais e urbanos”. Assim pode-se dividir o termo biomassa em cinco classes: biomassa de resíduos florestais, de resíduos agrícolas, de excreção animal, de resíduos sólidos urbanos e de culturas energéticas.

- **Biomassa de resíduos florestais**

Inclui apenas os resíduos florestais e resíduos das indústrias de transformação de madeira [33, 63]. É a fonte de biomassa com maior importância em Portugal e a mais utilizada em centrais termoelétricas. A razão principal deve-se à elevada disponibilidade deste recurso (a floresta cobre mais de um terço do território nacional), mas também à

maior densidade energética. As espécies mais predominantes em Portugal são o eucalipto, o pinheiro-bravo, o sobreiro e a azinheira [19].

- **Biomassa de resíduos agrícolas**

Incluem os resíduos agrícolas e das indústrias agro-alimentares e os seus efluentes [63]. Alguns exemplos são os subprodutos da horticultura, produção de azeite e produção de vinho [19].

- **Biomassa de excreção animal**

Provenientes da exploração pecuária [63]. As excreções animais são comumente utilizadas para produção de biogás através do processo de digestão anaeróbica [19].

- **Biomassa de resíduos sólidos urbanos**

São constituídos pelos resíduos domésticos e de atividades comerciais, onde se incluem as águas residuais. A principal utilização é em produção de energia através de incineração ou a extração de metano em aterros. A utilização destes resíduos possibilita a valorização energética e a redução do impacto dos aterros sanitários no ambiente [19, 33].

- **Biomassa de culturas energéticas**

Inclui a biomassa plantada dedicadamente para produção energética [19]. São constituídas por culturas de curta duração que permitem suportar, ou até expandir, os consumos de biomassa [19, 63]. A possibilidade destas espécies de rápido crescimento serem plantadas próximas dos locais de consumo é também uma vantagem acrescida [19].

Devido à sua presença e possibilidade de utilização plurifacetada, juntamente com o facto de ser renovável, a biomassa tem vindo a ser cada mais utilizada [19]. O aproveitamento da biomassa para fins energéticos, particularmente dos resíduos florestais, traz inúmeras vantagens, entre as quais os benefícios ambientais (a utilização da biomassa pode ser considerada de carbono nulo), o desenvolvimento de zonas rurais, a criação de emprego e a capacidade de produzir energia despachável [64]. Todos os tipos de biomassa, à exceção de culturas energéticas, permitem também aproveitar um recurso energético que de outra forma seria desperdiçado, e no caso dos resíduos, quando é utilizado um tratamento térmico a altas temperaturas, é possível reduzir a quantidade de

compostos tóxicos e prejudiciais, que de outra forma podiam acabar por ser libertados para o ambiente caso fossem para aterros sanitários [43].

Uma das vantagens destacadas no parágrafo anterior, relaciona-se com a neutralidade carbónica inerente à utilização da biomassa e ao facto de se considerar como uma fonte de energia renovável. A neutralidade carbónica refere-se a um balanço de emissões nulo, quer isto dizer que a fonte de combustível pode emitir $\text{CO}_{2,\text{eq}}$, como é o caso da queima de biomassa, mas é novamente absorvido ou sequestrado de outra forma. No caso da biomassa vegetal a compensação é feita pela mesma ao longo do seu ciclo de vida, isto é, o CO_2 emitido pela espécie durante a conversão, não é mais do que o que foi capturado ao longo do seu crescimento através da fotossíntese, pelo que não há uma libertação acrescida deste gás. Já no caso dos combustíveis fósseis o mesmo não se aplica, já que o carbono contido nos mesmos não iria ser libertado para a atmosfera se não fosse pela atividade humana [18]. A biomassa também é considerada renovável porque a sua utilização sustentada permite que a regeneração natural ocorra num espaço de tempo mais curto que o caso dos combustíveis fósseis, promovendo uma utilização cíclica. Assim, a utilização da biomassa florestal deve ser racionada, para que a exploração das florestas não seja mais rápida do que a capacidade de sequestrar carbono, e se crie um défice na capacidade de absorção de carbono, como é o caso de Portugal segundo o relatado pela associação ZERO [65]. Apesar de os resíduos sólidos urbanos não serem o tipo de biomassa com maior interesse para produção energética, muito devido ao menor poder calorífico e maior dificuldade na combustão, é importante referir que estes resíduos são reconhecidos por muitos autores também como uma fonte renovável. Em parte, porque muitos destes resíduos possuem quantidades significativas de papel, resíduos alimentares, madeira, entre outros, e porque de outra forma poderiam acabar em aterros sanitários e, neste caso, o $\text{CO}_{2,\text{eq}}$ emitido seria maior devido à libertação de metano. Isto acontece porque o metano é também um GEE, mas possui um potencial de aquecimento global superior ao CO_2 [66].

A utilização da biomassa para fins energéticos possui desvantagens, algumas das quais estão indicadas a seguir:

- Se a utilização não for devidamente controlada, a biomassa pode não ser considerada uma energia renovável;

- Relativamente a outras fontes de energia renovável, a biomassa requer uma logística de abastecimento de combustível (tal como os combustíveis fósseis), o tempo de construção da central é mais moroso e os custos de investimento, operação e manutenção são mais elevados [54, 64];
- Apesar da biomassa de resíduos florestais (biomassa com maior importância em Portugal) estar altamente difundida pelo território nacional, apenas 2,5% do território florestal pertence a entidades públicas, o que pode dificultar a utilização, e apenas 34% dos resíduos florestais disponíveis são economicamente e ambientalmente viáveis de ser utilizados para produção energética [19];
- A biomassa de resíduos florestais, como substituição dos combustíveis fósseis, tem uma densidade energética e massa volúmica aparente mais baixa (que prejudica o processo de transporte e armazenamento), e o inconveniente da sua localização estar espacialmente mais dispersa [19];
- A geração de cinza na combustão da biomassa, também comum no carvão, causa problemas operacionais [18]. Existe também a necessidade logística para descartar as largas quantidades de cinza criadas, que acarreta mais custos. Algumas soluções para o fim de vida das cinzas podem ser a sua reciclagem, com a reintrodução nos solos, se não prejudicar a qualidade dos mesmos, a utilização em materiais de construção, o uso como fertilizante, e no caso de cinzas com alto teor de carbono, podem voltar a servir como combustível, sendo por exemplo comprimidas em briquetes [17].

2.3.1.2. Propriedades da biomassa

Identificar as propriedades da biomassa permite avaliar a viabilidade de determinados processos de conversão e a viabilidade global do aproveitamento da biomassa, permitindo também detetar certas dificuldades que possam ocorrer durante o processamento [18]. McKendry [18] identifica sete propriedades importantes, direta ou indiretamente, para os processos de conversão termoquímica de biomassa, e são elas o teor de humidade, poder calorífico, teor de carbono fixo e matéria volátil, teor de cinzas, análise elementar, teor de metais alcalinos e massa volúmica aparente. Estas propriedades apresentam-se descritas a seguir.

- **Teor de humidade**

Representa a massa de água presente no material face à massa total do mesmo, e é geralmente expresso em percentagem. A humidade influencia negativamente o poder calorífico e o rendimento da combustão [67], pelo que tem uma enorme influência nos processos termoquímicos, particularmente na combustão, onde é recomendado um teor de humidade inferior a 20%. Tendo em conta que alguns tipos de biomassa possuem um teor de humidade mais elevado, por exemplo as lascas de madeira podem conter 50% de água, em muitos casos é necessário um processo de secagem antes da biomassa ser processada, que acarreta mais custos monetários e energéticos, pelo que se torna importante balancear estes custos com as vantagens trazidas pela diminuição da humidade. Para uma humidade mais elevada (80-90%) são normalmente utilizados processos bioquímicos, já que se torna muito dispendioso recorrer ao processo de secagem [21].

- **Poder calorífico**

Representa o conteúdo energético da biomassa ou a energia capaz de ser libertada na forma de calor, durante a combustão. É uma unidade expressa em energia por unidade de massa. Pode ser apresentado de duas formas: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). O PCS contém a energia total libertada durante a combustão, pelo que inclui também a energia latente necessária para vaporizar a água. Assim, representa a energia máxima teórica capaz de ser recuperada. Normalmente a energia contida no vapor de água não pode ser utilizada, portanto, utiliza-se o PCI em vez do PCS, que representa apenas a parcela de energia libertada (ou energia útil), na forma de calor sensível, durante a combustão. A biomassa de origem florestal é tipicamente a que possui um PCI mais elevado, superando os 18 MJ/kg, já o carvão utilizado em centrais termoelétricas possui um PCI superior, que varia entre os 20-30 MJ/kg [18].

- **Teor de carbono fixo e matéria volátil**

A matéria volátil representa o gás libertado durante o aquecimento da biomassa. O carbono fixo representa a massa remanescente após a libertação da matéria volátil, excluindo as cinzas e a água presentes. Estes dois parâmetros são importantes para avaliar

a facilidade com que a biomassa entra em ignição e é de seguida parcial, ou totalmente, oxidada [18].

- **Teor de cinzas**

As cinzas ocorrem como um subproduto durante a reação de combustão da biomassa [18]. Estas apresentam dois inconvenientes operacionais no processamento termoquímico: um maior teor de cinzas reduz o conteúdo energético disponível e as temperaturas elevadas, típicas da combustão, liquefazem as cinzas, que reduzem o rendimento da central e causam maiores custos operacionais [18, 68]. Resíduos metabólicos de animais são os que apresentam um maior teor de produção de cinzas, e a biomassa de origem florestal a que apresenta um teor menor [68].

- **Análise elementar**

A análise elementar e a análise imediata são os dois tipos de análise de biomassa mais comuns. As propriedades anteriores (o teor de humidade, o teor de carbono fixo e matéria volátil, o teor de cinzas e o poder calorífico) estão incluídas na análise imediata. A análise elementar engloba as propriedades relacionadas com a identificação e quantificação dos elementos químicos presentes na biomassa e cinzas [18]. A biomassa de origem florestal é constituída por carbono (50%), oxigénio (44%), hidrogénio (6%) e outros elementos químicos em baixa quantidade [33]. A biomassa de resíduos agrícolas é constituída, tipicamente, por menos carbono e mais elementos indesejáveis, como o azoto e enxofre. Quando mais elevado for o rácio hidrogénio/carbono, e mais baixo for o rácio oxigénio/carbono, mais elevado é o poder calorífico [18].

- **Teor de metais alcalinos**

Tem importância na qualidade dos processos termoquímicos, já que a reação destes metais com a sílica, presente na cinza, produz um composto líquido e pegajoso que pode prejudicar a reação, por exemplo obstruindo as tubagens de ar do forno [18].

- **Massa volúmica aparente**

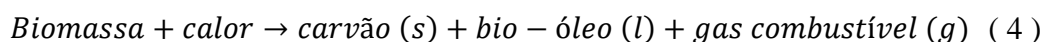
É relevante, sobretudo, na cadeia de abastecimento da biomassa, particularmente no transporte e armazenamento [18]. Geralmente fontes de biomassa com maior massa volúmica aparente, têm maior interesse de exploração no ponto de vista económico [17].

2.3.1.3. Tecnologias de conversão de biomassa

O aproveitamento da biomassa pode ser feito recorrendo a processos físico-químicos, termoquímicos e bioquímicos [21]. Os processos com relevância para este TFM são os termoquímicos, dos quais se podem identificar três subprocessos: combustão, pirólise e gaseificação. Cada um destes garante produtos de reação diferentes, pelo que os objetivos de utilização diferem [30].

- **Pirólise**

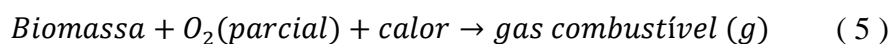
Na pirólise ocorre a conversão da biomassa em produtos na forma sólida, líquida e gasosa. O processo é feito aquecendo a biomassa, na ausência de oxigénio, a temperaturas que rondam os 500 °C [30]. A temperatura e a rapidez de aquecimento influenciam o teor de cada uma das fases obtidas. Tendo em conta o modo de aquecimento pode-se classificar o processo de pirólise, simplificada, em pirólise rápida e pirólise lenta. A pirólise rápida tem associada um aquecimento mais rápido e produz uma maior fração de líquidos (tipicamente 75%). A pirólise lenta tem um aquecimento mais gradual e tendencialmente gera mais sólidos, isto é, carvão vegetal ou resíduos carbonosos (tipicamente 80%) [21]. Os subprodutos podem ser queimados para produção de energia elétrica recorrendo, por exemplo, a um sistema baseado no ciclo de turbina a vapor. O gás-combustível pode alternativamente ser queimado numa turbina de gás [20]. O bio-óleo pode ser também aplicado num motor de combustão interna, como uma alternativa renovável aos combustíveis derivados do petróleo [30, 32]. Devido à necessidade energética para ocorrer o processo de conversão, a pirólise ocorre, tipicamente, sob uma reação endotérmica, que pode ser descrita pela Equação 4 [32]:



- **Gaseificação**

Na gaseificação ocorre a conversão da biomassa para um composto gasoso. Este composto gasoso pode ser intitulado gás produto ou gás síntese [30]. O gás produto é obtido quando se utiliza o ar como agente oxidante, que resulta num menor poder calorífico. O gás síntese possui um poder calorífico maior e é produzido através do aquecimento indireto ou com a utilização do oxigénio como agente oxidante [69]. Contudo, não é comum diferenciar estes dois produtos, geralmente utiliza-se apenas o

termo “gás síntese” para todos os tipos de combustível resultantes da gaseificação [69], que será a terminologia utilizada daqui em diante. A gaseificação decorre na presença de oxigénio em condições subestequiométricas e a altas temperaturas (800-900°C), pelo que se trata de uma combustão incompleta, com reações endotérmicas e exotérmicas [30]. O processo de gaseificação dá-se em quatro etapas: secagem, pirólise, combustão e gaseificação. A secagem é a primeira fase, onde decorre a redução da humidade da biomassa; na pirólise há a decomposição da mesma; na combustão dá-se a reação parcial do oxigénio e a consequente libertação de energia; na gaseificação/redução origina-se o gás síntese [70]. Estes quatro processos vão originar um gás combustível, que pode ser queimado diretamente ou ser usado como combustível numa turbina de gás ou motor de combustão interna [30]. A reação pode ser descrita, na sua forma endotérmica, pela Equação 5 [32]:



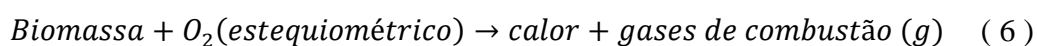
- **Pirólise e gaseificação**

A pirólise e a gaseificação revelam-se como métodos de conversão de biomassa mais ambientais, já que os produtos da reação são menos nocivos. Estes métodos são utilizados para a valorização de resíduos urbanos e industriais, como alternativa mais ecológica à incineração [23]. São também aplicados para a conversão de outros tipos de biomassa, em produtos com maior valor energético, como bio-óleos, carvão vegetal e gás síntese. Formas de aproveitamento mais avançadas que utilizam estes métodos para produção de eletricidade, também são possíveis [30]. Tais exemplos são a pirólise integrada com ciclo combinado (PICC), gaseificação integrada com ciclo combinado (GICC), pirólise integrada em ciclo regenerativo (PICR) [20, 71], ou ainda a pirólise, ou gaseificação, integrada num ciclo com cogeração [72, 73]. Todos estes métodos permitem obter rendimentos mais elevados que a queima direta da biomassa.

- **Combustão**

Na combustão ocorre a queima da biomassa, isto é, a reação química da biomassa com o agente oxidante. A energia química contida na biomassa é transformada em calor, através da queima a altas temperaturas. Este calor pode ter como finalidade o aquecimento e/ou a produção de energia mecânica ou eletricidade [30]. Se ocorrer a oxidação total do

combustível, o gás de combustão é totalmente inerte, contendo CO₂, H₂O (água) e NO_x. Se o oxigênio não oxidar completamente a biomassa, a combustão é incompleta. Neste caso, são formados, ou não são totalmente queimados, outros compostos prejudiciais, como o CO, e o rendimento de conversão é mais baixo. Para evitar que tal aconteça, o excesso de ar deverá ser entre 5-50% superior à quantidade estequiométrica [21]. Outras fontes de ineficiências no processo são a perda de calor nos gases de escape (podem ser reduzidas num sistema de cogeração), e a perda de calor por convecção e radiação para o exterior. A combustão, de forma similar à gaseificação, pode ser dividida em quatro etapas: secagem, pirólise, combustão da matéria volátil e combustão do resíduo carbonoso, com a principal diferença a residir na última etapa onde ocorre a combustão do produto sólido da pirólise, em vez da redução, pelo que é um processo puramente exotérmico [21, 30]. A reação pode ser descrita pela Equação 6 [32]:



2.3.2. Exemplos de aplicação

Uma das características que torna o FR uma tecnologia apelativa para a conversão de biomassa é a sua versatilidade. As diferentes classes de biomassa (florestal, agrícola, resíduos urbanos, entre outros) têm características distintas (poder calorífico, teor de cinzas, humidade, etc.), variando até entre os diferentes tipos de biomassa dentro da mesma classe (já que pode variar a granulometria, geometria, entre outros). Quando os combustíveis disponíveis são altamente heterogêneos, o FR revela-se uma tecnologia promissora, no sentido que uma das suas maiores vantagens é a sua versatilidade a diferentes fontes de matéria com diversas granulometrias, não se limitando a receber apenas um tipo de biomassa [24].

A indústria de produção de cal e cimento é o setor onde mais se utiliza o FR. Estes processos de produção têm elevadas despesas energéticas e utilizam frequentemente combustíveis fósseis como vetor energético. Devido à exigência de políticas ambientais para uma diminuição do impacto ambiental deste setor, causado precisamente pela utilização de energias fósseis, a indústria viu-se obrigada a reduzir o consumo deste tipo combustível e em parte, ou na totalidade, substituí-lo por outro combustível que permitisse reduzir a pegada carbónica. A utilização de biomassa revelou-se como a grande

alternativa, podendo substituir completamente os combustíveis fósseis nalguns tipos de biomassa, ou então ser utilizada como co-combustível com o carvão [74]. A empresa Valmet [75], num estudo em pequena escala, verificou que seria possível a madeira em pó substituir em 100% os combustíveis fósseis, desde que tivesse uma humidade inferior a 5% e fosse utilizado um queimador apropriado.

O FR também está presente na área da incineração de resíduos. Revela-se uma tecnologia importante para os resíduos sólidos potencialmente perigosos, resíduos oleosos, resíduos hospitalares, pneus e lamas provenientes do tratamento de águas residuais [23]. A vantagem desta tecnologia, perante outras, está na capacidade de suportar elevadas temperaturas e na aceitação de resíduos altamente heterogéneos [23, 43]. A incineração é um processo de tratamento térmico a altas temperaturas, na presença de oxigénio em excesso, utilizado como uma forma de eliminar, ou reduzir, compostos tóxicos e prejudiciais, e ao mesmo tempo fazer o aproveitamento energético destes resíduos. Num sistema com FR, é necessário instalar uma câmara de pós-combustão para permitir que a queima seja feita na totalidade, e de forma a garantir que os gases tenham o tempo de residência e temperatura necessários por lei [43]. Apesar de apresentarem vantagens que os destacam das demais tecnologias na incineração deste tipo de resíduos, o FR peca numa capacidade menor, necessidade de um espaço maior e maior dificuldade na utilização do calor proveniente da combustão [23]. Na incineração de resíduos urbanos o FR tem uma presença menos evidente que outras tecnologias, como a grelha e o forno de leito fluidizado, que apresentam mais vantagens [23, 43].

O processo de incineração é semelhante à combustão, ambos são processos termoquímicos com oxigénio acima das quantidades estequiométricas, por forma a se obter uma combustão completa, e ambos têm a possibilidade de utilizar a energia libertada para produzir eletricidade. A diferença entre ambos reside no objetivo central de aplicação e no combustível utilizado. A incineração é utilizada como uma técnica para destruir, de forma ambientalmente mais segura, resíduos (que podem ou não ser considerados biomassa) que contenham substâncias perigosas ou indesejadas, reduzindo o seu volume e eliminando substâncias nocivas. Para o conseguir são necessárias temperaturas elevadas e tempos de residência prolongados. Os resíduos urbanos e industriais, são as principais fontes de biomassa utilizadas no processo de incineração. Este tipo de combustível, por si só, não tem interesse de exploração quando o único intuito é a produção de eletricidade

em centrais termoelétricas, já que possuem normalmente uma densidade energética menor, podem ter maior dificuldade em entrar em combustão e não são neutros em carbono, pois não possuem a vantagem da absorção de carbono que ocorre no processo de fotossíntese dos resíduos vegetais (agrícolas e florestais) [23, 43]. Além disso, têm de ser cumpridas condições operacionais (principalmente no que diz respeito à temperatura e tempo de residência) mais exigentes para a decomposição de determinadas substâncias não permitidas nos gases de escape, para estar em conformidade com as regulamentações e leis ambientais, tal como indicado na Diretiva 2010/75/EU. Um dos requerimentos é a obrigatoriedade de temperaturas elevadas, o que aumenta a necessidade de consumo de combustível secundário (tipicamente de origem fóssil) para auxiliar no aumento de temperatura, em especial na câmara de pós-combustão, mesmo que o FR atinja uma combustão autossustentável. Quer isto dizer que no regime de incineração a geração de energia é uma forma de aproveitamento energético, ou seja, uma forma de recuperar calor de uma operação que, por si só, não tem como intuito a produção de energia [43].

A utilização que tem maior importância para o TFM é a que se foca em centrais termoelétricas com FR. Este equipamento pode operar nos seguintes regimes de pirólise, gaseificação ou combustão. Na Figura 9 encontra-se um diagrama que resume as formas de valorização de biomassa para produção de energia elétrica [20, 23, 35, 71].

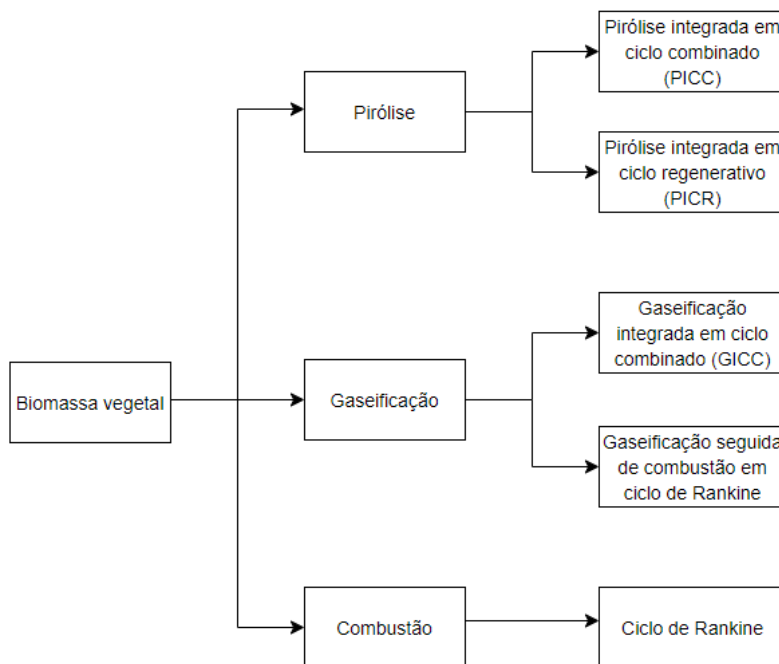


Figura 9 – Formas de valorização da biomassa

Os métodos de conversão pirólise e gaseificação permitem a valorização da biomassa através da transformação da matéria-prima em produtos com maior poder energético e menor impacto ambiental [23]. Segundo Ferreira et al. [19] em 2010 existiam apenas duas unidades de gaseificação registadas no Worldwide Gasification database em Portugal, e nenhuma delas usava o FR. A experiência de Portugal com a pirólise é ainda mais limitada, com as unidades existentes a cingirem-se apenas a casos piloto com outros tipos de fornos [19]. Bojanovský et al. [23] destaca 131 artigos relevantes destes dois processos utilizando a biomassa e FR. No entanto, por pesquisa própria, verificou-se que poucos destes artigos se centram na utilização da gaseificação ou pirólise para produção energética em ciclos avançados (onde os produtos da reação são queimados em equipamentos de combustão interna, como motores de combustão ou turbinas de gás), como a GICC, PICC ou PICR, por exemplo. Ross [69] confirma o averiguado e refere ainda que, de forma geral (para os vários tipos de tecnologias de queima), estes processos ainda se encontram numa fase prematura de desenvolvimento, com a gaseificação a marcar um maior interesse para a comercialização, do que a pirólise. Como a informação destes novos processos é ainda escassa, principalmente quando utilizado o FR, não serão alvo de estudo neste TFM.

Um dos casos mais comuns de valorização energética de biomassa é a combustão direta. Neste processo, a biomassa é queimada diretamente no forno e os gases de escape são utilizados para produzir vapor num ciclo de Rankine. É o método de conversão mais utilizado, tanto porque os custos de capital e operação são mais reduzidos, como permite um ciclo com maior simplicidade [76]. No caso do FR a aplicação não aparenta ser comum, e não foram encontradas referências de centrais termoelétricas a biomassa a utilizar um forno rotativo como unidade de combustão total. Foram, no entanto, encontrados casos de estudo onde se pratica a combustão de biomassa num FR [77, 78, 79]. Contudo, estes casos não se destinam à produção de energia elétrica, mas sim à obtenção do calor para outros processos, e não se aprofundam no processo de combustão e viabilidade do mesmo no FR.

Existe uma técnica particular de combustão onde se utiliza um estagiamento de ar, invés de uma combustão direta. Neste cenário a combustão é dividida em dois estágios. No primeiro é criada uma zona rica em combustível, como consequência dá-se uma combustão incompleta, ou parcial, visto que o oxigénio não é suficiente para haver uma

oxidação de todo o combustível, de forma similar à gaseificação. O segundo estágio consiste numa zona rica em oxigénio, onde os gases que não sofreram uma oxidação total na primeira fase, são totalmente queimados [17, 37]. Foram encontradas as seguintes referências que utilizam esta técnica: Fosgitt [34], Amodeo et al. [35], a empresa portuguesa Termogreen [36] com uma central em operação na zona da Chamusca e Bujak et al. [37].

Foi indicado que o primeiro estágio (caracterizado por uma combustão incompleta) é essencialmente um processo de gaseificação, Apesar de serem fisicamente o mesmo processo, por vezes são distinguidos, como em Fosgitt [34] e Roos [69]. A distinção é feita porque o objetivo do processo, e a forma de utilização dos produtos de combustão, é normalmente diferente. Na gaseificação o propósito é maximizar a produção de gás síntese para os mais variados usos (combustível ou matéria-prima), para posteriormente ser sujeito a uma limpeza de impurezas antes da sua utilização. Já no primeiro estágio de uma combustão do estagiamento de ar, a produção de gás síntese não é propriamente o objetivo, mas apenas um passo intermédio para se obter a combustão total, que é finalizada no segundo estágio. Neste TFM, como o FR pode ser utilizado para cada um dos propósitos, utilizou-se a terminologia referida pelos autores citados, diferenciando os dois termos, por forma a não criar equívocos. No entanto, torna-se importante reconhecer a similaridade entre os dois processos, já que pode aumentar a quantidade de informação disponível sobre o FR [34, 35].

Como se pode apurar, a utilização da biomassa para produção energética com a utilização do FR, nos seus diversos métodos de conversão termoquímicos, é um tema relativamente pouco explorado. Foram discutidas várias formas de utilização do FR para produção energética, contudo apenas as utilizações que não se encontram ainda nas fases de desenvolvimento (na aplicação do FR), e aparentam estar mais consolidadas, serão alvo de interesse. Pelo que os regimes de utilização mais promissores são o estagiamento de ar, ou seja, o FR a operar de forma similar a um gaseificador, e a combustão direta, onde o FR já opera com excesso de ar, este último devido à aplicação similar na incineração e a ser um processo bastante comum com outras tecnologias de queima [17].

Entre a combustão direta e a combustão com estagiamento de ar, optou-se pela que se enquadra mais no contexto do trabalho. Como este TFM tem como um dos temas

centrais a utilização de biomassa, e esta biomassa, face aos combustíveis fósseis, tem um interesse sobretudo ambiental, e não propriamente energético, a escolha mais congruente para o regime de operação é o que conduz a um impacto ambiental menor, neste caso, o que leva a um valor mais baixo de emissões, que é precisamente a técnica de estagiamento de ar. Esta técnica permite, simultaneamente, reduzir as emissões de uma combustão incompleta e de NO_x, face à combustão direta, para além de ser também um processo amplamente utilizado na combustão de biomassa, em grande e pequena escala [17, 52, 80].

O interesse para o estagiamento de ar poderia aumentar ainda mais se, às emissões de NO_x, se aplicasse um regime de comércio de licenças, de forma similar ao que acontece com os GEE na UE. Atualmente, as emissões de NO_x são apenas regulamentadas e controladas, e não taxadas da mesma forma que os GEE. Os valores limite de emissões de NO_x e outros poluentes provenientes da queima de combustíveis, encontram-se no Decreto-Lei n.º 39/2018, de 11 de junho. Este Decreto-Lei aplica-se apenas às instalações com potência térmica nominal igual ou superior a 1 MW e inferior a 50 MW.

Como a quantidade de bibliografia sobre este tema em específico é reduzida, para complementar as referências indicadas na combustão com estagiamento de ar, vão ser utilizados outros trabalhos, sempre que for correta a interligação entre os conceitos. Estes trabalhos incluem a gaseificação de biomassa com FR, pelos motivos já referidos da similaridade entre a gaseificação e combustão incompleta, e também a incineração de resíduos no FR, já que a utilização deste forno na incineração de resíduos utiliza o mesmo tipo de equipamentos, diferindo apenas no objetivo do processo e combustível utilizado.

No capítulo seguinte do TFM pretende-se estudar o funcionamento das centrais que utilizam esta tecnologia e entender, tecnologicamente, algumas complicações que possam comprometer a sua baixa disseminação aplicada nesta área.

3. Aplicação do forno rotativo em mini centrais

Este capítulo centra-se na aplicação do FR em mini centrais. Contém a indicação do funcionamento da instalação, a designação dos componentes, a descrição do processo de combustão, as formas de otimização e os desafios de operação.

Inicialmente é necessário estabelecer a definição do conceito de “mini central”, a fim de as poder comparar com as centrais de maior capacidade. Em Portugal, como descrito pelo Decreto-Lei n.º 153/2014, de 20 de outubro, os regimes de micro e mini produção estão incluídas no grupo das Unidades de Pequena Produção (UPP), onde se encontram instalações com capacidade máxima instalada até 1 MW proveniente de produção renovável. Será este valor o limite de potência considerado para uma mini central.

A dimensão de uma mini central permite que seja instalada em zonas rurais. A possibilidade de a instalação estar localizada perto da zona de recolha da matéria-prima, bem como a proximidade com pequenos aglomerados populacionais, pode alavancar a redução dos custos energéticos e monetários do transporte da matéria-prima e a redução das perdas de transporte e distribuição de energia elétrica. Os custos de investimento inicial são naturalmente mais baixos que centrais de maior capacidade [81, 82].

Centrais de maior potência, devido à dispersão desta matéria-prima, requerem uma logística mais complexa no que compete ao compromisso entre a densidade energética da biomassa e a energia despendida na cadeia de abastecimento, podendo até necessitar de importar biomassa de zonas distantes. Toda a logística de abastecimento torna a escolha da localização da instalação mais complexa e crítica. Apesar de tudo isto, este tipo de instalações continua a ser preferido devido a um melhor rácio entre o rendimento e investimento inicial [73]. Como verificado em Yagi et al. [81] a capacidade instalada numa central a biomassa é diretamente proporcional ao rendimento e inversamente proporcional ao custo específico. Quer isto dizer que, quanto maior a capacidade, maior o rendimento e menor o custo específico, tanto para a gaseificação, como para a combustão. Este facto evidencia a desvantagem principal das mini centrais, e a justificação para estas nem sempre serem viáveis economicamente, apesar das vantagens indicadas.

3.1. Descrição do funcionamento

Neste subcapítulo encontra-se uma descrição simplificada do funcionamento de uma mini central a biomassa com FR.

3.1.1. Fluxograma da instalação

Na Figura 10 apresenta-se um fluxograma do funcionamento de uma central a biomassa com forno rotativo para a produção de energia elétrica [36]. Para facilitar a descrição, dividiu-se o funcionamento em vários grupos, nos quais podem estar contidos diversos equipamentos que só serão descritos no subcapítulo 3.2. Podem-se distinguir as fases de pré-tratamento de biomassa, combustão, produção de vapor, geração de eletricidade, tratamento de efluentes gasosos e arrefecimento.

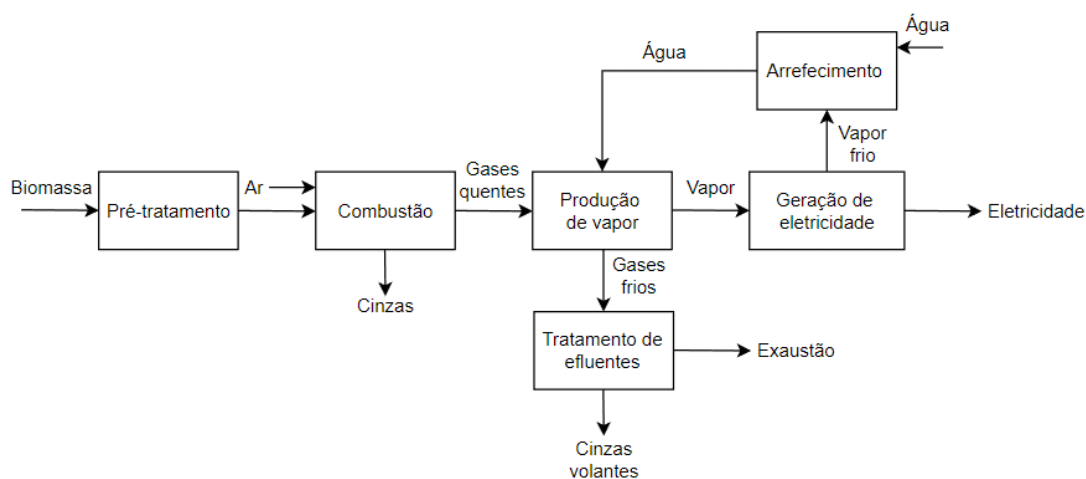


Figura 10 – Fluxograma do funcionamento da central

A seguir encontra-se a explicação do funcionamento de cada um dos grupos anteriormente referidos.

- **Pré-tratamento da biomassa**

É a primeira fase do fluxograma, onde há a receção e pré-tratamento da biomassa. O pré-tratamento é um processo facultativo que tem como objetivo melhorar a qualidade do combustível. Esta melhoria é feita recorrendo à secagem e/ou redução da granulometria do combustível. Na secagem há um aquecimento da matéria-prima com o objetivo de reduzir o teor de humidade. Com a redução da granulometria da biomassa pretende-se facilitar a combustão da mesma e uniformizar a sua qualidade. Esta fase também inclui o sistema de armazenamento e alimentação da biomassa [17].

- **Combustão**

A combustão divide-se em duas fases: combustão incompleta no FR e queima do combustível gaseificado na câmara de pós-combustão. Como produto da combustão final da biomassa tem-se as cinzas, escórias e os gases inertes quentes [17]. É nesta fase que também ocorre um controlo fundamental dos poluentes gasosos emitidos [69]. Os principais gases poluentes e/ou tóxicos emitidos durante a combustão da biomassa são o CO₂, NO_x, SO₂ (dióxido de enxofre, em pequenas quantidades), CO e HC (hidrocarbonetos). Para além dos compostos gasosos, podem também haver emissões de partículas sólidas em suspensão nos gases [17]. Estes compostos têm diferentes origens que podem estar relacionadas à composição química do combustível e ar, ao rácio ar:combustível e à temperatura de combustão [17, 21].

- **Produção de vapor**

Os gases quentes produzidos na fase de combustão, dirigem-se para a caldeira onde fornecem calor à água para produzir vapor.

- **Geração de eletricidade**

A fase final culmina na produção de eletricidade. O vapor de elevada entalpia, obtido na fase anterior, provoca o movimento rotacional da turbina de vapor, que por sua vez o transmite para um eixo acoplado ao gerador para a produção de energia elétrica.

- **Tratamento de efluentes gasosos**

O tratamento de efluentes gasosos ocorre numa fase secundária onde os gases de combustão frios (não são na realidade frios, apenas cederam parte da sua energia térmica para o vapor) são limpos. A limpeza é feita através da remoção das partículas sólidas (denominadas de cinzas volantes) e dos poluentes presentes nos gases [38]. Esta fase é essencial para cumprir com as normas e regulamentos ambientais relativos ao controlo de emissões e, assim, reduzir o impacto ambiental da combustão da biomassa.

- **Arrefecimento**

O processo de arrefecimento fecha o ciclo de água e introduz água adicional que possa ter sido perdida no sistema [39]. O vapor utilizado para produzir movimento na turbina é condensado e bombeado de volta para a caldeira. Novamente, na Figura 10,

utilizou-se a nomenclatura “vapor frio” para se referir ao vapor que cedeu parte da sua energia para a turbina, e não como indicação da temperatura do fluido.

3.1.2. Princípio físico

O objetivo de uma central termoelétrica é a obtenção de eletricidade. Segundo a lei da conservação de energia, a energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada. Por conseguinte, para obter energia elétrica, é necessária outra fonte de energia. A energia primária é obtida a partir da biomassa através da combustão, e esta energia, por sua vez, é transferida, na forma de calor, para um fluido (tipicamente água) para se obter vapor. O objetivo do vapor é a produção de trabalho mecânico, recorrendo a uma máquina térmica, como uma turbina de vapor [39]. O trabalho mecânico tem como finalidade produzir energia elétrica. Desta forma pode-se descrever o processo de obtenção de eletricidade apenas com conversões energéticas. Segundo o que foi mencionado, identificam-se quatro conversões de energia, que se encontram esquematizadas na Figura 11.

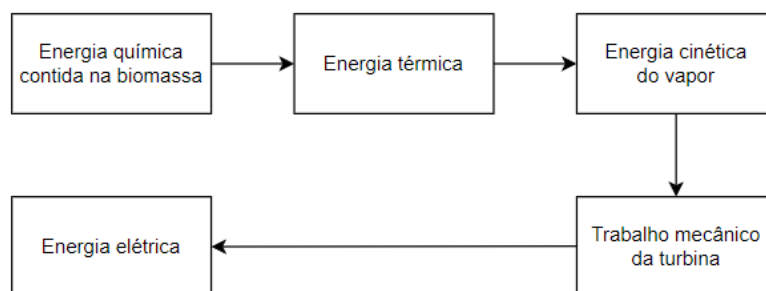


Figura 11 – Conversões de energia

Estes processos de conversão de energia podem ser descritos de acordo com processos e princípios físicos. A transformação de energia química em térmica ocorre pela combustão. A conversão do trabalho mecânico em energia elétrica está assente em princípios eletromagnéticos. As transformações energéticas intermédias, que incluem as conversões da energia térmica, até à produção de trabalho mecânico, podem ser descritas por vários processos. No caso de uma central termoelétrica onde há geração de energia a partir de uma fonte quente, utilizando para isso um fluido de trabalho, habitualmente a água, os processos estão descritos no ciclo de Rankine. Este é caracterizado como sendo um ciclo termodinâmico que tem como objetivo a conversão de calor, em trabalho, por

intermédio de um fluido de trabalho. O ciclo de Rankine é dividido em quatro processos e equipamentos, que se encontram na Figura 12 [39].

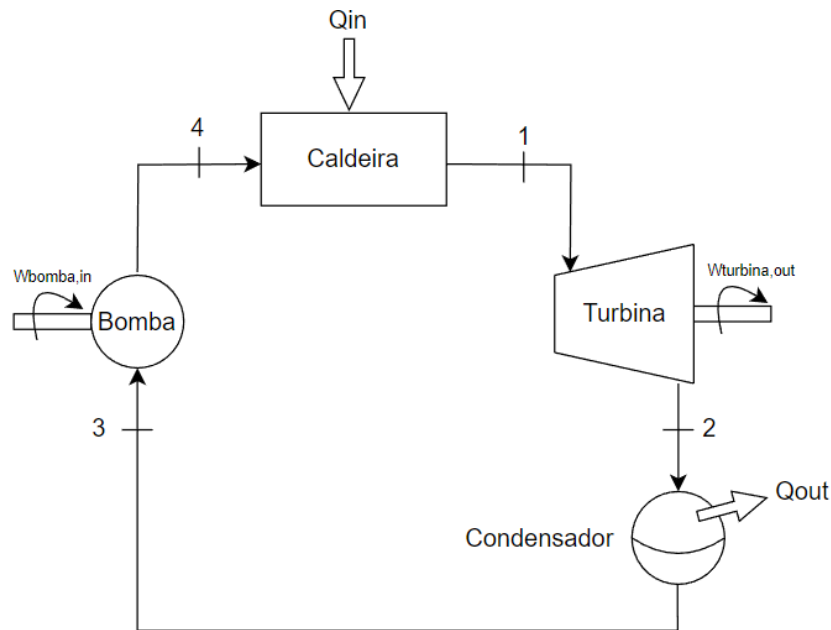


Figura 12 – Princípio de funcionamento do ciclo de Rankine

Os processos encontram-se identificados numericamente de 1–4 na Figura 12, e estão descritos a seguir [39].

- Processo 1–2 (expansão): o vapor proveniente da caldeira, a uma elevada temperatura e pressão, expande-se na turbina produzindo trabalho ($W_{\text{turbina,out}}$).
- Processo 2–3 (condensação): o vapor proveniente da turbina cede calor no condensador (Q_{out}), diminuindo a sua temperatura, até condensar totalmente. Para ocorrer esta troca de calor, o condensador necessita de dispor de um fluido de arrefecimento, que pode ser, por exemplo, ar ou um composto à base de água.
- Processo 3–4 (bombeamento): a água, já no estado líquido, é pressurizada pela bomba por forma a garantir a sua recirculação, e para isso é necessário fornecer trabalho à bomba ($W_{\text{bomba,in}}$).
- Processo 4–1 (aquecimento): o calor dos gases de combustão (Q_{in}) é fornecido à água presente na caldeira. A água é aquecida até à sua saturação, sendo totalmente evaporada, preferencialmente até se encontrar no estado de vapor sobreaquecido.

A descrição do ciclo de Rankine, que inclui a distinção do ciclo teórico e real, já é descrita em muitas fontes, pelo que não se entrará em mais detalhes. Para mais informação pode ser consultada a referência Moran et al. [83].

3.2. Descrição dos componentes

Para a identificação dos componentes base da central, utilizaram-se os indicados pela Termogreen [36] na sua instalação. Para complementar, nalgumas fases indicaram-se componentes alternativos através da consulta de Rajput [39]. Na Tabela 2 são indicados todos os componentes pela fase onde estão presentes.

Tabela 2 – Fases e respetivos processos/componentes

Fase	Processos/Componentes
Pré-tratamento da biomassa	Secagem, sistema de alimentação
Combustão	FR, câmara de pós-combustão
Produção de vapor	Caldeira
Geração de eletricidade	Turbina de vapor, gerador elétrico
Tratamento de efluentes gasosos	Scrubber, filtro manga, ciclones, precipitadores eletrostáticos
Arrefecimento	Condensador, bomba

3.2.1. Pré-tratamento da biomassa

3.2.1.1. Secagem

A secagem é um processo facultativo que permite reduzir o teor de água da biomassa, fornecendo-lhe calor. A redução da humidade do combustível proporciona uma combustão mais completa, um aumento do poder calorífico, aumento da temperatura de chama, um melhor rendimento da unidade de combustão e a redução das emissões de CO e cinzas volantes. Estas vantagens precisam de ser balanceadas com os custos extraordinários que este processo implica, particularmente o aumento do custo de capital e de operação [84].

Dentro dos vários tipos de secadores existentes, o secador por convecção e o de tambor rotativo são os mais comuns para a secagem de biomassa. A transferência de calor pode ser feita de forma direta, havendo troca direta entre os gases quentes e a biomassa, ou de forma indireta, onde não há contacto direto entre o sólido e o gás [85].

O aquecimento de biomassa na central é particularmente vantajoso se utilizar recursos gerados ao longo dos processos. A forma mais recorrente, em ciclos de Rankine, é através de uma purga na turbina, onde se retira parte do vapor, ainda a alta temperatura,

para ser utilizado para a secagem [39]. Porém, se este não tiver as condições desejáveis, pode ser feita uma mistura com uma fração do vapor proveniente do coletor de vapor, que se encontra a uma temperatura mais elevada [36]. Noutros ciclos, que utilizam uma turbina de gás ou um motor de combustão interna, a fonte de calor necessária para o aquecimento provém dos gases de combustão. Existem ainda outras formas de secagem não convencionais com base na energia solar, radiação microondas ou radiação de infravermelho distante [85].

3.2.1.2. Sistema de alimentação

O sistema de alimentação garante o fluxo de matéria-prima para o interior do forno. Mesmo que o FR seja uma tecnologia bastante versátil relativamente aos diferentes tipos de combustível que pode receber, o sistema de alimentação pode limitar o combustível a ser queimado, especialmente devido às limitações granulométricas impostas. A escolha do sistema dependerá da dimensão e do tipo de biomassa [17].

Existem diversos sistemas de alimentação: transportador com correia ou corrente, empurradores hidráulicos ou pneumáticos, parafuso sem-fim, entre outros [17, 39]. O transportador com correia é utilizado para transporte da biomassa durante longas distâncias horizontais. O transportador com corrente é energeticamente mais dispendioso, mas tem uma grande flexibilidade na granulometria e permite o transporte inclinado. O empurrador hidráulico é usado sobretudo nos fornos de grelha. O empurrador pneumático pode ser preferido para transporte de serradura ou palha triturada. O parafuso sem-fim é menos espaçoso e mais barato que os restantes, pelo que pode ter interesse para operar em mini centrais. Todavia, limita a dimensão da biomassa (menor que 50 mm), é mais sensível a impurezas do combustível e tem uma maior despesa energética. O sistema por parafuso sem-fim controla o caudal de alimentação através da regulação da velocidade de rotação do parafuso. Adicionalmente, pode também ser implementado um equipamento tipo funil que permita a descarga do material na vertical [17].

3.2.2. Combustão

Na Figura 13 encontra-se um esquema das unidades de combustão utilizadas (FR e câmara de pós-combustão). Nesta figura também estão indicados: o injetor de ar e o queimador de ambas as unidades, o sistema de deposição das cinzas, o percurso dos gases

para a caldeira e um sistema de alimentação de biomassa genérico. O queimador do FR é utilizado no “arranque”, tendo como objetivo iniciar a combustão. O queimador da câmara de pós-combustão tem o objetivo de manter a combustão controlada e elevar a temperatura de combustão, se necessário, para os gases serem entregues à caldeira [43].

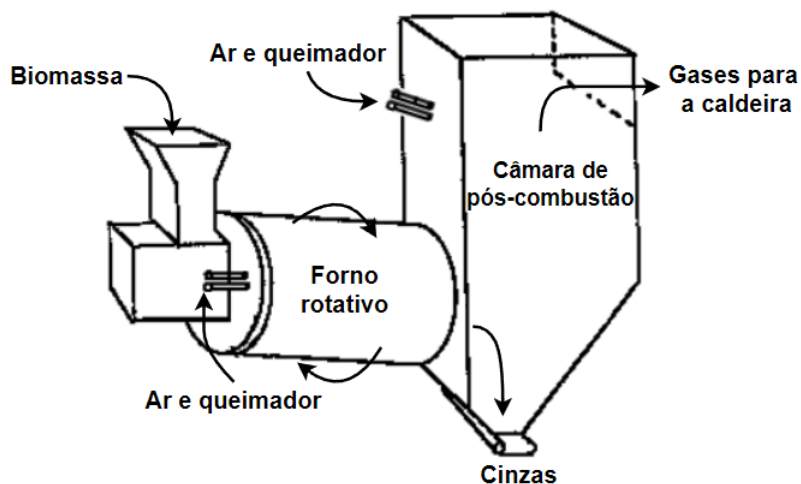


Figura 13 – Esquema das unidades de combustão. Adaptado de [86]

3.2.2.1. Forno rotativo

O FR é a unidade central de estudo e o primeiro equipamento do processo de combustão. A função principal do forno é oxidar parcial, ou totalmente, a biomassa, e assim produzir gases a elevada temperatura. Estes gases, por sua vez, são encaminhados para a câmara de pós-combustão. O equipamento pode trabalhar como gaseificador ou incinerador [34, 43]. A flexibilidade de operação é uma grande vantagem face a outras tecnologias de queima, já que permite receber, se o sistema de alimentação o permitir, diferentes variedades de biomassa, e ser usado para diferentes objetivos, seja a produção de energia, a valorização do combustível ou a destruição de resíduos [17].

Como indicado no subcapítulo 2.3.2. numa combustão com estagiamento de ar, a combustão é dividida em duas fases. No primeiro estágio de combustão, no FR, o oxigénio é fornecido abaixo das condições estequiométricas, e a biomassa sofre uma combustão incompleta. Os gases parcialmente oxidados neste forno, sofrem uma queima total na câmara de pós-combustão [34]. Por outras palavras, ocorre uma separação das fases de gaseificação (/desvolatilização) e combustão, onde a primeira fase decorre no FR, e a seguinte na câmara de pós-combustão [17]. Se se optasse pelo FR a operar no regime de combustão total, o ar seria fornecido em quantidades superiores às condições

estequiométricas, tal como foi descrito anteriormente para o caso da incineração. Tal como na incineração, admite-se que na combustão total seja igualmente necessário utilizar uma câmara de pós-combustão para garantir uma combustão completa [43]. Tal assunção é confirmada no capítulo 3.3.1 onde se verifica, em pormenor, o processo de combustão no FR e estuda-se a necessidade de uma câmara de pós-combustão para o aproveitamento do potencial energético total do combustível. Portanto, independentemente do regime de funcionamento, os equipamentos utilizados e a sua disposição são idênticos [36, 37], revelando a flexibilidade de operação ao utilizar esta tecnologia, podendo-se alternar os regimes com a mesma disposição de operação.

Face à combustão direta, o estagiamento de ar conduz a uma redução de emissões, menor temperatura no FR e permite produzir uma reação mais completa [17, 69]. Ocorre uma diminuição nas emissões de NO_x devido à redução do ar utilizado e diminuição da temperatura no FR [17]. O NO_x produzido é incrementado em combustão a elevada temperatura. A segmentação do processo químico em FR e câmara de pós-combustão, reduz a temperatura localizada e assim a redução na produção de NO_x . A redução de temperatura no FR pode levar também a um aumento no tempo de vida do tijolo refratário [69]. Visto que o estagiamento de ar leva a uma combustão mais completa, a temperatura final atingida na câmara de pós-combustão pode ser superior, e as emissões provenientes de uma combustão incompleta (principalmente CO) são mitigadas [17].

3.2.2.2. Câmara de pós-combustão

A câmara de pós-combustão, ou câmara de combustão secundária, é um elemento indispensável para a otimização da combustão [37, 43]. A combustão final dos gases é feita neste equipamento onde se retira o valor final do potencial calorífico do combustível e se elevam, e controlam, as temperaturas dos gases que vão ser fornecidos à caldeira [37, 43]. A divisão em duas unidades de combustão permite operar de uma forma mais segura todo o tipo de matéria-prima, pois no FR ocorre a conversão dos sólidos para gases mais limpos, do que os que se obteriam com a combustão total [34].

Devido ao baixo tempo de residência dos gases no FR, esta câmara tem também como função, fazer cumprir os tratados, regulamentos e legislação que condicionam a emissão dos gases de escape, uma vez que garante a temperatura necessária para a destruição das moléculas não permitidas nas emissões para a atmosfera [43]. Para garantir

a queima final, necessita também de sistemas de injeção de ar. Este ar deve ser regulado corretamente, pois excesso de ar provocaria a diminuição da temperatura e, por resultado, a diminuição da eficiência de combustão [34, 35], e o déficit de ar levaria a uma combustão incompleta [37].

O equipamento está diretamente ligado à extremidade do FR como demonstra a Figura 14. Portanto, é possível fazer uma transição dos gases imediata para o segundo estágio de combustão, evitando maiores perdas energéticas em sistemas de ligação. Podem ser instalados na vertical ou horizontal, com os verticais a serem mais utilizados [39].



Figura 14 – Ligação forno rotativo–câmara de pós-combustão, vista do interior da câmara [36]

3.2.3. Produção de vapor

3.2.3.1. Caldeira

A caldeira opera como um permutador de calor: é o equipamento que recebe os gases quentes da câmara de pós-combustão, e opera a troca de calor dos gases com o fluido de trabalho, que neste caso é a água. O objetivo é produzir vapor a elevada temperatura e pressão para permitir movimentar a turbina de vapor. Da caldeira resulta o vapor para o coletor de vapor e os gases de combustão que são reencaminhados para o tratamento de efluentes gasosos. A seleção da caldeira depende das condições de operação e da capacidade da unidade de combustão [45].

Existem diferentes formas de classificação de caldeiras, podem-se, por exemplo, distinguir caldeiras consoante a sua posição, a passagem dos fluidos, a forma de aquecimento, a circulação da água e a pressão [39]:

- Posição: podem ser classificadas em horizontais, verticais ou inclinadas [39]. A escolha dependerá, essencialmente, do espaço disponível. Se houver área suficiente é preferida a horizontal, devido à facilidade de inspeção e manutenção, caso contrário, pode-se optar pela vertical [39].
- Localização da passagem dos fluidos: permite identificar dois tipos de caldeiras: as aquatubulares, em que a água passa por dentro de um banco de tubos e os gases de combustão estão por fora, e as pirotubulares, que têm um funcionamento oposto, i.e., são os gases de combustão que circulam dentro de um banco de tubos. As caldeiras pirotubulares são mais indicadas para operação em mini centrais com baixo caudal e pressão de vapor [39]. As caldeiras aquatubulares são mais eficientes, podem operar em grandes centrais e possuem uma construção mais simples, contudo existe um maior risco de rutura e explosão, e exigem mais inspeção e manutenção [39]. Se o gás de combustão tiver partículas sólidas em suspensão que sejam propícias a criar depósitos e acumularem-se nas superfícies, é recomendado o uso de caldeiras pirotubulares, para facilitar a limpeza dos depósitos aglomerados [45].
- Forma de aquecimento e combustão: a combustão pode ser feita no interior da caldeira (caldeira de combustão interna) ou pode ser feita numa unidade de combustão separada, chegando apenas os gases de combustão à caldeira [39]. A água pode circular naturalmente pela caldeira através de correntes de convecção natural devido à transferência de calor, ou pode ser usada uma bomba para uma recirculação forçada [39].
- Pressão de vapor: podem-se distinguir caldeiras de alta pressão (para vapor superior a 80 bar) ou de baixa pressão (inferior a 80 bar) [39].

3.2.4. Geração de eletricidade

3.2.4.1. Turbina de vapor

A turbina recebe o vapor com a finalidade de produzir trabalho. O vapor expandido é posteriormente dirigido para o condensador. Podem existir purgas ao longo da turbina para aproveitar uma parte do vapor parcialmente expandido. Uma das possibilidades é a utilização do vapor no dispositivo de secagem da biomassa e/ou num desgaseificador térmico [36].

3.2.4.2. Gerador elétrico

O gerador elétrico converte a energia mecânica, produzida pelas turbinas, em energia elétrica.

3.2.5. Tratamento de efluentes gasosos

Esta fase pode ser constituída por vários equipamentos, cuja utilização depende do tipo de poluentes produzidos durante a combustão e da margem económica disponível. Os equipamentos de tratamento dos gases de combustão mais comuns são os scrubbers, filtros de manga, ciclones e precipitadores eletrostáticos [38, 39].

3.2.5.1. Scrubber

O scrubber, ou lavador de gases, é um dos equipamentos utilizados para remover os poluentes dos gases de combustão. Existem diferentes tipos de scrubber projetados para diferentes poluentes. Uns são mais indicados para a remoção das partículas sólidas em suspensão nos gases, outros também para a redução do teor de SO_2 e/ou NO_x [38].

Os dois tipos de scrubber mais comuns são os secos e os húmidos. Os scrubbers secos são usados para remover as partículas sólidas dos gases, utilizando, por exemplo, um meio poroso. No entanto, os scrubbers húmidos são os mais comuns e eficazes na remoção dos poluentes gasosos. Operam injetando uma solução líquida no fluxo de gases de combustão, que remove os poluentes através de um processo de absorção. A solução líquida é constituída por água e produtos químicos alcalinos, ou outros materiais absorventes, que dependem do tipo de poluente a remover [38]. Na Figura 15 está um tipo de scrubber húmido vertical para exemplificação.

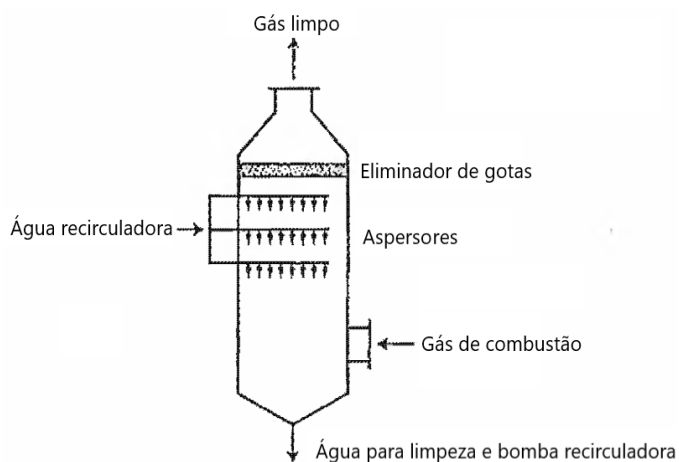


Figura 15 – Scrubber húmido vertical com aspersores. Adaptado de [38]

Neste dispositivo, os gases de combustão são inseridos na parte inferior, e enquanto se deslocam para a parte superior, são pulverizados pelos aspersores com o líquido à base de água. Antes da saída da câmara, existe um eliminador de gotas para remover as partículas líquidas arrastadas pelo gás [17]. Estas partículas, que podem ser constituídas por compostos tóxicos, devem ser removidas para que não recontaminem o gás limpo e representem um problema ambiental e de saúde pública [38].

O scrubber húmido é um dos únicos dispositivos com capacidade de eliminar, ou reduzir, simultaneamente, gases poluentes e partículas sólidas [38]. Tem também a possibilidade de arrefecer os gases de combustão e neutralizar a acidez dos gases e partículas, através da adição de uma substância alcalina à água dos aspersores [17, 38]. O facto de operar com água tem desvantagens associadas, como o potencial para a corrosão, a possível poluição das águas, a recolha de partículas contaminadas que podem não ser recicláveis e os custos acrescidos para tratar a água poluída [17, 38].

3.2.5.2. Filtro manga

O filtro manga é um dispositivo simples amplamente utilizado no tratamento dos gases de combustão para remover as partículas sólidas em suspensão. É constituído por uma série de sacos de tecido colocados em paralelo, por onde o gás é forçado a atravessar, deixando as partículas retidas no tecido da manga [17]. O filtro em si é importante para reter algumas das partículas, porém, o que garante uma eficiência de filtragem elevada para as pequenas partículas sólidas, é a própria película de poeira, ou partículas finas, acumulada permanentemente no filtro ao longo da filtragem [38]. Esta película fica retida mesmo após a limpeza.

Apesar da elevada eficiência, este equipamento necessita de um maior espaço de montagem, é sensível à velocidade dos gases, requer muita manutenção e não é adequado para condições de operação com muita quantidade de poeira, nem para operar em ambientes húmidos, já que afetam o tecido do filtro [17, 38].

3.2.5.3. Ciclone

O ciclone utiliza a força centrífuga, por meio da ação de um vórtice criado no interior, para separar as partículas sólidas em suspensão nos gases [38]. É composto por um corpo cilíndrico-cónico, no qual os gases entram tangencialmente e são submetidos à

força centrífuga (Figura 16). As partículas presentes nos gases embatem na parede e acabam por se depositar no fundo do ciclone [17].

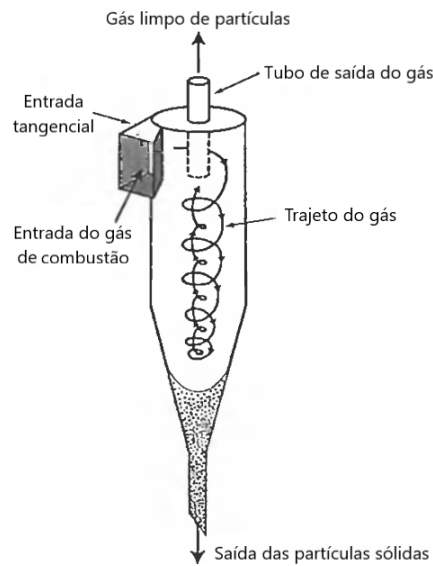


Figura 16 – Ciclone para o tratamento de efluentes gasosos. Adaptado de [38]

Tem a vantagem de ser tecnologicamente mais simples e barato, no entanto, é menos eficiente que outros dispositivos de tratamento dos gases. São usualmente utilizados com outras tecnologias de limpeza mais dispendiosas, como o filtro manga ou os precipitadores eletrostáticos. Representa a tecnologia de limpeza de gases mais utilizada e pode ser de interesse para operar em mini centrais, devido à sua simplicidade e baixo custo, desde que a baixa eficiência não comprometa os requisitos ambientais admissíveis [38].

3.2.5.4. Precipitadores eletrostáticos

Os precipitadores eletrostáticos são utilizados para remover as gotículas ou partículas sólidas presentes nos gases de combustão. O princípio de funcionamento baseia-se na passagem dos gases por um campo elétrico formado por dois eletrodos, um coletor e um emissor, que têm como função a descarga elétrica a alta voltagem [17, 38]. Estes eletrodos causam a ionização do gás, e as partículas carregadas são atraídas para o eletrodo coletor, sendo separadas do fluxo de gás [38].

Possui a eficiência de remoção de partículas mais elevada para partículas mais finas, podendo ser superior a 99%. Mesmo para uma taxa de retenção elevada, consegue fazê-lo sem perdas de carga significativas, sobretudo porque o controle das emissões atua

somente nas partículas, e não sobre a totalidade do gás de combustão, como os outros métodos [17]. Os custos de operação são geralmente baixos e tem um tempo de vida longo, sem necessitar de muita manutenção. Contudo, tem um custo inicial elevado, não é flexível à variação nas condições de operação, requer mais espaço e não controla os poluentes gasosos [38].

3.2.6. Arrefecimento

3.2.6.1. Condensador

O condensador é um permutador de calor que tem como função arrefecer o vapor proveniente da turbina e condensá-lo totalmente, para que à saída a água esteja no estado líquido para ser bombeada. Existem diversas formas de efetuar o arrefecimento do fluido de trabalho, e todas elas requerem um permutador de calor (onde ocorre a transferência de calor) e um fluido secundário (geralmente ar ou água).

Os condensadores a ar (aeroarrefecedores) são mais simples, já que o ar está facilmente disponível para utilização e o sistema é tecnicamente menos complexo, é apenas necessário garantir um fluxo de ar adequado através de ventilação forçada [17, 39].

Os condensadores a água são mais comuns, já que garantem uma melhor eficiência de arrefecimento. Entre estes, os mais frequentemente utilizados são os de contacto direto e de superfície. Nos condensadores de contacto direto há um contacto direto entre o vapor a arrefecer e a água de arrefecimento. Os condensadores de contacto direto devem ser utilizados quando existe uma vasta disponibilidade de água a preços baixos. Nos condensadores de superfície não há contacto direto entre o vapor e a água: tipicamente o vapor desloca-se pelo exterior de um banco de tubos que contém no interior a água de arrefecimento. Apesar de os condensadores de contacto direto serem mais simples e baratos, os condensadores de superfície são a solução mais comum, em parte porque requerem menos água para operar pois os condensados são mantidos no sistema de produção de vapor [39].

Ambos os sistemas de arrefecimento (ar ou água) têm situações de aplicação distintas. O arrefecimento com água é a situação mais comum em centrais termoelétricas, já que permite uma permuta de calor mais eficiente [39]. Quando a central termoelétrica

se situa em zonas onde a água para arrefecimento é poluída ou limitada, se possível, deve-se instalar aeroarrefecedores.

3.2.6.2. Bomba

A bomba tem como objetivo elevar a pressão até ao valor necessário para operar a caldeira. Este equipamento garante também a recirculação do fluido ao longo do sistema.

3.2.7. Outros equipamentos e acessórios

Naturalmente existem muitos outros componentes que não foram mencionados e que são igualmente importantes para assegurar o bom funcionamento da central termoelétrica. Existem ainda outros equipamentos opcionais que podem ser instalados com o propósito de melhorar o desempenho do sistema, como por exemplo o economizador, o pré-aquecedor de ar e o sobreaquecedor. Estes equipamentos, e outros, estão brevemente explicados neste capítulo. Procurou-se evitar a menção de acessórios comuns a quase todas as aplicações industriais, como tubagens, isolamentos, válvulas e sistemas de medição.

- **Chaminé**

A chaminé é o equipamento responsável pela exaustão dos gases de escape para a atmosfera após a fase de tratamento dos gases. Este equipamento tem de cumprir determinadas condições quando é projetado. Uma delas é a altura: deverá ter uma altura tal que propicie uma dispersão dos poluentes gasosos e sólidos, ainda presentes no gás, pelo ar. Alturas mais elevadas ajudam a reduzir a concentração destes poluentes na área em redor, diminuindo o impacto sobre o ambiente e seres humanos. O diâmetro da chaminé está principalmente relacionado com o caudal de gases de escape. Outro aspeto importante é a correta ventilação do fluxo de gases para a atmosfera. A altura da chaminé auxilia a criação do diferencial de pressão essencial para garantir esta circulação. Este gradiente de pressão pode não ser suficiente para promover uma circulação adequada se a temperatura dos gases for demasiado baixa, pois há um acréscimo na massa volúmica. Neste caso pode-se recorrer à criação de uma ventilação forçada através de ventiladores [39].

- **Desareador**

O desareador é um dispositivo utilizado para remover gases dissolvidos (como o oxigénio e o CO₂) da água de alimentação à caldeira. A desgaseificação é feita através do aquecimento da água a uma temperatura próxima de 110°C. Um dos benefícios é a eliminação do oxigénio dissolvido na água, permitindo reduzir a possibilidade de corrosão. Normalmente o aquecimento é feito com uma parte do vapor a baixa pressão da turbina [39].

- **Coletor de vapor**

O coletor permite recolher o vapor proveniente da caldeira e direcioná-lo para a turbina. Tem como função controlar e regular a pressão do vapor, e no caso de haver mais que uma turbina, possibilitar a distribuição igualitária do vapor para cada equipamento. A maior fração do vapor recolhido alimenta as turbinas [39]. O coletor pode parcelar uma parte do vapor para outros dispositivos [36].

- **Economizador**

O economizador é um permutador de calor que utiliza o vapor expandido antes de ser arrefecido no condensador, para fazer um pré-aquecimento da água líquida de alimentação à caldeira. Nalgumas configurações, pode ser possível utilizar o calor presente nos gases de escape antes de serem libertados para a atmosfera [39].

- **Pré-aquecedor de ar**

O pré-aquecedor de ar é geralmente colocado depois do economizador, e aproveita a restante entalpia sensível do vapor para pré-aquecer o ar antes de ser introduzido na câmara de combustão [39]. Quando o vapor não possui inércia térmica suficiente para o aquecimento desejado, pode ser utilizada uma parte do vapor proveniente do coletor de vapor [45].

- **Sobreaquecedor**

Pode ser utilizado em caldeiras aquatubulares e pirotubulares com o objetivo de aumentar a temperatura do vapor acima do ponto de saturação, para que chegue à turbina vapor no estado sobreaquecido. Nestas condições, é possível reduzir o desgaste e corrosão, e melhorar o desempenho da turbina [39]. Contudo, a utilização de um

sobreaquecedor neste tipo de instalações, onde a combustão ocorre fora da caldeira, recebendo esta apenas os gases da combustão, não aparenta ser a norma [34, 36, 37, 43].

- **Separador de vapor**

Neste equipamento ocorre a separação do vapor seco, ou sobreaquecido, do vapor húmido. As gotículas de água, que podem estar presentes no vapor, ocorrem devido à perda de calor na tubagem, desde a caldeira até à turbina. Estas partículas de água podem danificar a turbina [39].

- **Tratamento da água de alimentação**

A água utilizada para produzir vapor é uma das matérias-primas mais importantes numa central termoelétrica com ciclo de Rankine. É necessário garantir uma limpeza adequada para que esteja, na melhor das possibilidades, livre de impurezas, tais como microorganismos, sedimentos, gases dissolvidos, minerais, sais e calcário. Estes compostos indesejáveis podem levar a problemas de corrosão, fragilização dos metais, acumulação de minerais e sais nas superfícies dos equipamentos e danos na estrutura dos equipamentos devido à projeção de partículas sólidas transportadas pela água [39].

- **Armazenamento**

É fulcral que a instalação disponha de um local apropriado para o armazenamento de biomassa, e ainda mais quando a colheita não pode ser feita de modo contínuo, sendo necessário um armazenamento a longo prazo. O sistema de armazenamento deve criar as condições de depósito ótimas, tanto de temperatura como de humidade, de forma a não prejudicar o desempenho do combustível [17].

3.3. Processo de combustão

Este capítulo tem como propósito compreender o processo de combustão real no FR. No primeiro subcapítulo começa-se por analisar o coeficiente de combustão completa, para concluir o tipo de combustão esperado no FR, o impacto deste coeficiente noutros parâmetros e a utilidade da câmara de pós-combustão no processo de combustão. Com a análise efetuada, no subcapítulo seguinte, distinguem-se as etapas de conversão termoquímica nas duas unidades de combustão.

3.3.1. Análise do coeficiente de combustão completa

Nas centrais a biomassa o processo de combustão é ainda muito prevalente devido ao baixo custo da instalação, a um maior conhecimento técnico e uma maior quantidade de fabricantes com experiência em unidades de combustão [30, 34]. Como se viu no fim do capítulo 2, a maior fração de artigos que cobrem a combustão de biomassa no FR com vista a produção energética, são relativos à incineração de resíduos e outras fontes de biomassa potencialmente perigosa e com baixo poder calorífico. Apurou-se também que, mesmo nos casos em que o FR opera como incinerador, requer-se a utilização de uma câmara de pós-combustão, tal como na combustão com estagiamento de ar. Segundo os vários autores, isto ocorre, não só por questões ambientais, mas também devido a uma combustão incompleta ocorrente neste forno no regime de incineração [47]. Neste subcapítulo pretende-se estudar o coeficiente de combustão completa para perceber o impacto da sua variação noutros parâmetros operacionais que possam influenciar o desempenho do ciclo. É feita também uma análise ao coeficiente de combustão completa do FR enquanto incinerador, porém, os conceitos e terminologias são transversais ao modo de operação.

Em Bujak et al. [37] apresenta-se um estudo onde é pretendido estimar o coeficiente de combustão completa no FR. Este coeficiente é obtido, no seu modo mais simplista, pela Equação 7 [37].

$$CC_{FR} = \frac{\dot{m}_{CO_2,FR}}{\dot{m}_{CO,FR} + \dot{m}_{CO_2,FR}} \cdot 100 \quad (7)$$

onde $\dot{m}_{CO_2,FR}$ é o caudal mássico de CO₂ à saída do FR [kg/h] e $\dot{m}_{CO,FR}$ o caudal mássico de CO à saída do FR [kg/h]. Esta equação determina o estado de oxidação à saída do FR. Se se der a oxidação total, então o CO é totalmente convertido em CO₂, e CC_{FR} teria valor unitário (100%). Se ocorresse uma combustão incompleta, ter-se-ia a presença de CO nos gases de combustão, e o valor de CC_{FR} seria inferior a 100%.

Alternativamente à aplicação da Equação 7, em Bujak et al. [37] é desenvolvido um modelo teórico mais completo com base em várias suposições. Como resultado foi concebido um gráfico (Figura 17) do CC_{FR} em função do rácio de caudal mássico de ar ($\dot{m}_{ar,FR}$). O rácio de caudal mássico de ar [kg_a/kg_b] é representando por um quociente entre o caudal de ar injetado e o caudal de biomassa à entrada do forno. Também se

encontram traçadas as curvas da temperatura dos gases de combustão [°C], concentração de oxigénio nos gases de combustão [%] e caudal volumétrico dos gases de combustão em função do caudal mássico de biomassa [m_a^3/kg_b]. O gráfico da Figura 17 permite estudar a variação do comportamento dos vários parâmetros indicados, para vários valores do CC_{FR} . Dado que todos estes parâmetros se influenciam mutuamente, é crucial prever como a sua variação pode afetar o processo de combustão. Entender estas nuances permite facilitar o planeamento de medidas corretivas para a otimização do processo.

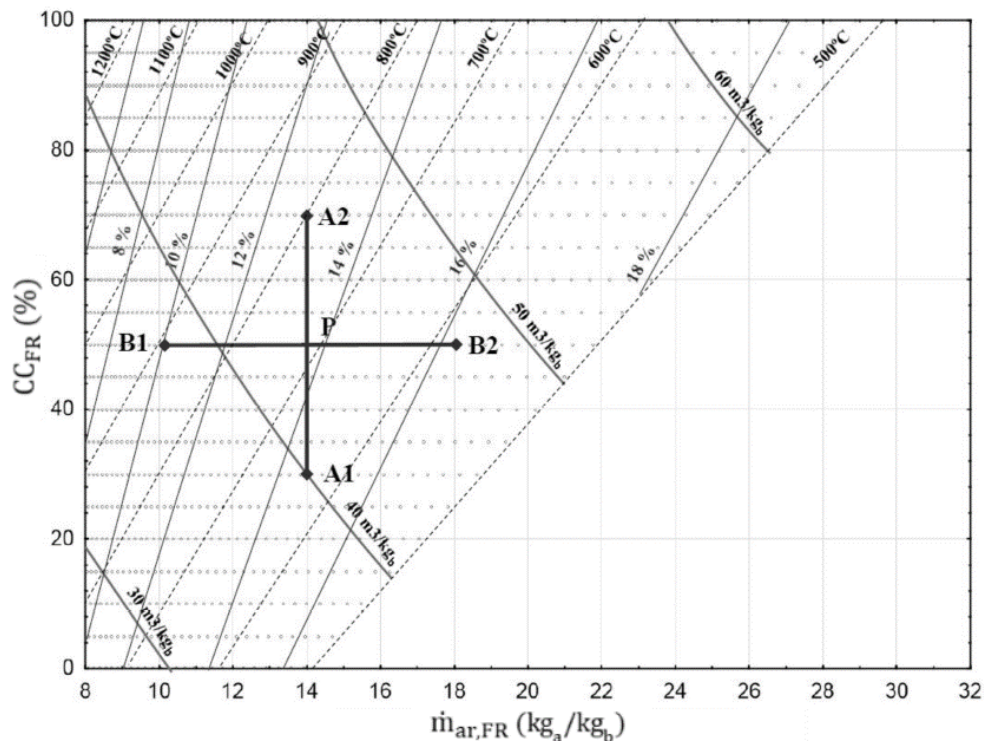


Figura 17 – Gráfico de previsão do coeficiente de combustão completa. Adaptado de [37]

Para exemplificar as variações nas condições de operação, a Figura 17 apresenta um ponto exemplificativo P com um $CC_{FR} = 50\%$ e $\dot{m}_{ar,FR} = 14 kg_a/kg_b$. Se destes parâmetros, apenas o $\dot{m}_{ar,FR}$ aumentar (ponto B2), espera-se um aumento no caudal volumétrico dos gases de combustão e um arrefecimento da temperatura dos gases, já que há uma maior proporção de agente oxidante, mas não há um aumento nas reações de combustão, quer isto dizer que a concentração de oxigénio nos gases de combustão aumenta. Contrariamente, se $\dot{m}_{ar,FR}$ diminuir (Ponto B1) há um menor excesso de ar, pelo que a temperatura aumenta, para o mesmo CC_{FR} . Se o CC_{FR} aumentar, para o mesmo $\dot{m}_{ar,FR}$, a temperatura dos gases de combustão aumenta devido ao maior aproveitamento do potencial energético do combustível. Com o contínuo aumento do CC_{FR} o regime de

operação tende para uma combustão total da biomassa. Se o objetivo é a gaseificação ou a combustão incompleta, então o valor de CC_{FR} deverá estar abaixo de 100%. Uma redução no CC_{FR} induz a uma diminuição da temperatura de combustão e caudal dos gases produzidos. Esta redução também fará com que a proporção de gás síntese aumente [69].

Através deste gráfico, ou de uma equação alternativa com resultados mais exatos proposta também em Bujak et al. [37], é possível estimar, na prática, valores de CC_{FR} . Os autores aplicaram este método para um caso real de incineração de farinha de ossos e carne. Os dados foram retirados por um período de cinco dias e obtiveram um valor médio de $CC_{FR} = 66,5\%$, com um desvio padrão de 8,79%. A partir dos vários dados, concluíram que o CC_{FR} e $\dot{m}_{ar,FR}$ têm um coeficiente de correlação elevado (0,87), quer isto dizer que, quando um dos parâmetros aumenta ou diminui, o outro segue o mesmo comportamento. No caso verificado, não se atingiu a combustão completa no FR, assim, compostos como o CO, H₂, entre outros (gás síntese) não sofreram oxidação. Estas substâncias necessitam de ser queimadas na segunda câmara de combustão, com vista a realizar um maior aproveitamento energético e certificar que estas substâncias, e outras características de uma combustão incompleta, não são emitidas para a atmosfera, ou que a sua emissão seja mitigada.

Em Winter et al. [87] é discutida a dificuldade de o FR garantir uma combustão completa. Um dos problemas descritos está no baixo tempo de residência dos gases no interior do forno e numa mistura incompleta destes gases com o agente oxidante. A mistura incompleta provoca uma combustão incompleta, com formação de compostos como o CO, que contém parte do valor energético do combustível. Adicionalmente, o baixo tempo de residência não permite, ou pode não permitir, que haja a queima total destes gases que não foram oxidados na totalidade. A solução indicada é também a instalação de uma segunda câmara de combustão. A condição da combustão incompleta dos gases pode justificar o fenómeno do baixo CC_{FR} verificado em Bujak et al. [37].

Na prática, mesmo nos casos de incineração no FR, é comum ocorrer uma combustão incompleta [37, 87, 88]. Como já foi mencionado, a câmara de pós-combustão é, em muitos casos, mandatária por motivos legais para destruir compostos prejudiciais ao ambiente [87]. No entanto, confere-se que é também um equipamento indispensável

para um maior aproveitamento energético do poder calorífico da biomassa, independentemente do regime de operação [34, 87].

É necessário clarificar que a informação relativa à combustão no FR refere-se, somente, a equipamentos de menor dimensão utilizados na incineração, combustão ou gaseificação de biomassa, com um comprimento que pode variar de 10 a 12 m e um diâmetro de 3 a 5 m, ou valores ainda inferiores no caso de aplicação em mini centrais [22, 34, 87]. Um FR para outras aplicações, como é o caso da produção de cimento ou cal, tem um comprimento que pode ser cinco a dez vezes superior. Este facto é extremamente importante pois garante um maior tempo de residência dos gases [24], e poderá reduzir o problema do baixo tempo de residência no tipo de FR indicado, e permitir que se atinja CC_{FR} maiores [89].

3.3.2. Estágios de combustão

Mencionaram-se as duas formas mais utilizadas de aproveitamento energético da biomassa: a combustão direta e a combustão com estagiamento de ar. Num processo de combustão direta o combustível é exposto a um ambiente com excesso de agente oxidante por forma a sofrer uma oxidação total [21]. Na combustão com estagiamento de ar ocorre primeiramente uma combustão incompleta, ou parcial, similar à gaseificação, e de seguida a combustão total do gás síntese noutra câmara de combustão. O diagrama da Figura 18 descreve ambas as hipóteses de conversão de biomassa.

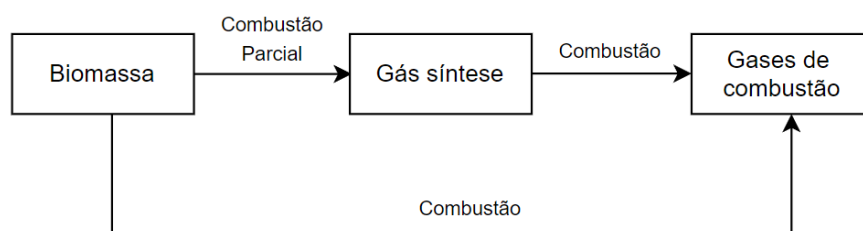
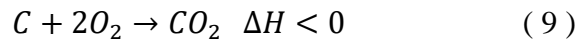


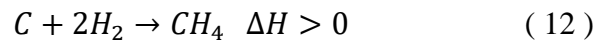
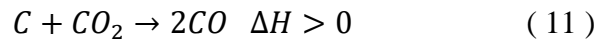
Figura 18 – Processos de transformação da biomassa em gases de combustão

O processo de combustão direta pode ser dividido em quatro estágios: secagem, pirólise/desvolatilização, combustão da matéria volátil e combustão do resíduo carbonoso. O processo de gaseificação, ou combustão incompleta, que decorre no FR é similar, contudo, neste nunca é atingida a combustão total da matéria volátil e resíduo carbonoso, já que esta fonte de energia é convertida em gás síntese. Assim, pode-se dividir nas seguintes quatro etapas [31, 35]:

1. Pirólise/desvolatilização: dá-se com o aquecimento da biomassa e subsequente libertação de matéria volátil e formação do resíduo carbonoso [35].
2. Oxidação parcial ou total: o resíduo carbonoso e matéria volátil reagem com o oxigénio e formam CO (oxidação parcial) ou CO₂ (oxidação total) [31]. Estas reações (Equação 8 e 9) providenciam calor que é, em parte, utilizado para fornecer energia às reações de gaseificação [31]. Como há libertação de calor, a reação é exotérmica, ou seja, a variação de entalpia (ΔH) é inferior a zero [31].



3. Gaseificação: consiste na conversão do resíduo carbonoso num gás combustível [31]. O carbono reage com o dióxido de carbono e vapor (proveniente do teor de humidade do combustível) para produzir gás síntese (uma mistura de CO, H₂ e outros produtos) [35]. Neste caso há um consumo de energia (reação endotérmica), pelo que $\Delta H > 0$ [31]. Existem inúmeras reações de gaseificação que podem decorrer, contudo, as mais importantes estão descritas nas Equações 10-12 [35]:



4. Oxidação de gás síntese: uma parte do gás síntese produzido pode sofrer oxidação ainda no FR. Ocorrendo oxidação, há libertação de calor com $\Delta H < 0$ [35].

Apesar de todas estas reações estarem classificadas como reações diretas, já que é este o resultado mais provável [35], são reversíveis [31]. A direção da reação depende de parâmetros operacionais, como a temperatura, pressão e concentração das espécies reagentes [31].

Após a produção de gás síntese no FR, este é oxidado totalmente na câmara de pós-combustão. Como resultado da combustão completa, os principais produtos esperados são o CO₂ e H₂O [21].

3.4. Otimização do desempenho

Neste subcapítulo estão apresentadas medidas generalistas de otimização do desempenho de toda a central. As medidas passam pela otimização da combustão, a redundância de equipamentos, otimização das condições de vapor, recuperação de calor, escolha adequada do combustível, monitorização, controlo, manutenção e limpeza dos equipamentos, e implementação de técnicas de captura e armazenamento de carbono.

3.4.1. Combustão

A combustão é uma das formas de melhorar o desempenho do ciclo, já que é a fase onde se retira o potencial energético do combustível, que será posteriormente convertido em energia elétrica [39]. Tal como indicado no subcapítulo 3.3.2., pode-se dividir a combustão em duas vertentes: a produção de gás síntese no FR e a combustão de gás síntese na câmara de pós-combustão.

A produção de gás síntese é influenciada por inúmeros fatores, e alguns dos quais que poderão ter maior impacto são o combustível, a tecnologia de gaseificação e os parâmetros de operação [33, 69]. O combustível e a tecnologia de gaseificação já estão premeditados (biomassa e FR). Contudo, para maximizar o poder calorífico do gás síntese, a biomassa deverá ter, entre outras características, um poder calorífico elevado e um teor de humidade baixo [33]. Os parâmetros de operação, nesta situação, incluem a temperatura e pressão de combustão, a relação ar:combustível e o tempo de residência [33, 69].

A temperatura da combustão no FR afeta diretamente a composição química do gás síntese e, portanto, o seu potencial calorífico. A elevadas temperaturas (superior a 1200 °C) o gás síntese é energeticamente mais rico sendo constituído, maioritariamente, por H₂ e CO, enquanto a temperaturas inferiores estão presentes também o CH₄ (metano) e CO₂ [21]. Apesar das temperaturas inferiores penalizarem a densidade energética do gás síntese, serão estas as condições desejáveis. O motivo é porque o propósito primário não é maximizar a produção e poder calorífico do gás síntese, mas sim realizar este processo como uma etapa intermédia da combustão total [32, 34]. Por isso, o controlo de temperatura é importante para tirar partido máximo da gaseificação e, ao mesmo tempo, garantir uma reação exotérmica. O aumento de pressão traz também vantagens, mas

gaseificadores a elevada pressão são apenas aplicados se na utilização for mais vantajoso o gás comprimido, como em turbinas de gás no ciclo GICC [31].

A variação da relação ar:combustível possibilita, de igual modo, alterar a constituição química do gás síntese. Teoricamente, condições mais restritas de ar fornecido ao processo, podem levar à produção de um gás síntese com maior poder calorífico, já que as reações de oxidação são mais reduzidas [33]. Contudo, com a redução do oxigénio presente no interior do forno, a reação tende a ser endotérmica, que não é o desejável. Para atingir a combustão incompleta pretendida, é preciso injetar quantidade de ar suficiente para que não haja necessidade energética suplementar, ou seja, preservar uma reação exotérmica, e ao mesmo tempo não permitir que o ar seja em excesso que resulte na combustão total. O valor de ar ideal depende de muitas condições, mas é comum encontrar-se entre 10 a 70% das condições estequiométricas [34].

Garantir um tempo de residência dos sólidos adequado no FR é importante para conceder uma conversão completa da biomassa. Nesta conversão ocorre a quebra das ligações químicas presentes no resíduo carbonoso, formado na fase inicial do processo de combustão, permitindo que os componentes do mesmo sejam convertidos em gases. Se o tempo de residência for curto, perder-se-á parte do potencial do combustível, que ficou confinado nos sólidos, o que resultaria numa menor eficiência do processo [33].

Naturalmente, existem muitos outros fatores que não foram mencionados que influenciam tanto a eficiência do processo, quanto a composição química do gás síntese. Um exemplo de outro fator é a formação de depósitos no interior do forno, que se não forem removidos podem afetar a eficiência da conversão [69]. Também o agente oxidante utilizado (ar, ar enriquecido em oxigénio, oxigénio puro, vapor ou hidrogénio) afeta o poder calorífico do gás síntese resultante [21].

Após a produção de gás síntese, este é queimado na câmara de pós-combustão. A forma de garantir a combustão completa passa por fornecer uma quantidade de oxidante superior à necessária, para assim propiciar uma oxidação total do combustível [34], pelo que é fundamental haver um controlo contínuo do ar injetado. Por um lado, se for insuficiente, resulta numa combustão incompleta nesta câmara, que provoca desperdícios energéticos e potencializa a libertação para a atmosfera de compostos indesejáveis presentes nos gases, como o CO, HC e partículas sólidas [21]. Se o teor de excesso de ar

for muito elevado, a temperatura de combustão baixa, o que pode, também, resultar numa queima incompleta e menor eficiência energética [43]. É igualmente fundamental, nesta unidade de combustão, encontrar a relação ideal de ar:combustível para otimizar a combustão e minimizar os efeitos negativos.

3.4.2. Redundância de equipamentos

A redundância refere-se à instalação de equipamentos suplementares, ou de *backup*, para garantir a fiabilidade e continuidade de operação em caso de manutenção ou avaria de um dos equipamentos. É uma medida para garantir o contínuo bom funcionamento da instalação, diminuindo os tempos de paragem, podendo ser considerada uma forma de otimizar o desempenho. A forma de realizar a redundância pode variar consoante a capacidade instalada a fim de garantir, simultaneamente, as melhores condições económicas e de fiabilidade. No caso de mini centrais pode ser mais viável a instalação de dois equipamentos onde cada um tenha a capacidade de fornecer as condições de pico. Estes equipamentos podem englobar os sistemas de controle e automação, sensores, instrumentação, ciclo de arrefecimento, entre outros [39].

3.4.3. Condições do vapor

Definir as condições ótimas de vapor permite melhorar o desempenho do ciclo. Estas condições vão depender do custo de combustível e da central, da eficiência térmica obtida e do fator de carga [17, 39]. Por norma, condições de pressão e temperatura elevada são preferenciais pois estão associadas a valores de eficiência superior, mas vêm mediante maiores custos para a instalação, como demonstra a Figura 19 [39].

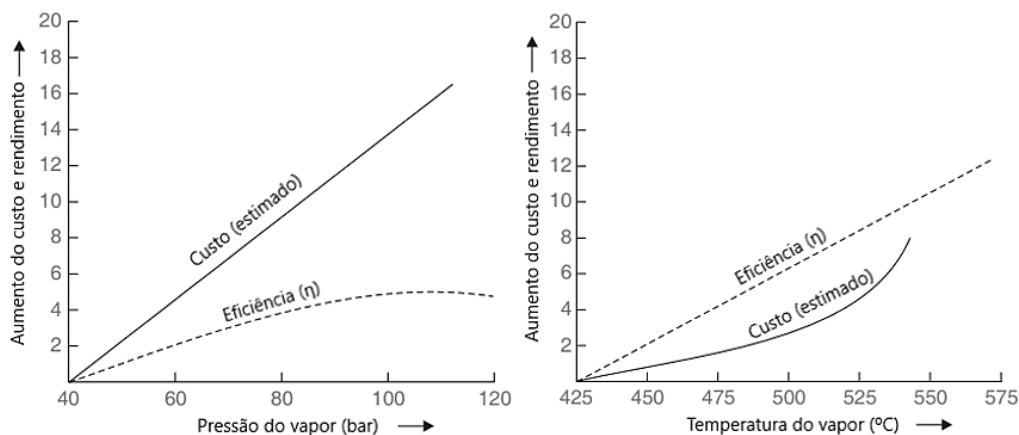


Figura 19 – Custo e rendimento em função da pressão e temperatura do vapor [39]

Verifica-se, pela Figura 19, que um aumento sucessivo da pressão de vapor não é acompanhado sempre por um aumento na eficiência. A eficiência atinge um máximo para uma pressão de vapor próxima de 100 bar. Os valores frequentemente aplicados, devido a um equilíbrio entre custo vs. eficiência, são na ordem dos 60 bar. A temperatura e eficiência seguem uma relação de proporcionalidade direta, que incentiva à utilização do vapor à temperatura máxima praticável. Contudo, a determinada temperatura, o custo, que seguia inicialmente um comportamento semelhante à eficiência, sofre um aumento mais acentuado, que se assemelha a uma curva exponencial. A justificação deriva da limitação tecnológica existente: temperaturas elevadas requerem materiais com maior resistência, que são mais dispendiosos. Mesmo que o sistema tivesse a capacidade para atingir temperaturas desta magnitude, poderia continuar a não ser vantajoso, mesmo com a eficiência elevada, devido aos custos presentes [39].

3.4.4. Recuperação de calor

Na recuperação de calor pretende-se aproveitar um recurso que não teria utilização, e assim aumentar o rendimento global do ciclo. Neste tipo de centrais o calor recuperado tem origem, usualmente, no vapor previamente expandido na turbina. Esta forma de energia pode ser implementada de três modos: num ciclo de cogeração, em equipamentos com necessidades térmicas, como o desareador, ou em equipamentos que melhorem o desempenho do sistema, como pré-aquecedores de ar e economizadores.

Os ciclos de cogeração possibilitam a produção simultânea de energia elétrica e calor. O vapor expandido é caracterizado por uma baixa exergia, não tendo interesse para a produção de trabalho, mas poderá ter para a produção de calor. Este calor pode ser utilizado para aquecer água para produzir água quente sanitária (AQS), para aplicação doméstica ou industrial. Quando a aplicação é possível, conseguem ser alcançados os valores mais elevados de utilização energética, que coincide no valor máximo de rendimento da central [17]. Face à cogeração em centrais de grande escala, as mini centrais possuem a vantagem de poder mais facilmente estar instaladas perto das zonas onde há maior necessidade, tendo mais facilidade em encontrar consumidores [39]. Naturalmente, a cogeração exige a necessidade de consumo de calor na proximidade, caso contrário a aplicação é escusada. Uma das soluções para amenizar estas perdas e aumentar a eficiência, é a recuperação de calor noutros equipamentos que já foram mencionados,

como o desareador, o economizador ou o pré-aquecedor de ar, que desempenham outras funções que permitem otimizar o sistema.

3.4.5. Escolha do combustível

Neste tipo de centrais termoelétricas que podem operar com combustíveis com características muito distintas, é fundamental a escolha adequada da biomassa. Deve-se ter em conta parâmetros como o teor de humidade, o poder calorífico e a granulometria, apesar da versatilidade do forno. A necessidade ou possibilidade de pré-tratamento do combustível (secagem, trituração ou peletização, por exemplo) deve ser ponderada.

3.4.6. Monitorização, controlo, manutenção e limpeza

A larga maioria das instalações atuais necessitam de sistemas de monitorização e controlo, por forma a garantir as melhores condições de funcionamento. As centrais termoelétricas a biomassa não são exceção, principalmente no processo de combustão [39]. Na prática, o controlo dos parâmetros que regem a combustão é complexo devido ao elevado grau de simultaneidade e interdependência destes parâmetros, e a influência de fatores externos [37]. Nas unidades de combustão deve haver um controlo da quantidade de ar necessária, para se conseguir potencializar o processo de conversão, a temperatura e o caudal de gases produzidos [34]. O sistema de alimentação de biomassa também deve ser devidamente regulado para assegurar as quantidades apropriadas de combustível [69]. O tempo de residência dos sólidos no FR deve ser ajustado ao tipo de combustível a queimar, através do controlo da velocidade de rotação, inclinação ou outros parâmetros, para que se atinja o melhor rendimento de conversão termoquímica [24].

A manutenção e limpeza dos equipamentos deve ser assegurada regularmente para garantir que estejam a operar no seu potencial máximo e evitar falhas e interrupções operacionais de maior duração e custo [17]. A limpeza é particularmente importante na remoção de cinzas e incrustações nos equipamentos [69].

3.4.7. Técnicas de captura e armazenamento de carbono

A implementação de técnicas de captura e armazenamento de carbono é uma das ferramentas para tornar o processo mais ecológico, mitigando as emissões de CO₂. O processo pode ser feito em vários estágios do ciclo, mas normalmente são aplicadas na

etapa de pós-combustão, onde são utilizadas tecnologias apropriadas que permitem separar o CO₂ dos restantes gases. Após a captura, o CO₂ é comprimido e transportado, para depois ser armazenado em locais apropriados. A operação de captura e armazenamento de carbono tem sido profundamente estudada há mais de duas décadas, principalmente com aplicação nos combustíveis fósseis, porém ainda hoje se encontra numa fase de pesquisa e desenvolvimento, estando pouca difundida. Os custos energéticos acrescidos para implementar esta prática são um motivo pela qual se encontra pouco disseminada, paradigma que se pode alterar no futuro [72].

3.5. Desafios de operação

A operação em centrais de biomassa traz dificuldades que são comuns a outras centrais termoelétricas com ciclo de Rankine, mas muitas outras que são específicas a este tipo de combustível. A utilização de um FR adiciona ainda mais particularidades que não são encontradas noutras tecnologias de combustão. Neste subcapítulo pretende-se discutir, na generalidade, as adversidades mais comuns que se podem enfrentar neste tipo de instalações e, se aplicável, alternativas para as solucionar.

3.5.1. Slagging, fouling e corrosão

As temperaturas elevadas que se verificam durante a combustão de biomassa podem levar à fusão de cinzas. A fusão não é necessariamente incomum e adversa, se a cinza liquefeita solidificar ao contacto com as paredes, e com o impacto fraturar-se [43]. O problema reside quando a temperatura é excessivamente elevada, ou o ponto de fusão das cinzas é baixo, podendo não haver tempo suficiente para a cinza solidificar [90]. Como resultado, a cinza fixa-se às paredes da câmara de combustão ou tubagem, para só depois se solidificar e criar uma acumulação de depósitos [43, 90]. O aparecimento desta camada pode obstruir a passagem dos gases, reduzir a transferência de calor e causar corrosão, e erosão, nas paredes internas, diminuindo o tempo de vida do equipamento [90]. Este conceito é conhecido como *slagging* na terminologia anglo-saxónica.

Existe outro fenómeno com consequências similares ao *slagging*, conhecido como *fouling* ou incrustações [69]. Este conceito refere-se à deposição e acumulação de partículas sólidas, essencialmente inorgânicas, nas paredes internas das unidades de combustão, tubagens e caldeiras [69, 90]. Causam problemas particularmente nas

tubagens, devido a entupimentos e corrosão na zona da incrustação [91]. Estas partículas surgem durante a combustão da biomassa e são transportadas pelos gases de combustão, sem nunca se fundirem [69]. Na Figura 20 encontra-se um exemplo de depósitos num permutador de calor utilizado para arrefecer o gás síntese produzido num gaseificador de leito fluidizado [92].

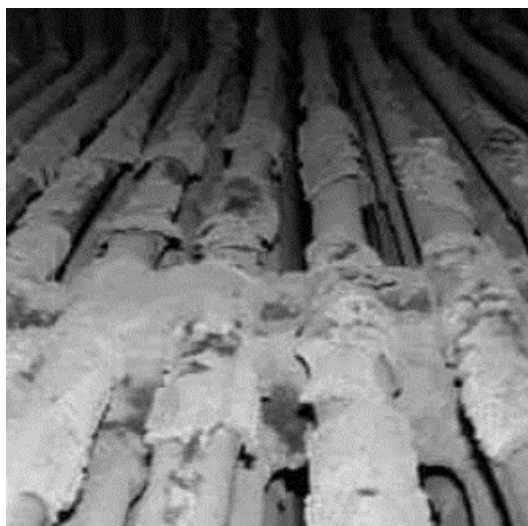


Figura 20 – Fouling num permutador de calor [92]

Ambos os fenómenos são igualmente importantes e preocupantes para ambas as unidades de combustão, já que podem ocorrer tanto na gaseificação ou combustão de biomassa [23, 69]. Como se trata de uma combustão com estagiamento de ar, a temperatura no FR é mais baixa e é menos propício o aparecimento do slagging [34], já a câmara de pós-combustão carece de maior cuidado já que se esperam temperaturas elevadas devido à combustão total e à necessidade de destruir compostos nocivos que estejam nos gases de combustão. Como consequência, a caldeira também é especialmente vulnerável, já que recebe os gases quentes da câmara de pós-combustão.

O aparecimento de *slagging* e *fouling* é comum e prejudica o desempenho e longevidade da central. Uma das consequências destes fenómenos é a ocorrência de corrosão, que pode desencadear a deterioração do material. No entanto, esta forma de corrosão, desencadeada por ambos os problemas, restringe-se a zonas com presença de partículas sólidas e, no caso do *slagging*, temperaturas suficientemente altas para provocar a fusão das cinzas [40]. Quer isto dizer que ocorrem maioritariamente nos equipamentos de combustão, nas tubagens que encaminham os gases para a caldeira e até

na própria caldeira [34, 69]. Nestes equipamentos, e noutros, existem ainda outras formas de corrosão igualmente prováveis e importantes. Antes de indicar as causas da corrosão, estão descritos, nos pontos abaixo, os vários tipos de corrosão mais comuns e a localização onde ocorrem [40]:

- Corrosão relacionada com a água: o equipamento mais frágil à ocorrência deste tipo de corrosão é a caldeira. A causa advém de impurezas presentes na água.
- Corrosão relacionada com os gases de combustão a alta temperatura: ocorre, precisamente, nos equipamentos em contacto com as temperaturas mais elevadas dos gases de combustão, isto é, o FR, a câmara de pós-combustão e a caldeira. No caso do FR e câmara de pós-combustão, há maior probabilidade de ocorrerem os fenómenos de *slagging* e *fouling*.
- Corrosão relacionada com os gases de combustão a baixa temperatura: dá-se nos equipamentos posteriores à caldeira, como o economizador e pré-aquecedor de ar.

Relativamente às causas de corrosão, as mais proeminentes na combustão de biomassa estão indicadas abaixo [40, 91].

- Corrosão a elevada temperatura: está relacionada com a corrosão causada por determinados elementos químicos (cloro por exemplo) e pelos depósitos de partículas (constituídos por sódio, potássio e outros elementos). Na generalidade, verifica-se que a velocidade de corrosão aumenta com o aumento da temperatura dos gases de combustão, especialmente para temperaturas superiores a 650 °C.
- Corrosão ácida: ocorre quando os gases de combustão arrefecem e começam a condensar. Os condensados podem ser constituídos por compostos químicos ácidos à base de enxofre ou cloro, tal como o ácido clorídrico. O ácido clorídrico pode reagir com álcalis criando cloreto de potássio que quando condensado, pode formar incrustações ácidas nas superfícies.
- Corrosão por formação de depósitos: está relacionada ao fenómeno de *fouling*, no qual as partículas muito finas formadas durante a combustão da biomassa fixam-se às paredes internas dos equipamentos ou tubagens. Estas incrustações podem ser constituídas por álcalis e cloro que aceleram o processo de corrosão.

- Corrosão por álcalis: advém do sódio e potássio presentes na biomassa. Estes compostos formam cinzas com um ponto de fusão relativamente baixo, de 500-600°C, pelo que estão associados à ocorrência de *slagging*.
- Corrosão pelo cloro: contabiliza a corrosão causada por compostos à base de cloro, como o dicloro e ácido clorídrico na forma gasosa. Quando entram em contacto com as paredes dos equipamentos formam um composto ferroso à base de cloro que reage com o oxigénio, oxidando o metal, e liberta novamente o cloro, que pode voltar a reagir com as superfícies. Está particularmente presente na queima de resíduos sólidos urbanos ou industriais.

Os problemas de *slagging*, *fouling* e corrosão tornam a combustão e gaseificação de biomassa mais desafiante que o carvão [69]. A ocorrência de tais fenómenos causam diversas adversidades, que vão desde a diminuição da transferência de calor e da eficiência global, ao aumento de custos devido à necessidade de limpeza, manutenção e possível paragem da central [23]. Eliminar completamente a possibilidade de aparecimento é difícil, devido ao elevado número de parâmetros que influenciam a sua origem. Portanto, a solução está na diminuição da probabilidade de ocorrência e na atenuação das consequências [91]. Para tal, é fundamental compreender os parâmetros que os influenciam para saber como os mitigar. Os que são de difícil alteração relacionam-se com propriedades intrínsecas dos compostos presentes na reação, como a constituição química do combustível e agente oxidante, e a temperatura de fundição das cinzas [69]. Existem outros parâmetros relacionadas à construção dos equipamentos que se devem ter em conta no projeto, como a temperatura das superfícies durante a operação, o material, ou acabamento, das superfícies expostas, e a geometria das superfícies [45]. As formas de minimizar o aparecimento destes problemas passam por garantir uma velocidade de escoamento adequada (que influencia o *slagging* e *fouling*), o controlo de temperatura, o tratamento e triagem de biomassa, e a limpeza dos equipamentos [69]. Algumas destas soluções estão indicadas nos pontos abaixo.

- **Controlo de temperatura**

O controlo de temperatura é fundamental para reduzir o risco de corrosão e a formação de depósitos [69]. Apesar de temperaturas elevadas propiciarem o aparecimento de *slagging* e *fouling*, temperaturas baixas também não são desejáveis, já que limitam a

capacidade do sistema e estimulam o aparecimento de corrosão a baixa temperatura [69]. A temperatura do gás de combustão deverá estar sempre acima da temperatura de condensação dos elementos corrosivos presentes no gás, como o enxofre ou cloro, para que nunca condensem e resultem na corrosão das superfícies [69].

Existem diversas formas de controlar a temperatura de combustão, tal como injetar água, que absorve o calor ao evaporar, regular a quantidade de biomassa alimentada ao forno (pode ou não influenciar a temperatura), recircular os gases de combustão, redirecionando os gases de escape de volta ao forno para diminuir a concentração de oxigénio, controlar o tempo de residência (se diminuído, pode baixar a temperatura dos gases), ou injetar mais ar que o “necessário” para aumentar a razão estequiométrica e causar uma diminuição da temperatura de combustão [43, 69]. A estequiometria estabelece a quantidade de oxidante teoricamente suficiente para oxidar completamente o combustível e atingir a temperatura máxima de combustão, por isso, injetar menos ar que o necessário também provoca uma redução na temperatura de combustão [17].

- **Junção de aditivos à combustão**

Podem ser adicionados aditivos ao combustível como argila, calcário ou minerais à base de cálcio, para permitir reduzir o *slagging* e *fouling*. Certos dispositivos de combustão podem conter um sistema de alimentação dedicado para estes aditivos [69].

- **Lavagem**

A lavagem de biomassa (sobretudo biomassa agrícola, como a palha) permite reduzir o teor de cloro e potássio, que são contribuidores para os fenómenos de *slagging* e *fouling*. A lavagem, e a subsequente secagem, vão incluir gastos energéticos que reduzem a energia útil final da biomassa. O objetivo é que estes custos sejam compensados pelo prolongamento da vida útil dos equipamentos [69].

- **Triagem de biomassa**

Deve-se realizar uma seleção do combustível a ser utilizado. Apesar do FR se adaptar facilmente a todo o tipo de biomassa, alguns combustíveis podem não ser preferíveis devido à tendência para formar mais cinza ou serem mais corrosivos [69]

- **Materiais adequados**

Devem ser seleccionados materiais anticorrosivos para os componentes em contacto com os gases, como aços inoxidáveis com elevado teor de cromo [69].

- **Limpeza dos equipamentos**

Os equipamentos podem ser providos de um sistema de limpeza químico ou mecânico, que pode, ou não, ser automatizado. O sistema químico utiliza um fluido de limpeza que dissolve os depósitos acumulados através de uma reação química. Este tipo de limpeza permite alcançar áreas de difícil acesso e é, tipicamente, mais barato que um sistema mecânico, contudo advém com maiores requisitos de segurança e um maior impacto ambiental [45]. Os sistemas mecânicos consistem na ação mecânica direta sobre as partículas aglomeradas, e englobam os sopradores, sistemas sonoros e sistemas por detonação pulsante [69].

3.5.2. Controlo da quantidade de ar

Regular a quantidade de ar é um dos desafios mais difíceis no processo de estagiamento de ar, e as características construtivas do forno dificultam ainda mais este controlo [23, 69]. O facto de ser rotacional torna a colocação de injetores ao longo do forno mais complexa e o seu comprimento extenso prejudica a uniformidade de ar, já que normalmente é colocado apenas um injetor de ar numa das extremidades do forno [34]. Um controlo desajustado no fornecimento de ar, que pode ainda ser mais provável em mini centrais, pode levar a emissões mais elevadas (NO_x ou emissões da combustão incompleta) [17].

Alguns aspetos a ter em conta no controlo de ar num FR a operar num processo de gaseificação e algumas das soluções propostas pelos autores revistos, estão indicadas em cada um dos pontos abaixo [34, 35]:

- **Vedação:** é necessário vedar o forno eficientemente para impedir entradas de ar indesejadas.
- **Sistema de alimentação:** este sistema, principalmente a funcionar em modo contínuo, é uma potencial zona por onde o ar se pode infiltrar. Um dos métodos

para evitar a entrada de ar, é a utilização de sistemas de alimentação com parafuso sem fim, no qual o combustível atua como um “tampão” para o ar.

- Introdução de ar: como o FR se encontra acoplado à câmara de pós-combustão, a localização mais comum para a injeção de ar, e para o queimador, é na parte superior do forno, isto é, na zona de entrada de biomassa. Esta localização propicia a ocorrência de combustão junto à entrada de ar. A dificuldade está em minimizar este fenómeno e uniformizar a distribuição de ar ao longo do FR. A regulação com monitorização da introdução de ar é importante para evitar que isto aconteça. Existem outros métodos para a injeção de ar que promovem a sua distribuição ao longo do cilindro. Uma alternativa é injetar o ar por baixo do leito do material, evitando que o material próximo à entrada entre imediatamente em combustão; neste caso é necessário utilizar um tijolo refratário que seja permeável aos gases, para proporcionar a passagem do ar em todo o forno.
- Mistura do combustível com o ar: se existir problemas na mistura do combustível com o ar, a eficiência de conversão pode ser baixa. Uma das soluções para melhorar a mistura é aplicar pás internas. Inconvenientemente esta solução pode levar a uma maior presença de partículas em suspensão nos gases.
- Remoção de cinza: no sistema de remoção de cinza também pode ocorrer passagem de ar para o interior. Para contornar este problema, deve-se introduzir um sistema anti-infiltração de ar na zona de descarga de cinzas.
- Entupimentos: deve-se evitar entupimentos nos sistemas de ar que podem desregular o ar injetado.

3.5.3. Tempo de residência

O tempo de residência dos sólidos no FR é uma das medidas para otimizar o processo de conversão termoquímica. Porém, é também uma das maiores dificuldades encontradas, já que o valor ideal de permanência varia consoante o combustível, tornando-se ainda mais complexo a determinação do valor ideal quando são queimados/gaseificados vários tipos de combustível simultaneamente. Se o tempo for mais baixo que o ideal, o processo de gaseificação ou combustão pode não se concluir. Quando é demasiado elevado, podem existir perdas energéticas acrescidas, devido ao tempo prolongado de permanência, e uma redução na produtividade e rentabilidade [43].

O tempo de residência para a gaseificação de resíduos de madeira no FR pode chegar a sessenta minutos [34].

Na câmara de pós-combustão também é igualmente importante garantir um tempo de residência adequado dos gases provenientes do FR para assegurar a combustão total dos gases e eliminar compostos nocivos. Tempos de residência desajustados podem levar às mesmas consequências indicadas no FR [87].

3.5.4. Tijolo refratário

O tijolo refratário, ou simplesmente refratário, é colocado no interior do forno e tem com função servir de isolante térmico, para evitar maiores perdas térmicas, e garantir a integridade estrutural do forno para que suporte as temperaturas elevadas presentes no processo [93]. O refratário tem de ser escolhido de maneira a contabilizar as mais variadas condições adversas que pode sofrer. As características mais relevantes que devem ser tidas em conta são a resistência à abrasão, a corrosão, o choque térmico, a fadiga e a transferência de calor. É esperável que, a longo prazo, acabe por sofrer desgaste e necessite ser substituído. Com os materiais utilizados atualmente, se o FR for utilizado como incinerador, depois de um a dois anos de utilização pode apresentar um desgaste tal que o torne inapto para proteger o forno [46]. Como as condições de temperatura numa combustão incompleta não são tão severas, é provável que o tempo de vida útil seja mais prolongado, como indicado no subcapítulo 3.2.2.1. No entanto, é difícil de aferir pois não foram encontradas referências que abordassem esta temática para o regime em estudo.



Figura 21 – Colocação do refratário no interior do FR [22]

Quando o refratário deixa de realizar corretamente a sua função, é necessário substituí-lo (como exemplificado na Figura 21). A substituição requer custos elevados devido ao preço de colocação do novo material e pela obrigatoriedade de cessar a operação do forno e de toda a central. Como o FR numa mini central é menor do que o utilizado noutras aplicações, o tempo de manutenção e os custos são também menores, que se torna uma vantagem particularmente importante. O desenvolvimento de novos materiais refratários pode ser uma das soluções para aumentar o tempo de vida. Materiais mais resistentes podem vir a ser a mais caros, porém, o ideal é que os custos resultantes do tempo de paragem compensem o incremento nos custos [46].

3.5.5. Desgaste, fratura e desalinhamento do forno

O desgaste a longo prazo é um fenómeno comum a todos os equipamentos. No entanto, há componentes que experimentam maiores esforços ao longo da operação que podem acelerar o processo de desgaste, que por sua vez, pode conduzir a uma redução no tempo de vida [39]. O desgaste pode ser devido a ações mecânicas ou químicas. A erosão e abrasão são exemplos de um desgaste proveniente de uma ação mecânica. A corrosão é o exemplo mais importante de desgaste por ação química. No subcapítulo 3.5.4. viu-se que um dos constituintes que mais sofre com este fenómeno, por ação de diversos mecanismos, é o refratário. Apesar de o refratário ser o caso mais severo, em toda a estrutura do forno o desgaste mecânico também é preocupante, particularmente nos componentes móveis. Ao contrário de outros fornos que são estáticos, o FR está em constante rotação, o que acelera o processo de degradação dos elementos rotativos, tais como os rolamentos, engrenagens de acionamento e suportes rolantes e sistemas de vedação [40].

A carapaça do FR é normalmente constituída por vários cilindros metálicos menores que são soldados entre si até dar forma à estrutura final. Os suportes rolantes são colocados na zona soldada para diminuir a concentração de tensões. Durante a operação, o forno é sujeito a esforços cíclicos e térmicos que podem gerar fadiga mecânica. O aparecimento da fadiga é acompanhado por fissuras, que podem não ser visíveis a olho nu, mas tendem a propagar-se até causar uma falha súbita e catastrófica. Nas zonas soldadas o risco de aparecimento é ainda maior, já que é um lugar propício à pré-existência de fissuras devido a defeitos na soldadura. Por este motivo, a análise à fadiga,

na fase de propagação da fissura, é indispensável, principalmente nas zonas com maior fragilidade [41]. Na Figura 22 está demonstrado um exemplo de uma fissura presente na soldadura.



Figura 22 – Propagação de uma fissura na soldadura [41]

A rotação aliada à dilatação térmica, devido à elevada temperatura, pode levar a uma deflexão da estrutura, como se encontra na Figura 23. Devido a esta deflexão, acaba por haver deformação dos rolamentos e dos suportes rolantes e, conseqüentemente, causar o desalinhamento do forno. Esta alteração no posicionamento entre componentes diminui a área de contacto e aumenta a tensão entre as superfícies, criando um maior desgaste [42].

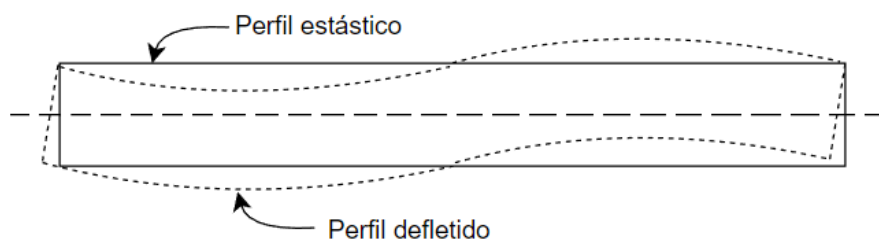


Figura 23 – Perfil defletido durante a rotação

A rotação e a dilatação térmica são efeitos impossíveis de evitar, já que estão implícitos no funcionamento do forno. A solução mais prática para contornar o problema, passa por aumentar a largura do rolamento, para aumentar, à partida, a área de contacto, e assim prolongar o tempo até à necessidade de substituição [42].

3.5.6. Disponibilidade da biomassa

Garantir a disponibilidade biomassa é um dos fatores críticos para o desempenho eficiente de uma central a biomassa. Para conseguir uma produção de energia elétrica contínua, é necessária uma disponibilidade de combustível que acarrete os consumos, mesmo quando há variações na oferta. A forma mais comum para abater estas variações que podem suceder, é recorrer ao armazenamento de combustível [17]. Neste sentido as mini centrais são vantajosas, pois têm um consumo de combustível menor, podendo-se adaptar a variações sazonais da biomassa ou a uma oferta menor na periferia, o que torna mais fácil garantir uma disponibilidade contínua de combustível.

3.5.7. Logística da biomassa

A logística, ou cadeia de abastecimento, inclui todo o processo do combustível, desde a extração até ao consumo. É um dos aspetos mais importantes na utilização da biomassa devido aos elevados custos inerentes, e a otimização destes processos é uma das chaves para tornar a utilização da biomassa mais viável. Idealmente a central deve estar localizada próximo da fonte de biomassa, para possibilitar um fornecimento confiável e a baixo custo [53].

3.5.8. Emissões e cinzas

As emissões e cinzas produzidas durante a combustão estão relacionadas com a constituição química da biomassa e do agente oxidante, a temperatura e qualidade de combustão, e, por vezes, a tecnologia utilizada [21, 54].

As características da biomassa definem muitos dos produtos criados durante a combustão, como as cinzas, CO₂, NO_x e SO₂ [21]. A libertação de SO₂ está associada à presença de enxofre no combustível, que varia de espécie para espécie de biomassa, mas é normalmente residual, principalmente no caso da madeira (0,01% da massa seca) quando comparada com o carvão (aproximadamente 0,5% da massa seca) [33]. O agente oxidante mais utilizado é o ar que é um dos motores para a produção de NO_x, porque é constituído maioritariamente por azoto. Em vez do ar, pode ser utilizado ar enriquecido em oxigénio ou oxigénio puro, que para além de reduzirem as emissões de NO_x, melhoram a combustão, mas agravam os custos [21, 94]. As temperaturas elevadas (principalmente quando acima de 1000 °C) também potencializam a formação de NO_x. Optando-se por uma combustão com

estagiamento de ar, as temperaturas podem não atingir estes valores no FR, mas na câmara de pós-combustão, onde decorre a combustão total, as temperaturas geradas podem flutuar para valores nesta gama [43, 69] A qualidade de combustão é relevante uma vez que a combustão incompleta promove o aparecimento de outras substâncias nocivas [21]. Esta qualidade está muitas vezes interligada com o tipo de tecnologia de queima utilizado [54]. No subcapítulo 4.2., que relata a viabilidade ambiental com a utilização da biomassa e FR, é averiguado se este forno provoca emissões mais agravadas que outras tecnologias.

4. Viabilidade

Neste capítulo é estudada a viabilidade das mini centrais a biomassa com forno rotativo na sua vertente técnica, ambiental, económica e social. Cada um destes pontos será analisado num subcapítulo individual.

Em cada um dos pontos pretende-se averiguar a implementação de centrais de biomassa como um todo, onde se indicam referências genéricas que discutem a viabilidade deste combustível, mas também serão feitas comparações, quando for possível, com outras tecnologias de queima. É importante notar que muito da informação consultada é baseada em estudos que têm o foco na incineração ou gaseificação de resíduos, por falta de informação sobre centrais termoelétricas com FR. Porém, só serão mencionados se assim fizer sentido de acordo com o referido.

É também necessário ressaltar que a análise isolada dos quatro principais pontos de viabilidade é de difícil caracterização, já que estão todos interligados. Pelo que, ao longo do estudo da viabilidade, os conceitos anteriores podem ser revisados e/ou ajustados, à medida que novas informações sejam indicadas.

4.1. Viabilidade técnica

O estudo de viabilidade técnica realizado inclui, num primeiro subcapítulo, uma discussão da importância da localização da central e da cadeia de abastecimento de biomassa, e num segundo subcapítulo é avaliada a implementação do FR numa central de biomassa num ponto de vista técnico, quando comparado com outras tecnologias de queima.

4.1.1. Localização da central e cadeia de abastecimento de biomassa

Um dos aspetos mais importantes nas centrais a biomassa, que é transversal a todos os tipos de tecnologias, é a importância da seleção da localização da central. Uma escolha desadequada pode ter como consequência a escassez de combustível e/ou o elevado custo de energia produzida. Devem ser considerados os seguintes pontos [17, 39]:

- Disponibilidade de biomassa: é fundamental que a localização escolhida para a instalação da central tenha acesso a uma fonte abundante de biomassa.

- Cadeia de abastecimento de biomassa: é um ponto crucial numa central de biomassa, devido à dispersão espacial deste combustível, sendo importante avaliar o raio de ação de exploração de biomassa.
- Acesso a água: a central deve ter na proximidade uma fonte de água em abundância. A água é o fluido de trabalho da central e pode ser utilizada como fluido de arrefecimento.
- Estabilidade geológica e climatérica: devem ser considerados potenciais problemas geológicos e climáticos que possam pôr em causa o bom funcionamento da instalação.
- Conexão com a rede elétrica: o local deverá ter acesso ou estar na proximidade de uma rede elétrica pré-existente.
- Custos do terreno: pode ser necessária uma área considerável para a construção da central termoelétrica, e assim é necessário analisar os custos do terreno.
- Despojos de cinzas: devem ser criados espaços para colocar as cinzas ou ponderados meios para a transportar para outro local.
- Problemas ambientais: devido à possibilidade de libertação de partículas sólidas em suspensão nos gases e compostos prejudiciais gasosos, a central deve estar localizada a uma determinada distância das povoações.
- Capacidade para expansões futuras: podem ser criados espaços para possíveis expansões da capacidade instalada ou instalação de outros componentes com vista a melhorar o desempenho.

Um ponto-chave indicado é a disponibilidade de biomassa, onde as mini centrais se podem revelar de maior interesse por mais facilmente se sustentarem com os recursos locais, já que há menor consumo de combustível. Aliada à disponibilidade, a otimização da cadeia de abastecimento é fulcral para garantir a disponibilidade de biomassa ao longo do ano e reduzir os custos destas instalações. Esta cadeia pode compreender vários processos, mas tipicamente englobam-se nas fases de recolha/colheita, transporte, armazenamento, pré-tratamento e utilização [53]. Se a biomassa provir de culturas energéticas, é acrescentada a fase de cultivo [17]. Na Figura 24 encontra-se um fluxograma da cadeia de abastecimento de biomassa [17, 55]. Como se observa nesta figura, muitos dos processos não são lineares e contínuos. Pode ser utilizado um meio de armazenamento intermédio entre a recolha e transporte, por exemplo, ou ainda um

processo de pré-tratamento no local de recolha de biomassa, antes do transporte para a central [55].

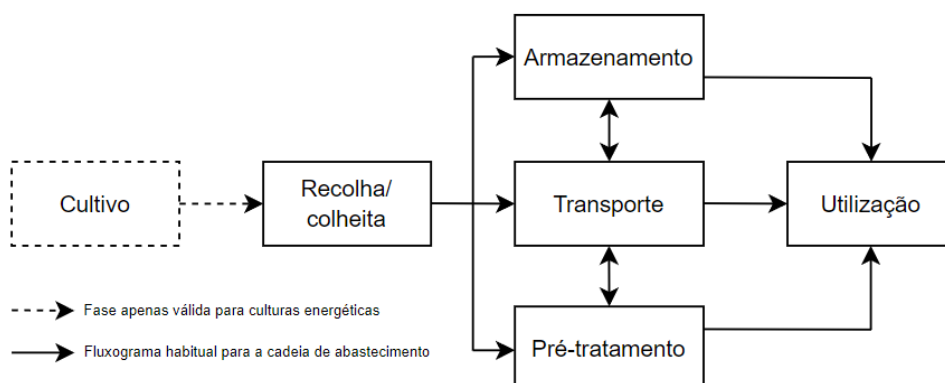


Figura 24 – Cadeia de abastecimento de biomassa. Adaptado de [55]

A fase de cultivo é dedicada à produção de biomassa para fins energéticos. O processo de recolha/colheita representa a fase onde a biomassa é obtida, quer seja pela recolha de algum tipo de resíduo ou a colheita de biomassa de origem vegetal. A deslocação do combustível, desde o local de recolha, até à central termoelétrica, é representada na fase de transporte. Devido à variação na disponibilidade sazonal de algumas fontes de biomassa (sobretudo a biomassa de resíduos agrícolas), a fase de armazenamento é indispensável para garantir um fluxo de combustível contínuo. Todas estas fases culminam na utilização final da biomassa [53].

Para além da disponibilidade e cadeia de abastecimento, é importante ter em conta a qualidade ou heterogeneidade da biomassa. É sempre preferível biomassa com maior poder calorífico, menor teor de humidade e mais uniforme. Se utilizados vários tipos de biomassa, devem ser o mais homogêneos possível. Estes tópicos são fundamentais para manter uma boa qualidade de combustão [17].

4.1.2. Análise técnica qualitativa

Todas as tecnologias de queima apresentam diferenças entre si. Numa perspetiva técnica, os principais pontos que as diferem são as características no funcionamento e na combustão, a capacidade, complexidade e escalabilidade, o tempo de residência, os requisitos para o combustível e a eficiência térmica [23, 48, 51].

O que difere o FR de outras tecnologias é a forma como o combustível se desloca ao longo do forno. A combinação da inclinação e do movimento rotacional, permite deslocar os sólidos ao longo do comprimento. A rotação também garante uma boa mistura do combustível [52]. No entanto, peca numa mistura pobre dos gases, aliado ao baixo tempo de residência, que aumenta a probabilidade de uma combustão incompleta e a consequente necessidade de uma segunda câmara de combustão após o FR, mesmo a operar em regime de combustão total [52, 87]. Existe também dificuldade em iniciar a combustão e controlar a temperatura [51].

O FR apresenta-se como uma tecnologia mais simples e com maior capacidade que o forno de leito fluidizado, mas equiparável ao leito fixo e grelha móvel [23, 51]. Apesar da simplicidade, requer uma manutenção frequente para substituição do refratário [51]. A escalabilidade não é geralmente problemática, já que existem fornos com diversas dimensões [48].

A maior vantagem do FR é a capacidade de controlar o tempo de residência, que só é possível através do controlo da rotação, inclinação ou caudal mássico. Esta capacidade possibilita processar qualquer tipo de combustível, independentemente das suas características, e de haver, ou não, uma mistura heterogénea de diferentes tipos de biomassa [52]. Já outros equipamentos de queima têm restrições ao nível da dimensão, teor de humidade ou outras características morfológicas. A única desvantagem do FR, neste aspeto, está no elevado tempo de residência dos sólidos [48].

A eficiência térmica é a mais baixa dentro das tecnologias de queima habitualmente utilizadas [23, 48, 49]. As perdas de calor pelas paredes do forno são elevadas, podendo atingir os 10% do calor libertado na combustão. Este fator pode inviabilizar o FR utilizado num processo de aproveitamento energético de biomassa [52]. Apesar das perdas serem inevitáveis, existem estudos que pretendem implementar formas de mitigar estas perdas de calor [23]. Os trabalhos estão relacionados com o FR a operar no setor de produção de cimento, contudo, se se verificar viável, poderiam vir a ser implementadas noutras áreas de aplicação. Fatores que podem induzir à diminuição das perdas térmicas são a melhoria do isolamento e a diminuição do tempo de residência dos sólidos. Quanto mais elevado for o tempo de queima, maior a exposição a perdas térmicas.

4.2. Viabilidade ambiental

No estudo de viabilidade ambiental tenciona-se avaliar o impacto ambiental de uma central termoelétrica de biomassa quando comparada com outras fontes de produção energética, sendo elas, ou não, renováveis. Ressalta-se também a importância dos dispositivos de controlo de emissões e a necessidade do uso sustentável de biomassa para preservar os recursos naturais e reduzir o risco de incêndios florestais. É feita uma comparação, a nível de emissões, do FR com outras tecnologias de queima.

Tal como outras formas de combustão, a combustão de biomassa emite também poluentes. Como indicado no subcapítulo 3.5.8., existem diferentes fatores que podem influenciar as emissões presentes no aproveitamento energético da biomassa [21, 54]. Os poluentes emitidos são essencialmente compostos por CO₂, CO, NO_x, SO₂ e partículas em suspensão. Apesar de ser extremamente difícil eliminar todas as emissões, é possível reduzi-las consideravelmente através de equipamentos de tratamento de efluentes gasosos, indicados no subcapítulo 3.2.5. O CO₂ é o único gás que não é tratado e é libertado diretamente para a atmosfera, salvo se forem implementadas técnicas de captura de carbono (subcapítulo 3.4.8) [72]. Apesar do tratamento de gases e a libertação de CO₂ serem comuns na combustão de combustíveis fósseis, a biomassa apresenta a vantagem de poder ser considerado um combustível neutro em carbono [18]. Como indicado em Carneiro et al. [54], a neutralidade carbónica na combustão de biomassa não é partilhada por todos os especialistas. Ainda assim, neste TFM, como descrito no subcapítulo 1.1, foi aceite a premissa que a combustão não contribui com “novo” CO₂ para a atmosfera [18]. Relativamente a outros poluentes, a queima de biomassa de origem florestal, face à queima de combustíveis fósseis, tem emissões de NO_x similares e de SO₂ significativamente menores [54]. Ao utilizar a técnica de estagiamento de ar é possível que as emissões de NO_x sejam mais baixas que a combustão direta. Tendo tudo isto em vista, e considerando que a biomassa pode ser neutra em carbono, e ainda renovável, este combustível apresenta mais vantagens ambientais que combustíveis fósseis.

Ainda que a combustão de biomassa seja considerada neutra em carbono, todos os processos que precedem à sua utilização não o são. Os processos de cultivo, recolha, transporte e armazenamento utilizam combustíveis fósseis [95]. No artigo Evans et al. [95] é discutido, no ponto de vista de outros autores, as emissões envolvidas nestes

processos. Alguns autores citados neste trabalho afirmam que, remover vegetação acima ou ao nível do solo, preserva carbono suficiente no solo para compensar as emissões dos processos antecedentes. Outros indicam que o processo de combustão evita a decomposição anaeróbica da biomassa, evitando a libertação de metano, e assim possibilita atingir a neutralidade carbónica. Na generalidade, os autores verificam que, apesar de todo o processo não ser neutro em carbono, na maioria dos trabalhos consultados, a opinião mais aceite é que toda a cadeia é próxima de o ser, já que todo o processo envolve baixas emissões, maioritariamente na forma de CO₂ [95].

Para garantir que o aproveitamento é renovável e neutro em carbono, o combustível precisa de ser cultivado, se for o caso, e recolhido de forma sustentada. Os critérios de sustentabilidade, para as variadas tipologias de biomassa, estão estabelecidos na Diretiva (UE) 2018/2001 relativa à promoção de energia de fontes renováveis, no artigo 29.º números 2 a 7. Nesta diretiva, é referido que a exploração de biomassa de forma sustentável permite: reduzir o impacto ambiental, tornar o combustível mais confiável, no que concerne à sua disponibilidade, e reduzir o seu custo.

A biomassa proveniente de culturas energéticas é amplamente utilizada por questões económicas, que serão revistas no subcapítulo seguinte, e pela acrescida facilidade no abastecimento de combustível. Contudo, a utilização biomassa de culturas energéticas é causa de grande debate, por ter um maior impacto no ambiente e na biodiversidade, relativamente à biomassa proveniente de limpeza florestal. A necessidade de cultivo e fertilização do terreno (a fertilização provoca um aumento nas emissões de NO_x), o possível conflito com áreas de cultivo para comida e alimentação de pecuária, e a introdução de espécies invasivas que podem prejudicar a biodiversidade, são alguns dos riscos que têm de ser avaliados quando se opta por esta via [56].

Já a exploração da biomassa de resíduos florestais e arbustivos, quando articulada com políticas sustentáveis, é preferida ambientalmente, e pode ser um método de prevenção de incêndios florestais [96]. Neste estudo técnico [96] é indicado que no ano de 2016 apenas foi aproveitada 22,4% da biomassa de resíduos florestais para produção de energia. Um dos impedimentos para a larga aplicação de medidas de limpeza florestal, conexas à produção energética, são os custos de exploração. Tornar o processo de recolha e transporte mais eficientes, pode ser uma das soluções para incentivar projetos de

limpeza de florestal e o subsequente aproveitamento energético [96]. A exploração sustentada pode também potencializar a biodiversidade e oferecer melhores condições às espécies locais, através da diminuição de pragas e doenças [56, 97].

As principais referências consultadas que fazem a comparação do FR (implicitamente contabiliza-se também a câmara de pós-combustão) com outras tecnologias de queima, não referem diferenças nas emissões gasosas resultantes, se os fornos operarem nas mesmas condições e com o mesmo combustível [23, 48, 49, 50, 51, 52]. Leckner [52] indica que um dos motivos para as emissões serem próximas entre as tecnologias, advém de optar por um estagiamento de ar, que reduz a produção de NO_x, e na utilização de uma câmara de pós-combustão, que permite queimar o CO e HC não queimados. Dos trabalhos referenciados, apenas Fosgitt [34] e Termogreen [36] indicam diferenças relativamente às emissões. Em Fosgitt [34] indica-se que as emissões são inferiores à tecnologia de leito fluidizado, mas superiores ao leito fixo. A empresa Termogreen garante apenas que é uma tecnologia com baixa emissão de poluentes [36]. Em Molino [51] é descrito o FR a operar como gaseificador, e conclui-se que produz um gás síntese com um elevado teor de alcatrão, que o torna um dos dispositivos com o gás síntese de pior qualidade. O teor de alcatrão é muitas vezes descrito como uma das maiores desvantagens da gaseificação [98]. Contudo, como o gás síntese produzido no FR é queimado na câmara de pós-combustão, esta desvantagem não se revela tão preocupante.

4.3. Viabilidade económica

No estudo de viabilidade económica pretende-se olhar, de uma forma geral e qualitativa, para os custos na implementação de uma central termoelétrica a biomassa e na aplicação do FR. Mencionam-se os principais tipos de custo e é feita uma comparação dos custos das centrais que utilizam FR, com outras que utilizam tecnologias de queima distintas.

Pode-se dividir os custos de uma instalação em três vertentes: custos de investimento, custos de operação e custos de manutenção. O custo de investimento é o custo referente a toda a infraestrutura [99]. Os custos de operação referem-se aos gastos necessários para operar a central, como por exemplo, o combustível, a água e os

trabalhadores [17, 99]. O custo de manutenção está associado aos gastos com a manutenção dos equipamentos [99].

Muitos dos tipos de custo apresentados são variáveis consoante a tecnologia a operar. A biomassa também é incluída nos custos e, apesar do preço possuir grandes variações, é muitas vezes o maior, ou dos maiores, custos de centrais a biomassa [17, 95]. Neste preço estão implícitos os custos da cadeia de abastecimento e a baixa densidade energética deste combustível [17, 95]. Verifica-se que é importante otimizar ao máximo toda a cadeia, reduzir a necessidade de pré-tratamento e selecionar combustível com maior densidade energética, como a biomassa de origem florestal [17]. O FR pode ser uma tecnologia de interesse para colmatar parte do problema, pois não apresenta problemas ao nível da granulometria nem humidade do combustível, eliminando a necessidade de pré--tratamento. A criação de fileiras florestais de curta duração, ou no sentido mais amplo, criação de culturas energéticas, pode ser uma solução viável para diminuir os custos de abastecimento de biomassa, já que se pode criar uma fonte de combustível renovável perto da instalação onde se vai realizar o aproveitamento energético, diminuindo os custos no transporte [56].

Quando comparadas com outras formas de produção de energia, as centrais termoelétricas a biomassa ainda enfrentam custos muito elevados, acima de outras renováveis, como a solar fotovoltaica, eólica *on-shore* e centrais hidroelétricas, e acima de fontes de energia fóssil. Assim, centrais com produção dedicada de eletricidade, principalmente quando são de menor capacidade, podem não gerar interesse. Deve-se, portanto, priorizar a utilização de centrais em cogeração [10].

Como já foi referido, não foram encontrados casos de estudo que comparassem os custos de uma central termoelétrica a biomassa com FR com outras tecnologias, por isso utilizam-se os trabalhos que fazem esta comparação de custos para o caso dos resíduos [23, 48, 49, 50, 51, 52]. Antes de realizar a comparação, confirmou-se que os custos qualitativos indicados coincidiam entre as fontes.

Nos custos de investimento o FR apresenta-se como uma tecnologia com custos baixos a moderados [48, 51]. São tipicamente mais baixos que tecnologias como o leito fluidizado, grelha móvel e forno de plasma (que se aconselham sobretudo a centrais de maior capacidade), mas podem ser mais elevados que fornos de leito fixo [23, 48, 51].

Os custos de operação são os custos que podem estar menos relacionados com a tecnologia, já que o maior peso é o custo do combustível. Contudo, os custos de operação com FR são indicados em [49] como elevados, mas também são apontados elevados para outras tecnologias, como a grelha móvel. Alguns motivos que podem ser apontados para os elevados custos de operação são a energia elétrica despendida para permitir a sua rotação e a baixa eficiência energética do forno, que acaba por necessitar de mais combustível para perfazer a mesma quantidade de energia útil.

Os custos de manutenção são elevados, podendo representar uma limitação na sua aplicabilidade em larga escala [48, 51]. Os maiores custos de manutenção são referentes à substituição do refratário e ao desgaste nas partes móveis [48]. Na incineração a frequência de manutenção do refratário é maior, porque o desgaste é mais severo devido ao tipo de resíduos incinerados e às altas temperaturas [43].

4.4. Viabilidade social

No estudo de viabilidade social pretende-se analisar o impacto de uma mini central termoelétrica de biomassa na população local. Avaliam-se vários fatores, como a geração de emprego, o incentivo à economia, a melhoria da infraestrutura elétrica local e a poluição sonora e ambiental. Destacam-se alguns trabalhos que investigaram a opinião popular sobre a instalação de centrais termoelétricas de biomassa, e avaliam-se os impactos sociais relatados. Indicam-se também as vantagens, a nível social, na implementação de uma mini central, quando comparada com centrais de maior capacidade.

Não foram encontradas diferenças diretas, no ponto de vista social, quando são usadas tecnologias de queima diferentes [23, 48, 49, 50, 51, 52]. Pelo que se considera que, ao existirem, não são impactantes, por conseguinte, qualquer conclusão no ponto de vista social é transversal às tecnologias.

As centrais a biomassa favorecem economicamente regiões mais rurais com condições económicas mais desfavoráveis. Por um lado, industrializando-as, por outro, aumentando as oportunidades de trabalho, direta ou indiretamente, sobretudo quando são envolvidas culturas energéticas [54]. As oportunidades de trabalho podem ser duas a três vezes superiores aos empregos criados por uma central termoelétrica a carvão [95]. A

geração de emprego ajuda também a combater o êxodo rural [54]. Os trabalhos gerados de forma direta referem-se a trabalhos de operação ou manutenção na central, de recolha de biomassa, de cultivo de culturas energéticas e trabalhos de pesquisa. Os criados de forma indireta devem-se à introdução no mercado de novos trabalhos interligados com a central, como transportadoras de combustível e materiais de construção, serviços de consultoria, entre outros [64]. Dado que este tipo de instalação está frequentemente situado em zonas rurais, tem o potencial de melhorar a infraestrutura elétrica local e reforçar a segurança energética da região [55, 82].

A implementação de centrais de biomassa é muitas vezes receada pela população local pelo possível impacto ambiental, social e económico negativo [100, 101]. A seguir são apresentados os estudos Upham et al. [100], Upreti [101] e Lucas et al. [102] que relatam a opinião popular sobre estas instalações, descrevendo os principais motivos de oposição, bem como os argumentos a favor.

Em Upham et al. [100] é relatado um questionário, elaborado em 2004, sobre a opinião pública relativamente à construção de um gaseificador para produção elétrica, em ciclo combinado, com 21,5 MW_e de capacidade. A resposta ao questionário foi dada por 40% da população da região e a opinião foi amplamente contra a sua instalação. Os maiores receios foram o aumento do tráfego de camiões, a poluição e ruído inerentes aos meios de transporte, e as emissões e cheiros provenientes da central. O potencial de criação de emprego foi a maior vantagem apontada.

Em Upreti [101] também são investigados impactos sociais em várias instalações de maior capacidade (5,5–32 MW) no Reino Unido, e são indicados como motivos para oposição os riscos ambientais (emissões e riscos para a saúde), ecológicos (impacto na fauna, flora e águas), económicos (baixa compensação, baixos benefícios e impacto negativo no turismo) e problemas relacionados com o aumento de tráfego e do ruído. Neste trabalho é também verificado que, mesmo indicados os benefícios económicos e no aumento de oportunidades de trabalho, os riscos anteriormente referidos são considerados de maior relevância, e a aceitação a este tipo de centrais é muitas vezes negada.

Artigos mais recentes relatam problemas semelhantes de oposição social, como em Gabrielle et al. [103] ou Botelho et al. [104], e são também indicados outros, como a poluição luminosa e poluição visual.

Em Lucas et al. [102] é feito um questionário aos cidadãos dinamarqueses relativamente à utilização de biomassa de origem florestal para produção energética, e foram recolhidas 1023 respostas. Verificou-se que houve mais pessoas a favor da sua utilização, do que contra. No entanto, é de notar que, ao contrário do questionário desenvolvido em [100], que foi direcionado para as pessoas a habitar na região da instalação da central, as opiniões indicadas neste trabalho não são referentes a uma central nem região em específico, mas apenas à utilização de biomassa de origem florestal para aproveitamento energético. Neste caso, os efeitos adversos diretos à população indicados nos outros trabalhos, como as emissões, os cheiros e a poluição visual, luminosa e sonora, podem não ter sido considerados nas respostas dos participantes.

Existe outro possível impacto negativo que é a utilização de terreno agrícola para a plantação de culturas energéticas. Em alguns casos, estas culturas são implementadas em terrenos férteis destinados, ou que podem ser destinados, à produção de alimento. Estas ocorrências devem ser evitadas para impedir um impacto social negativo agravado [95].

A utilização de biomassa e outras fontes de energia renovável, apesar de serem preferidas a energias fósseis, não estão livres de um possível impacto social negativo. Contudo, as opiniões nunca são transversais, já que inúmeros fatores as podem influenciar. Assim, devem ser implementadas formas para mitigar os possíveis efeitos adversos indicados pelos locais. No caso das centrais a biomassa, deve-se, por exemplo, envolver a população em todas as fases da construção, tornar transparentes todos os dados relativos às emissões durante o funcionamento, enfatizar os benefícios para a população local e oferecer compensações monetárias à população local (por exemplo um desconto na eletricidade paga) [104].

Verifica-se também que a má receção da opinião pública, em muitos casos, não está, maioritariamente, na forma de utilização de energia, mas sim em todo o impacto que consigo acarreta. Muito deste impacto é proporcional à dimensão da instalação. Centrais de maior capacidade emitem mais emissões, têm um maior impacto na poluição visual e

podem forçar um maior tráfego para garantir o combustível necessário para a central, promovendo maior ruído e poluição [100]. A utilização de mini centrais pode ser uma das alternativas para atenuar parte destas adversidades, e criar uma maior aceitação social para a utilização de biomassa [100, 101, 104].

5. Conclusão e trabalhos futuros

5.1. Conclusão geral

Nesta dissertação realizou-se o estudo teórico completo de mini centrais a biomassa com forno rotativo.

Verificou-se que, quando utilizada de forma sustentável, a biomassa é uma fonte de energia renovável. O seu aproveitamento direto pode ser considerado neutro em carbono, devido à compensação existente por parte da fotossíntese durante o crescimento de outras espécies. Porém, se for contabilizada a cadeia de abastecimento, existem, de facto, emissões, mas em baixas quantidades e maioritariamente na forma de CO₂. A sua utilização também é importante para diversificar o mix energético, mitigar o risco de incêndios florestais, se for utilizada biomassa de resíduos florestais, e amenizar a problemática da intermitência na produção de eletricidade de outras renováveis, graças à capacidade de produção de energia despachável, podendo, também, reduzir a dependência energética externa do país.

As mini centrais a biomassa com forno rotativo têm o potencial de resolver dois dos principais desafios associados à biomassa. Um é referente à disponibilidade. Frequentemente as centrais a biomassa necessitam de importar combustível de regiões longínquas, especialmente centrais de maior capacidade, aumentando o nível de emissões na cadeia de abastecimento, para além de encarecer o custo do combustível. As mini centrais revelam-se rentáveis neste aspeto, já que a sua localização descentralizada permite tirar partido de raios de exploração de biomassa mais curtos, reduzindo também a complexidade logística e os custos energéticos associados. O outro problema diz respeito à heterogeneidade da mesma, já que cada classe de biomassa possui características distintas. Muitas outras tecnologias não aceitariam determinados combustíveis, ou exigiriam um pré-tratamento exaustivo. O FR, devido à sua versatilidade, permite que estas instalações recebam todo o tipo de recursos de biomassa disponíveis na vizinhança, se forem tecnicamente, ou economicamente, viáveis, podendo reduzir a necessidade de transporte e aumentando a energia útil do combustível. A utilização do FR em mini centrais permite combinar a vantagem da versatilidade do combustível a estas instalações, que sofrem, na generalidade, com menores eficiências e um custo específico mais elevado. Este benefício resulta, inevitavelmente, num custo de

combustível mais reduzido. Esta atenuação poderia compensar os elevados custos específicos destas centrais, viabilizando mais a sua utilização.

Do ponto de vista social e ambiental, não foram encontradas diferenças na utilização do FR comparativamente a outras tecnologias de queima. Os principais pontos resumem-se ao combustível e à instalação como um todo, e não propriamente ao tipo de tecnologia utilizado. Os impactos sociais negativos relacionam-se com a poluição visual e sonora, e possíveis riscos ambientais e ecológicos. Estes problemas podem ser desagradados ao optar por mini centrais. Há também vantagens sociais, já que as centrais permitem industrializar regiões rurais e criar emprego de forma direta e indireta. Na questão ambiental, as emissões continuam presentes, porém, como se optou pela técnica de estagiamento de ar, podem-se esperar reduções ao nível das emissões de NO_x e nas emissões provenientes de uma combustão incompleta, comparativamente a uma combustão direta.

Apesar de promissora, a aplicação do FR em mini centrais possui ainda alguns entraves que, resolvidos, tornariam a instalação técnico-economicamente mais viável. Os principais pontos são a eficiência térmica baixa (em grande parte devido às perdas energéticas ao longo do cilindro) e os custos de manutenção do refratário. A perda de calor pelas paredes do forno advém, em parte, das características construtivas do forno. Porém, a redução destas perdas é algo continuamente estudado na indústria cimenteira, e medidas podem ser descobertas e implementadas neste setor, principalmente na introdução de isolamentos térmicos mais eficazes. Operar o FR com mini centrais também se torna ideal, já que a energia útil do combustível pode aumentar devido a uma redução da energia despendida na cadeia de abastecimento. No que se refere ao refratário, com o desenvolvimento da engenharia dos materiais, é esperado que novos materiais, mesmo que mais dispendiosos, possam suportar um tempo de vida mais longo, evitando maiores paragens na central para manutenção interna do FR, podendo reduzir os custos de manutenção. Atuar sobre estes dois pontos indicados seria um avanço considerável para tornar este tipo de instalações mais comuns.

5.2. Trabalhos futuros

Devido à amplitude de conhecimentos intrínsecos neste tema, existem inúmeros trabalhos futuros que podem derivar desta dissertação.

Um deles pode incidir num estudo mais aprofundado na viabilidade técnico-económica na utilização de biomassa no FR. Poderia incluir os gastos energéticos típicos na cadeia de abastecimento e a eficiência energética do forno. Contudo, atualmente, tal estudo é de difícil realização devido à escassez de informação mais técnica.

Seria de interesse realizar um estudo que pretendesse fazer uma análise e comparação da viabilidade de uma central termoelétrica com FR a operar com estagiamento de ar, face a uma central com FR em combustão direta. Analisar-se-iam também os pontos de viabilidade indicados: técnico, ambiental, económico e social. Neste trabalho aceitou-se o estagiamento de ar como a melhor alternativa à combustão direta única, e exclusivamente, pela vertente ambiental, não tendo em conta quaisquer desvantagens, se existentes, no ponto de vista económico.

Por fim, outro trabalho futuro pode incidir no estudo das tecnologias avançadas de produção de eletricidade com a tecnologia de FR. Estes métodos utilizam a pirólise ou gaseificação, ou uma combinação dos dois, para transformar a biomassa noutra forma de combustível, para depois ser queimado num equipamento de combustão interna. Os mais comuns são o PICC, PICR e GICC. Estes métodos revelam-se promissores face ao processo de combustão: permitem alcançar eficiências mais elevadas e têm um menor impacto ambiental [20, 69]. Contudo, são processos que ainda se encontram na fase de desenvolvimento, principalmente quando aplicados com o FR, e são mais dispendiosos e complexos [71, 105].

REFERÊNCIAS

- [1] A. Olabi e M. A. Abdelkareem, “Renewable energy and climate change,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 158, nº 112111, 2022.
- [2] C. Borrego, M. Lopes, I. Ribeiro, A. Carvalho e A. I. Miranda, “As alterações climáticas: uma realidade transformada em desafio,” *CAPTAR*, vol. 2, nº 2, pp. 1-16, 2010.
- [3] W. F. Lamb, T. Wiedmann, J. Pongratz, R. Andrew, M. Crippa e J. G. J. Olivier, “A review of trends and drivers of greenhouse gas emissions by sector from 1990 to 2018,” *Environmental Research Letters*, vol. 16, nº 073005, 2021.
- [4] APA, “Inventário Nacional de Emissões 2022,” 15 abril 2022.
- [5] EEA, “EU achieves 20-20-20 climate targets, 55 % emissions cut by 2030 reachable with more efforts and policies,” 26 outubro 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/highlights/eu-achieves-20-20-20>. [Acedido em 20 fevereiro 2023].
- [6] Presidência do Conselho de Ministros, “Resolução do Conselho de Ministros n.º 20/2013,” *Diário da República*, 2013.
- [7] C. Macedo, “Observatório da Energia: “Portugal e as metas energéticas para 2020”,” 2 agosto 2021. [Online]. Disponível em: <https://www.ambientemagazine.com/observatorio-da-energia-portugal-e-as-metas-energeticas-para-2020/>. [Acedido em 20 fevereiro 2023].
- [8] A. T. Hoang, S. Nižetić, A. I. Olcer, H. C. Ong, W.-H. Chen, C. T. Chong, S. Thomas, S. A. Bandh e X. P. Nguyen, “Impacts of COVID-19 pandemic on the global energy system and the shift progress to renewable energy Opportunities, challenges, and policy implications,” *Energy Policy*, vol. 154, p. 112322, 2021.
- [9] A. Roth, C. Klessmann e J. Niedergesäss, “How COVID helped EU countries meet their renewable energy targets,” 21 novembro 2022. [Online]. Disponível em:

- <https://www.euractiv.com/section/energy/opinion/how-covid-helped-eu-countries-meet-their-renewable-energy-targets/>. [Acedido em 22 fevereiro 2023].
- [10] Governo de Portugal, “Plano Nacional Energia e Clima 2021-2030 (PNEC 2030),” 2019.
- [11] M. d. A. e. d. A. Climática, F. Ambiental e APA, “Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050 (RNC2050),” 2019.
- [12] EDP Comercial, “PNEC: O que é e o que significa?,” 24 novembro 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.edp.pt/empresas/empresas-com-energia/pnec-o-que-significa-para-a-minha-empresa/>. [Acedido em 21 fevereiro 2023].
- [13] APREN, “2021 Eletricidade Renovável em Revista,” 2022, p. 6.
- [14] APREN, “Balanço da Produção de Eletricidade de Portugal Continental em 2022,” [Online]. Disponível em: <https://www.apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao>. [Acedido em 21 fevereiro 2023].
- [15] DGEG, “Produção anual e potência instalada,” [Online]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/estatistica/energia/eletricidade/producao-anual-e-potencia-instalada/>. [Acedido em 21 fevereiro 2023].
- [16] REN, [Online]. Disponível em: <https://datahub.ren.pt>. [Acedido em 22 fevereiro 2023].
- [17] S. v. Loo e J. Koppejan, *The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing*, Londres: Earthscan, 2008.
- [18] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 1): overview of biomass,” *Bioresource Technology*, vol. 83, pp. 37-46, 2002.
- [19] S. Ferreira, E. Monteiro, P. Brito e C. Vilarinho, “Biomass resources in Portugal: Current status and prospects,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 78, pp. 1221-1235, 2017.

- [20] J. Nunes e F. Freire, “Tecnologias Avançadas para a Produção de Electricidade com base em Biomassa Lenho-Celulósica (Número especial: Energia),” *Revista Engenharia Química: indústria, ciência e tecnologia*, vol. 6, pp. 34-41, 2007.
- [21] P. Adams, T. Bridgwater, A. Lea-Langton, A. Ross e I. Watson, “Chapter 8 - Biomass Conversion Technologies,” em *Greenhouse Gas Balances of Bioenergy Systems*, Academic Press, 2018, pp. 107-139.
- [22] P. P. d. Santos, “Sessão de Esclarecimentos “Projetos de Produção de Energia Elétrica a partir Fontes Renováveis, e pouco disseminadas no território nacional, e respetiva integração na rede”,” 30 julho 2019. [Online].
- [23] J. Bojanovský, V. Máša, I. Hudák, P. Skryja e J. Hopjan, “Rotary Kiln, a Unit on the Border of the Process and Energy Industry—Current State and Perspectives,” *Sustainability*, vol. 14, nº 21, 2022.
- [24] A. A. Boateng, *Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes*, Butterworth-Heinemann, 2015.
- [25] K. E. Peray, *The Rotary Cement Kiln*, Chemical Publishing Co., Inc., 1986.
- [26] A. Donatelli, P. Garzone e P. Iovane, “Discharging granular material from a rotary kiln in a slumping regime: Theoretical and experimental studies,” *Particuology*, vol. 23, pp. 56-61, 2015.
- [27] J. Lasek, K. Głód, K. Słowik, A. Cygan e Y.-H. Li, “Static and dynamic characteristics of rotary kiln reactor during processing of biomass and municipal solid waste,” *Powder Technology*, vol. 404, nº 117476, 2022.
- [28] J. Mellmann, “The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior,” *Powder Technology*, vol. 118, pp. 251-270, 2001.
- [29] H. Liu, H. Yin, M. Zhang, M. Xie e X. Xi, “Numerical simulation of particle motion and heat transfer in a rotary kiln,” *Powder Technology*, vol. 287, pp. 239-247, 2015.

- [30] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 2): conversion technologies,” *Bioresource Technology*, vol. 83, pp. 47-54, 2002.
- [31] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 3): gasification technologies,” *Bioresource Technology*, vol. 83, pp. 55-63, 2002.
- [32] W. M. Lewandowski, M. Ryms e W. Kosakowski, “Thermal Biomass Conversion: A Review,” *processes*, vol. 8, n° 5, 2020.
- [33] J. G. Speight, *The Biofuels Handbook (RSC Energy Series, Volume 5)*, Wyoming: Royal Society of Chemistry, 2011, pp. 78-155.
- [34] R. L. Fosgitt, “Gasification using rotary kiln technology,” Cirque Energy, LLC, Saginaw, 2010.
- [35] P. Amodeo, D. Goodale, D. Waage, R. Rynk e R. Comly, “Alternative Energy Derived from Agricultural and Cafeteria Wastes using a Rotary Kiln Gasifier,” em *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2009.
- [36] Termogreen, [Online]. Disponível em: <http://www.termogreen.com/index.html>. [Acedido em 26 abril 2024].
- [37] J. Bujak, P. Sitarz, K. Bujak, S. Majkowski e R. Pasela, “Estimation Complete Combustion Coefficient in Rotary Kilns,” *Energies*, vol. 15, n° 3, 2022.
- [38] C. D. Cooper e F. C. Alley, *Air Pollution Control: A Design Approach*, Illinois: Waveland Press, 2011.
- [39] R. K. Rajput, *A Textbook of Power Plant Engineering*, Laxmi Publications, 2007.
- [40] L. Rosendahl, *Biomass Combustion Science, Technology and Engineering*, Rumford: Woodhead Publishing, 2013.
- [41] H. Basri, I. Yani e A. T. Prakoso, “The prediction of fatigue crack growth of rotary kiln shell welded under cyclic loading,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 620, n° 012115, 2019.

- [42] P. Samanta, B. Chakrabart e S. V. Herwadkar, “Misalignment Effect on Cement Kiln Support Bearing,” *International Joint Tribology Conference*, n° IJTC2008-71152, pp. 489-491, 2009.
- [43] X. Jiang, Y. Li e J. Yan, “Hazardous waste incineration in a rotary kiln: a review,” *Waste Disposal & Sustainable Energy*, vol. 1, pp. 3-37, 2019.
- [44] A. Bosmans e L. Helsen, “Energy from waste: review of thermochemical technologies for refuse derived fuel (RDF) treatment,” em *Third International Symposium on Energy from Biomass and Waste*, Venice, 2010.
- [45] P. Stehlík, “Effective utilization of heat in waste and biomass processing,” em *6th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Pretoria, 2008.
- [46] A. V. Weinberg, C. Varona, X. Chaucherie, J. Poirier e D. Goeuriot, “Rotary Kilns for Hazardous Waste Incineration: Refractory Wear Mechanism and Lifetime Prolongation,” *Refractories Worldforum*, vol. 10, n° 1, pp. 82-86, 2017.
- [47] J. Bujak, P. Sitarz e M. Nakielska, “Analysis of meat and bone meal clean combustion conditions,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 280, n° 124428, 2021.
- [48] U. Arena, “Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review,” *Waste Management*, vol. 32, pp. 625-639, 2012.
- [49] S. Al-Salem, *Plastics to Energy*, William Andrew, 2019.
- [50] S. El-Haggar, *Sustainable Industrial Design and Waste Management*, Elsevier, 2007.
- [51] A. Molino, S. Chianese e D. Musmarra, “Biomass gasification technology: The state of the art overview,” *Journal of Energy Chemistry*, vol. 25, pp. 10-25, 2016.
- [52] B. Leckner, “Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy (WtE) units,” *Waste Management*, vol. 37, pp. 13-25, 2015.

- [53] L. J. R. Nunes, T. P. Causer e D. Ciolkosz, “Biomass for energy: A review on supply chain management models,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 120, n° 109658, 2020.
- [54] P. Carneiro e P. Ferreira, “The economic, environmental and strategic value of biomass,” *Renewable Energy*, vol. 44, pp. 17-22, 2012.
- [55] C. Cambero e T. Sowlati, “Assessment and optimization of forest biomass supply chains from economic, social and environmental perspectives – A review of literature,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 62-73, 2014.
- [56] I. Malico, J. Carrajola, C. J. P. Gomes e J. C. Lima, “Biomass residues for energy production and habitat preservation. Case study in a montado area in Southwestern Europe,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 112, n° 5, pp. 3676-3683, 2016.
- [57] D. Lahaye, M. e. Abbassi, K. Vuik, M. Talice e F. Juretic, “Mitigating Thermal NOx by Changing the Secondary Air Injection Channel A Case Study in the Cement Industry,” *Fluids*, vol. 5, n° 2, 2020.
- [58] H. Henein, J. K. Brimacombe e A. P. Watkinson, “Experimental Study of Transverse Bed Motion in Rotary Kilns,” *Metallurgical Transactions B*, vol. 14, pp. 191-205, 1983.
- [59] S. Yang, Q. Kong, D. Zeng, S. Wu, F. Gong e R. Xiao, “Simulation research of a counter-flow rotary kiln hazardous waste incineration system,” *International Journal of Coal Science & Technology*, vol. 9, n° 60, pp. 1-10, 2022.
- [60] H. M. B. Al-Hashemi e O. S. B. Al-Amoudi, “A review on the angle of repose of granular materials,” *Powder Technology*, vol. 330, pp. 397-417, 2018.
- [61] X. Liu, X. Xu, W. Wu, F. Herz e E. Specht, “A simplified model to calculate the power draw for material movement in industrial rotary kilns,” *Powder Technology*, vol. 301, pp. 1294-1298, 2016.

- [62] M. He, J. Zhang e X. Y. Liu, “Determination of the Repose Angle of Stuff in Rotary Kiln Based on Imaging Processing,” em *The Ninth International Conference on Electronic Measurement & Instruments* , Beijing, 2009.
- [63] DGEG, “Biomassa,” [Online]. Disponível em: <https://www.dgeg.gov.pt/pt/areas-setoriais/energia/energias-renovaveis-e-sustentabilidade/biomassa/>. [Acedido em 17 abril 2023].
- [64] I. Stupak, A. Asikainen, M. Jonsell, E. Karlton, A. Lunnan, D. Mizaraite, ... e P. Tamminen, “Sustainable utilisation of forest biomass for energy—Possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic, and other European countries,” *Biomass and Bioenergy* , vol. 31, pp. 666-684, 2007.
- [65] ZERO, “A Biomassa em Portugal,” outubro 2021.
- [66] H. Cheng e Y. Hu, “Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China,” *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. 3816-3824, 2010.
- [67] M. R. Wu, D. L. Schott e G. Lodewijks, “Physical properties of solid biomass,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, pp. 2093-2105, 2011.
- [68] S. V. Vassilev, C. G. Vassileva, Y.-C. Song, W.-Y. Li e J. Feng, “Ash contents and ash-forming elements of biomass and their significance for solid biofuel combustion,” *Fuel*, vol. 208, pp. 377-409, 2017.
- [69] C. J. Roos, “Clean Heat and Power Using Biomass Gasification for Industrial and Agricultural Projects,” U.S. Department of Energy, Northwest CHP Application Center, Washington, 2010.
- [70] V. F. d. Silva, “Processos termoquímicos de conversão de biomassa,” Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, 2021.

- [71] B. D'Alessandro, M. D'Amico, U. Desideri e F. Fantozzi, "The IPRP (Integrated Pyrolysis Regenerated Plant) technology: From concept to demonstration," *Applied Energy*, vol. 101, pp. 423-431, 2013.
- [72] T. Pröll e F. Zerobin, "Biomass-based negative emission technology options with combined heat and power generation," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, vol. 24, pp. 1307-1324, 2019.
- [73] Y. A. Situmorang, Z. Zhao, A. Yoshida, A. Abudula e G. Guan, "Small-scale biomass gasification systems for power generation (<200 kW class): A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 117, n° 109486, 2020.
- [74] R. T. Kusuma, R. B. Hiremath, P. Rajesh, B. Kumar e S. Renukappa, "Sustainable transition towards biomass-based cement industry: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 163, n° 112503, 2022.
- [75] Valmet, "Using wood powder as fuel in lime kilns, pilot case study," 8 janeiro 2019. [Online]. Disponível em: <https://www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/new-technology/VPWoodLimeKiln/>. [Acedido em 26 abril 2023].
- [76] J. C. Solarte-Toro, J. A. Gonzalez-Aguirre, J. A. P. Giraldo e C. A. C. Alzate, "Thermochemical processing of woody biomass: A review focused on energy-driven applications and catalytic upgrading," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 136, n° 110376, 2021.
- [77] R. Kizuka, K. Ishii, S. Ochiai, M. Sato, A. Yamada e K. Nishimiya, "Improvement of Biomass Fuel Properties for Rice Straw Pellets Using Torrefaction and Mixing with Wood Chips," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 12, pp. 3417-3429, 2021.
- [78] I. Karp e K. Pyanykh, "Substitution of natural gas by biomass," *Advanced Science*, n° 7, ISSN 2219-746X, 2014.
- [79] K. Pyanykh, A. Yudin e I. Karp, "Biomass: Combustion and Gasification for Substitution of Natural Gas," *Industrial Heating*, vol. 81, n° 6, pp. 39-42, 2013.

- [80] J. Carroll, J. Finna, F. Biedermann, Brunner, T. e I. Obernberger, “Air staging to reduce emissions from energy crop combustion in small scale applications,” *Fuel*, vol. 155, pp. 37-43, 2015.
- [81] K. Yagi e T. Nakata, “Economic analysis on small-scale forest biomass gasification considering geographical resources distribution and technical characteristics,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, n° 7, pp. 2883-2892, 2011.
- [82] E. Bocci, M. Sisinni, M. Moneti, L. Vecchione, A. Di Carlo e M. Villarini, “State of art of small scale biomass gasification power systems: a review of the different typologies,” *Energy Procedia*, vol. 45, pp. 247-256, 2014.
- [83] M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner e M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, John Wiley & Sons, 2014, pp. 437-506.
- [84] M. Shirinbakhsh e M. Amidpour, “Design and optimization of solar-assisted conveyer-belt dryer for biomass,” *Energy Equipment and Systems*, vol. 5, n° 2, pp. 1-10, 2017.
- [85] J. Yi, X. Li, J. He e X. Duan, “Drying efficiency and product quality of biomass drying: a review,” *Drying Technology*, vol. 38, n° 15, 2020.
- [86] F. Neuwahl, G. Cusano, J. G. Benavides, S. Holbrook e S. Roudier, “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Waste Incineration,” EUR 29971 EN, 2019.
- [87] F. Winter, M. Lackner e A. K. Agarwal, *Handbook of Combustion - Volume 4: Solid Fuels*, Wiley-VCH, 2010, pp. 285-323.
- [88] R. K. Lyon e J. A. Cole, “Unmixed combustion: an alternative to fire,” *Combustion and Flame*, vol. 121, n° 1-2, pp. 249-261, 2000.
- [89] B. R. M. Bisulandu e F. Marias, “Modeling of the Thermochemical Conversion of Biomass in Cement Rotary Kiln,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 12, pp. 1005-1024, 2021.

- [90] A. Demirbas, “Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 31, pp. 171-192, 2005.
- [91] R. A. Antunes e M. C. L. d. Oliveira, “Corrosion in biomass combustion: A materials selection analysis and its interaction with corrosion mechanisms and mitigation strategies,” *Corrosion Science*, vol. 76, pp. 6-26, 2013.
- [92] A. v. d. Drift e J. Pels, “Product gas cooling and ash removal in biomass gasification,” ECN, Petten, The Netherlands, ECN-report: ECN-C-04-077, 2004.
- [93] F. Lombardi, E. Lategano, S. Cordiner e V. Torretta, “Waste incineration in rotary kilns: a new simulation combustion tool to support design and technical change,” *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 31, n° 7, 2013.
- [94] G. F. Melo, P. T. Lacava e J. A. Carvalho, “A case study of air enrichment in rotary kiln incineration,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 25, n° 5, pp. 681-692, 1998.
- [95] A. Evans, V. Strezov e T. J. Evans, “Sustainability considerations for electricity generation from biomass,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 1419-1427, 2010.
- [96] O. T. Independente, R. F. Castro, P. Fernandes, J. Sande Silva, J. Azevedo, J. M. Moura e F. ... Duarte, “Redução do risco de incêndio através da utilização de biomassa lenhosa para energia,” Assembleia da República, Lisboa, 2020.
- [97] DGEG, L. Gil, J. M. Duarte, R. Costa, G. Torres e I. Cabrita, “A biomassa como fonte renovável do mix energético em Portugal,” *Renováveis Magazine*, n° 37, pp. 20-24, 2019.
- [98] D. a. P. o. a. N. R. K. T. A.-S. B. G. The Concept, “Shi, Huiyuan; Si, Wen; Li, Xi,” *Energies*, vol. 9, n° 67, 2016.

- [99] Z. Xin-gang, J. Gui-wu, L. Ang e L. Yun, “Technology, cost, a performance of waste-to-energy incineration industry in China,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 55, pp. 115-130, 2016.
- [100] P. Upham e S. Shackley, “Local public opinion of a proposed 21.5 MW(e) biomass gasifier in Devon: Questionnaire survey results,” *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, pp. 433-441, 2007.
- [101] B. R. Upreti, “Conflict over biomass energy development in the United Kingdom: some observations and lessons from England and Wales,” *Energy Policy*, vol. 32, pp. 785-800, 2004.
- [102] P. U. Lucas, C. Gamborg e T. B. Lund, “Sustainability concerns are key to understanding public attitudes toward woody biomass for energy: A survey of Danish citizens,” *Renewable Energy*, vol. 194, pp. 181-194, 2022.
- [103] B. Gabrielle, L. Bamière, N. Caldes, D. C. S. G. Decocq, F. Ferchaud e G. ... Richard, “Paving the way for sustainable bioenergy in Europe: Technological options and research avenues for large-scale biomass feedstock supply,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 11-25, 2014.
- [104] A. Botelho, L. L. Gomes, L. Pinto, S. Sousa e M. Valente, “Using stated preference methods to assess environmental impacts of forest biomass power plants in Portugal,” *Environment, Development and Sustainability*, vol. 18, pp. 1323-1337, 2016.
- [105] F. Fantozzi, B. D’Alessandro e G. Bidini, “IPRP (Integrated Pyrolysis Regenerated Plant): gas turbine and externally heated rotary-kiln pyrolysis as a biomass and waste energy conversion system. Influence of thermodynamic parameters,” *Power and Energy*, vol. 217, n° 5, pp. 519-527, 2003.