



M 2020

MODELAÇÃO E SIMULAÇÃO DO SISTEMA TÉRMICO DE UMA CALDEIRA DE BIOMASSA NO *OPENMODELICA*

IARA OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA
À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Modelação e simulação do sistema térmico de uma caldeira de biomassa no OpenModelica

Dissertação de Mestrado

de

Iara Oliveira

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

ISQ-Direção de IeDi/Unidade de Baixo Carbono e Eficiência de Recursos



Orientador na FEUP: Prof. Fernando Martins

Coordenadores no ISQ: Doutor Pedro Luis Cruz Prieto

Eng. Miguel Castro Oliveira



julho de 2020

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer ao Instituto de Soldadura e Qualidade pela oportunidade dada e pela confiança para desenvolver a minha tese de mestrado num instituto com tanta história e que me permitiu desenvolver os meus conhecimentos em termos de modelação e simulação.

Agradeço também aos meus orientadores, Doutor Pedro Prieto e Engenheiro Miguel Oliveira, a imensa disponibilidade demonstrada em ajudar no aparecimento de obstáculos e entraves e o apoio e força dados.

Ao Professor Fernando Martins pelo interesse e disponibilidade de ajudar, assim como a orientação fulcral na realização desta tese.

Agradeço aos meus avós todo o apoio e ajuda dados ao longo da minha formação académica e a todos os meus amigos pelos conselhos, incentivo e força que me transmitiram.

O Prof. Fernando Gomes Martins, orientador desta dissertação, é membro integrado do LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: Financiamento Base - UIDB/00511/2020 da Unidade de Investigação - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia - LEPABE - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático e respetiva simulação de uma instalação de demonstração de uma caldeira, usando como combustível biomassa (*pellets*) para a produção de água quente. A instalação incorpora um economizador e um pré-aquecedor de ar, que consistem em equipamentos de recuperação de calor que completam o sistema. A instalação foi modelada e simulada na plataforma *OpenModelica*, uma distribuição *open-source* da linguagem *Modelica*. Tal permitiu elevar o seu carácter demonstrativo e educacional através da visualização gráfica de resultados em tempo real, obtidos em vários cenários de operação e diminuindo custos e recursos que seriam utilizados em experiências de laboratório.

O uso da linguagem *Modelica*, sendo uma linguagem de modelação orientada a objetos, permite obter um modelo estruturado de componentes e ligações. O modelo foi elaborado com recurso a uma biblioteca personalizada *BoilerTool*, criada a partir da biblioteca *ThermoPower*. Desenvolveu-se um modelo para caldeiras de biomassa através das equações de balanços massa e de energia do processo de combustão e da equação de transferência de calor para o aquecimento da água. O modelo da caldeira foi validado pelas condições nominais de operação do sistema.

O modelo do sistema foi criado com base nas condições de operação reais. Na simulação realizada com as condições reais obtiveram-se dois valores que apresentam um desvio dos valores reais, sendo o desvio maior de 1,3 %. Estudou-se o comportamento do sistema em várias condições de operação através da simulação de 26 cenários diferentes. Nesta análise de sensibilidade do sistema considerou-se vários valores das variáveis de entrada do modelo. A variação da temperatura de saída da caldeira, da potência consumida pelo utilizador e da temperatura da água após esse consumo conduz a variações no caudal de água. Observou-se que uma diminuição e um aumento de 5 °C da temperatura da água à saída da caldeira implica um aumento de 32 % e a uma diminuição de 19 % no caudal de água, respetivamente, mantendo os caudais de ar e combustível. Em relação ao consumo de potência pelo utilizador, verificou-se que um aumento e uma diminuição em 5 % corresponde, respetivamente, a um aumento e diminuição de 5 % no valor dos 3 caudais e da potência da caldeira. Verificou-se ainda que a eficiência da caldeira e a potência fornecida na caldeira são influenciadas maioritariamente pelas temperatura do ar, dos gases de combustão à saída da caldeira e pelo excesso de ar. Nos cenários em que não é considerado pré-aquecimento do ar, observaram-se alterações na eficiência e na potência da caldeira, sendo que ambas diminuíram em todos estes cenários.

Palavras Chave: caldeira de biomassa, produção de água quente, simulação, *OpenModelica*

Abstract

The objective of the work is the modelling and simulation of a demonstrative installation of a pellet boiler for the production of hot water. The installation comprises an economiser and an air pre-heater as heat recovery equipment's, which complete the system. The system was modelled and simulated in the software *OpenModelica*, an open source distribution of the Modelica language. This allows to elevate its demonstrative and educational features by graphic visualization in real time of results obtained from different scenarios of operation, while reducing costs and resources that would have been used in laboratory experiences.

The language Modelica, which is an object-oriented programming language, enabled the development of a model structured by components and connections. The model was assembled using the library BoilerTool, built from the ThermoPower library. The model for biomass boiler was developed using mass and energy balance equations for the combustion process and heat exchange equations for the water heating. The model was validated by the nominal conditions of the system.

The model of the system was created based on the real operating conditions. In the simulation performed using the real conditions, two of the values obtained presented a deviation from de real values, being the highest deviation of 1.3 %. It was studied the behaviour of the system in several operating conditions through the evaluation of 26 different scenarios. In this sensitivity analysis of the system, the inputs of the model were varied. The analyse of the temperature of the water, the power consumed by the user and the temperature of the water after that consumption of power lead to variations of the mass flow rate of the water. It was observed that a decrease and an increase of 5 ° C in the temperature of the water leaving the boiler implies an increase of 32 % and a decrease of 19 % in the water mass flow, respectively, maintaining the air and fuel mass flows. Regarding the power consumption by the user, it was found that an increase and decrease of 5 % corresponds, respectively, to an increase and decrease of 5 % in the value of the 3 mass flows and the boiler power. It was found also that the boiler efficiency and the power supplied to the boiler are mainly influenced by the temperature of the air, temperature of the flue gases at the outlet of the boiler and the excess air. In scenarios where air pre-heating is not considered, changes in boiler efficiency and power were observed, with both variables decreasing in all scenarios.

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.

Índice

1	Introdução.....	6
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	6
1.2	Apresentação da Empresa	7
1.3	Contributos do Trabalho	7
1.4	Organização da Tese	7
2	Contexto e Estado da Arte	9
2.1	Modelação e Simulação de Sistemas.....	10
2.2	Biomassa	11
2.3	Uso de <i>pellets</i> como combustível em caldeiras	12
3	Materiais e Métodos	15
3.1	Sistema Térmico da Caldeira	15
3.2	Modelo Matemático de Operação da Caldeira	16
3.3	<i>OpenModelica</i>	19
3.4	Componentes	19
3.5	Modelo da Caldeira de Biomassa	21
3.6	Modelo do Sistema Térmico.....	23
4	Resultados e Discussão.....	25
4.1	Validação do Modelo.....	25
4.2	Simulação de Diferentes Cenários	26
5	Conclusões	37
6	Avaliação do trabalho realizado.....	39
6.1	Objetivos Realizados	39
6.2	Trabalho Futuro	39
7	Referências	41
	Anexo A - Auxiliares de Cálculo.....	45
	Anexo B - Especificações da Caldeira de Biomassa	46

Lista de Figuras

<i>Figura 2.1- Caldeira de pellets.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 3.1 - Diagrama do sistema térmico.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.2 - Fotografia do pré-aquecedor.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.3 - Fotografia do economizador.</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3.4- Interface gráfico do modelo da caldeira de biomassa.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 3.5 - Interface gráfico do sistema térmico no OMEdit</i>	<i>23</i>
<i>Figura 4.1-Caudal de água em função do consumo de potência, para as temperaturas da água aquecida na caldeira de 75 °C, 80 °C e 85 °C.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.2 -Caudal de combustível em função do consumo da potência.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.3 - Caudal de ar em função do consumo de potência.</i>	<i>29</i>
<i>Figura 4.4 - Potência recuperada no economizador e respetivas temperaturas de entrada e de saída em função do caudal de água dos cenários 1,10 e 11.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 4.5- Potência recuperada no pré-aquecedor e temperaturas de saída do ar em função da temperatura de entrada do ar.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 4.6-Caudal mássico de ar e eficiência da caldeira em função do excesso de ar.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 4.7 -Caudal de água em função da temperatura de entrada da água na caldeira, com e sem pré-aquecedor.</i>	<i>35</i>
<i>Figura 4.8 -Potência da caldeira em função do consumo de potência pelo utilizador, com e sem pré-aquecedor.</i>	<i>36</i>
<i>Figura A.1-Representação gráfica do calor específico da água em função da temperatura (Engineering ToolBox, 2004) e correlação obtida.</i>	<i>45</i>
<i>Figura B.1- Especificações da caldeira de biomassa, incluindo esquema legendado do equipamento (Smart Heating Technology, 2014)</i>	<i>46</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 2.1 -Características de pellets de madeira.</i>	<i>13</i>
<i>Tabela 3.1-Componentes equipamentos utilizados no OMEdit.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 4.1-Resultados da simulação do modelo, condições reais e desvio-padrão.</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 4.2-Diferentes cenários simulados.</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 4.3 - Resultados das simulações dos cenários 1 até ao 9.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 4.4 - Resultados das simulações dos cenários 1,10 e 11.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 4.5- Resultados das simulações dos cenários 1,12 e 13.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 4.6- Resultados das simulações dos cenários 1,14 e 15.....</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 4.7 - Resultados das simulações dos cenários 1,16 e 17.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4.8- Resultados das simulações dos cenários 19 até ao 27.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela A.1-Coefficientes da Equação 5, para cada espécie e temperaturas abaixo dos 1000 K (Koppejan e Loo, 2008).....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela A.2- Coeficientes da Equação 5, para cada espécie e temperaturas acima dos 1000 K (Koppejan e Loo, 2008).....</i>	<i>45</i>

Notação e Glossário

$\dot{m}$	caudal mássico	kg/h
A	área	m ²
D	diâmetro	m
e	espessura	kJ
h	entalpia	m
L	comprimento	kg.kmol ⁻¹
M	massa molar	W
P_n	potência nominal	kW
q	calor transferido por unidade de tempo	kJ/h
T	temperatura	°C ou K
T_0	temperatura de referência	°C ou K
T_1	temperatura adiabática de chama	°C
T_e	temperatura à entrada do permutador	°C
T_s	temperatura à saída do permutador	°C
X	fração mássica	
λ	coeficiente de excesso de ar	

Letras gregas

η	Eficiência	%
--------	------------	---

Subscritos

0	estado de referência
c	combustível
gc	gases de combustão
i	espécie química
w	humidade

Lista de Siglas

ISQ	Instituto de Soldadura e qualidade	
OMEdit	<i>OpenModelica Connection Editor</i>	
PCI	Poder Calorífico Inferior	MJ.kg ⁻¹
PCS	Poder Calorífico Superior	MJ.kg ⁻¹

1 Introdução

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

Há vários anos que os sistemas de aquecimento de biomassa são a fonte mais importante de aquecimento de espaços, antes do aparecimento de outro tipo de combustíveis, como o carvão, o gás natural e o petróleo (Nakada et al., 2014). Com o aumento das preocupações ambientais sobre a utilização de combustíveis fósseis, os sistemas de biomassa têm adquirido uma nova popularidade. Em sistemas de pequena escala, como pequenos lares, piscinas, hospitais, hotéis e explorações agrícolas, a utilização de caldeiras automáticas de *pellets* de biomassa tem aumentado, uma vez que permite o mesmo conforto em comparação a sistemas de aquecimento com gás natural ou aquecimento elétrico.

Em Portugal, a biomassa sólida é intensamente utilizada no setor industrial. No entanto, e apesar de muitos dos projetos serem tecnicamente viáveis, há um conjunto de barreiras que impedem um maior consumo de biomassa, como custos de investimento dos sistemas e forte competição com os combustíveis fósseis (Pereira, 2019). Este é um combustível renovável particularmente adequado para a produção de calor para sistemas de aquecimento e para a produção combinada de calor e eletricidade na indústria, permitindo implantação de tecnologias de baixo teor de carbono, o que faz com que seja importante demonstrar as capacidades e possibilidades dos sistemas que o utilizam.

A disponibilidade da biomassa e a sua uniformidade a nível global, aliadas à sua neutralidade nas emissões de dióxido de carbono, tornam a biomassa uma fonte de energia de muito interesse na atualidade. Os maiores obstáculos da utilização de biomassa como combustível em relação aos combustíveis fósseis são a sua baixa densidade energética, alto teor de humidade e heterogeneidade (Oberberger e Thek, 2010). Estes problemas podem ser reduzidos e mesmo até prevenidos através da produção de biomassa densa, como os *pellets* e as briquetes.

Até recentemente, as caldeiras de biomassa eram maioritariamente utilizadas por grandes indústrias para aquecimento ou produção de energia em processos de cogeração. Com o desenvolvimento de caldeiras eficientes e de fácil utilização, estima-se que até 2030, a utilização de biomassa para aquecimento de água e espaços compreenda 18 % das necessidades globais, assim como um aumento de 70 % na produção de calor industrial, através de caldeiras e gaseificadores de biomassa (Nakada et al., 2014).

Com o aumento do interesse por caldeiras de biomassa, é importante demonstrar as capacidades e vantagens da sua utilização. A modelação numérica e simulação de um sistema quando comparada com experiências de simulação de laboratório tem como vantagens a

flexibilidade de a partir de algumas informações de operação, ser possível obter parâmetros característicos do funcionamento e diferentes cenários de operação, de um modo rápido e eficiente e com custos reduzidos. A aplicação de modelos serve como suporte a dimensionamento de instalações industriais e a otimização de processos e sistemas energéticos.

1.2 Apresentação da Empresa

O Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ) é uma entidade privada, independente e sem fins lucrativos, sediada em Portugal, que presta serviços de engenharia, consultoria técnica, inspeções técnicas, ensaios, testes e formação. Desenvolve também atividades de I e D, onde está inserida a unidade em que se realizou este projeto, a unidade de Baixo Carbono e Eficiência de Recursos.

Conta com mais de 50 anos de atividade e tem sete delegações em Portugal (Oeiras, Vila Nova de Gaia, Castelo Branco, Loulé, Sines, Loulé e Vila Nova de Cerveira) e está presente em 14 países. O projeto foi desenvolvido nos escritórios de Vila Nova de Gaia, onde se situa também o laboratório EcoTermoLab.

O EcoTermoLab é um laboratório de formação, investigação e desenvolvimento na área de energia, mais especificamente nas áreas de climatização, energias renováveis e eficiência energética. O seu edifício foi concebido tendo como princípio de que todos os seus equipamentos e respetivas infraestruturas energéticas podem ser utilizados, monitorizadas e intervencionadas em ações de formação em contexto real de operação, servindo de modelo e objeto de estudo.

1.3 Contributos do Trabalho

O presente trabalho contribuiu para o desenvolvimento de um simulador para caldeiras de biomassa de pequena escala na plataforma *OpenModelica*. O modelo foi desenvolvido num contexto de que promove a eficiência energética, uma vez que a caldeira está inserida num sistema que visa demonstrar o potencial do aproveitamento de calor ao longo do sistema. A calibração do modelo foi realizada com base nas condições de operação da instalação e foram conduzidas simulações para diferentes cenários.

1.4 Organização da Tese

No Capítulo 1 faz-se um pequeno enquadramento do paradigma da biomassa nas indústrias portuguesas, assim como a utilização de biomassa como combustível para sistemas de aquecimento, apresentando algumas das suas vantagens e dos seus maiores obstáculos. Apresentam-se as caldeiras de biomassa num contexto das suas aplicações e perspetivas globais

para o ano de 2030. Faz-se ainda uma breve introdução às vantagens da modelação e simulação de sistemas.

No Capítulo 2 apresentam-se as metas europeias existentes para a utilização de energias renováveis e para eficiência energética, assim como um dos maiores obstáculos para a diminuição de consumos energéticos na indústria. Introduzem-se como soluções as tecnologias de recuperação, sendo feita a descrição do funcionamento e das vantagens dos equipamentos utilizados neste trabalho, a biomassa como fonte de energia renovável e a modelação de sistemas. Apresenta-se o estado de arte científico e tecnológico de modelos de caldeiras de biomassa, assim como da utilização do *OpenModelica* em sistemas térmicos. Faz-se ainda a revisão bibliográfica da simulação e modelação computacional, das principais tecnologias de conversão de biomassa, abordando com detalhe a combustão de biomassa, sendo por últimas apresentadas as vantagens e características das *pellets* de madeira e dos seus sistemas.

No Capítulo 3 apresenta-se a plataforma *OpenModelica*, as bibliotecas utilizadas e os componentes utilizados para o desenvolvimento do modelo da caldeira e do circuito.

No Capítulo 4 apresentam-se as especificações da caldeira dadas pelo fornecedor, o modelo da caldeira, as condições de operação nominais do circuito, o modelo do circuito construído. Para o modelo da caldeira são ainda definidas as equações para os balanços de massa e de energia. São apresentados os resultados da simulação e comparados aos valores reais.

No Capítulo 5 são apresentados os diferentes casos de estudo e os resultados obtidos das suas simulações.

No Capítulo 6 apresentam-se as principais conclusões do trabalho e no Capítulo 7 avalia-se o trabalho realizado e enumeram-se algumas sugestões para trabalho futuro.

2 Contexto e Estado da Arte

A Comissão Europeia propôs a Estratégia Europa 2020, em que apresentam políticas para inverter a atual trajetória das emissões dos gases com efeito de estufa, sendo um plano global para que a Europa contribua para a neutralidade climática e se torne uma economia com zero emissões. No âmbito deste plano, os estados membros acordaram numa meta de implantação de fontes de energias renováveis de 32 %, até 2030, e num objetivo de melhoria de eficiência energética de 32,5 %, até 2030. Uma destas estratégias é a “bio economia”, que dá ao aumento da utilização de biomassa um passo fulcral para uma economia com zero emissões (Comissão Europeia, 2019).

A energia sob a forma de calor domina o consumo de energia na indústria europeia. Os aquecimentos processuais e de espaços correspondem a 70,6 % dos consumos energéticos industriais, fazendo por isso muito sentido olhar para o calor residual gerado em grande parte dos processos industriais, como aquecimento de fluídos, e avaliar as vantagens do seu aproveitamento. A recuperação de calor residual permite atingir diretamente o objetivo de diminuir as emissões de gases com efeito estufa e a de aumentar a eficiência energética (Comissão Europeia, 2020).

Os métodos de recuperação de calor capturam e transferem o calor residual de volta ao sistema como fonte de energia extra. A modelação e obtenção de características de um sistema ou processo permite encontrar o máximo de calor que pode ser recuperado, aumentando o seu potencial energético. Em sistemas de caldeiras é usual a aplicação de economizadores e pré-aquecedores de ar.

Os economizadores são permutadores de calor instalados na conduta dos gases de exaustão, por onde estes passam por secções formadas por tubos. Dentro dos tubos passa um líquido, que é aquecido e devolvido ao sistema, melhorando a eficiência térmica. Um estudo realizado pela empresa Spirax Sarco (2011) mostra que a utilização de um economizador num sistema de caldeira de vapor pode aumentar a eficiência em 1 % por cada redução de 5 °C da temperatura dos gases de combustão. Noutro estudo realizado pela Maxxtec (2014), é indicado que, independentemente da configuração do sistema, se a temperatura dos gases de combustão for diminuída em 140 °C, o consumo do combustível pode ser reduzido em 7 % (Jouhara, et al., 2018).

Os pré-aquecedores de ar podem ser permutadores de calor de placas ou de tubos. No sistema estudado, o permutador é de tubos. O pré-aquecedor consiste num reservatório que se encontra dividido em duas secções (ar quente e ar frio) e contém um feixe de tubos dispostos em

paralelo. Dentro do tipo passa um fluido quente, neste caso a água de retorno da caldeira, que aquece o ar ambiente (Jouhara, et al., 2018).

O estudo de caldeiras tem sido alvo de grande interesse por vários autores: Serrano et al. (2013) estudaram a eficiência e emissões de uma caldeira de *pellets* de 50 kW numa instalação piloto. Persson et al. (2006) estudaram fornalhas e caldeiras de *pellets* de madeira e desenvolveram um modelo para simulação na plataforma TRNSYS. Porteiro et al. (2009) modelaram numericamente uma caldeira de *pellets* comercial num modelo CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Hebenstreit et al. (2011) modelou e simulou em MatLab/Simulink a utilização de um sistema que combina a condensação da água nos gases de combustão com uma bomba de calor, que recupera o calor latente da condensação.

2.1 Modelação e Simulação de Sistemas

A modelação computacional de sistemas é um tema de investigação continua, com recursos a aumentar ao longo dos anos. A necessidade de informações precisas acerca do comportamento de sistemas energéticos aumentou significativamente com o objetivo de otimização dos mesmos, desde o projeto da sua instalação até à avaliação do seu desempenho e eficiência. A maioria das aplicações informáticas existentes apresenta a mesma estrutura. Existe uma interface gráfica para o utilizador, existindo depois o algoritmo de modelação que define o problema a resolver e os métodos numéricos de resolução, responsáveis pela resolução do modelo matemático (Elmegaard e Houbak, 2002).

Existe atualmente um elevado número de linguagens para simulação de sistemas energéticos disponíveis. No entanto, as ferramentas existentes podem acarretar custos elevados. O problema dos custos elevados encontrados em várias ferramentas de simulação como o *Aspen Plus* podem ser resolvidos com a utilização da linguagem *Modelica*, que pode ser implementada em várias ferramentas gratuitas (tal como *OpenModelica* e *MathModelica*) Este tipo de ferramentas é distribuído sem restrições e o utilizador pode aceder e modificar o código fonte. Tem ainda como vantagem o facto de ser muito flexível e de qualquer pessoa ou organização poder contribuir e encontrar erros. Tudo isto faz com que, comparativamente aos simuladores comerciais, reflita os recentes desenvolvimentos de novas tecnologias mais rapidamente.

A linguagem *Modelica* tem vindo a ser utilizada em diversos estudos como por: Sodja e Zupančič (2009), para modelação de processos térmicos em edifícios; Desideria et al. (2016), para validação em estado estacionário e dinâmico de um sistema de recuperação de calor residual de pequena escala; Hernandez-Albaladejo e Urquia (2018), para modelação de sistemas térmicos solares de baixas temperaturas; Oliveira e Iten (2020), para modelação de circuitos de águas industriais.

2.2 Biomassa

Biomassa compreende a matéria orgânica biodegradável e não fossilizada proveniente das plantas, animais e micro-organismos. Inclui produtos, resíduos e detritos provenientes da agricultura, da exploração florestal e de indústrias afins, assim como gases e líquidos resultantes da decomposição de matéria orgânica. Quando produzida de forma sustentável, as emissões de dióxido de carbono (CO₂) provenientes da conversão energética da biomassa são reaproveitadas por vários tipos de plantas através da fotossíntese. Deste modo, a utilização de biomassa não contribui para a acumulação de CO₂ na atmosfera, sendo considerado um combustível neutro em carbono (Ferreira et al., 2009).

Essencialmente, o aproveitamento da biomassa sólida é feito com tecnologias como lareiras e pequenas fornalhas para produção de calor em aplicações domésticas, fornalhas de grelha fixa, móvel ou inclinada, de leito fluidizado e leito pulverizado, em centrais térmicas, e centrais de cogeração para produção de energia elétrica e de água quente.

As tecnologias de conversão termoquímica de biomassa são a pirolise, gaseificação, liquefação e combustão, sendo a combustão a mais desenvolvida e de aplicação mais frequente. Para o propósito deste trabalho, apenas a combustão será abordada com mais detalhe.

A combustão consiste na queima completa da biomassa, da qual resulta uma corrente de gases a elevadas temperaturas e cinzas. É um processo muito influenciado pelas propriedades do combustível e condições da reação, como a razão de ar/combustível alimentados. Deve ser realizada com excesso de ar, de modo a assegurar uma boa mistura do ar e dos gases de combustão. Quanto ao combustível, é importante apresentar um teor de humidade baixo e um elevado poder calorífico superior (PCS).

O PCS representa o calor libertado durante a combustão considerando que a água formada se encontra no estado líquido. Como normalmente a água é toda vaporizada no processo de combustão, define-se também o poder calorífico inferior (PCI), que considera que a água formada durante a combustão se encontra no estado gasoso. O poder calorífico da biomassa está intimamente ligado à sua composição, diminuindo com o aumento do seu teor de matéria inorgânica, uma vez que não contribui para a reação de combustão. A eficiência (η) de uma caldeira de biomassa foi definida por vários autores como a razão entre a quantidade de calor transferido para a água, $q_{\text{água}}$ e o calor contido no combustível alimentado (q_c) (Serrano et al., 2013) (Vamvuka et al., 2011).

$$\eta = \frac{q_{\text{água}}}{q_c} \times 100 \quad (1)$$

Em termos das fontes de combustível sólido para caldeiras, as principais fontes de biomassa são os resíduos florestais, os resíduos agrícolas e os resíduos da indústria de processamento de madeira.

2.3 Uso de *pellets* como combustível em caldeiras

Os *pellets* são um biocombustível sólido com características e qualidade consistente, tornando-o adequado para diversas áreas de aplicação, desde fornos e sistemas de aquecimento central a instalações de grande escala, e com automação praticamente completa em toda esta gama de capacidades. O aparecimento no mercado de um biocombustível homogéneo, em termos de forma e tamanho, possibilitou o desenvolvimento de fornalhas de biomassa para aplicações de pequena escala totalmente automatizados, com um conforto do utilizador similar em comparação a sistemas de aquecimentos modernos de óleo ou gás natural (Oberberger e Thek, 2010).

A madeira permite a obtenção de *pellets* de boa qualidade, uma vez que não é necessária a adição de aditivos na sua produção e são geralmente produzidos através de serrim de madeira refinada. O serrim é seco e comprimido numa forma cilíndrica com diâmetros entre os 6 e 10 mm e um comprimento máximo de 40 mm. O teor de humidade deve ser baixo (< 10 %), de modo a permitir uma combustão eficiente e baixas emissões de poluentes (Fiedler, 2004). A massa volúmica da matéria-prima é assim aumentada, aumentando a densidade energética do combustível. Estes fatores atribuem também benefícios em termos de transporte, armazenamento e durabilidade do combustível.

As *pellets* de madeira são normalmente caracterizadas em termos da sua composição mássica pela análise aproximada do combustível, em humidade, voláteis, carbono fixo e cinzas. O teor de voláteis da biomassa refere-se à quantidade de gases libertados durante a sua decomposição térmica. Da análise final ao combustível em base seca resulta o teor de cada elemento que o constitui. Na Tabela 2.1 apresenta-se a análise aproximada e a análise final (%), assim como o PCI (MJ.kg⁻¹), encontradas na bibliografia de *pellets* de uma mistura de madeiras florestais (Patino, et al., 2007).

Tabela 2.1 -Características de pellets de madeira.

Análise aproximada, % (base húmida)	
Humidade	8,5
Voláteis	75
Carbono fixo	16
Cinzas	0,62
Análise final, % (base seca)	
Carbono	52
Hidrogénio	6,7
Oxigénio	47
Azoto	0,17
Enxofre	<0,05
PCI (MJ.kg⁻¹)	16,6

Os sistemas de *pellets* permitem uma combustão contínua e automática de um combustível bem definido, em que a velocidade de combustão é controlada pelo caudal de combustível alimentado. O combustível é alimentado do reservatório à câmara de combustão automaticamente por meio de um parafuso sem fim. O ar de combustão é alimentado por uma ventoinha elétrica que pode também fornecer uma corrente de ar secundária (Oberberger e Thek, 2010). A ignição é automática, e realiza-se com a ajuda de uma resistência elétrica. A Figura 2.1 representa esquematicamente uma caldeira de *pellets* (Callefi, 2014).

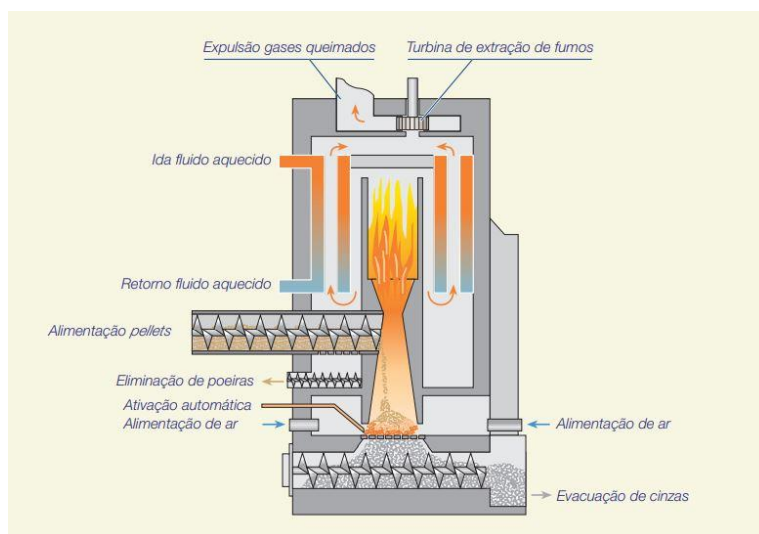


Figura 2.1- Caldeira de pellets.

Este tipo de combustível pode ser utilizado em caldeiras de baixa capacidade, até 100 kW, de capacidades médias, entre 100 e 1000 kW, e de elevada capacidade, para mais de 1000 kW. As caldeiras de menor capacidade são utilizadas no aquecimento residencial ou em pequenas redes de aquecimento central, mas também em pequenas indústrias.

Nas caldeiras para aquecimento central e/ou produção de água quente, os gases resultantes da combustão são conduzidos em várias passagens por um permutador de calor e a sua energia é transferida para a água, que se encontra no outro lado do permutador. Os permutadores podem ser do tipo piro-tubular, em que os gases de combustão circulam dentro dos tubos do permutador, ou aqua-tubular, onde é a água que circula no interior dos tubos (exemplo da Figura 2.1). Uma bomba de circulação transporta a água aquecida para o fim pretendido. A totalidade da caldeira está isolada e revestida com metal para prevenir estragos e reduzir a perda de calor (Obernberger e Thek, 2010).

Segundo Míguez (2012), as caldeiras de *pellets* compreendem 31 % do mercado, enquanto que as caldeiras de lenha e estilhas compreendem 22 % e 17 % do mercado, respetivamente. O restante é composto por caldeiras de *pellets* combinadas com outro combustível, maioritariamente estilhas. O autor afirma também que o tipo de permutador de calor preferencial nas caldeiras de *pellets* é do tipo piro tubular, atingindo 90,3 % do mercado.

3 Materiais e Métodos

3.1 Sistema Térmico da Caldeira

O sistema térmico utilizado como caso de estudo é uma instalação de demonstração. É constituído por uma caldeira de *pellets* de biomassa, um economizador, um pré-aquecedor de ar e um circuito permutador de calor/torre de arrefecimento, que simula o pedido de potência do utilizador. A biomassa é alimentada à caldeira, assim como o ar para a combustão, que passa antes no pré-aquecedor de ar. A água é aquecida na caldeira e arrefecida no circuito permutador/torre, seguindo para o economizador. Antes de voltar à caldeira, pode ou não, passar pelo pré-aquecedor de ar. A Figura 3.1 representa o diagrama do sistema térmico estudado, com os equipamentos identificados. A Figura 3.2 e a Figura 3.3 representam, respetivamente, o pré-aquecedor de ar e o economizador, instalado na conduta dos gases de combustão.

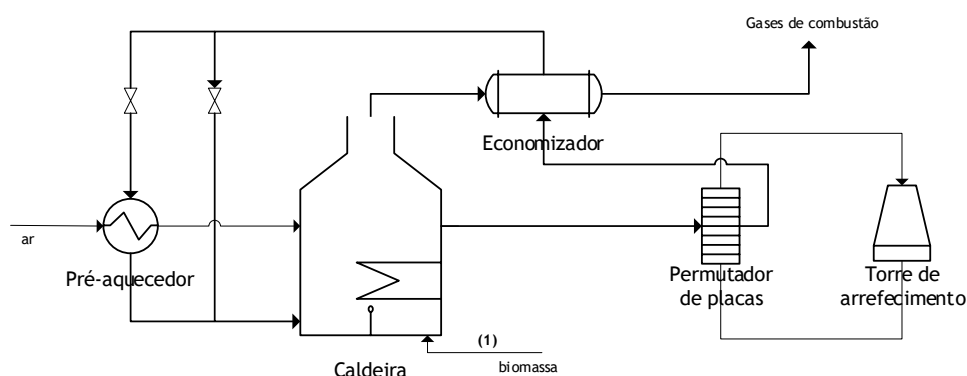


Figura 3.1 - Diagrama do sistema térmico.



Figura 3.2 - Fotografia do pré-aquecedor.



Figura 3.3 - Fotografia do economizador.

Apesar de se encontrar no diagrama da Figura 4.1, o modelo desenvolvido não incorporou a torre de arrefecimento e o permutador. Este circuito secundário serve, no sistema real, para simular um consumo térmico. No modelo considera-se como entrada um calor constante, que corresponde ao calor transferido no permutador, não sendo necessário simular o circuito permutador/torre.

A caldeira apresenta um queimador de grelha móvel em aço inox com sistema de limpeza e reservatório de cinzas. Apresenta isolamento duplo e uma chaminé com resistência à condensação. O permutador de calor é do tipo piro-tubular e apresenta turbuladores, que permitem um escoamento turbulento dos gases. As informações da caldeira, incluindo um esquema legendado, dadas pelo fabricante podem ser consultadas na Figura B.1 do Anexo B. As características principais da caldeira são as seguintes:

- Marca: Smart Heating Technology
- Modelo: SMART
- Potência nominal, P_n: 60 kW
- Rendimento à P_n: 90%
- Volume de água: 129 L
- Temperatura da água mínima/máxima: 65/90 °C
- Temperatura mínima água de retorno: 55 °C
- Pressão máxima de funcionamento: 3,5 bar

3.2 Modelo Matemático de Operação da Caldeira

Combustão

Um processo de combustão pode, de uma forma genérica, ser descrito pela reação:

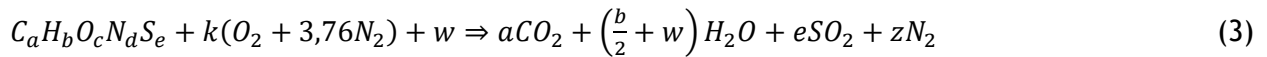


O combustível é a biomassa em forma de *pellets*, maioritariamente composta por Carbono (C), Hidrogénio (H) e Oxigénio (O) e em menores quantidades, Azoto (N) e Enxofre (S). Deste modo, este combustível pode ser genericamente representado por $C_aH_bO_cN_dS_e$. A fração mássica de cada componente (x_i) da biomassa em base húmida teve de ser calculada. O número de moles de cada (n_i) componente, kmol.h^{-1} , é calculado através da Equação 2.

$$n_i = x_i \times (1 - x_w - x_{\text{cinzas}}) \cdot \frac{\dot{m}_c}{M_i} \quad (2)$$

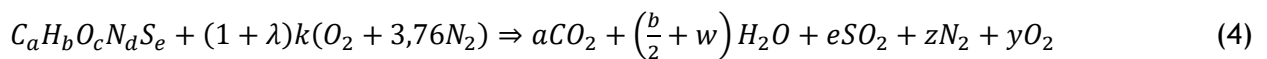
onde x_w e x_{cinzas} correspondem às frações mássicas de humidade e cinzas no combustível, respetivamente, $\dot{m}_c$ é o caudal mássico do combustível, em kg.h^{-1} , e M_i corresponde à massa molar de cada componente, em kg.kmol^{-1} .

O oxidante é o ar atmosférico, constituído, em base volumétrica, por aproximadamente 21 % de oxigénio O_2 e 79 % de N_2 . A razão molar N_2/O_2 é 3,76. Assumindo combustão completa (oxigénio totalmente consumido) e negligenciando os efeitos de dissociação a altas temperaturas e a formação de óxidos de azoto, a composição dos produtos pode ser determinada diretamente aplicando o balanço de massa à reação descrita pela Equação 3.



onde a , b , c , d e e correspondem ao número de moles de cada constituinte no combustível em base seca, w corresponde à humidade do combustível e k corresponde à quantidade estequiométrica de ar envolvida na reação.

Na prática, sabe-se que a combustão completa só se obtém se a quantidade de ar for superior à teoricamente necessária. Isto acontece porque as características do equipamento não permitem uma mistura ar/combustível perfeitamente homogénea. Deste modo, introduz-se um excesso de ar, representado pelo coeficiente λ , à Equação 3, resultando na Equação 4.



A partir do balanço de massa aos elementos da Equação 4 e das composições obtidas pela Equação 2 determinam-se as quantidades de cada produto (kmol.h^{-1}), tendo em conta os caudais mássicos alimentados de combustível e ar. O caudal mássico de cada produto é obtido através da massa molar de cada espécie. O caudal mássico dos gases resulta da soma dos caudais das espécies produzidas.

O balanço energético permite calcular as eficiências (térmica e de combustão) e a temperatura dos gases de combustão. Esta temperatura é estimada com base na temperatura adiabática de chama (T_c). A energia contida no combustível, dada pelo PCI, é libertada durante a combustão e aquece os gases até uma determinada temperatura. Esta temperatura depende, além da energia do combustível e da energia contida nos produtos, da energia de pré-aquecimento, que corresponde à diferença entre temperaturas de ar e/ou combustível e a temperatura de referência (25 °C), e das perdas de energia (perda de calor por radiação devido a combustão incompleta) e da energia contida nos gases dos produtos.

Tanto a energia de pré-aquecimento do ar, como a dos gases de combustão são obtidas através do cálculo da variação de entalpia entre a temperatura a que se encontram e a temperatura de referência (T_0). A entalpia do ar (h_{Ar}) e dos gases de combustão (h_{gc}) podem ser calculadas através do somatório das entalpias de cada produto (h_i). A expressão que permite calcular h_i é dada pela Equação 5 (Koppejan e Loo, 2008).

$$h_i(T) = n_i \times T \left(a_1 + \frac{a_2}{2} \cdot T + \frac{a_3}{3} \cdot T^2 + \frac{a_4}{4} \cdot T^3 + \frac{a_5}{5} \cdot T^4 + \frac{a_6}{T} \right) R \quad (5)$$

onde T é a temperatura do gás (K), R é a constante universal dos gases ($8314,32 \text{ J.kmol}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Os coeficientes a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 e a_6 , para temperaturas menores ou iguais a 1000 K e temperaturas maiores a 1000 K são específicos para cada espécie e encontram-se nas tabelas A.1 e A.2, que se encontram no Anexo A.

Além dos gases de exaustão, a combustão tem como produtos as cinzas, que é a matéria inorgânica existente na biomassa que não é queimada durante a combustão. A entalpia deste termo pode ser calculada através do seu calor específico, da sua massa ($\dot{m}_{cinzas}$) e da sua variação de temperatura. Para as cinzas, é conhecida uma correlação para calcular o seu calor específico, $c_{p,cinzas}$, ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) em função da temperatura ($0 < T < 1200 \text{ K}$), dada pela Equação 6, com T em $^{\circ}\text{C}$ (Jenkins et al. 2011):

$$c_{p,cinzas} = 752 + 0,293T \quad (6)$$

Quando o calor é usado para aumentar a temperatura dos gases de exaustão, o balanço energético é nulo e a temperatura dos gases de exaustão e das cinzas é igual à temperatura adiabática de chama. Deste modo, considerando que o combustível é alimentado a 25°C e desprezando as perdas de energia o balanço energético resulta na Equação 7.

$$PCI \cdot \dot{m}_c + [h_{Ar}(T_{Ar}) - h_{Ar}(T_0)]\dot{m}_{Ar} = [h_{gc}(T_c) - h_{gc}(T_0)]\dot{m}_{gc} + m_{cinzas}c_{p,cinzas}(T_c - T_0) \quad (7)$$

$\dot{m}_{gc}$ corresponde ao caudal dos gases de combustão.

Permutador de Calor

O calor a ser transferido por unidade de tempo (q), kW, pode ser facilmente calculado (Equação 8), para qualquer aplicação de aquecimento ou arrefecimento, através do caudal mássico do fluído ($\dot{m}$), kg.s^{-1} , das suas temperaturas de entrada e de saída (T_e e T_s , respetivamente), $^{\circ}\text{C}$, e do seu calor específico médio (c_p), $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Rohsenow et al., 1998).

$$q = \dot{m}c_p(T_s - T_e) \quad (8)$$

Eficiência

A partir da informação apresentada, é possível reescrever a Equação 1 e definir a eficiência da caldeira como:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{\text{água}}c_{p,\text{água}}(T_s - T_e)}{PCI \cdot \dot{m}_c} \times 100 \quad (9)$$

Onde $\dot{m}_{\text{água}}$ corresponde ao caudal mássico de água (kg.h^{-1}) e o $c_{p,\text{água}}$ corresponde ao calor específico médio da água, calculado através de uma expressão em função da temperatura (ver Figura A.3 no Anexo A).

3.3 *OpenModelica*

O modelo do sistema foi desenvolvido e simulado na plataforma *OpenModelica Connection Editor (OMEdit)*, na versão *OpenModelica v1.14.1*. O *OpenModelica* é uma aplicação informática gratuita de simulação dinâmica, que permite modelar sistemas físicos complexos, como sistemas mecânicos, elétricos, hidráulicos, térmicos e de controlo, utilizando a linguagem *Modelica*. Esta é uma linguagem orientada por objetos e baseia-se em equações em que cada sistema consiste em múltiplos modelos ou componentes de diferentes áreas. Ou seja, modelos de diferentes domínios podem ser herdados e/ou conectados para a criação de um modelo complexo de alto nível (Fritzson, et al., 2018).

Diversos componentes e mecanismos associados são definidos por *uma classe* específica, à qual são associadas variáveis, que representam as propriedades da classe. As equações descrevem o comportamento de cada classe e podem ser escritas de forma algébrica, matricial e diferencial. Um dos benefícios da programação por objetos é o facto de ser possível estender as propriedades e o comportamento de uma classe para a outra.

Deste modo, o sistema modela-se por um conjunto de blocos (componentes). Cada um destes blocos representam equipamentos, subprocessos ou subsistemas que se relacionam entre si, o que faz com que o problema possa ser dividido em modelos mais simples, possibilitando testes localizados. Os componentes representam-se por ícones, que podem ser arrastados para a janela principal de modo a formar o circuito a simular. Estes ícones estão distribuídos por várias bibliotecas associadas à linguagem, que podem ser descarregadas gratuitamente. É também possível criar novos modelos de componentes, como foi o caso da caldeira de biomassa utilizada neste estudo.

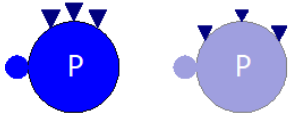
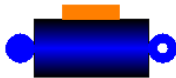
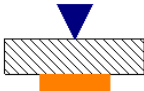
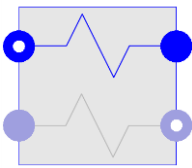
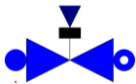
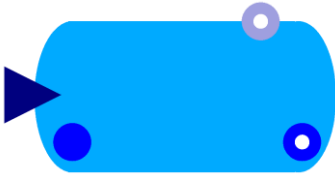
Em cada biblioteca podem também ser definidas as unidades e os fluídos utilizados, constantes e funções. Neste trabalho foram utilizadas as bibliotecas: *Modelica*, desenvolvida pela *Modelica Association* e na qual se baseiam todas as bibliotecas existentes; *ThermoPower*, desenvolvida pelo Politécnico de Milão para a modelação dinâmica de instalações termoelétricas e sistemas de conversão de energia; *BoilerTool*, desenvolvida pelo ISQ a partir da biblioteca *ThermoPower* e que sintetiza os componentes e fluídos específicos para a modelação de caldeiras.

3.4 Componentes

O sistema foi construído através de componentes já criados para vários equipamentos, como por exemplo, tubos, válvulas, permutadores de calor e bombas. Para a caldeira de biomassa, foi criado um novo modelo do componente. Para melhor compreensão do modelo da caldeira e do sistema construído, apresentam-se na Tabela 3.1 os componentes e equipamentos utilizados e os respetivos parâmetros de introdução obrigatória. Os fluídos e as suas propriedades são

definidos por pacotes e neste trabalho utilizou-se água, ar e gases de combustão. O pacote dos gases de exaustão foi criado e definido como uma mistura de gases ideais, cuja composição é a calculada nos balanços de massa. Aos componentes do pacote água são atribuídos ícones azuis e aos gasosos (ar e gases de combustão) ícones cinzentos.

Tabela 3.1-Componentes equipamentos utilizados no OMEdit.

Componente	Ícone	Parâmetros de entrada
Fonte de caudal		✓ Caudal mássico; ✓ Pressão; ✓ Temperatura;
“Descarga” de caudal		
Tubo de água		✓ Área de secção reta, comprimento e perímetro; ✓ Caudal mássico;
Fonte de calor		✓ Potência;
Sensor de temperatura, caudal e pressão		
Permutador de calor		✓ Caudais mássicos dos fluídos; ✓ Perda de carga; ✓ Número de tubos, comprimento do permutador e espessura e diâmetro interno dos tubos;
Válvula		✓ Condutância hidráulica
Caldeira de biomassa		✓ Temperatura de referência para os balanços de energia; ✓ Composição mássica, temperatura e PCI das <i>pellets</i>; ✓ Temperatura, caudal mássico (ou excesso), temperatura e teor de humidade do ar de combustão;

3.4.1 Tubo de água

Este modelo assume que o fluido encontra-se sempre num estado monofásico (neste caso, no estado líquido), velocidade uniforme na área de secção reta, um fator de atrito que assegura condições de escoamento em regime turbulento e que a difusão de calor ao longo do tubo é desprezada. O modelo baseia-se em balanços dinâmicos de massa, momento e energia, implementando o método de volumes finitos, sendo que no balanço de energia é assumido uma distribuição uniforme de pressão (Casella, 2005).

O modelo tem dois tipos de conectores, os de entrada e saída do fluido, que descrevem o seu escoamento, e os térmicos, utilizados para a transferência de calor unidimensional através da fronteira lateral.

3.4.2 Modelo de transferência de calor

A biblioteca *ThermoPower* inclui um pacote que inclui modelos dedicados a fenómenos de transferência de calor. Estes modelos permitem calcular ou especificar a quantidade de calor transferida por unidade de tempo nos conectores térmicos. A fonte de calor, cujo ícone foi apresentado na Tabela 3.1, representa o modelo de uma fonte de calor tubular, com uma quantidade de calor uniformemente distribuída. O valor potência (W) é definida no código, no conector de sinal. Os conectores de sinal servem para dar valores a variáveis de entrada e saída e fazer ligações entre vários componentes do circuito.

3.4.3 Permutador de calor

O modelo do permutador representa genericamente permutadores de calor tubulares a operar em contracorrente. A transferência de calor ocorre por condução do fluido quente para a parede dos tubos e da parede para o fluido frio, impulsionada pelo gradiente de temperaturas entre os fluidos.

3.5 Modelo da Caldeira de Biomassa

O modelo da caldeira foi desenvolvido em duas partes: a combustão, que se baseia nos balanços de massa da conversão da biomassa em gases de combustão e cinzas; e o permutador de calor, que compreende a transferência de calor que ocorre dos gases para a água.

O interface do modelo desenvolvido da caldeira encontra-se representado na Figura 3.4. É possível verificar a existência de dois conectores, um de entrada (esquerda) e um de saída (direita), um tubo e uma fonte de calor, que permite simular o permutador de calor de uma forma simplificada, e o componente que introduz os gases de exaustão, assim como o seu conector de saída.

Os parâmetros a introduzir no modelo da caldeira, constantes ao longo deste trabalho, são os seguintes:

- ✓ Composição mássica (C, H, O, N, S e w) e PCI dos *pellets*, apresentados na Tabela 2.1;
- ✓ Temperatura de referência: 25 °C;
- ✓ Temperatura das *pellets*: 25 °C.

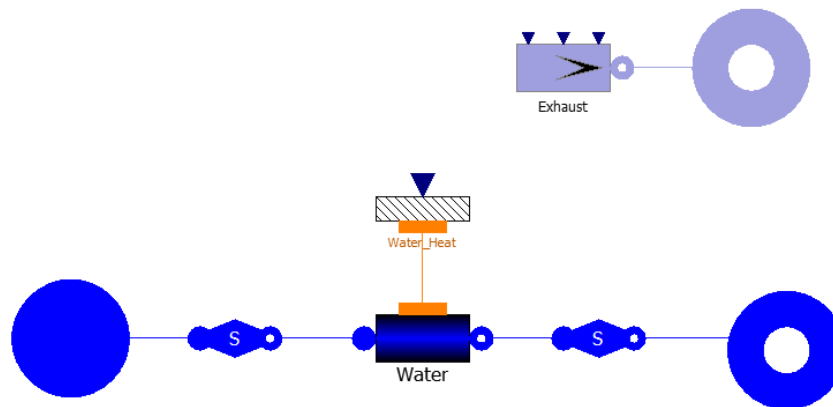


Figura 3.4- Interface gráfico do modelo da caldeira de biomassa.

O modelo foi desenvolvido de modo a calcular o caudal mássico de combustível, através da introdução do caudal mássico de ar ou o excesso de ar, da composição mássica e PCI da biomassa, da temperatura de saída de água e da temperatura de saída dos gases de exaustão. O caudal de água e a temperatura de entrada de água são adquiridos através do sensor à entrada. Consequentemente, é calculada a massa de gases de combustão e a sua temperatura de saída da caldeira. As variáveis são calculadas através das equações definidas nas Secção 3.3 e podem ser alteradas dentro do modelo. Por exemplo, o caudal de biomassa pode passar a ser um parâmetro, passando a variável a temperatura de água à saída da caldeira. É possível estudar o comportamento de vários cenários, o que demonstra a flexibilidade do programa.

É através da Equação 8 que o modelo define a potência (da componente fonte de calor) fornecida à água ($q_{caldeira}$). Todas as variáveis são conhecidas dentro do modelo: temperatura de saída da água é definida pelo utilizador; o caudal de água, a uma dada temperatura, tem de ser introduzido e definido antes de entrar na caldeira, ou não existiria uma corrente a passar pelo “tubo” da caldeira e a simulação não seria possível. Como o calor recebido pela água é igual ao perdido pelos gases de combustão, definindo a temperatura de saída dos gases à saída da caldeira, a mesma equação aplicada aos gases completa o sistema de equações dos balanços de massa e de energia. Para o c_p dos gases de combustão estimou-se o valor de 1,10 kJ.kg⁻¹.K⁻¹.

3.6 Modelo do Sistema Térmico

O interface do modelo desenvolvido para simulação, encontra-se representado na Figura 3.5.

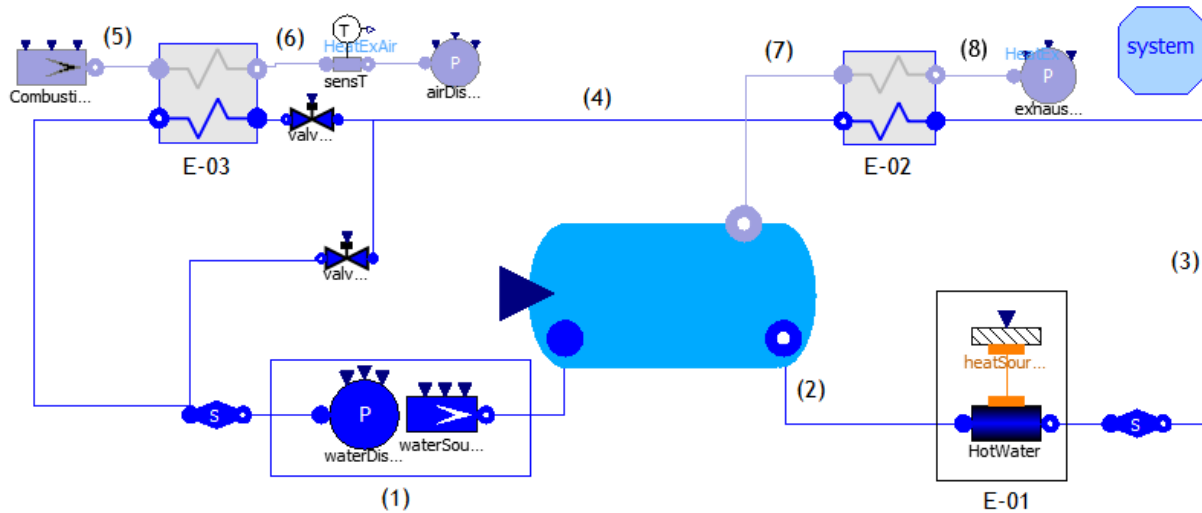


Figura 3.5 - Interface gráfico do sistema térmico no OMEdit

Em condições de operação reais, a corrente (2) de água quente sai da caldeira a uma temperatura de 80 °C, com um caudal mássico de $0,72 \text{ kg.s}^{-1}$, e segue para o permutador de calor (E-01), onde é arrefecida até os 59,2 °C, pela corrente de água fria proveniente torre de arrefecimento, passando a designar-se corrente (3). A corrente (3) segue para o economizador (E-02), onde é aquecida pela corrente (7) de gases de combustão, que deixa a caldeira com um caudal mássico de $0,038 \text{ kg.s}^{-1}$ e a 185 °C. Neste equipamento, a temperatura da corrente de gases é diminuída até os 110,2 °C (8), enquanto que a temperatura da água aumenta para os 60,2 °C (9). Antes de voltar à caldeira, a corrente de água é dividida por ação de válvulas em duas correntes, ambas com um caudal de $0,36 \text{ kg.s}^{-1}$. Parte da água pode passar por um pré-aquecedor de ar, onde atua como fluido quente e aquece a corrente (5) de ar, com um caudal de $0,034 \text{ kg.s}^{-1}$ e a 20 °C, até aos 40,6 °C, passando a ser designada por corrente (6). As duas correntes de água voltam a ser misturadas e resultam na corrente (1) com uma temperatura de aproximadamente 60 °C, que é alimentada à caldeira. Para simplificação, a temperatura de cada corrente será designada por T com o número correspondente, apresentado na Figura 3.5, em subscrito, por exemplo, a temperatura da corrente 1 será designada T_1 .

Como foi referido anteriormente, o caudal mássico da corrente 5 é um parâmetro de entrada da caldeira, assim como a sua temperatura, uma vez que são necessários para os balanços de massa e energia. O valor inserido na caldeira é conectado ao parâmetro do caudal mássico da fonte de ar e a temperatura de entrada no permutador é definida (20 °C). A temperatura, à

saída de E-03, é dada pelo sensor e é introduzida no código da caldeira como parâmetro através de um conector de sinal.

Os conectores foram também utilizados para fechar o circuito. As duas correntes formadas após E-02 são conectadas a um sensor, que conserva as suas massas e energia e fornece como variável a temperatura da corrente gerada. Esta temperatura é inserida como parâmetro da “fonte de água”.

Para o permutador de placas, utilizaram-se os mesmos componentes do permutador da caldeira. A potência é definida com um valor, que deve poder ser alterado sem afetar a temperatura definida de saída da caldeira, uma vez que simula o pedido de potência do utilizador e este pode variar.

Os parâmetros geométricos dos permutadores E-02 e E-03 foram ajustados e definidos de modo a obter os valores de temperaturas dos fluídos mais próximos aos reais.

4 Resultados e Discussão

4.1 Validação do Modelo

Para validar o modelo é necessário comparar os resultados obtidos na simulação com os valores reais. Deste modo, apresentam-se na Tabela 4.1 as condições de operação reais e os resultados da simulação realizada com as seguintes considerações e parâmetros (variáveis de entrada):

- ✓ $\dot{m}_{\text{água}} = 0,72 \text{ kg.s}^{-1}$;
- ✓ $\dot{m}_{Ar} = 0,034 \text{ kg.s}^{-1}$;
- ✓ $T_2 = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- ✓ $T_3 = 185 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- ✓ $T_5 = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- ✓ $q_{E-01} = 62,7 \text{ kW}$;

A potência retirada em E-01, q_{E-01} , foi calculada através da Equação 8 e introduzida também no modelo do circuito, com base no caudal mássico da água à entrada do caudal mássico definido na fonte ($0,72 \text{ kg.s}^{-1}$) e nas temperaturas de entrada ($80 \text{ }^{\circ}\text{C}$) e de saída ($59,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Obteve-se o valor de $62,7 \text{ kW}$.

Os parâmetros geométricos dos permutadores encontrados vão ser constantes nos diferentes casos de estudo apresentados na Secção 4.2. Estes parâmetros são o número de tubos (Nt), o comprimento do permutador (L), em m, o diâmetro interno dos tubos (D), em m, e a espessura dos tubos (e). O valor de e foi definido como $0,002 \text{ m}$ para ambos os permutadores. Para o permutador E-02, Nt é 2, L é $0,85 \text{ m}$ e D é $0,08$ e para o permutador E-03, Nt é 2, L é $0,272 \text{ m}$ e D é $0,06$.

Tabela 4.1-Resultados da simulação do modelo, condições reais e desvio-padrão.

	Valor real	Valor obtido	Desvio (%)
$T_1 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	60	60	0
$T_4 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	60	60	0
$T_6 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	41	40	0,2
$T_8 \text{ (}^{\circ}\text{C)}$	110	109	1,3
$\dot{m}_{gc} \text{ (kg.s}^{-1}\text{)}$	0,038	0,038	0

Através da Tabela 4.1 é possível verificar que o modelo está bem definido e descreve bem o sistema, uma vez que as temperaturas obtidas para as diferentes correntes estão muito próximas dos valores reais. O maior desvio é encontrado na temperatura dos gases à saída do economizador (corrente 8) o que pode ser atribuído ao facto de ser definida como uma mistura de gases com comportamento ideal, o que na realidade não acontece, podendo conter partículas de cinzas e aerossóis. Assumiu-se também uma combustão completa e não se contabilizaram as possíveis emissões de NO, NO₂ e N₂O.

No entanto, é possível validar o modelo de caldeira de biomassa e os pressupostos dados por Koppejan e Loo (2008) para a realização dos balanços de massa e energia. Calculado o calor necessário para aquecer a água às condições reais, de 217018 kJ.h⁻¹ (60,2 kW), obteve-se um caudal de combustível de 14,4 kg.h⁻¹, uma temperatura adiabática de chama de 1628 °C e um caudal de gases de combustão de 136,7 kg.h⁻¹, que correspondem ao valor real desta corrente, 0,038 kg.s⁻¹. Além disto, foi obtida uma eficiência de 90,6 %, valor bastante próximo do 90 %, apresentado para uma potência de 60 kW.

4.2 Simulação de Diferentes Cenários

A partir do modelo desenvolvido realizou-se uma análise de sensibilidade. Estudou-se o comportamento do sistema em várias condições de operação através da simulação do modelo em 26 cenários diferentes, 17 em que a corrente de água passa no pré-aquecedor e 9 cenários, em que a água segue diretamente do economizador para a caldeira. Estudou-se o efeito de 3 pontos de referência para a temperatura aquecida na caldeira (T_2) e 3 pontos de referência para o consumo de potência no permutador E-01 (q_{E-01}). De seguida, definiram-se novos valores para a temperatura de saída do permutador E-01 (T_3), a temperatura do ar ambiente (T_5), temperatura dos gases de combustão à saída da caldeira (T_7) e o excesso de ar (λ), que foram comparadas ao cenário de referência, o cenário 1. Os cenários criados para as simulações podem estar apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.2-Diferentes cenários simulados.

ID Cenário	T_2 (°C)	q_{E-01} (kW)	T_3 (°C)	T_5 (°C)	T_7 (°C)	λ	Com pré- aquecedor
1	80	60	59,2	20	185	1,45	Sim
2	80	63	59,2	20	185	1,45	Sim
3	80	57	59,2	20	185	1,45	Sim
4	85	60	59,2	20	185	1,45	Sim
5	85	63	59,2	20	185	1,45	Sim
6	85	57	59,2	20	185	1,45	Sim
7	75	60	59,2	20	185	1,45	Sim
8	75	63	59,2	20	185	1,45	Sim
9	75	57	59,2	20	185	1,45	Sim
10	80	60	54,0	20	185	1,45	Sim
11	80	60	65,0	20	185	1,45	Sim
12	80	60	59,2	25	185	1,45	Sim
13	80	60	59,2	15	185	1,45	Sim
14	80	60	59,2	20	190	1,45	Sim
15	80	60	59,2	20	180	1,45	Sim
16	80	60	59,2	20	185	1,50	Sim
17	80	60	59,2	20	185	1,40	Sim
18	80	60	59,2	20	185	1,45	Sim
19	80	60	59,2	20	185	1,45	Não
20	80	63	59,2	20	185	1,45	Não
21	80	57	59,2	20	185	1,45	Não
22	85	60	59,2	20	185	1,45	Não
23	85	63	59,2	20	185	1,45	Não
24	85	57	59,2	20	185	1,45	Não
25	75	60	59,2	20	185	1,45	Não
26	75	63	59,2	20	185	1,45	Não

Através das simulações realizadas com os cenários presentes na Tabela 4.1 foi estudada a influência das variáveis de entrada nas condições de operação sistema, nomeadamente, no caudal de água, de ar e de combustível. Em relação à caldeira, estudou-se a variação na temperatura de retorno da caldeira, a potência da caldeira e a sua eficiência. Para o economizador, foi estudada a variação do calor recuperado neste equipamento e a variação da temperatura da água à saída deste equipamento e dos gases de combustão. O calor recuperado no pré-aquecedor foi também avaliado, assim como a temperatura do ar aquecido no equipamento. Verificou-se que o modelo permite simular diferentes cenários de operação do sistema.

Temperatura da água e Consumo de potência requeridos pelo utilizador

Os valores considerados para a temperatura da água foram de 75 °C, 80 °C e 85 °C e para cada uma destas temperaturas foram definidos 3 consumos de potência: 57 kW, 60 kW e 63 kW. Isto corresponde aos cenários 1 até 9 e os resultados das simulações encontram-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.3 - Resultados das simulações dos cenários 1 até ao 9.

ID Cenário	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_2 (°C)	80	80	80	85	85	85	75	75	75
q_{E-01} (kW)	60	63	57	60	63	57	60	63	57
$\dot{m}_{\text{água}}$ (kg.h ⁻¹)	2480	2604	2356	1998	2098	1898	3266	3430	3103
$\dot{m}_c$ (kg.h ⁻¹)	13,8	14,5	13,1	13,8	14,5	13,1	13,8	14,5	13,1
$\dot{m}_{Ar}$ (kg.h ⁻¹)	117	123	111	117	123	111	117	123	111
$q_{caldeira}$ (kW)	58	61	55	58	61	55	58	61	55
η (%)	90,6	90,6	90,7	90,6	90,6	90,6	90,7	90,6	90,7
T_1 (°C)	60,0	60,0	60,0	60,2	60,2	60,2	59,8	59,8	59,8
q_{E-02} (kW)	3,0	3,1	2,9	3,0	3,1	2,9	3,1	3,2	3,0
T_4 (°C)	60,3	60,2	60,3	60,5	60,5	60,5	60,0	60,0	60,0
T_8 (°C)	107	109	106	108	110	107	107	108	105
q_{E-03} (kW)	0,70	0,71	0,68	0,72	0,74	0,70	0,66	0,68	0,66
T_6 (°C)	41,0	40,5	41,6	41,8	41,2	42,4	41,0	40,4	41,0

Através da análise da Tabela 4.2 é possível verificar para aumentar ou diminuir 5 °C (cenários 4, 5, 6 e 7, 8, 9, respetivamente) a temperatura da água da caldeira e mantendo o calor em E-01 constante em relação ao cenário de referência, o único caudal a variar é o de água. É demonstrado que para pequenas variações na temperatura de água pretendida, os caudais de água e de ar podem ser mantidos constantes, uma vez os desvios em relação à referência são de 0 %. Ao variar T_2 , mantendo a temperatura de saída do permutador E-01 constante (59,2), a temperatura da água à entrada da caldeira (T_1) é cerca de 60 °C, aumentando e diminuindo 0,3 %. Como a temperatura de saída dos gases também se mantém nos 185 °C, o calor fornecido à água vai ser igual e é por isso necessário um aumento de caudal quando T_2 diminui, e uma diminuição de caudal quando T_1 aumenta. A diminuição e o aumento de 5 °C em T_2 correspondeu a um aumento de 32 % e a uma diminuição de 19 % no caudal de água, respetivamente.

Em relação ao consumo de potência em E-01, foi verificado que um aumento e uma diminuição desta potência em 5 % provocou, respetivamente, um aumento de 5 % e uma diminuição de 5

% no valor dos 3 caudais e da potência da caldeira. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 representam graficamente a variação do caudal de água, do caudal de combustível e do caudal de ar em função do consumo de potência pretendido. A Figura 4.1 inclui também os pontos de referência de T_2 , de modo a observar o aumento do caudal de água que ocorre quando se aumenta o consumo de potência.

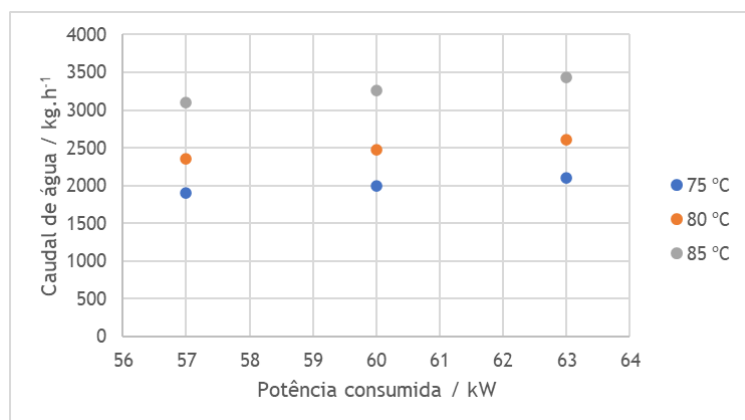


Figura 4.1-Caudal de água em função do consumo de potência, para as temperaturas da água aquecida na caldeira de 75 °C, 80 °C e 85 °C.

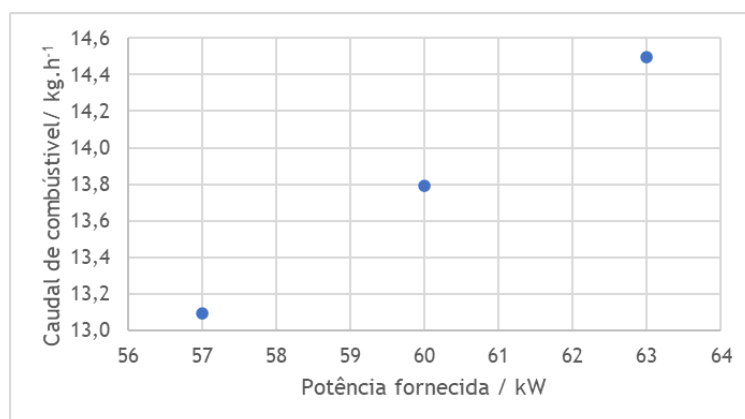


Figura 4.2 -Caudal de combustível em função do consumo da potência.

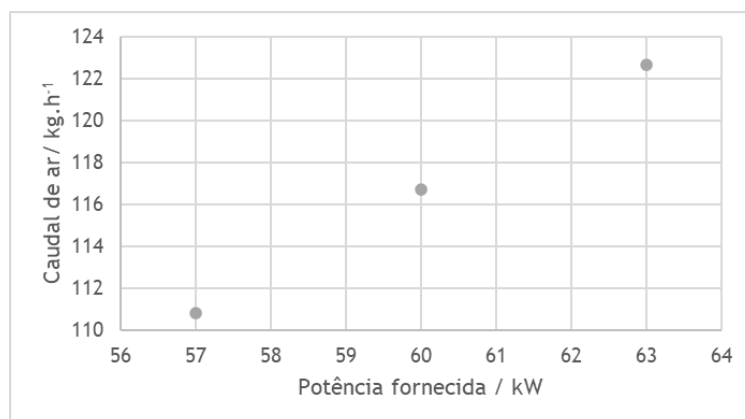


Figura 4.3 - Caudal de ar em função do consumo de potência.

Temperatura de saída do permutador E-01

A variação da temperatura de saída do permutador E-01 influencia a temperatura de entrada da água na caldeira, que é o variável mais determinante na variação do caudal de água. Foram definidos os valores de 55 °C e 64 °C para T_3 , que correspondem a uma variação de 7 % em relação ao valor de referência, o que provocou uma diminuição de 20 % no caudal de água e um aumento de 38 %, respetivamente. Os resultados dos cenários referenciados podem ser consultados na Tabela 4.3.

Tabela 4.4 - Resultados das simulações dos cenários 1, 10 e 11.

ID Cenário	1	10	11
T_3 (°C)	59,2	54	65
$\dot{m}_{\text{água}}$ (kg.h ⁻¹)	2480	1984	3434
$\dot{m}_c$ (kg.h ⁻¹)	13,8	13,8	13,8
$\dot{m}_{Ar}$ (kg.h ⁻¹)	117	117	117
q_{caldeira} (kW)	58	57	58
η (%)	90,6	90,5	90,8
T_1 (°C)	60,0	55,1	65,5
q_{E-02} (kW)	3,0	3,1	2,9
T_4 (°C)	60,3	55,4	65,7
T_8 (°C)	108	105	110
q_{E-03} (kW)	0,70	0,60	0,81
T_6 (°C)	41,0	38,1	44,5

Verificou-se que este aumento de 7 % em T_3 faz com T_1 passe a ter o valor de 65,7 °C, que corresponde a um desvio de 9 % do valor de referência. O aumento de T_4 , em relação à referência, é também de 9 %. Apesar da potência recuperada neste cenário ser 3 % menor do que a do cenário de referência, a diferença entre T_3 e T_4 aumentou 1 %. Para aplicações em que se necessita de um grande caudal de água e de um menor arrefecimento, recomenda-se aumentar o aproveitamento de calor no economizador (q_{E-02}), amentando as suas dimensões. Em comparação, apesar do valor de 55 °C para T_3 provocar um aumento de 3 % no calor recuperado no economizador, a temperatura à saída da caldeira obtida diminui 1 %. É possível observar isto na Figura 4.4, que representa T_3 , T_4 e q_{E-02} em função dos caudais obtidos para cada cenário.

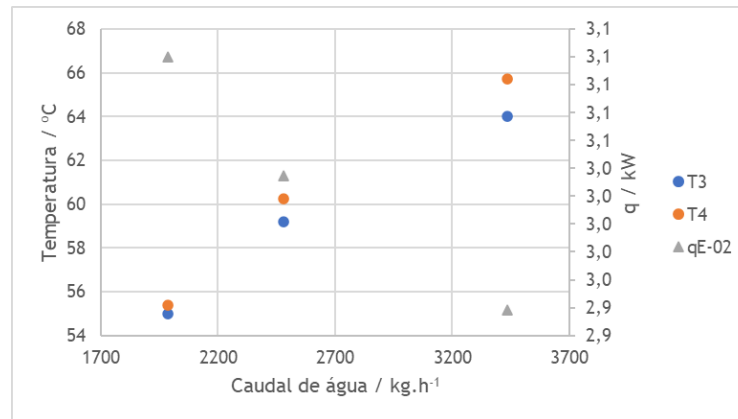


Figura 4.4 - Potência recuperada no economizador e respectivas temperaturas de entrada e de saída em função do caudal de água dos cenários 1, 10 e 11.

Temperatura do ar

Foi estudado o efeito da variação da temperatura de entrada do ar no pré-aquecedor atribuindo os valores de 25 °C e 15 °C, 25 % maior e menor que 20 °C. A temperatura do ar alimentado à caldeira influencia a temperatura da câmara de combustão e influencia apenas a eficiência da combustão. Quanto maior for a temperatura da câmara de combustão, maior é a eficiência. Deste modo, o caudal de água mantém-se constante e o caudal de ar e de combustível diminuem ligeiramente com o aumento de T_5 . Os resultados encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.5- Resultados das simulações dos cenários 1, 12 e 13.

ID Cenário	1	12	13
T_5 (°C)	20	25	15
$\dot{m}_{\text{água}}$ (kg.h ⁻¹)	2480	2480	2480
$\dot{m}_c$ (kg.h ⁻¹)	13,8	13,8	13,8
$\dot{m}_{Ar}$ (kg.h ⁻¹)	117	116	117
q_{caldeira} (kW)	58	58	58
η (%)	90,6	90,7	90,5
T_1 (°C)	60,0	60,1	60,0
q_{E-02} (kW)	3,0	3,0	3,1
T_4 (°C)	60,3	60,3	60,3
T_8 (°C)	107	107	107
q_{E-03} (kW)	0,70	0,61	0,79
T_6 (°C)	41,0	43,5	38,7

As simulações demonstram que a variação do parâmetro T_5 vai-se refletir maioritariamente nas variáveis do pré-aquecedor. Para 25 °C observa-se um aumento de T_6 , aumentando de 41,0 °C para 43,5 °C ou seja 6 %, que corresponde a uma recuperação de calor de 0,70 kW. Já para 15 °C, o calor recuperado foi de 0,79 kW, que corresponde à obtenção de uma T_6 de 38,7 °C, 6 % menor do que a referência. A Figura 4.5 representa graficamente a variação de T_6 e da potência recuperada no pré-aquecedor em função dos 3 pontos estabelecidos de 15, 20 e 25 °C.

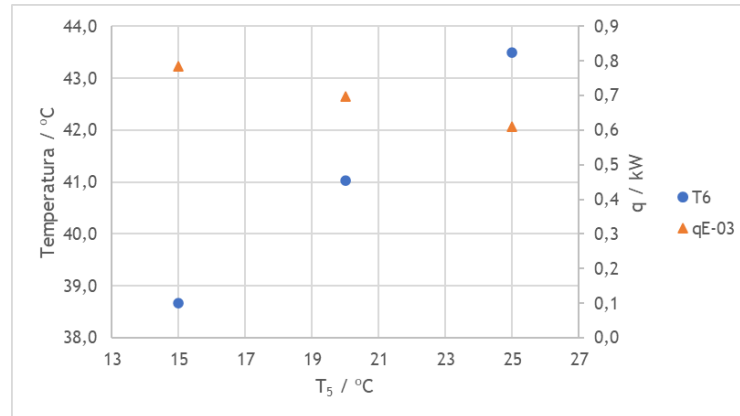


Figura 4.5- Potência recuperada no pré-aquecedor e temperaturas de saída do ar em função da temperatura de entrada do ar.

Temperatura dos gases de exaustão

Assim como acontece com o ar, a variação da temperatura dos gases de exaustão à saída da caldeira não altera significativamente as variáveis do sistema, uma vez que os seus caudais são muito baixos. O aumento de T_7 , leva a necessidades ligeiramente maiores dos caudais de combustível e de ar. Isto reflete-se num ligeiro aumento da temperatura de entrada da água, diminuindo consequentemente $q_{caldeira}$ e a eficiência. No entanto, estes aumentos e diminuições não provocam desvios superiores a 0,5 % em relação à referência. O maior desvio observado foi um aumento de cerca de 5 % do calor recuperado no economizador no cenário em que a T_7 foi definida como 190 °C. Contrariamente, quando se define o valor de 180 °C para T_7 , a potência recuperada diminui cerca de 4 % em relação aos 3 kW obtidos no cenário de referência. Os resultados das simulações referidas encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.6- Resultados das simulações dos cenários 1, 14 e 15.

ID Cenário	1	14	15
T_3 (°C)	185	190	180
$\dot{m}_{\text{água}}$ (kg.h ⁻¹)	2480	2480	2480
$\dot{m}_c$ (kg.h ⁻¹)	13,8	13,8	13,8
$\dot{m}_{Ar}$ (kg.h ⁻¹)	117	117	117
q_{caldeira} (kW)	57,6	57,5	57,8
η (%)	90,6	90,3	91,0
T_1 (°C)	60,0	60,1	60,0
q_{E-02} (kW)	3,0	3,2	2,9
T_4 (°C)	60,3	60,3	60,2
T_8 (°C)	107	109	105
q_{E-03} (kW)	0,70	0,70	0,70
T_6 (°C)	41,0	41,0	41,1

Excesso de ar

Os resultados das simulações realizadas com excesso de ar de 1,45, 1,50 e 1,40 encontram-se na Tabela 4.6. Observou-se que o aumento do excesso de ar em 3 % corresponde a um aumento de 4 % no caudal de ar e a um aumento do caudal de combustível de 1%, mas leva a uma diminuição de 1 % na eficiência caldeira. Quando se diminuiu o excesso em 3 % relativamente ao valor de referência, os resultados obtidos foram em sentido contrário, mas na mesma proporção. Este efeito pode ser verificado na Figura 4.6.

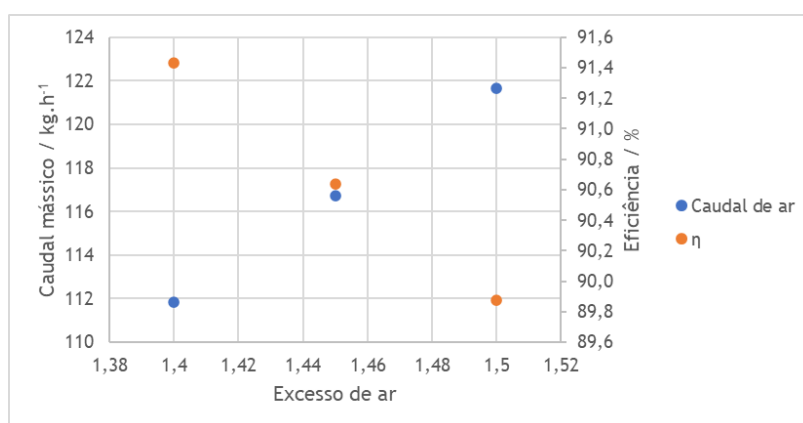


Figura 4.6-Caudal mássico de ar e eficiência da caldeira em função do excesso de ar.

Tabela 4.7 - Resultados das simulações dos cenários 1, 16 e 17.

ID Cenário	1	16	17
λ	1.45	1.5	1.4
$\dot{m}_{\text{água}}$ (kg.h ⁻¹)	2480	2480	2480
$\dot{m}_c$ (kg.h ⁻¹)	13,8	13,9	13,7
$\dot{m}_{Ar}$ (kg.h ⁻¹)	117	122	112
q_{caldeira} (kW)	58	58	58
η (%)	90,6	89,9	91,4
T_1 (°C)	60,0	60,0	60,0
q_{E-02} (kW)	3,0	3,1	3,0
T_4 (°C)	60,3	60,3	60,2
T_8 (°C)	107	109	106
q_{E-03} (kW)	0,70	0,71	0,68
T_6 (°C)	41,0	40,5	41,5

Sem pré-aquecimento do ar

O modelo desenvolvido permite estudar o efeito do pré-aquecimento do ar, por controlo das válvulas existentes depois do economizador. Foram repetidos os cenários 1 até 9, mas sem pré-aquecimento do ar e observou-se que a sua influência recai principalmente na potência da caldeira e da sua eficiência. Como foi explicado nos cenários em que se estudou a influência do aumento e da temperatura de entrada do ar no pré-aquecedor, a temperatura do ar vai influenciar apenas a dinâmica da combustão. Os resultados das simulações encontram-se na Tabela 4.7.

Tabela 4.8- Resultados das simulações dos cenários 19 até ao 27.

ID Cenário	19	20	21	22	23	24	25	26	27
T_2 (°C)	80	80	80	85	85	85	75	75	75
q_{E-01} (kW)	60	63	57	60	63	57	60	63	57
$\dot{m}_{\text{água}}$ (kg.h ⁻¹)	2480	2480	2604	2356	1998	2098	1898	3266	3430
$\dot{m}_c$ (kg.h ⁻¹)	13,8	13,8	14,5	13,1	13,8	14,5	13,1	13,8	14,5
$\dot{m}_{Ar}$ (kg.h ⁻¹)	117	117	122	111	117	123	111	116	122
$q_{caldeira}$ (kW)	57	60	54	57	60	54	57	60	54
η (%)	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7	89,7
T_1 (°C)	60,3	60,2	60,3	60,5	60,5	60,5	60,0	60,0	60,0
q_{E-02} (kW)	3,1	2,9	3,0	3,1	2,9	3,1	3,2	3,0	3,1
T_4 (°C)	60,2	60,3	60,5	60,5	60,5	60,0	60,0	60,0	60,2
T_8 (°C)	109	106	108	110	107	107	108	105	109

Na Figura 4.7 é possível verificar que os caudais obtidos são constantes quer se utilize o não o pré-aquecedor de ar. Na figura, cada grupo de 3 pontos corresponde a um ponto estabelecido de T_2 , e os caudais mais elevados correspondem à T_2 mais baixa. Os caudais de ar e de combustível também não variam com a utilização do pré-aquecedor de ar. Como já foi referido anteriormente, a variação de T_1 não influencia a potência da caldeira, sendo apresentado na Figura 4.8 os valores que permitem verificar que o pré-aquecimento do ar permite aumentar a potência fornecida à água na caldeira. O pré-aquecimento do ar permite um aumento de 1 % tanto na potência da caldeira como na sua eficiência

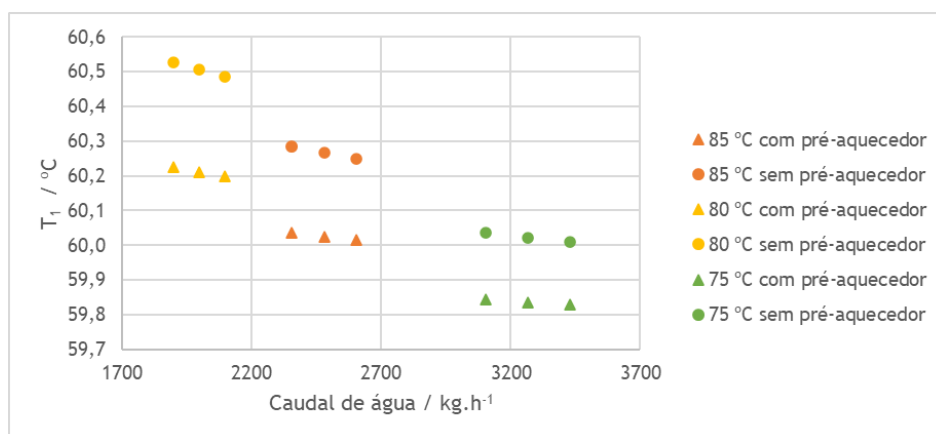


Figura 4.7 -Caudal de água em função da temperatura de entrada da água na caldeira, com e sem pré-aquecedor.

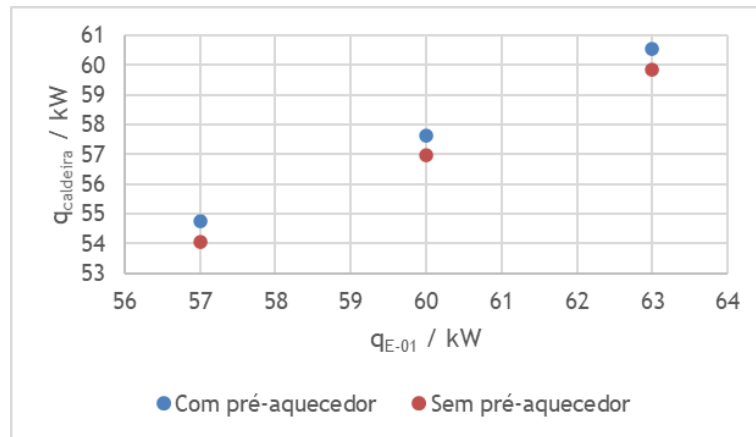


Figura 4.8 -Potência da caldeira em função do consumo de potência pelo utilizador, com e sem pré-aquecedor.

5 Conclusões

As caldeiras de biomassa são equipamentos associados a um grande potencial nos setores industrial e doméstico. Sendo a biomassa um recurso energético renovável, o uso deste tipo de equipamentos associa-se a um elevado potencial de sustentabilidade. A operação de caldeiras de combustão já foi investigada em diversos estudos, no entanto estes estudos focam-se maioritariamente no processo de combustão para análise e diminuição de emissões. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo de caldeira de biomassa na plataforma de simulação open-source *OpenModelica*. Os modelos desenvolvidos com esta ferramenta permitem a simulação de diferentes instalações e a avaliação de consumos, gastos e eficiência energética. A modelação e simulação da instalação utilizada para este trabalho permite observar em tempo real a energia que teria sido desperdiçada.

Apesar da combustão de biomassa sólida ser um processo bastante complexo, os balanços de massa e de energia à câmara de combustão comprovaram a suposição de que são suficientes para descrever a caldeira em termos da sua eficiência térmica. Isto foi comprovado na simulação realizada tendo como variável desconhecida o caudal alimentado do combustível e com as condições de operação reais. Obteve-se como resultado da simulação o valor de 0,038 kg.s⁻¹, que corresponde ao valor real. O maior desvio obtido foi para a temperatura dos gases de exaustão à saída do economizador, obtendo-se um valor de 1,3 %. Este desvio é atribuído ao facto de se assumir que a combustão é completa e que os gases de combustão são uma mistura de gases com comportamento ideal, o que não se acontece em casos reais.

O modelo permitiu avaliar a influência das variáveis de entrada nas diferentes variáveis de saída do sistema, através dos resultados da sua simulação. Os parâmetros de entrada selecionados para a realização desta análise de sensibilidade foram a temperatura de saída da caldeira e o consumo de potência, parâmetros que qualquer utilizador do sistema tem sempre que definir, uma vez que o objetivo do sistema é a produção de água quente para um determinado fim/consumo. Selecionou-se também a temperatura da água depois de passar pelo utilizador, que permite estudar a influência de casos limite do sistema, definindo por exemplo como temperatura de retorno à caldeira o seu valor mínimo imposto pelo fornecedor (55 °C); a temperatura do ar, que permite definir o sistema nas diferentes alturas do ano; o excesso de ar e a temperatura dos gases de combustão à saída da caldeira, variáveis que fornecem informações sobre o comportamento da combustão. Verificou-se que uma diminuição e um aumento de 5 °C na temperatura de saída da água da caldeira corresponde a um aumento de 32 % e a uma diminuição de 19 % no caudal de água, respetivamente, não havendo variações significativas nos caudais de ar e combustível. Já um aumento ou diminuição de 5 °C na temperatura da água depois de passar pelo utilizador provoca uma diminuição de 20 % no caudal

de água e um aumento de 38 %, respetivamente. Em relação ao consumo de potência pelo utilizador, verificou-se que um aumento e uma diminuição em 5 % corresponde, respetivamente, a um aumento de 5 % e uma diminuição de 5 % no valor dos 3 caudais e da potência da caldeira.

A simulação de vários cenários permite auxiliar na seleção do cenário mais eficiente a partir de um conjunto de variáveis diferentes que relacionam a influência dos parâmetros de entrada nos objetivos de cada aplicação, podendo ser aplicado na resolução de problemas de otimização.

Conclui-se que o trabalho realizado serve como referência para o estudo de sistemas de produção de água quente com caldeiras de biomassa em *OpenModelica*.

6 Avaliação do trabalho realizado

6.1 Objetivos Realizados

Este trabalho teve como objetivos a modelação do sistema térmico de uma caldeira doméstica de biomassa e a sua simulação com diferentes cenários operação. Desenvolveu-se um modelo matemático para caldeiras que utilizam *pellets* como combustível e validou-se este modelo através da simulação modelo do sistema com as condições reais de operação. O modelo do sistema foi simulado com as condições de operação reais e os resultados obtidos permitiram a sua validação. Definiram-se 26 cenários de operação em que se fazia variar as variáveis de entrada do modelo. A simulação destes cenários permitiu realizar a análise de sensibilidade do sistema.

6.2 Trabalho Futuro

O modelo construído apresenta algumas limitações no que diz respeito ao comportamento dinâmico do sistema. O passo seguinte será realizar simulações que permitam estudar a resposta da alteração num determinado tempo das variáveis do sistema. Vê-se como trabalho futuro para melhoramento do modelo da caldeira evoluir para a utilização de modelos em estado transiente e a implementação de um sistema de controlo, com base no caudal de combustível e caudal de ar alimentados, permitindo assim controlar a emissão de poluentes.

7 Referências

- Callefi. (Setembro de 2014). *Callefi-Hydronic Solutions*. Obtido de: https://www.calleffi.com/sites/default/files/file/hidraulica_31.pdf
- Casella, F. (16 de 09 de 2005). Obtido de: <https://build.openmodelica.org/Documentation/ThermoPower.Water.Flow1DFV.html>
- Comissão Europeia. (16 de Julho de 2019). Atingir a neutralidade climática até 2050.
- Comissão Europeia. (23 de Abril de 2020). *Heating and cooling*. Obtido de: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/heating-and-cooling_en#facts-and-figures
- Desideria, A., Hernandez, A., Gusev, S., Broek, M. v., Lemort, V., e Quoilin, S. (15 de 11 de 2016). Steady-state and dynamic validation of a small-scale waste heat recovery system using the ThermoCycle Modelica library. *Energy 115 (Part 1)*, pp. 684-696.
- Elmegaard, B., e Houbak, N. (2002). Software for the Simulation of Power Plant Processes. *Proceedings of ECOS 2002*.
- Engineering ToolBox. (2004). *Water - Specific Heat*. Obtido em 10 de Abril de 2020, de: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-water-d_660.html
- Ferreira, S., Moreira, N. A., e Monteiro, E. (2009). Bioenergy overview for Portugal. *Biomass and Bioenergy*, 1-10.
- Fiedler, F. (06 de 2004). The state of the art of small-scale pellet-based heating systems and relevant regulations in Sweden, Austria and Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (3)*, pp. 201-221.
- Fritzson, P., Pop, A., Asghar, A., Bachmann, B., Braun, W., Braun, R., . . . Ochel, L. (2018). The OpenModelica Integrated Modeling, Simulation and Optimization Environment. *Proceedings of The American Modelica Conference 2018, October 9-10, Somberg Conference Center*, (pp. 206-219). Cambridge MA, USA: Linköping University Electronic Press.
- Hebenstreit, B., Riepl, R., Riepl, R., Ohnmacht, R., e Ohnmacht, R. (2011). Efficiency optimization of biomass boilers by a combined condensation - heat pump - system. *ECOS 2011*, (pp. 1465-1477). Novi Sad, Serbia.
- Hernandez-Albaladejo, G., e Urquia, A. (2018). Modelling of Low-Temperature Solar Thermal Systems with Modelica. *IFAC-PapersOnLine 51 (2)*, pp. 783-788.

- Jenkins, B. M., Baxter, L. L., e Koppejan, J. (2011). Biomass Combustion. Em R. C. Brown, *Thermochemical Processing of Biomass* (pp. 13-46). United Kingdom: John Wiley e Sons.
- Jouhara, H., Khordehgah, N., Almahmoud, S., Delpech, B., Chauhan, A., e Tassou, S. A. (2018). Waste heat recovery technologies and applications. *Thermal Science and Engineering Progress* 6, pp. 268-289.
- Koppejan, J., e Loo, S. v. (2008). *The Handbook of Biomass Combustion and Cofiring*. London: Earthscan.
- Maxxtec. (2014). *Economizer*. Sinsheim: MAXXTEC GmbH,.
- Míguez, J. L., Morán, J. C., Granada, E., e Porteiro, J. (08 de 2012). Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (6), pp. 3867-3875.
- Nakada, S., Saygin, D., e Gielen, D. (2014). *Global Bioenergy Supply and Demand Projections for the Year 2030*. IRENA.
- Obernberger, I., e Thek, G. (2010). *The Pellet Handbook*. London: Earthscan .
- Oliveira, M. C., e Iten, M. (25 de 03 de 2020). Modelling of industrial water circuits with a customised Modelica library. *Applied Thermal Engineering* 196 , pp. 114-840.
- Patino, D., Moran, J. C., Porteiro, J., Miguez, J. L., Granada, E., e Collazo, J. (2007). Study of the combustion of pellets and RDF in a small boiler-stove plant. *Clean Air* 8, pp. 183-197.
- Pereira, A. (2019). Dossier sobre biomassa. *renovéveis magazine* , 18.
- Persson, T., Fiedler, F., e Nordlander, S. (2006). *Methodology for identifying parameters for the TRNSYS model Type 210 -wood pellet stoves*. Borlänge: Formas, STEM, Nordic Energy Research and Höskolan Dalarna.
- Porteiro, J., Collazo, J., Patiño, D., Granada, E., Moran, J. C., Gonzalez, e Míguez, J. L. (2009). Numerical Modeling of a Biomass Pellet Domestic Boiler. *Energy e Fuels* 23, 1067-1075.
- Rohsenow, W., Hartnett, J., e Cho., Y. (1998). *Handbook of Heat transfer*. USA: McGraw-Hill.
- Serrano, C., Portero, H., e Monedero, E. (2013). Pine chips combustion in a 50 kW domestic biomass boiler. *Fuel* 11, 564-573.
- Smart Heating Technology. (2014). *Automatic Biomass Boilers - SMART 60 kW*. Obtido em 20 de Junho de Fevereiro, de:
http://www.smartheating.cz/wp-content/uploads/2014/09/Letak_60-100kW_Pt_Smart.pdf

- Sodja, A., e Zupančič, B. (07 de 2009). Modelling thermal processes in buildings using an object-oriented approach and Modelica. *Simulation Modelling Practice and Theory* 17 (6), pp. 1143-1159.
- Spirax Sarco. (2011). *An Explanation of Specialist Boiler Types and Other Specialist Features*. Obtido em 01 de 06 de 2020, de:
<https://www.spiraxsarco.com/learn-about-steam/the-boiler-house/miscellaneous-boiler-types-economisers-and-superheaters>
- Spirax Sarco. (2011). *An explanation of specialist boiler types and other specialist features*. Cheltenham: Spirax Sarco.
- Vamvuka, D., Sfakiotakis, S., Mourouzidis, T., e Bandelis, G. (2011). Development of a Biomass-Fired Combustion Unit for Residential Heating. *Combustion Science and Technology* 183 (8), 764-778.

Anexo A - Auxiliares de Cálculo

Tabela A.1-Coeficientes da Equação 5, para cada espécie e temperaturas abaixo dos 1000 K (Koppejan e Loo, 2008).

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
CO ₂	2,36	$8,98 \times 10^{-03}$	$-7,12 \times 10^{-06}$	$2,46 \times 10^{-09}$	$-1,44 \times 10^{-13}$	$-4,84 \times 10^{+04}$
H ₂ O	4,20	$-2,04 \times 10^{-03}$	$6,52 \times 10^{-06}$	$-5,49 \times 10^{-09}$	$1,77 \times 10^{-12}$	$-3,03 \times 10^{+04}$
SO ₂	2,91	$8,10 \times 10^{-03}$	$-6,91 \times 10^{-06}$	$3,33 \times 10^{-09}$	$-8,78 \times 10^{-13}$	$-3,69 \times 10^{+04}$
N ₂	3,30	$1,41 \times 10^{-03}$	$-3,96 \times 10^{-06}$	$5,64 \times 10^{-09}$	$-2,44 \times 10^{-12}$	$-1,02 \times 10^{+03}$
O ₂	3,78	$-3,00 \times 10^{-03}$	$9,85 \times 10^{-06}$	$-9,68 \times 10^{-09}$	$3,24 \times 10^{-12}$	$-1,06 \times 10^{+03}$

Tabela A.2- Coeficientes da Equação 5, para cada espécie e temperaturas acima dos 1000 K (Koppejan e Loo, 2008).

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
CO ₂	3,86	$4,41 \times 10^{-03}$	$-2,21 \times 10^{-06}$	$5,23 \times 10^{-10}$	$-4,72 \times 10^{-14}$	$-4,88 \times 10^{+04}$
H ₂ O	3,03	$2,18 \times 10^{-03}$	$-1,64 \times 10^{-07}$	$-9,70 \times 10^{-11}$	$1,68 \times 10^{-14}$	$-3,00 \times 10^{+04}$
SO ₂	5,25	$1,98 \times 10^{-03}$	$-8,20 \times 10^{-07}$	$1,58 \times 10^{-10}$	$-1,12 \times 10^{-14}$	$-3,76 \times 10^{+04}$
N ₂	2,93	$1,49 \times 10^{-03}$	$-5,68 \times 10^{-07}$	$1,01 \times 10^{-10}$	$-6,75 \times 10^{-15}$	$-9,23 \times 10^{+02}$
O ₂	3,28	$1,48 \times 10^{-03}$	$-7,58 \times 10^{-07}$	$2,09 \times 10^{-10}$	$-2,17 \times 10^{-14}$	$-1,09 \times 10^{+03}$

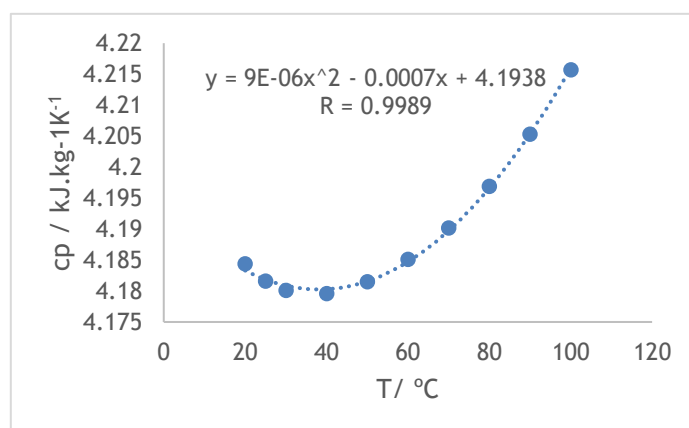


Figura A.1-Representação gráfica do calor específico da água em função da temperatura (Engineering ToolBox, 2004) e correlação obtida.

Anexo B - Especificações da Caldeira de Biomassa



Figura B.1- Especificações da caldeira de biomassa, incluindo esquema legendado do equipamento (Smart Heating Technology, 2014)