



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Mariana Marques Gonçalves

**ANÁLISE DOS FLUXOS MATERIAIS APLICADA À
BIOMASSA FLORESTAL EM PORTUGAL**

**Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente
orientada pela Professora Doutora Rita Pinheiro Garcia e coorientada pelo
Professor Doutor Fausto Miguel Cereja Seixas Freire e apresentada ao
Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra.**

Setembro de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Análise dos Fluxos Materiais aplicada à biomassa florestal em Portugal

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Tecnologia e Gestão do Ambiente

Material Flow Analysis applied to forest biomass in Portugal

Autor

Mariana Marques Gonçalves

Orientadores

Rita Pinheiro Garcia

Fausto Miguel Cereja Seixas Freire

Júri

Presidente	Professor Doutor José Joaquim da Costa Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Vogais	Ribeiro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professora Doutora Rita Pinheiro Garcia Professora Auxiliar Convidada da Universidade de Coimbra

Coimbra, setembro, 2019

Agradecimentos

A realização desta dissertação de mestrado só foi possível graças à disponibilidade, apoio e incentivo de algumas pessoas, às quais expresso os meus sinceros agradecimentos.

À minha orientadora, Professora Doutora Rita Garcia pelo interesse, empenho, paciência e motivação com que sempre me orientou neste trabalho.

Ao meu coorientador, Professor Doutor Fausto Freire pela orientação, incentivo e disponibilidade sempre prestada.

Quero agradecer à minha família e amigos, o apoio constante e disponibilidade que me deram, em especial à minha mãe e aos meus avós.

Por último, à minha irmã pelo apoio incondicional, motivação e disponibilidade para rever as várias versões desta dissertação.

A presente dissertação enquadrou-se na investigação relacionada com os projetos: SUSTAINFOR - Avaliação da sustentabilidade de estratégias de gestão do setor florestal no contexto da bioeconomia (PTDC/AGR-FOR/1510/2014 / POCI-01-0145-FEDER-016764) e SABIOS - Avaliação da sustentabilidade de sistemas de bioenergia: uma abordagem ciclo de vida multicritério para apoio à decisão, incluindo alterações do uso dos solos (PTDC/AAG-MAA/6234/2014 / POCI-01-0145-FEDER-016765), financiados pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) e Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Resumo

A biomassa florestal é um recurso endógeno importante em Portugal, quer como fonte de energia renovável quer como matéria-prima para a produção de produtos de valor acrescentado para consumo interno e exportação. A procura de matéria-prima pelas indústrias e a redução da sua disponibilidade devido aos incêndios florestais fazem com que seja necessário analisar o consumo e *stocks* de biomassa florestal, bem como melhorar a eficiência do uso do recurso. Esta dissertação tem como objetivo analisar os fluxos materiais da cadeia de produtos de biomassa florestal, desde os *inputs* primários (extração de rolaria e resíduos da exploração florestal) até ao tratamento dos resíduos de fim de vida. Foi desenvolvido um modelo de análise de fluxos materiais (AFM), para o ano de 2015, que inclui o setor da pasta e papel, painéis de madeira, serração e energia (lenha, produção de péletes, carvão vegetal, geração de eletricidade em centrais dedicada e cogeração). Para o fim de vida dos produtos foram considerados três destinos: reciclagem, incineração e deposição em aterro. Os dados foram obtidos de fontes estatísticas e convertidos para a unidade de referência (metro cúbico equivalente de fibra (m^3 e.f.)). Foram calculados os seguintes indicadores: extração doméstica, entrada direta de materiais, consumo interno de materiais, fator de cascata, taxa de recuperação de papel e taxa de entrada reciclada de papel. Os resultados da análise de AFM revelaram que a biomassa florestal extraída em Portugal em 2015 (14.9 milhões de m^3 e.f.) seria suficiente para o consumo interno, mas não para o volume de produtos exportados (10.5 milhões de m^3 e.f.). O consumo total de biomassa florestal foi 17.9 milhões de m^3 e.f., aproximadamente 60% para produção de produtos e 40% para energia. O fator de cascata total foi de 1.68, contudo a eficiência do uso de recursos ainda pode ser melhorada, especialmente aumentando a utilização material de resíduos industriais. A taxa de recuperação de papel foi de 54%, contudo a taxa de entrada reciclada do setor foi de apenas 18%, em parte devido à multifuncionalidade deste setor, como produtor de pasta e papel e produtor de energia elétrica. Indústrias podem beneficiar dos resultados da AFM, para entender o sistema que envolve a biomassa florestal e melhorar os seus sistemas industriais.

Palavras-chave: Análise de Fluxos Materiais, Biomassa florestal, Fator de cascata, Portugal.

Abstract

Forest biomass is an important resource in Portugal as a source of renewable energy or as a raw material to produce value-added products for domestic consumption and export. Demand for raw material by the industries and the reduction of forest biomass due to forest fires makes it necessary to analyze consumption and stocks of forest biomass as well as improve resource efficiency. This dissertation aims to perform a material flows analysis (MFA) applied to the forest biomass product chain in Portugal, from primary inputs (biomass extraction and forest residues) to the treatment of end-of-life residues. An MFA model was developed for 2015, including the pulp and paper industry, wood panels industry, sawmills (including furniture, carpentry, wood packaging and other woodwork) and energy (firewood, pellet production, charcoal, electricity generation in dedicated plants and cogeneration). At the end of product life, three destinations are considered: recycling, incineration and landfill disposal. Data were taken from statistical sources and converted to the reference unit (fiber equivalent cubic meter (m^3 e.f.)) using conversion factors. The following indicators were calculated: domestic extraction, direct material input, internal material consumption, cascade factor, paper recovery rate and recycled paper input rate. The results of the MFA revealed that the forest biomass extracted in Portugal (14.9 million m^3 e.f.) would be enough for domestic consumption, but not for exports. Total consumption of forest biomass was 17.9 million m^3 e.f., approximately 60% for material production and 40% for energy. The total cascade factor was 1.68, but the efficient use of resources, especially industrial residues for material use, may still be improved. The paper recovery rate was 54% and the recycled input rate was 18%, partially due to the multifunctionality in this sector, which combines the production of pulp and paper and electricity generation. Industries can benefit from the MFA results, to understand the system involving a forest biomass and to improve their industrial systems.

Keywords Cascade factor, Forest biomass, Material Flow Analysis, Portugal.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	vi
Simbologia e Siglas	vii
Simbologia.....	vii
Siglas	vii
1. Introdução.....	1
1.1. Motivação e enquadramento	1
1.2. Estado da arte.....	3
1.3. Objetivos.....	7
1.4. Estrutura da dissertação	7
2. Modelo e dados.....	9
2.1. AFM- Análise de fluxo de materiais.....	9
2.2. Modelo	10
2.2.1. Fronteira do sistema	10
2.2.2. Unidade de referência.....	14
2.2.3. Dados e hipóteses	15
2.3. Indicadores selecionados	22
2.3.1. Indicadores de AFM	22
2.3.2. Fator de cascata	23
2.3.3. Taxa de recuperação e taxa de entrada reciclada do papel/cartão	26
3. Resultados e Discussão.....	28
3.1. Análise dos fluxos de biomassa florestal.....	28
3.2. Fator de cascata.....	38
3.3. Taxa de recuperação e taxa de entrada reciclada	42
4. Conclusões.....	43
4.1. Trabalhos futuros	46
5. Referências bibliográficas	47
Apêndice A.....	50
Apêndice B	53
Apêndice C	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Valor acrescentado bruto das fileiras florestais em 2015 (ICNF, 2017a).....	2
Figura 2.1. Fronteira do sistema	13
Figura 2.2. Fronteira do subsistema da serração	14
Figura 2.3. Utilização de biomassa florestal em cascata de único e múltiplos estágios (adaptado de Essel et al., 2014).....	24
Figura 3.1- Resultados da AFM para serração e outras obras de madeira em m ³ e.f.....	33
Figura 3.2. Resultados da AFM para carpintaria, embalagens e mobiliário em m ³ e.f.....	34
Figura 3.3. AFM para o setor de painéis de madeira em m ³ e.f.	35
Figura 3.4. Resultados da AFM para o setor da pasta e papel em m ³ e.f.	36
Figura 3.5. Resultados da AFM para o setor energético em m ³ e.f.....	37

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Resumo de estudos sobre análise de fluxos de biomassa florestal	4
Tabela 1.2- Indicadores e descrição (Hashimoto <i>et al.</i> , 2004)	5
Tabela 2.1. Fatores de conversão para unidades de referência (Lenglet <i>et al.</i> , 2017 e Weimar, 2011).....	16
Tabela 2.2. Fatores de conversão.....	17
Tabela 2.3. Parâmetros de distribuição de Weibull e normal para o cálculo de <i>stocks</i> (Pivnenko <i>et al.</i> , 2016; Brunet-Navarro <i>et al.</i> , 2017).....	20
Tabela 2.4. Equações para cálculo do fator de cascata baseadas em Mantau, 2015	24
Tabela 2.5. Nomenclatura das variáveis usadas para calcular o fator de cascata (Mantau, 2015).....	25
Tabela 3.1. Fluxos para cálculo do uso em cascata em m ³ e.f.....	38
Tabela 3.2. Cálculo do fator de cascata total	39
Tabela 3.3. Fluxos para a produção industrial em m ³ de fibra de madeira.....	40
Tabela 3.4. Resultado de cascata em produtos de produção industrial	40
Tabela 3.5. Fluxos no setor da pasta e papel em m ³ e.f.....	41
Tabela 3.6. Resultados para setores de pasta e painéis de madeira	41

SIMBOLOGIA E SIGLAS

Simbologia

€ – Euro
 μ – Período médio de vida
B – Biomassa florestal
C – Carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
kg – Quilograma
m³ – metro cúbico
m³ e.f. – metro cúbico equivalente de fibra de madeira
R – Resíduos
t – Período de vida
t – Tonelada
*t*₀ – período de vida mínimo
 α – Parâmetro distribuição de Weibull
 β – Parâmetro distribuição de Weibull
 σ – Desvio padrão
 σ^2 – Variância

Siglas

ACV – Avaliação de Ciclo de Vida
AFM – Análise de Fluxos Materiais
APA – Agência Portuguesa do Ambiente
CIM – Consumo interno de materiais
ED – Extração doméstica
EDM – Entrada direta de materiais
FAO – Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
GEE – Gases de Efeito de Estufa
ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas
INE – Instituto Nacional de Estatística
PNAC – Plano Nacional para as Alterações Climáticas
PNBN – Plano Nacional para a Promoção de Biorrefinarias
PPD – Produção processada doméstica
TER – Taxa de entrada reciclada
TR – Taxa de recuperação
UE – União Europeia

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação e enquadramento

A consciencialização em relação aos impactes ambientais a que os combustíveis fósseis estão associados, como a sua contribuição para o aquecimento global, induz a necessidade de reduzir o seu consumo, algo que os governos tendem a incentivar. Uma das alternativas é a utilização de biomassa florestal, que tem sido promovida como fonte de energia neutra em carbono, uma vez que se considera genericamente que o carbono libertado na sua combustão foi previamente sequestrado (EPA, 2018).

Em Portugal, o potencial de utilização deste recurso é elevado, uma vez que cerca de 35% do território português é coberto por área florestal (ICNF, 2017b). A sua utilização é importante para a prossecução dos objetivos de políticas como o Programa Nacional para as Alterações Climáticas 2020/2030 (PNAC 2020/2030). As metas estabelecidas para Portugal implicam a redução das emissões de gases de efeito de estufa (GEE) entre 18% e 23% até 2020 e de 30% a 40% até 2030, em relação aos valores do ano de 2005 (Conselho de Ministros, 2015). Para além desta, outras políticas estão a ser implementadas como o Plano Nacional para a Promoção de Biorrefinarias (PNPB), cujo objetivo é promover a construção, até 2030, de refinarias que utilizam biomassa endógena para produzir eletricidade, calor ou biocombustíveis.

A contribuição da biomassa florestal como fonte de bioenergia é relevante em Portugal. Em 2017, as energias renováveis representaram cerca de 52% do consumo final de eletricidade e destes 7% corresponderam à utilização de biomassa (INE, 2019). Para além de energia elétrica, a biomassa florestal também contribui para outras formas de energia, como energia térmica e biocombustíveis. O uso de biomassa florestal no setor de energia térmica tem potencial para aumentar. Em 2016, a biomassa florestal representou 96.1% da contribuição total das fontes energias renováveis e 33.8% do consumo total de energia térmica em Portugal (Bioenergy Europe, 2018). Para além da utilização energética, outros

setores da fileira de biomassa florestal têm um contributo importante para a economia portuguesa (Figura 1.1), nomeadamente: silvicultura e exploração florestal; indústrias da madeira e de cortiça; fabricação de pasta, papel e cartão; e fabricação de mobiliário. A soma do valor acrescentado bruto de cada um destes setores completa um montante de mais de 3.7 mil milhões de euros (ICNF, 2017a). Esta quantidade corresponde ao retorno económico que as indústrias tiveram no ano de 2015 resultado da sua atividade produtiva.



Figura 1.1. Valor acrescentado bruto das fileiras florestais em 2015 (ICNF, 2017a)

A extensa área florestal está associada a um elevado risco de incêndios florestais, que pode levar à perda de território e a uma redução significativa de recurso. Este risco faz com que a competição entre os vários setores que consomem biomassa florestal aumente. De forma a reduzir o risco de incêndios, entrou recentemente em vigor nova legislação para obrigar entidades e proprietários dos terrenos a fazer uma melhor gestão das florestas (Decreto-Lei 10/2018, 2018), levando a um aumento dos resíduos de exploração. Tanto os resíduos provenientes de áreas ardidadas como da limpeza das florestas são considerados biomassa florestal com potencial de aproveitamento para bioenergia.

A disponibilidade anual de matéria-prima é uma das limitações associadas a este recurso, pois não está disponível de imediato (períodos longos de crescimento e de rotação das árvores). A elevada procura de biomassa florestal como fonte material e de energia faz com que a competição pela matéria-prima aumente, o que torna necessário conhecer os seus fluxos e de toda a sua cadeia (produção, importações e exportações). O estudo da utilização de biomassa florestal permite conhecer os seus setores consumidores, o consumo de recurso

dentro das indústrias e a valorização de resíduos, de modo a ter uma visão geral da distribuição de recurso e possível otimização dos processos industriais. Para tornar a extração e consumo de biomassa sustentável é importante considerar a economia circular, para otimizar o uso de recursos e tornar os ciclos de vida dos produtos mais eficientes. Os modelos de economia circular promovem a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais, para aproveitamento material/energético e redução da extração de material prima. Uma das formas de abordar este conceito é a partir da utilização em cascata, que consiste no uso repetido de matéria-prima. A análise do funcionamento, consumo e de aplicação do conceito de utilização de cascata aos setores consumidores de biomassa florestal, não foi encontrado no momento em que foi realizada a revisão bibliográfica deste estudo.

1.2. Estado da arte

Neste capítulo são apresentados estudos cuja metodologia de estudo é a que se pretende utilizar nesta dissertação: análise de fluxos materiais (AFM) aplicada à biomassa florestal. A revisão bibliográfica mostra que a AFM pode ser usada para avaliar os fluxos de biomassa florestal a várias escalas: global (Bais *et al.*, 2015), europeia (Mantau, 2012) e nacional (Parobek *et al.*, 2014; Hashimoto *et al.*, 2004; Lenglet *et al.*, 2017). Outros estudos aplicaram a AFM com o objetivo de estudar os fluxos de biomassa florestal num único setor, como Ewijk *et al.* (2017) que analisaram os “Fluxos do ciclo de vida global do papel, métricas de reciclagem e eficiência de materiais”. A AFM foi ainda combinada com a metodologia de avaliação de ciclo de vida (ACV) para calcular os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida do recurso (Kayo *et al.*, 2018; Mehr *et al.*, 2018).

Bais *et al.* (2015) quantificaram os fluxos de biomassa florestal à escala global, desde a produção primária até ao seu consumo. O objetivo deste estudo era apresentar o panorama global dos fluxos de carbono na biomassa tendo em conta a existência de incertezas consideráveis em relação à extração de biomassa. Esta incerteza é notada principalmente nos biocombustíveis. É defendido pelos autores que não só a produtividade, mas também a área florestal e as intervenções políticas influenciam os padrões de fluxos. O estudo revelou que a produtividade florestal global aumentou, contudo, a extração de recurso manteve-se estável, apesar de ter propensão a subir. Esta deve-se ao crescimento da população mundial

e às metas relativas às energias renováveis. Por fim, concluíram que é necessária mais investigação relacionada com a utilização em cascata, de modo a que seja possível desenvolver estratégias para o uso sustentável de biomassa globalmente.

Na Tabela 1.1 são apresentados os principais estudos, que serviram como orientação para esta dissertação, pela sua similaridade em relação ao método de estudo utilizado (AFM), e aos objetivos de estudo aplicados à biomassa florestal.

Tabela 1.1. Resumo de estudos sobre análise de fluxos de biomassa florestal

Referência	Âmbito geográfico	Período	Setores em estudo
Mantau (2012)	Europa	2010	Cadeia de biomassa florestal
Mantau (2015)	Europa e Alemanha	2010	Cadeia de biomassa florestal
Parobek <i>et al.</i> (2014)	Eslováquia	n.d.	Cadeia de biomassa florestal
Hashimoto <i>et al.</i> (2004)	Japão	1960 a 1999	Cadeia de biomassa florestal
Lenglet <i>et al.</i> (2017)	França	2009 a 2013	Cadeia de biomassa florestal (exceto 3 ^a transformações)
Ewijk <i>et al.</i> (2017)	Global	2012	Pasta e papel

Nota: n.d.- não definido

Mantau (2012) realizou um estudo a nível europeu para 2010 com o objetivo de analisar o consumo de biomassa florestal e mais tarde comparou-o com o caso específico da Alemanha (Mantau, 2015). Parobek *et al.* (2014) fizeram o mesmo tipo de análise, mas relativa à Eslováquia. Hashimoto *et al.* (2004) e Lenglet *et al.* (2017) estudaram também a cadeia de biomassa florestal, mas para períodos mais longos, examinando o seu consumo no Japão e em França, respetivamente.

Todos os artigos da Tabela 1.1 realizaram a quantificação e respetiva modelações dos fluxos de biomassa a partir da AFM. A principal limitação dos estudos é descrita como sendo a disponibilidade de dados, facto que é comum à maioria dos estudos de AFM. Parte dos dados é geralmente obtida a partir de fontes oficiais, mas é também comum o recurso a questionários realizados à população e às indústrias. Parobek *et al.* (2014) consideraram ainda que, devido à indisponibilidade de dados, o *stock* manteve-se constante ao longo do

tempo. A partir da recolha de toda a informação, os estudos elaboram balanços de massa tendo em conta as importações e exportações que ocorrem no país.

A forma de apresentação dos resultados difere entre os estudos. Mantau (2015) e Lenglet *et al.* (2017) condensaram toda a informação num diagrama de Sankey. Parobek *et al.* (2014) apresentaram um quadro com os valores dos fluxos. No entanto, as unidades em que os resultados finais são apresentados são equivalentes (segundo Lenglet *et al.*, 2017): metro cúbico equivalente de fibra de madeira (m^3 e.f.) (Lenglet *et al.*, 2017) ou m^3 de madeira sólida (“*solid wood equivalent*”) (Mantau, 2015). Por fim, os autores utilizaram os resultados das AFM para calcular diversos indicadores e discutiram as hipóteses formuladas. Mantau (2015) e Parobek *et al.* (2014) calcularam o fator de cascata total com o objetivo de ter uma visão sistémica dos seus sistemas, a partir do uso em cascata de cada setor. Hashimoto *et al.* (2004) calcularam seis indicadores com o objetivo de discutir o ciclo material da biomassa e eventuais metas para esses indicadores (Tabela 1.2). Hashimoto *et al.* (2000) concluíram ser necessário implementar mais medidas de recuperação de materiais, pois durante os 40 anos estudados, a extração de matéria-prima não decresceu, apesar da recuperação de materiais ter aumentado.

Tabela 1.2- Indicadores e descrição (Hashimoto *et al.*, 2004)

Indicador	Descrição
Entrada direta de material (EDM)	Objetivo do ciclo de material (restrição do consumo de recursos naturais)
Taxa de uso de produtos usados recuperados	Recuperação de produtos usados (<i>input</i>)
Eficiência no uso de materiais	Recuperação de subprodutos e prevenção de resíduos
Tempo de uso de material	Reutilização de produtos usados e prevenção de resíduos
Taxa de recuperação de produtos usados	Recuperação de produtos usados (<i>output</i>)
Produção processada doméstica (PPD)	Objetivo do ciclo de material (redução na carga ambiental)

Ewijk *et al.* (2017), realizaram um estudo cujo objetivo foi analisar globalmente os balanços materiais de apenas um dos setores derivados de biomassa florestal: pasta e papel. O artigo procurou determinar qual o destino dos produtos em fim de vida (*stock*, reciclagem, incineração com/sem recuperação de energia e aterro), quantificando ao mesmo tempo os fluxos de biomassa, pasta, papel e resíduos. Ao contrário de outros estudos (e.g., Parobek *et*

al. 2014), foi considerado que anualmente são adicionados ao *stock* novos produtos e descartado parte do *stock* mais antigo. Ewijk *et al.* (2017) incluíram uma análise das métricas de reciclagem, que habitualmente é obtida pela razão entre a quantidade de produto que vai para reciclagem e a produção total de produto, o que reflete numa taxa de recolha de 54%. No entanto, este valor segundo os autores é inconsistente, porque ao comparar uma quantidade ainda no estado de pasta com uma quantidade na fase de fabricação do papel, há uma omissão de perdas que ocorrem ao longo dos processos existentes entre os dois estágios. Para além disso, é também referido que, nem todo o papel pode ser reciclado, pois nem todo é descartado, isto é, parte fica em *stock*. Ewijk *et al.* (2017) propõem um indicador alternativo para avaliar a reciclagem: a taxa de entrada reciclada (TER), que traduz a quantidade de papel pós-consumo enviado para reciclagem por *input* total de fibra biomassa florestal virgem. O resultado obtido para a RIR foi de 38%, um valor inferior à taxa de recuperação inicialmente calculada (54%).

Kayo *et al.* (2018) e Mehr *et al.* (2018) construíram modelos em que combinaram dois métodos, a AFM, para estudar os fluxos e *stocks* de biomassa florestal (no Japão e Suíça, respetivamente) e a ACV para calcular os impactes ambientais ao longo do ciclo de vida associado ao consumo de biomassa florestal. A partir da AFM foram obtidas informações importantes para o estudo, com a finalidade de construir os modelos que serviram como base para a realização da ACV. Apesar de em ambos os casos (Japão e Suíça) serem analisados fluxos de biomassa, nem todos os setores que utilizam este recurso foram investigados. Para o Japão, os autores abordaram o consumo de biomassa para construção e geração de energia (Kayo *et al.*, 2018). Para a Suíça, os autores analisaram o uso de biomassa para energia e como matéria para construção e painéis (Mehr *et al.*, 2018).

A AFM aplicada à biomassa florestal fornece informações importantes da utilização desta matéria-prima, que permite conhecer melhor um sistema que envolve vários setores industriais. Quando completo, uma AFM pode ainda ser utilizada para estudar indicadores com o objetivo de discutir possibilidades de otimização de processos, redução e incorporação de resíduos em processos industriais, uso em cascata, métricas de reciclagem, importância da exportação e importação de biomassa florestal e de produtos. Estas análises fazem com que seja possível gerir e utilizar as florestas de forma sustentável. A literatura apresenta estudos globais, europeus e para alguns países sobre a forma como a biomassa florestal é distribuída, transformada e tratada após a sua utilização. Até à data, não foram encontrados

estudos no contexto português que analisem de forma detalhada os fluxos e *stocks* de biomassa florestal e fim de vida dos produtos em Portugal. Este trabalho visa preencher essa lacuna, realizando um estudo sistemático de AFM, incluindo os vários setores e produtos derivados de biomassa florestal e estudar vários indicadores de utilização eficiente da matéria-prima baseados nos estudos da revisão bibliográfica.

1.3. Objetivos

Este estudo tem como objetivo principal fazer uma análise sistemática dos fluxos e *stocks* de biomassa florestal em Portugal no ano de 2015. A análise tem em conta todo o ciclo de vida da biomassa florestal desde a extração da mesma até ao fim de vida dos produtos dela resultantes, distribuída pelos diversos setores industriais (mobiliário, painéis de madeira, pasta e papel, carpintaria, embalagens de madeira, entre outros). São ainda objetivos específicos do estudo:

- Desenvolver um modelo de AFM das indústrias de base florestal em Portugal;
- Comparar a extração doméstica de biomassa florestal em Portugal com a taxa de entrada e o consumo interno de materiais;
- Calcular o fator de cascata total e específico para cada um dos setores em estudo e comparar com aos dados relativos ao contexto europeu;
- Comparar a taxa de recuperação com a taxa de entrada reciclada de papel/cartão.

Os *stakeholders* que podem beneficiar dos resultados deste estudo são os associados aos setores industriais incluídos nesta dissertação. A aplicação da informação da AFM pode ser importante para a visualização completa do modelo de consumo de biomassa florestal e para comparar os resultados do país (apresentados no estudo) com os resultados individuais de cada setor, de modo a utilizar de forma mais eficiente os seus recursos.

1.4. Estrutura da dissertação

A dissertação está organizada em quatro capítulos, da seguinte forma:

- Capítulo 1: É apresentada a motivação para a realização do estudo, uma revisão da literatura de estudos, os objetivos e a estrutura da dissertação.

- Capítulo 2: É introduzida a metodologia de AFM e descrito o modelo desenvolvido, bem como os dados utilizados. São também apresentados os indicadores selecionados para o estudo e a forma de cálculo dos mesmos.
- Capítulo 3: São apresentados e discutidos os resultados da análise de fluxos de biomassa florestal em Portugal e do cálculo dos indicadores selecionados para o estudo.
- Capítulo 4: São apresentadas as considerações finais deste trabalho e tópicos de possíveis trabalhos futuros.

2. MODELO E DADOS

Neste capítulo são apresentados a metodologia e o software utilizados no estudo e é descrito o modelo desenvolvido, nomeadamente as fronteiras do sistema, a unidade de referência, os dados recolhidos e as hipóteses formuladas. Por fim, são apresentados os seis indicadores avaliados no estudo: extração doméstica, entrada direta de materiais, consumo interno de materiais, fator de cascata, taxa de recuperação e taxa de entrada reciclada.

2.1. AFM- Análise de fluxo de materiais

A AFM é uma metodologia utilizada em Ecologia Industrial para compreender de forma holística e integrada o funcionamento dos sistemas e subsistemas em estudo (Lenglet *et al.*, 2017). A AFM é definida como “uma avaliação sistemática dos fluxos e *stocks* de materiais dentro de um sistema definido no espaço e no tempo” (Brunner and Rechberger, 2004). A análise é feita a partir do balanço material de *inputs*, *outputs* e *stocks*, calculado tendo em consideração a lei da conservação de massa (Van Eygen *et al.*, 2016). A AFM pode ser aplicada a bens (como neste estudo), substâncias (análise de fluxos de substâncias), no âmbito económico (“*Economy-wide material flow analysis*”) e a várias áreas e escalas (global e regional). À escala regional, pode ser usada para realizar a análise de fluxos materiais de uma cidade (i.e., metabolismo urbano). O metabolismo de urbano é um modelo que considera que uma cidade é um ecossistema e quantifica as necessidades de materiais e bens para as tarefas humanas. Para além destes, é também complementar a outros métodos como ACV e análises de *input* e *output* (OECD, 2008). Uma das vantagens de AFM é o facto de permitir calcular os *stocks* de materiais, o que faz com que este método seja indicado para estudos de escassez e reciclagem de recursos. A primeira fase de um estudo de AFM é a definição dos objetivos, escolha da fronteira do sistema, dos produtos e processos incluídos no modelo (Van Eygen *et al.*, 2016). A elevada quantidade de dados necessários bem como a sua disponibilidade e consistência são apontadas como uma das limitações da AFM. Os resultados da AFM permitem calcular alguns indicadores, como a entrada direta de materiais (EDM), a extração doméstica (ED) e o consumo interno de materiais (CIM), que serão utilizados como indicadores neste estudo e detalhados na secção 2.3.

Um dos softwares utilizados para auxiliar a modelação em estudos de AFM é o STAN, que é um software específico de AFM utilizado para representar e analisar o sistema (Van Eygen *et al.*, 2016). O modelo é desenvolvido a partir de um conjunto de dados de entrada relativos a processos, fluxos (massa, volume ou densidade), *stocks*, importações e exportações. Este software tem em conta o princípio da conservação de massa, o que permite evitar erros na construção do modelo e encontrar inconsistências no mesmo. A apresentação de dados e resultados da AFM é apresentada a partir de um diagrama em que o tamanho das setas dos fluxos reflete o peso que estes têm no sistema. Esta opção é mais atrativa visualmente e facilmente interpretada do que a alternativa tradicional de apresentação de múltiplas tabelas de dados.

Outra possibilidade para visualização dos fluxos materiais são os diagramas de Sankey. Apesar de não discriminar os *stocks*, este tipo de diagramas facilita a visualização dos fluxos dentro de um sistema, o que torna possível localizar as principais contribuições para o sistema global. Vários estudos apresentam os resultados do seu trabalho com este diagrama como, Ewijk *et al.* (2017) e Cazzaniga *et al.* (2019), que apresentam os fluxos de biomassa florestal na União Europeia (EU).

Neste estudo foi utilizado o STAN, pois permite visualizar um diagrama, que inclui processos, fluxos, importações e exportações. Os *stocks* dos produtos finais são a principal razão da escolha de software, pois são essenciais para o estudo e o STAN é o único que apresenta esta informação na representação gráfica do modelo.

2.2. Modelo

2.2.1. Fronteira do sistema

O foco desta AFM é a biomassa florestal, acima do solo, que consiste em toros de madeira e resíduos florestais, incluindo casca, ramos e bicadas (Dias, 2005). Esta, no seu estado natural, tem um longo caminho a percorrer até chegar aos consumidores como produto final, devido às várias fases de transformação que sofre. A Figura 2.1 apresenta o modelo global do estudo, nomeadamente a fronteira do sistema, os processos incluídos na análise, a cadeia de produtos derivados da biomassa florestal e as interações entre os setores. Foi excluída a análise da produção de biomassa florestal, i.e., o *stock* de biomassa na floresta,

pelo que apenas se analisou o consumo deste recurso. Na Figura 2.2 é apresentada a fronteira do subsistema da serração, a descrição correspondente a cada fluxo das Figuras 2.1 e 2.2 encontra-se no Apêndice A (Tabela A.1).

O estudo tem início na extração da biomassa florestal que, posteriormente, é transportada como rolaria ou resíduos da exploração florestal para cada setor e processada as vezes necessárias para obter os produtos finais. A fronteira do sistema inclui não só as transformações primárias e secundárias, mas também as terciárias (habitualmente excluídas ou agregadas em estudos deste tipo), como por exemplo a indústria do mobiliário. Desta forma, o modelo de AFM engloba todos os produtos das fileiras florestais, desde madeira serrada, carpintaria, mobiliário, embalagens de madeira, outros produtos de madeira, painéis de madeira (contraplacados, partículas e fibra), estilha e serradura, resíduos industriais e da exploração florestal, pasta de papel e papel/cartão. Após a fase de processamento, os produtos finais (carpintaria, mobiliário, embalagens de madeira, outros produtos de madeira, painéis de madeira e papel/cartão) são utilizados durante um certo período de tempo (período em que ficam em *stock*) e, quando atingem o seu fim de vida são descartados.

Foram considerados três destinos para os produtos em fim de vida: reciclagem, geração de energia e deposição em aterro. A reciclagem é o processo de valorização em que os produtos em fim de vida são reprocessados e transformados novamente em produtos, que podem ter a sua finalidade original ou outras (exceto valorização energética). A geração de energia a partir de biomassa florestal e produtos derivados é um dos destinos considerados neste estudo para produtos em fim de vida, resíduos (da exploração florestal e industriais) e lenha. A valorização energética pode ser feita de seis formas: geração de eletricidade em centrais dedicadas, geração de eletricidade em centrais de cogeração, incineração, produção de carvão vegetal, péletes e lenha. A maior parte da eletricidade proveniente de biomassa em Portugal é gerada em centrais dedicadas e de cogeração. Estas utilizam biomassa florestal ou resíduos para gerar energia elétrica e também energia térmica, no caso da cogeração. O carvão vegetal e os péletes são dois produtos derivados da biomassa florestal, ambos considerados biocombustíveis, que são originados pela compressão (péletes) ou carbonização (carvão vegetal) da biomassa. A incineração é considerada como um dos destinos de produtos em fim de vida, quando valorizados energeticamente. Já a lenha é a forma mais tradicional de utilização de biomassa com finalidade energética. Por fim,

considerou-se que os resíduos que não são reciclados nem valorizados energeticamente são depositados em aterro. O ano de referência para o modelo em estudo é 2015, visto ser o ano mais recente com informações mais completas.

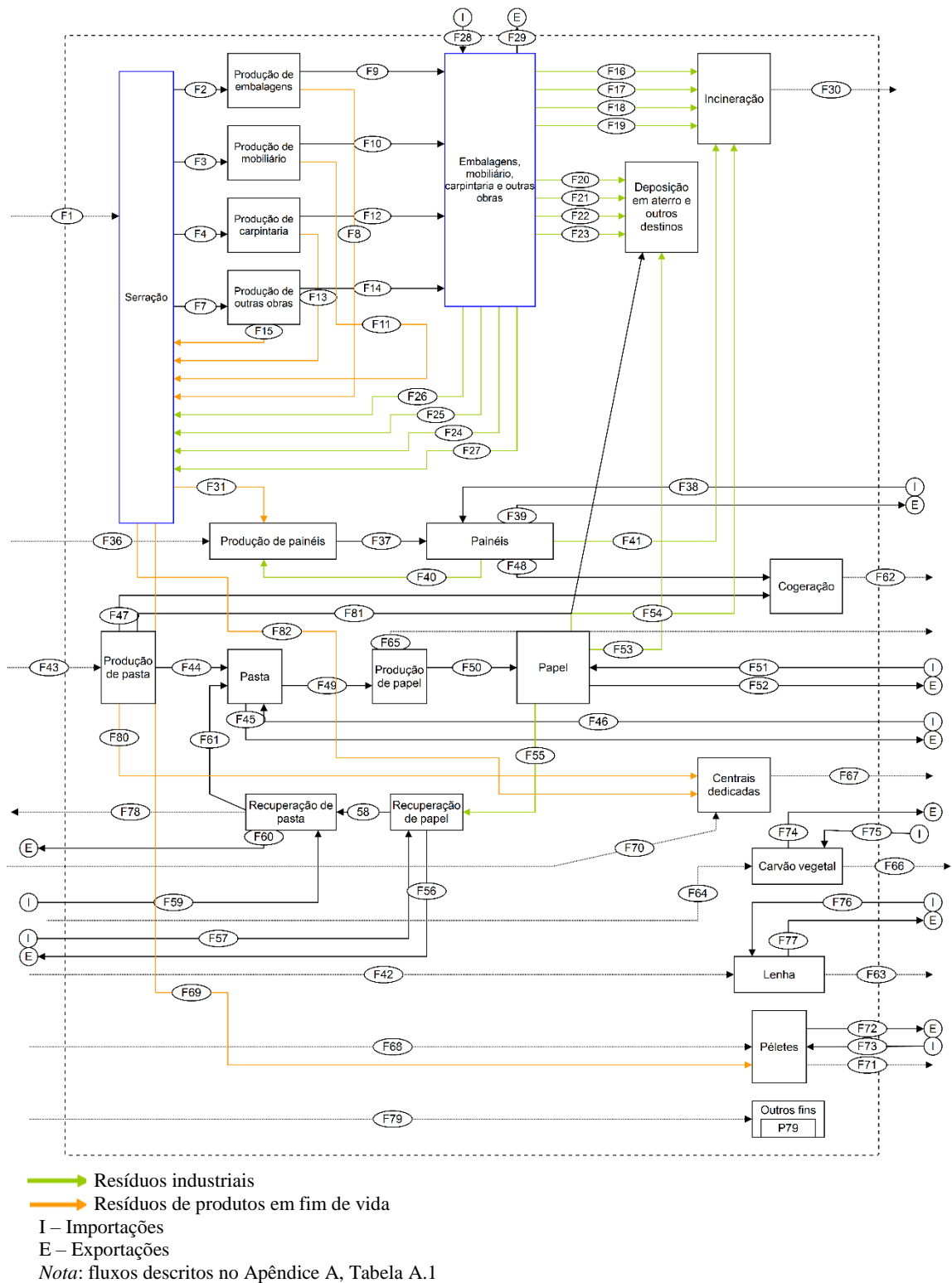
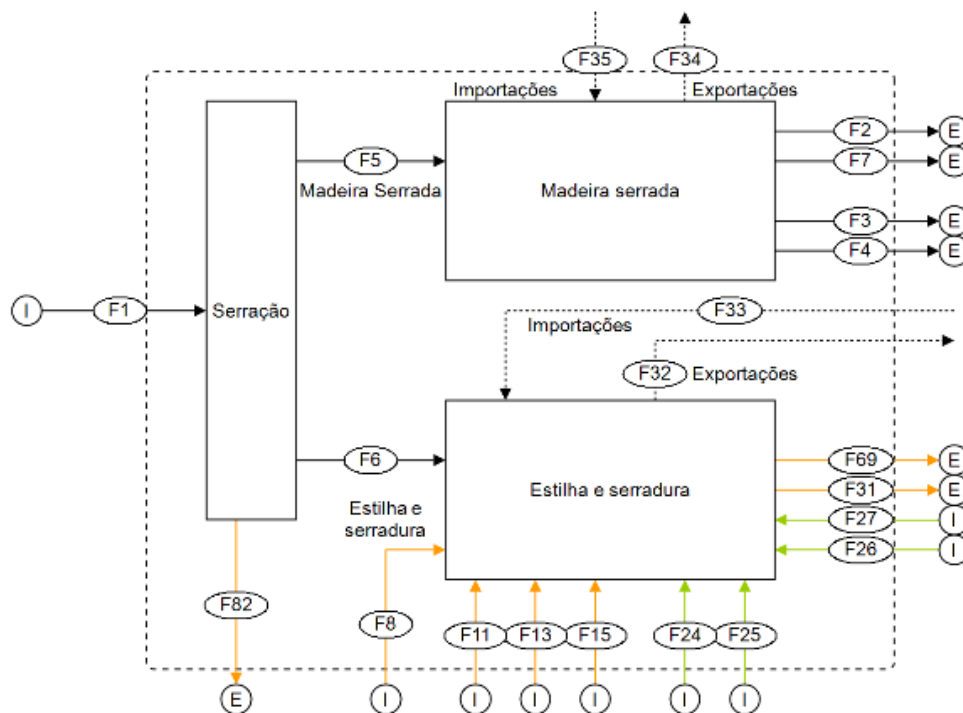


Figura 2.1. Sistema em estudo: fronteira do sistema, setores e interações



- Resíduos industriais
→ Resíduos de produtos em fim de vida
 I – Importações
 E – Exportações
 Nota: fluxos descritos no Apêndice A, Tabela A.1

Figura 2.2. Subsistema da serração: fronteira do sistema, setores e interações

2.2.2. Unidade de referência

A unidade de referência corresponde à unidade na qual toda a análise é expressa. Ter uma unidade homogênea ao longo da cadeia de biomassa florestal é essencial, visto que os dados são recolhidos em unidades diferentes (e.g., m³ de produto, tonelada de produto, número de unidades produzidas). A conversão de unidades (detalhada na secção 2.2.4) permite fazer comparações entre estudos. A unidade de referência utilizada no estudo é o metro cúbico equivalente de fibra de madeira (m³ e.f.). Esta unidade é comumente utilizada em estudos de AFM de biomassa florestal, nomeadamente Mantau *et al.* (2012) e Lenglet *et al.* (2017). O volume equivalente de fibra de madeira corresponde ao volume de fibra de madeira contida no produto quando esta está no seu ponto de saturação (Lenglet *et al.*, 2017). Para cada produto derivado de biomassa florestal foi usado um fator de conversão específico (que representa o volume equivalente de fibra de madeira contido num m³ ou tonelada (t) de produto), obtido de Lenglet *et al.* (2017) e Weimar (2011).

Uma unidade de referência alternativa utilizada em estudos de AFM relativos a biomassa florestal é o metro cúbico equivalente de toros de madeira (“*roundwood equivalent*”), que corresponde à quantidade de toros de madeira necessária para produzir uma unidade de produto. No entanto, Lenglet *et al.* (2017) referem que esta unidade não pode ser utilizada de forma direta em estudos de AFM, pois pode fazer dupla contagem de subprodutos. Um dos exemplos de dupla contagem são os resíduos do processo de serração, que podem ser contabilizados no processo industrial e como resíduos deste mesmo processo (Lenglet *et al.*, 2017).

2.2.3. Dados e hipóteses

As principais fontes de dados para o estudo foram o relatório “Informação estatística sobre o setor florestal e sobre as fileiras florestais” de 2000 a 2016, realizado pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF, 2017a) e as estatísticas realizadas pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 2019). Os dados, de produção, importações e exportações e as respetivas fontes estão detalhados no Apêndice B (Tabelas B.1 e B.2). Sempre que necessário foram utilizados dados do Instituto Nacional de Estatística (INE) como fonte complementar, nomeadamente, para os consumos, importações e exportação de produtos como: mobiliário, embalagens de madeira, carpintaria e outras obras de madeira (Apêndice B, Tabela B.3).

A abordagem escolhida para a recolha de informação foi do tipo de cima para baixo (“*top-down*”), complementada com uma abordagem de baixo para cima (“*bottom-up*”). Na maior parte dos casos, realizou-se o cálculo dos fluxos associados aos produtos finais (abordagem “*top-down*”) a partir dos dados referentes ao consumo de biomassa florestal para cada um dos setores. Nos restantes, calculou-se o consumo de recursos virgens a partir do conhecimento dos fluxos de todos os produtos finais do sistema (abordagem “*bottom-up*”).

Os fluxos de materiais podem ser classificados de duas formas: *inputs* ou *outputs*. Estes são fluxos individuais que têm uma determinada origem e direção. Os *inputs* ou fluxos de entrada correspondem à quantidade de biomassa florestal (em m³ e.f.) necessária para produzir uma determinada quantidade de produto. Um dos tipos de *input* são, por exemplo, as importações: fluxos com origem noutra país, que entram em Portugal para consumo. Os *outputs* são o oposto, representam os fluxos de saída. Durante o processamento da biomassa,

esta sofre várias transformações, resultando em produtos finais, produtos intermédios e resíduos, que tanto podem ser utilizados como matéria-prima para outro processo, como podem ser transformados em energia (muitas vezes para processos internos). Todos estes (produtos finais, intermédios, resíduos e energia) são considerados *outputs*. Outro exemplo de um fluxo de saída são as exportações: produtos que são fabricados no país e depois exportados para fora do mesmo. Aos produtos resultantes de transformações intermédias correspondem fluxos que tanto podem ser de entrada como de saída, i.e., *inputs* e *outputs* intermédios, pois o produto (por exemplo, painéis de madeira) sai de um processo (produção de painéis) como *output* e entra como *input* noutra processo como material (painéis em uso).

Os *inputs* primários não são convertidos, pois a unidade de volume de rolaria consumida pelos setores (serração, painéis, indústria papelreira e outros fins) é equivalente à unidade de referência. No entanto, dados como importações, exportações e *inputs/outputs* intermédios estão expressos noutras unidades, pelo que é necessário converter estes valores para a unidade de referência (m^3 e.f.). A conversão é feita tendo em conta os fatores obtidos em Lenglet *et al.* (2017) e Weimar (2011), apresentados na Tabela 2.1. Estes fatores de conversão correspondem ao volume de fibra equivalente contido num m^3 ou t de produto. Por exemplo, se a unidade original for m^3 de painéis de madeira, o fator de conversão transforma esta quantidade em m^3 e.f.. Esta conversão é necessária visto que um painel de madeira não é apenas constituído por biomassa florestal, mas também por outros materiais (e.g. resina), que não foram incluídos no estudo.

Tabela 2.1. Fatores de conversão para unidades de referência (Lenglet *et al.*, 2017 e Weimar, 2011)

Produtos	Unidade original	Fator de conversão (m^3e.f./unidade original)
Madeira serrada	m^3	1
Embalagens de madeira	t	1.1
Pasta de papel	t	2.175 ^a
Papel/Cartão	t	1.54
Papel recuperado	t	1.54
Painéis contraplacados	m^3	0.96
Painéis de partículas	m^3	1.26
Painéis de fibra	m^3	1.47
Carvão vegetal	t	1.65
Péletes de madeira	t	2.22
Resíduos de madeira	t	1.1

^a média entre pasta de papel química e mecânica

Através da aplicação dos fatores de conversão da Tabela 2.1, calcularam-se todos os fluxos desde a extração da biomassa florestal até à saída dos produtos finais das indústrias, com exceção da cadeia da madeira serrada. Esta parte da cadeia (após a produção de madeira serrada) é considerada como terceira transformação e, por isso, é habitualmente excluída deste tipo de estudos ou apresentada de forma agregada, pelo que não foi possível obter informação em relação aos fluxos de entrada bem como aos fatores de conversão necessários para converter as unidades originais relativas a importações, exportações e consumos (exceto para as embalagens). Foi por isso necessário distribuir a quantidade de m^3 e.f. resultante do balanço do *input*, importações e exportações de madeira serrada pelas embalagens, mobiliário, carpintaria e outras obras. A distribuição foi feita a partir das contribuições da produção de cada produto para o sistema. O raciocínio de cálculo dos *inputs* de biomassa florestal para a indústria do mobiliário, embalagens, carpintaria e outras obras de madeira é apresentado em detalhe no Apêndice B, secção B.1 (Tabela B.3) e B.2 (Tabela B.4 e B.5). Para produzir 1 m^3 e.f de mobiliário, carpintaria, embalagens e outras obras de madeira (produto) são necessários 1.11 m^3 e.f de biomassa florestal (matéria-prima) (Tabela 2.2). Foram também utilizados valores de conversão para saber qual a razão *input/output* para a produção de péletes e carvão vegetal, Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Fatores de conversão

Tipo de material	Quantidade de matéria-prima necessária por m^3 ou t de produto	Referência
Mobiliário, carpintaria, embalagens, outras	1.11	
Péletes	1.2	(Quinteiro <i>et al.</i> , 2019)
Carvão Vegetal	5.96	(UNECE, 2009)

A casca é um dos resíduos da produção industrial envolvido em todos os setores apresentados no estudo, porém os dados de ICNF (2017a) e FAO (2019) relativos ao consumo de biomassa florestal por setor são apresentados sem casca (“*under bark*”). A casca (F80 e F82) é maioritariamente direcionada para valorização energética (centrais dedicadas) e em alguns casos é também utilizada internamente para gerar energia para os processos (como nos painéis de madeira). Foi aplicado um rácio de volume biomassa/(volume de biomassa e casca) de 0.88 (UNECE, 2009), i.e. considerou-se que a casca corresponde a

aproximadamente 13.6% do volume equivalente de fibra da biomassa florestal reportada pelo ICNF (2017a) e FAO (2019).

O cálculo dos resíduos gerados em cada processo foi feito aplicando o princípio da conservação da massa, no qual se considera que estes equivalem à matéria-prima que entra no processo menos aquela que sai como produto final. Em geral, a geração de energia foi considerada como destino final destes resíduos; contudo, os fluxos F8, F11, F13, F15, podem também ser reciclados como estilha e serradura para a produção de painéis de madeira. Alguns setores utilizam os resíduos internamente para geração de energia para o processo. No caso do setor do papel e painéis de madeira, os resíduos do processo (produtos resultantes da transformação) são aproveitados para geração de energia em cogeração.

Após a obtenção dos produtos finais é necessário identificar o seu destino no período temporal em análise (1 ano). Existem dois cenários possíveis: (1) o produto é mantido em *stock*; e (2) o produto é consumido diretamente após produção e é descartado no mesmo ano. Para determinar se o produto é mantido em *stock* é necessário conhecer o seu tempo de vida. Uma vez atingido o fim vida, é necessário saber qual o seu destino: reciclagem (volta a ser inserido na cadeia como *input* de um processo de produção), valorização energética ou aterro. Excluiu-se a hipótese de reutilização, que é considerada neste estudo como um prolongamento da vida útil do produto (cenário 1).

A existência de *stocks* foi considerada para os seguintes produtos: mobiliário, carpintaria, outras obras de madeira, embalagens de madeira, painéis de madeira e papel/cartão. O *stock* consiste na quantidade de produtos utilizada/armazenada em 2015 e que foi produzida em anos anteriores. Para calcular o *stock* de 2015 é necessário saber as quantidades descartadas anualmente, obtidas a partir de dois tipos de distribuições: normal e de Weibull. Para todos os produtos, exceto papel/cartão, considerou-se que o seu tempo de vida é representado por uma distribuição normal cumulativa, de média igual ao tempo médio de vida do produto e desvio padrão igual a um terço da média. A distribuição cumulativa representa a quantidade de produtos ao longo dos anos que atinge o seu fim de vida. Uma vez que se pretende saber a quantidade de produtos que ficam em *stock*, foi realizado o cálculo apresentado na Equação 1.

$$F(t) = 1 - \text{distribuição normal cumulativa}$$

$$= 1 - \left(\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{\sigma^2}} \right) \text{(Equação 1)}$$

Onde:

t : período de vida

μ : período médio de vida

σ : desvio padrão

σ^2 : variância

Para mobiliário, carpintaria e outras obras de madeira considerou-se um tempo médio de vida de 35 anos, com base em Brunet-Navarro & Jochheim (2017), enquanto que, para os painéis, o valor assumido é de 25 anos (parâmetros detalhados na Tabela 2.3). No caso das embalagens de madeira foi utilizada a distribuição normal, mas reduzido o valor médio de vida de 35 anos (igual aos derivados da madeira serrada) para 2 anos. Uma vez que o papel/cartão tem um período de vida curto e, por isso, tem maior probabilidade de ser descartado no mesmo ano em que é produzido, ao contrário dos produtos anteriores que têm maior durabilidade, utilizou-se uma distribuição cumulativa de Weibull para representar o seu *stock* (Equação 2), cujos parâmetros são apresentados na Tabela 2.3, para os vários tipos de papel/cartão existentes (papel/cartão não revestido para uso gráfico, papel sanitário e de uso doméstico e papel/cartão para embalagem e empacotamento).

$$F(t) = 1 - \text{distribuição de Weibull cumulativa}$$

$$= 1 - \left(1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\beta}\right)^\alpha} \right) \text{(Equação 2)}$$

Onde:

t : período de vida

t_0 : período de vida mínimo

α, β : parâmetros de Weibull

Tabela 2.3. Parâmetros de distribuição de Weibull e normal para o cálculo de *stocks* (Pivnenko *et al.*, 2016; Brunet-Navarro *et al.*, 2017)

Categoria de produto	Parâmetros Weibull		Período de vida	
	α	β	Mínimo t_0	Máximo t_{max}
Cartão	1.44	1.81	1.9	7.8
Papel doméstico e sanitário	1.66	0.35	0.5	1.5
Papel de jornal	1.66	0.35	0.5	1.5
Outro papel gráfico	1.91	3.69	1	10.3
Outro papel	2.56	14.33	0.5	29
Embalagens e empacotamento	1.66	0.35	0.5	1.5
	Parâmetros distribuição normal			
	Desvio padrão		Período de vida médio	
Painéis de madeira	8.33		25	
Mobiliário, carpintaria, outras obras	11.67		35	
Embalagens de madeira	0.67		2	

A quantidade de produtos em fim de vida no ano de 2015 foi calculada a partir das distribuições normais e de Weibull, tendo em conta o *stock* do ano de estudo e de anos anteriores. Foi considerado que 87% das embalagens de madeira em fim de vida em 2015 foram recicladas (APA, 2019), uma parte foi depositada em aterro (3%) e o restante foi encaminhado para incineração (10%). Para os restantes produtos derivados da madeira serrada foi aplicada uma taxa de reciclagem de 30% (Brunet-Navarro & Jochheim, 2017), assumido que 5% foi encaminhado para aterro e o restante (65%) valorizado energeticamente.

A estilha e a serradura são utilizadas de duas formas: uma parte é reinserida no ciclo de produção de painéis de madeira e o restante é valorizado energeticamente (na produção de péletes). Considerou-se que, dos três tipos de painéis de madeira (contraplacado, partícula e fibra), apenas os dois últimos são produzidos a partir de estilha e serradura. A partir deste pressuposto, foi definido que os painéis de partículas contêm 90% de resíduos e 10% de biomassa virgem; para os painéis de fibra considerou-se que a percentagem de biomassa virgem é 30% e os resíduos correspondem a 70% (Sonae Arauco, 2016). A quantidade de resíduos que não é utilizada para produção de painéis é reencaminhada para produção de péletes. Dos painéis em fim de vida, 10% são reutilizados para fazer novos painéis de madeira e o restante é encaminhado para valorização energética (Brunet-Navarro &

Jochheim, 2017). A quantidade de papel/cartão em fim de vida corresponde ao valor de papel recuperado (Tabela B.2) e assumido que 2% é encaminhado para aterro (outros destinos) e 7% para incineração. O papel recuperado é incluído na pasta recuperada e transformado para entrar na produção de papel.

Para além da produção industrial, parte da biomassa florestal é usada para fins energéticos. A valorização energética é subdividida em seis setores: produção de péletes, produção de carvão vegetal, lenha, incineração, abastecimento de centrais termoelétricas dedicadas e de cogeração. A quantidade de biomassa florestal necessária para a produção de péletes, carvão vegetal e lenha foi obtida utilizando os fatores de conversão apresentados nas Tabelas 2.1 e 2.2, respetivamente. Considerou-se que a biomassa consumida na produção de péletes é composta por 83% de rolaria e 17% de resíduos (estilha e serradura) com base em Quinteiro *et al.* (2019). A quantidade de biomassa florestal consumida em centrais dedicadas e de cogeração foram obtidas a partir de Marques (2015) e Grupo de trabalho da biomassa (2013) e completadas neste estudo (Apêndice C, Tabelas C.1 e C.2). As centrais de cogeração geram energia (calor e eletricidade) para uso interno e eletricidade para a rede nacional. Contudo, tendo em conta os dados disponíveis, não foi possível diferenciar estes destinos, pelo que apenas se apresenta o valor agregado. As indústrias que geram energia térmica e eletricidade a partir de centrais de cogeração são a da pasta/papel e a dos painéis de madeira. Enquanto nos painéis se considera que todos os resíduos industriais podem ser valorizados em centrais de cogeração, no setor da pasta de papel esta possibilidade não é viável. Durante o processo de produção de pasta de papel surgem vários resíduos: casca, lamas, cinzas e resíduos dos processos industriais (incluindo licor negro). Ao contrário dos painéis, a casca é encaminhada para centrais dedicadas (geralmente centrais associadas às próprias indústrias) gerando eletricidade para a rede nacional, os resíduos industriais são utilizados para cogeração (Tabela C.2) e o restante, que não pode ser valorizado energeticamente vai para aterro e outros destinos. As centrais dedicadas, recebem também casca do setor da serração e o restante provém de resíduos florestais. O setor de pasta/ papel inclui também processos em que há geração de energia interna (na qual estão incluídas as possíveis perdas dos processos) como a produção de papel e recuperação de pasta. A incineração é um processo de queima, que reduz o volume dos resíduos, nomeadamente produtos em fim de vida, transformando-os num material inerte (cinzas). Uma das formas

de incineração é a co-incineração em cimenteiras, em que se utilizam os fornos das cimenteiras para incinerar resíduos (incluindo resíduos perigosos), pois os fornos funcionam a temperaturas muito elevadas. A deposição em aterro é ainda uma realidade em Portugal, contudo apenas são considerados quando não há mais nenhuma opção de tratamento. Esta foi considerada para a pasta de papel, como já explicado e também como destino de fim de vida de uma pequena parte do papel, mobiliário, embalagens, carpintaria e outras obras de madeira em fim de vida.

2.3. Indicadores selecionados

Neste capítulo são apresentados os indicadores selecionados para analisar os resultados obtidos pela AFM da biomassa florestal. Estes permitem analisar o consumo doméstico, bem como as importações, exportações, a utilização de produtos em cascata e a reciclagem para o setor do papel/cartão: taxa de recuperação e taxa de entrada reciclada.

2.3.1. Indicadores de AFM

Para a análise da AFM são incluídos três indicadores típicos desta metodologia: extração doméstica, entrada direta de materiais e consumo interno de materiais (Eurostat, 2001). A extração doméstica/interna (ED) corresponde à quantidade de biomassa florestal extraída em Portugal anualmente (no âmbito deste estudo será para o ano de 2015). Este indicador traduz a quantidade de biomassa florestal endógena consumida, tendo apenas em conta a matéria-prima do país, nos vários setores consumidores deste recurso e utilizada para a produção dos vários produtos derivados de madeira.

A entrada direta de materiais (EDM) mede o *input* direto de todos os materiais sólidos que possuem valor económico, isto é, a quantidade de biomassa florestal extraída e as importações associadas aos produtos do sistema (Equação 3). O *input* direto de materiais traduz o saldo total de biomassa florestal para o processamento de produtos.

$$\text{EDM} = \text{ED} + \text{Importações (Equação 3)}$$

O consumo interno de materiais (CIM) consiste no balanço entre a extração doméstica de matérias primas, a importação de matéria-prima e de bens e a exportação do mesmo tipo de recursos (equação 4). Este indicador avalia a quantidade total de biomassa florestal

utilizada e permite fazer a distinção entre o que foi consumido em Portugal e noutros países (exportado).

$$\text{CIM} = \text{ED} + \text{Importações} - \text{Exportações} \text{ (Equação 4)}$$

2.3.2. Fator de cascata

A biomassa florestal é um recurso renovável, mas sujeito a limitações de disponibilidade. Apesar dos esforços em otimizar os processos industriais, continua a haver necessidade de extrair quantidades elevadas de matéria-prima. Um dos responsáveis pela crescente extração de biomassa florestal é à utilização de biomassa como substituto de combustíveis fósseis para cumprir metas de redução dos impactes ambientais (Fehrenbach *et al.*, 2017). Por esse motivo, é necessário aplicar medidas no âmbito da economia circular como reciclar, reutilizar, tornar o uso de matérias-primas mais eficiente e fechar os ciclos de modo a que os materiais se mantenham na economia por mais tempo.

A ideia subjacente ao fator de cascata é a da utilização repetida da matéria-prima, que neste caso se trata de biomassa florestal. Quando é aplicado o uso em cascata pode haver melhoria da eficiência e de redução dos impactes ambientais associados à extração de biomassa virgem (Fehrenbach *et al.*, 2017). O uso em cascata dá prioridade à utilização material da biomassa antes da sua utilização para produção de energia. Existem dois tipos de uso de cascata (Fehrenbach *et al.*, 2017) (Figura 2.3):

- Cascata de estágio único: o material, i.e., a biomassa florestal, é utilizado uma única vez como matéria-prima num produto; chegando ao fim de vida, o material é usado diretamente para fins energéticos.
- Cascata de múltiplos estágios: ao contrário do anterior, o material é usado pelo menos duas vezes para produzir produtos e só após serem esgotadas todas as opções de utilização material é que é utilizado para energia.

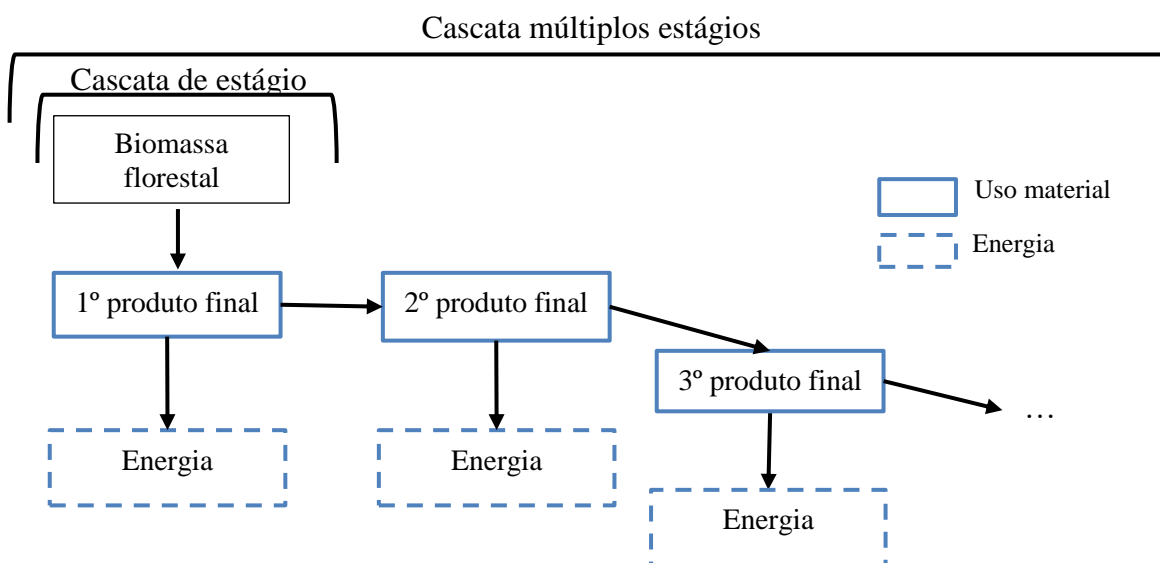


Figura 2.3. Utilização de biomassa florestal em cascata de único e múltiplos estágios (adaptado de Essel et al., 2014)

No âmbito deste trabalho pretende-se calcular o fator de cascata associado ao consumo de biomassa florestal (fator de cascata total) e o fator de cascata associado a alguns dos setores em estudo (produção industrial, painéis de madeira e pasta/papel) para 2015. Na Tabela 2.4 são apresentadas as equações para o cálculo do uso de cascata que permitem determinar quantas vezes a matéria-prima é reaproveitada como produto e finalmente como energia. Para isso são analisados os fluxos que correspondem aos resíduos dos processos industriais (cascata em resíduos de madeira), aos produtos em fim de vida reciclados (cascata em produtos reciclados), ambos os anteriores (cascata em produtos) e todo o sistema em estudo (fator de cascata total).

Tabela 2.4. Equações para cálculo do fator de cascata baseadas em Mantau, 2015

Indicador	Equações
Cascata em resíduos de madeira	$(B^i + R_{p,p,m}^i) / B^i$
Cascata em produtos reciclados	$(B^t + R_{f,p,m}^i) / B^t$
Cascata em produtos	$(B^i + R_{p,p,m}^i + R_{f,p,m}^i) / B^i$
Fator de cascata total	$(B^t + R_{p,p,m}^i + R_{p,p,e}^t + R_{f,p,m}^i + R_{f,v,e}^t) / B^t$

B: Biomassa florestal virgem (m³ e.f.)

As variáveis usadas no cálculo do fator de cascata são indicadas na Tabela 2.5, na qual se apresentam os quatro fluxos principais (de resíduos: R) em m^3 e.f.. Os fluxos R podem ser calculados para os setores i (t : total; pi : produção industrial; pp : pasta e papel; pn : painéis;), a origem j do resíduo (p : processo industrial; f : produto em fim de vida), o seu destino k (p : processo industrial; v : valorização energética) e a forma como é valorizado l (m : material; e : energia).

Tabela 2.5. Nomenclatura das variáveis usadas para calcular o fator de cascata (Mantau, 2015)

Fluxos	Descrição
$R_{p,p,m}^i$	Resíduos do processo industrial (p) utilizados no processo industrial (p) como material (m)
$R_{p,p,e}^t$	Resíduos do processo industrial (p) usados no processo industrial (p) para energia (e)
$R_{f,p,m}^i$	Resíduos de fim de vida (f) usados no processo industrial (p) como material (m), i.e. reciclados
$R_{f,v,e}^t$	Resíduos de fim de vida (f) valorizados energeticamente (v, e)

O fator de cascata é sempre maior ou igual a 1: é igual a 1 quando a matéria-prima natural (sem transformações, B^i) é utilizada uma única vez ao longo da sua vida útil; é superior a 1 quando (parte) da matéria-prima natural é reutilizada pelo menos uma vez (como material ou fonte de energia) ao longo da sua vida útil. Quanto mais vezes os produtos forem reutilizados como matéria (e posteriormente como energia), mais elevado será o fator de cascata.

As equações descritas acima foram baseadas no estudo de Mantau (2015), contudo, foram adaptadas para este estudo. Mantau (2015) não inclui a casca nos fluxos usados para calcular o fator de cascata, nem importações e exportações de produtos finais, intermédios e matéria-prima. Neste estudo, estes fluxos foram incluídos, pois o consumo de resíduos industriais e de fim de vida são dependentes dos fluxos de importação e exportação. Desta forma, consideraram-se para o cálculo do fator de cascata os seguintes fluxos: rolaria, resíduos da exploração florestal, resíduos industriais, casca, importações, exportações.

2.3.3. Taxa de recuperação e taxa de entrada reciclada do papel/cartão

A reciclagem é uma das formas de gestão de resíduos que reduz a necessidade de fibra de madeira virgem. Dos produtos em estudo neste trabalho, o papel/ cartão é o que tem mais potencialidade em relação à reciclagem após consumo/fim de vida, pelo seu curto período de vida, elevada quantidade de recolha dos produtos em fim de vida (devido ao sistema de recolha seletiva de papel) e possibilidade de reciclar várias vezes a sua fibra. A taxa de recuperação (TR) corresponde à relação entre a quantidade de papel reciclado e a quantidade de papel produzido em Portugal (Equação 5).

$$TR = \frac{\textit{Papel reciclado}}{\textit{Papel produzido em Portugal}} \textit{ (Equação 5)}$$

Como alternativa à taxa de recuperação, Ewijk *et al.* (2017) sugeriram a utilização de outro indicador: a taxa de entrada reciclada (TER). A TER é a razão entre a quantidade de papel enviado para reciclagem e o *input* total de fibra (Equação 6) (Ewijk *et al.*, 2017). O *input* total de fibra corresponde à biomassa virgem à entrada do setor de papel mais a biomassa reciclada.

$$TER = \frac{\textit{Papel reciclado}}{\textit{Input total de fibra}} \textit{ (Equação 6)}$$

Enquanto que a TR relaciona a quantidade de papel reciclado com a quantidade de papel produzida num determinado ano, a TER compara o *input* total de fibra para a produção de papel com a quantidade de papel reciclado nesse ano. Ao comparar o *input* de papel para reciclagem e o total produzido, a TR não reflete a realidade da indústria do papel/cartão, pois não tem em consideração as perdas que ocorrem entre os dois processos (produção e reciclagem), nem o facto de parte do papel não ser reciclado (Ewijk *et al.*, 2017). Sendo que o principal objetivo da reciclagem é a redução dos impactes resultantes da extração de matéria-prima, biomassa florestal, a TR não estuda realmente a reciclagem. A TR tem em consideração a biomassa florestal, mas apenas aquela que está incluída na quantidade

produzida de papel e não o *input* de biomassa florestal que é necessário para a produção dessa quantidade (que inclui as perdas associadas ao processo e a geração de energia) (Ewijk *et al.*, 2017). Desta forma, a TER é mais completa e precisa para o estudo da reciclagem associada ao processo de produção de pasta e papel.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Análise dos fluxos de biomassa florestal

As figuras do capítulo 3 representam os fluxos e *stocks* de biomassa florestal em Portugal em 2015. Os esquemas mostram os fluxos materiais desde a extração até ao fim de vida dos produtos e respetivos tratamentos, representados da esquerda para a direita, respetivamente. Adicionalmente, todos os produtos (finais e intermédios) são individualmente apresentados por setores: (1) setor da serração (madeira serrada e estilha/serradura) e outras obras de madeira (Figura 3.1); (2) carpintaria, embalagens de madeira e mobiliário (Figura 3.2); (3) painéis de madeira (Figura 3.3); (4) setor da pasta e papel/cartão (Figura 3.4); (5) outros fins e fins energéticos: péletes, carvão vegetal, cogeração, incineração, centrais dedicadas e lenha (Figura 3.5).

A ED no ano de 2015 foi cerca de 14.9 milhões de m³ e.f.. Da quantidade total, 88% (13 milhões de m³ e.f.) representam rolaria (incluindo a casca) para a indústria. Os restantes 12% correspondem a resíduos da exploração da floresta que foram utilizados para fins energéticos (Figura 3.5). Adicionalmente, foram importados 7 milhões de m³ e.f. (correspondente a produtos primários, intermédios e finais), representando uma EDM de 22 milhões de m³ e.f. correspondente à quantidade de biomassa consumida no processamento de produtos em Portugal em 2015. Desta quantidade, 10.5 milhões de m³ e.f. foram exportados, obtendo-se desta forma a quantidade de materiais correspondente ao consumo interno (CIM), que foi aproximadamente 11.5 milhões de m³ e.f.. A partir destes três indicadores concluiu-se que a quantidade de biomassa florestal extraída em Portugal em 2015 foi suficiente para o consumo interno. No entanto, como Portugal exportou quantidades elevadas de produtos derivados de biomassa florestal, foi necessário importar recursos e produtos, para contrabalançar a procura.

No ano de 2015 foram consumidos 17.9 milhões de m³ e.f. de biomassa florestal, dos quais 1.8 milhões de m³ e.f. são resíduos florestais utilizados em centrais dedicadas e para produção de carvão vegetal. Desse consumo total de biomassa florestal de 17.9 milhões de m³ e.f., aproximadamente 60% foi utilizado para produção de produtos e 40% para energia.

Da quantidade total de resíduos utilizados, 97% (1.72 milhões de m³ e.f.) abasteceram as necessidades das centrais dedicadas e o restante foi utilizado como recurso único para a produção de carvão vegetal. De acordo com Ferreira *et al.* (2017), Portugal tem uma disponibilidade de 2 megatoneladas por ano de resíduos florestais, tendo em conta que 1.8 milhões de m³ e.f. corresponde a 1.6 megatoneladas, conclui-se que no ano do estudo ficou ainda disponível 0.4 megatoneladas de resíduos florestais. Estes valores confirmam a validade deste resultado, pois o valor obtido é inferior ao de referência (Ferreira *et al.*, 2017).

A quantidade de rolaria necessária para a produção industrial (considerando a importação e exportação) foi de 16.1 milhões de m³ e.f., distribuída pelos produtos/setores: serração, painéis de madeira, pasta/papel/cartão, lenha, péletes e outros fins. Contudo, a quantidade de rolaria consumida reportada foi 15 milhões de m³ e.f., o que deixa um défice de 1.1 milhões de m³ e.f. não reportado. A diferença em relação ao valor reportado é de 7%, que estará relacionada com a incerteza dos dados estatísticos e do modelo apresentado.

A indústria da pasta e papel é a que consome a quantidade mais elevada de rolaria, cerca de 60% do total consumido, o que corresponde a 9.7 milhões de m³ e.f. (Figura 3.4), o que traduz a importância do setor no país, em particular como setor exportador. Os setores que consomem mais biomassa florestal, a seguir ao papel, são a serração e a produção de péletes. Estes representam 15% e 14% dos consumos, respetivamente. Apesar de serem valores mais baixos que os anteriores, representam um consumo de 2.4 e 2.2 milhões de m³ e.f. Por fim, os restantes 1.7 milhões de m³ e.f. (11% do total de rolaria) são distribuídos entre produção de painéis de madeira (0.8), a geração de energia a partir de lenha (0.68) e outros destinos não identificados (0.36). Pela falta de informação em relação aos outros fins, consideraram-se como *stocks* e por isso não foram identificados os possíveis destinos dos produtos em fim de vida.

As Figuras 3.1 e 3.2 representam o setor da serração, que inclui a produção de madeira serrada e resíduos (estilha e serradura), incluindo em detalhe cada um dos produtos derivados da madeira serrada. A quantidade de matéria-prima disponível para os fluxos F2, F3, F4 e F7 é aproximadamente 0.9 milhões de m³ e.f.. Dos produtos derivados de madeira serrada, o mobiliário tem o fluxo de biomassa florestal mais elevado, com um consumo de 52% do total. A restante biomassa consumida é distribuída pela cadeia da madeira serrada, com 20% a ser utilizado para produção de embalagens de madeira, 21% para carpintaria e o restante (7%) para outros produtos de madeira.

O sistema relativo ao setor dos painéis é apresentado na Figura 3.3. Nesta verifica-se que, do total de biomassa florestal consumida, 3 milhões de m³ e.f., 72% são resíduos (estilha e serradura) e 28% são biomassa virgem. A elevada percentagem de resíduos consumidos na produção de painéis deve-se particularmente à produção de painéis de partículas e de fibra, constituídos por 90% e 70% de resíduos, respetivamente. O processo de produção de painéis gera resíduos industriais, incluindo casca, utilizada para geração de energia, tanto para o processo (interno) como para venda, à rede nacional. Os resíduos desta indústria correspondem a 35% do fluxo total de biomassa consumido nas centrais de cogeração do sistema.

A Figura 3.4 mostra a análise de fluxos materiais para a indústria de pasta e papel. O processo da produção de papel é iniciado com o *input* de biomassa florestal para a indústria e transformação da fibra de madeira em pasta de papel, que pode ser exportada ou consumida (5.8 milhões de m³ e.f.) em Portugal. Este processo requer grandes consumos de energia, a maior parte da qual provém da valorização energética de resíduos do processo industrial. O papel não é apenas obtido através da pasta produzida com biomassa florestal virgem, mas também da pasta recuperada, visto que a fibra do papel pode ser reciclada várias vezes. No ano de 2015, a recuperação de papel e pasta (F61) representou 11% da quantidade de pasta produzida (F49). Do *input* de biomassa florestal para o setor da pasta de papel, apenas 60% do *input* sai como pasta de papel, sendo que o restante é utilizado como combustível para cogeração. Porventura, a indústria da produção de papel está a utilizar mais biomassa florestal do que a que necessita para a produção material. O excesso de biomassa florestal é usado para gerar energia, que pode ter dois destinos: consumo interno ou venda de eletricidade para a rede nacional. A cogeração na indústria do papel representou 65% do fluxo total de biomassa florestal encaminhado para centrais de cogeração (Figura 3.5).

Os resíduos (casca e outros resíduos industriais) são *outputs* dos processos, contudo setores como painéis de madeira não os consideram como tal, pois os resíduos são reinseridos na produção de painéis ou usados para cogeração. No setor da pasta e papel, a casca é representada pelo fluxo F80, contudo considera-se que não há saída de resíduos devido ao reaproveitamento para energia, produção de eletricidade para consumo interno (posteriormente a quantidade não utilizada é vendida à rede nacional) ou calor. Do setor de serração (F1) são produzidos dois produtos: madeira serrada e os resíduos da sua produção, estilha e serradura. Estes representam 60% e 40%, respetivamente da rolaria consumida (F1)

neste setor. Por sua vez, as produções de mobiliário, carpintaria, embalagens e outras obras de madeira utilizam a maioria da madeira serrada para os seus produtos finais, produzindo apenas 0.09 milhões de m³ e.f. de resíduos (F8, F11, F13 e F15).

Os *stocks* representam o que está armazenado ou em uso, por isso, um produto que tenha um período de vida longo está mais tempo em utilização. Assim, conclui-se que os produtos com maior *stock* são aqueles com um fim de vida mais longo, tal como os painéis de madeira e produtos derivados de madeira serrada, e não necessariamente os que têm mais produção. A maioria dos produtos produzidos em 2015, ficaram em *stock*, com a exceção das embalagens e do papel. Em 2015, o *stock* totalizava 43.9 milhões de m³ e.f., dos quais 24.9 milhões de m³ e.f. de painéis e 14.6 milhões de m³ e.f. de produtos como mobiliário, carpintaria, embalagens madeira e outras obras de madeira. No caso do papel/cartão e até das embalagens de madeira (inseridas no *stock* dos produtos de madeira serrada), as quantidades de produtos armazenados são mais baixas, devido ao seu curto período de vida. Das embalagens produzidas foram para *stock* 93% e no caso do papel permaneceram em *stock* 16% (papel de uso doméstico/papel de jornal) e 97% de papel de uso gráfico.

O destino dos produtos em fim de vida difere. As quantidades de produtos reciclados estão documentadas (exceto para o mobiliário, carpintaria e outras obras), contudo a fração cujo destino é a valorização energética ou a deposição em aterro não está disponível para nenhum setor, pelo que estes valores foram assumidos de forma variada tendo em conta que a percentagem reciclada de cada produto, o período de vida e que a deposição em aterro é cada vez mais reduzida devido às políticas ambientais, favorecendo então a incineração. Para, análise de sensibilidade e verificou-se que as alterações não seriam significantes. No caso do mobiliário, carpintaria e outras obras não são conhecidos os destinos dos produtos de fim de vida, pelo que se considerou que a percentagem reciclada foi 30%, 5% deposto em aterro e o restante foi incinerado (este destino foi favorecido pela dificuldade de reciclar este tipo de resíduo e pelo longo período de vida dos mesmo). Foi realizada uma análise de sensibilidade para verificar se outros valores teriam influência nos resultados, nomeadamente considerando que 70% dos produtos em fim de vida são encaminhados para incineração, tendo resultado em menos de 7% de variação nos fluxos F17, F18 e F19.

Os processos relacionados com a geração de energia estão representados na Figura 3.5 e consomem um total de 9.9 milhões de m³ e.f.. O carvão vegetal é produzido apenas com resíduos florestais e as centrais dedicadas consomem 1.7 milhões de m³ e.f. de resíduos da

exploração florestal, que corresponde a 54% do consumo total necessário para estas centrais. As péletes consomem 2.7 milhões de m³ e.f. (do total consumido na Figura 3.5), distribuído em rolaria e estilha/serradura. A incineração consome cerca de 9% dos 9.9 milhões de m³ e.f. consumidos a partir de produtos recuperados em fim de vida e a lenha (consumo doméstico) representa 7% da rolaria. Por fim, a cogeração tem um consumo de 3.8 milhões de m³ e.f. de biomassa florestal para geração de energia.

A reciclagem de produtos em fim de vida é importante para a redução do *input* biomassa florestal nos vários setores industriais, visto que a fibra pode ser várias vezes reciclada (dependendo do tipo de produto em que foi transformada). No ano de 2015, foram reciclados cerca de 2 milhões de m³ e.f., sendo que a maioria provém dos produtos em fim de vida do setor do papel/cartão (1.8 m³ e.f.), utilizados exclusivamente neste setor para produção de pasta recuperada.

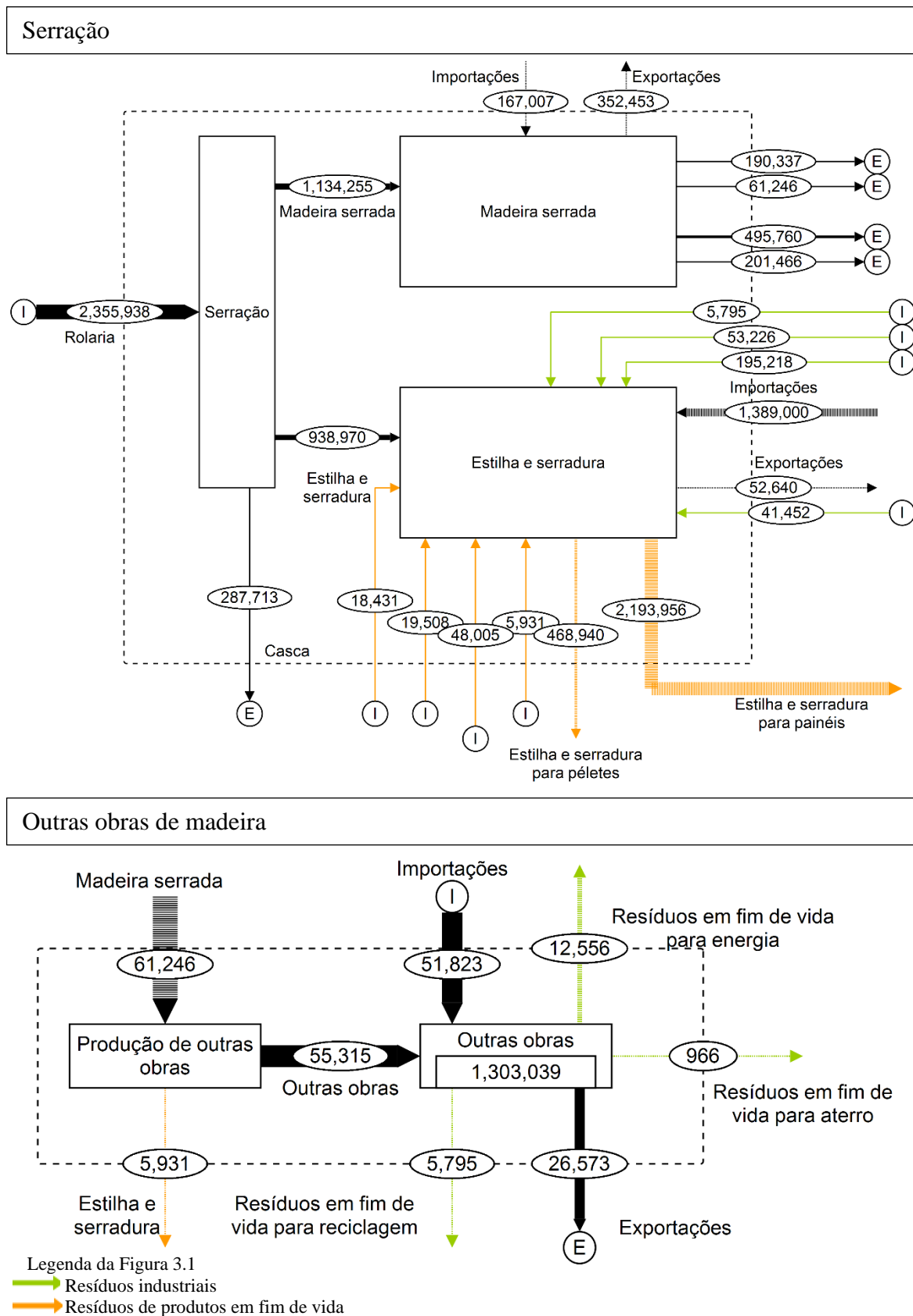


Figura 3.1- Resultados da AFM para serração e outras obras de madeira em m³ e.f.

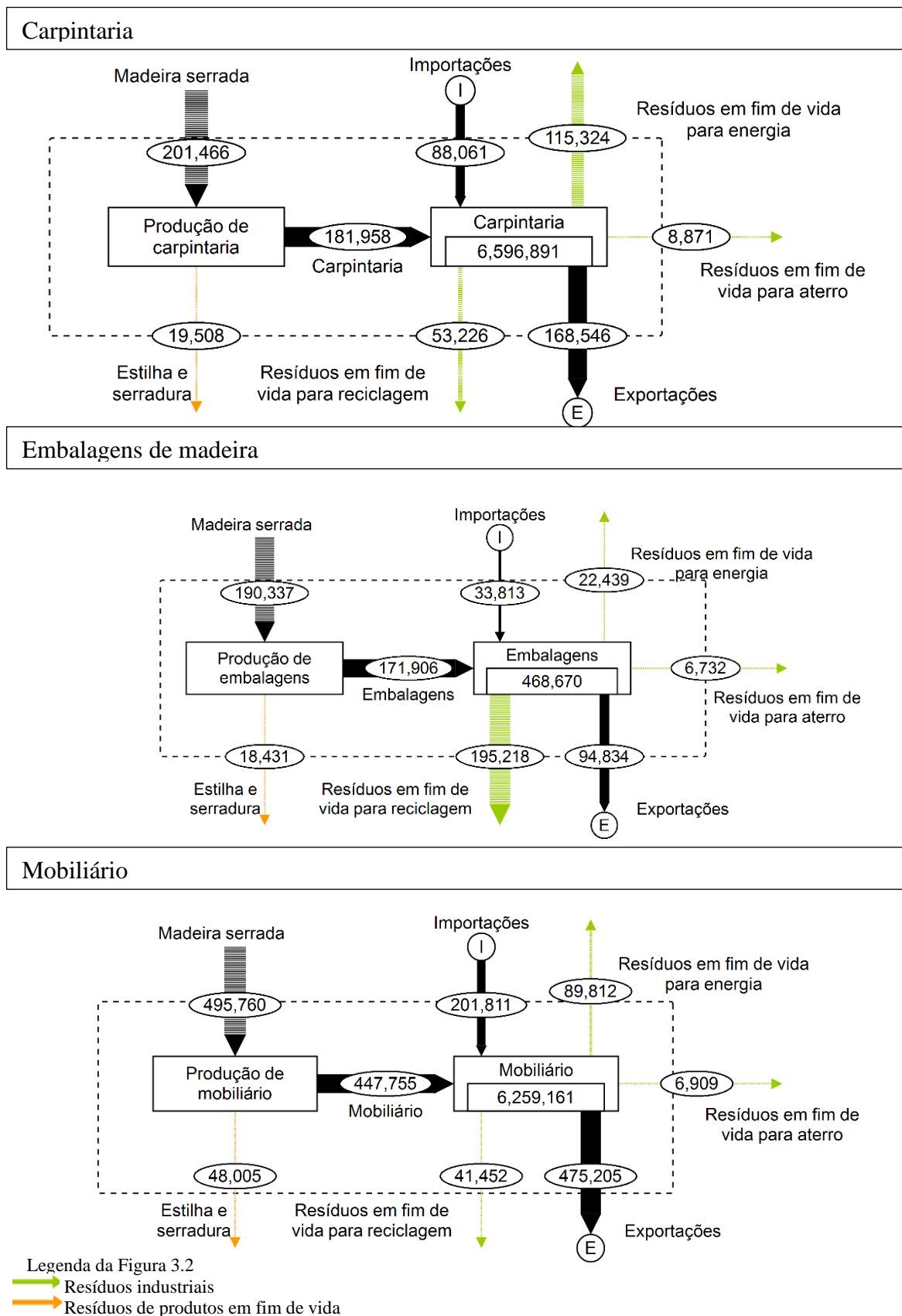


Figura 3.2. Resultados da AFM para carpintaria, embalagens e mobiliário em m³ e.f.

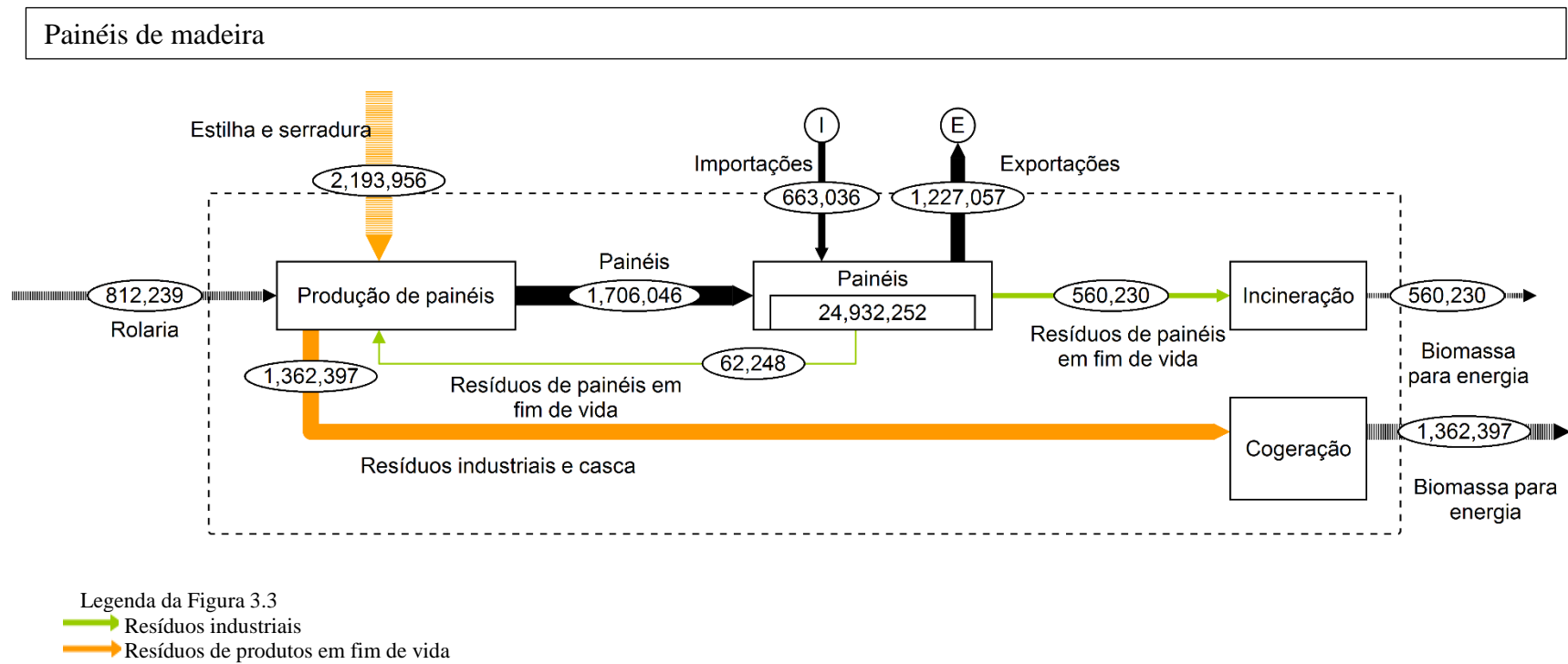
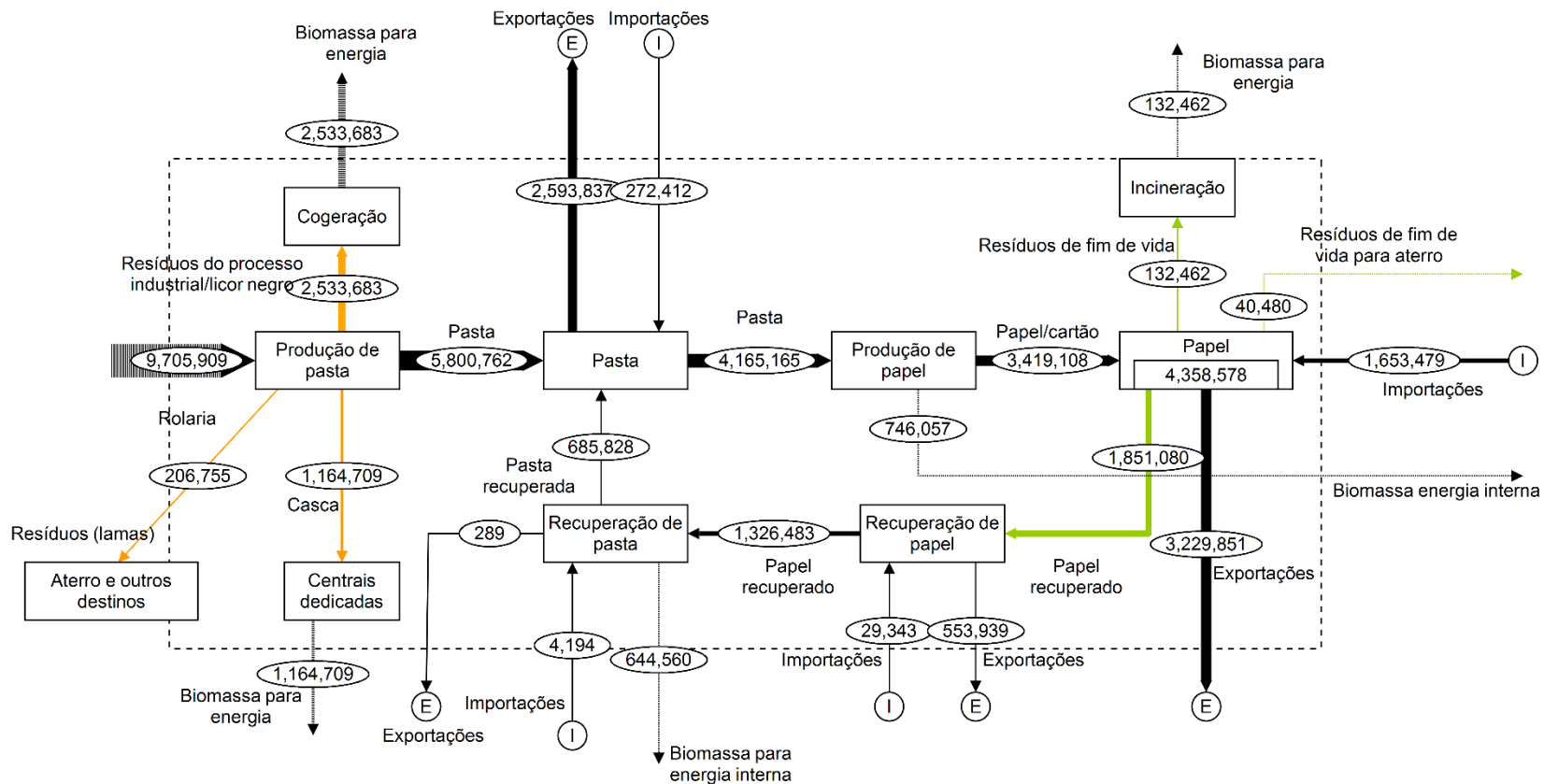


Figura 3.3. AFM para o setor de painéis de madeira em m³ e.f.

Setor da pasta e papel/cartão



Legenda da Figura 3.4

→ Resíduos industriais

→ Resíduos de produtos em fim de vida

Nota: Potenciais perdas do processo são incluídas na “Biomassa para energia interna”

Figura 3.4. Resultados da AFM para o setor da pasta e papel em m³ e.f.

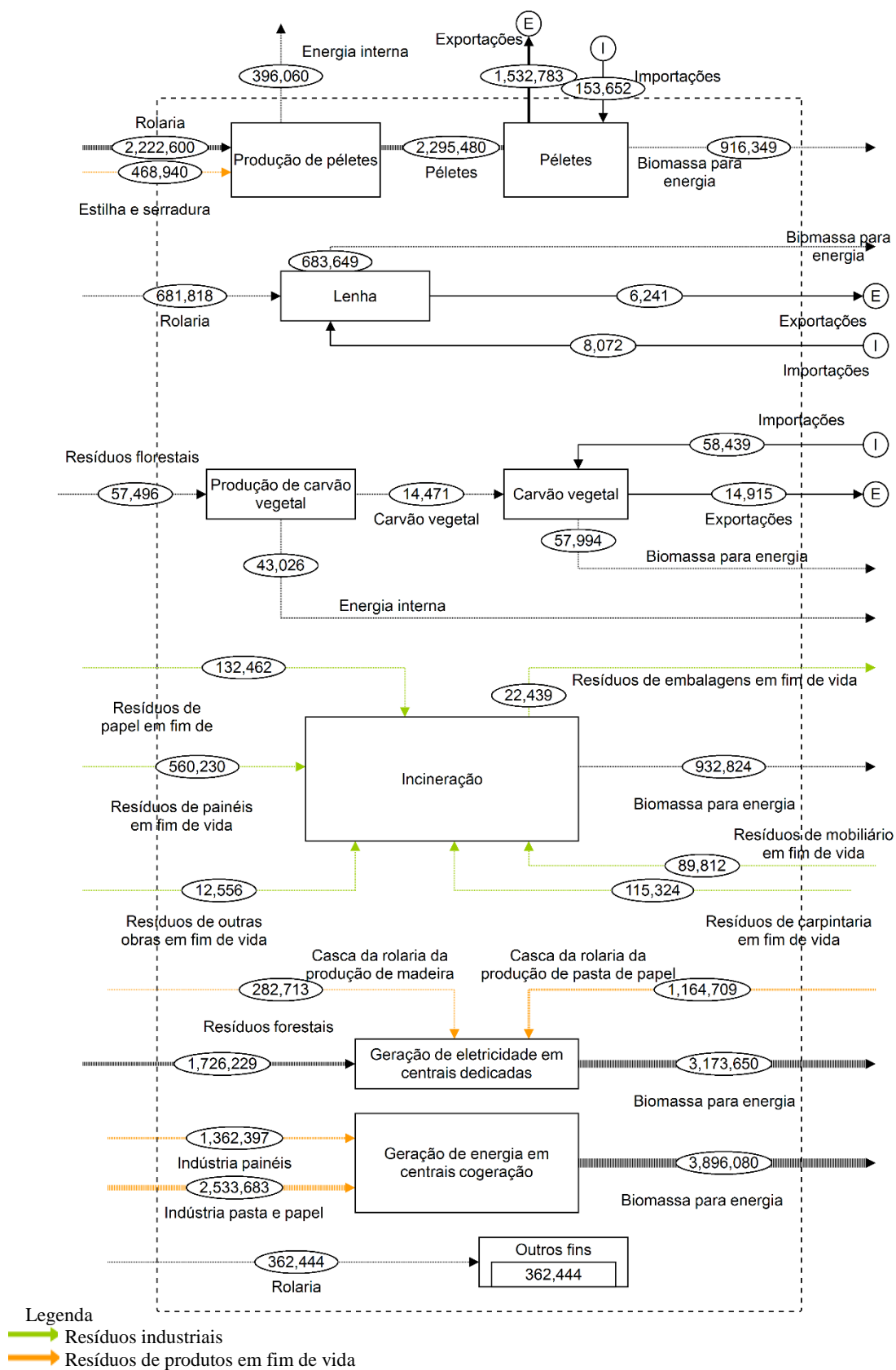


Figura 3.5. Resultados da AFM para o setor energético em m³ e.f.

3.2. Fator de cascata

Nos resultados da AFM verificou-se uma discrepância entre o consumo total de biomassa florestal do estudo e aquele reportado. Desta forma, será utilizado o obtido pelo estudo para os cálculos do fator de cascata. Na Tabela 3.1 apresentam-se os resultados dos cálculos dos fluxos.

Tabela 3.1. Fluxos para cálculo do uso em cascata em m³ e.f.

Variáveis	Fluxos
B^t	17924673
$R_{p,p,m}^t$	2754772
$R_{p,p,e}^t$	6734119
$R_{f,p,m}^t$	1684422
$R_{f,v,e}^t$	932824

B^t corresponde à soma das quantidades de rolaria (16.1 m³ e.f.) e de resíduos da exploração florestal (1.8 m³ e.f.) consumidos em Portugal em 2015. Já $R_{p,p,m}^t$ é a soma os fluxos F8, F11, F15, F13, F31 e F69. O $R_{p,p,e}^t$ inclui os fluxos de casca do setor da serração e da pasta para as centrais dedicadas (F82 e F80), os fluxos para cogeração (F48 e F47) e os fluxos F78 e F65, que representam a energia interna (que incluem possíveis perdas dos processos) gerada nos processos de produção de papel e recuperação de pasta. Os resíduos de fim de vida utilizados nos processos industriais, $R_{f,p,m}^t$, são representados por F24, F25, F26, F27, F40 e F58. $R_{f,p,e}^t$ corresponde aos seguintes fluxos: F16, F17, F18, F19, F41 e F54. Este conjunto de fluxos é a quantidade de biomassa florestal necessária para gerar energia a partir de incineração (F30).

Na Tabela 3.2 apresentam-se os fatores de cascata totais calculados, bem como os resultados obtidos por Mantau (2015) para a Europa. Em Portugal é utilizada uma porção maior de resíduos dos processos industriais (1.15) que de produtos reciclados (1.09). O fator de cascata total é mais elevado do que o fator de cascata em produtos, pois tem em consideração a utilização como energia e material, ao contrário da cascata em produtos que só inclui as utilizações como material. Desta forma, conclui-se que a utilização como energia é importante para o sistema, pois é nessa área que há mais utilização em cascata. Assim, em Portugal prioriza-se a cascata de estágio único, pois o recurso é utilizado uma única vez

como material e encaminhado para energia. A prioridade em Portugal deveria ser o uso dos recursos como material até não ser possível fazê-lo mais vezes e só depois utilizá-los para energia, porque ao usar a cascata de estágio único, a eficiência do uso de produtos é mais baixa. A comparação com os valores calculados para a Europa demonstra que o reaproveitamento de resíduos industriais em Portugal foi semelhante, contudo, na Europa, houve mais aproveitamento de resíduos de fim de vida, ainda assim o fator de cascata total europeu (1.57) é inferior ao de Portugal (1.68). Apesar do fator de cascata em produtos ser inferior ao europeu, a valorização energética dos resíduos é superior. Neste estudo considerou-se que toda a matéria prima que não foi incorporada nos produtos finais eram resíduos do processo industrial usados para energia. Esta consideração faz com que se contabilize possíveis perdas dos processos para energia, quando na realidade estas poderiam ter outros destinos. Por isso, o valor de biomassa florestal para geração de energia pode estar sobrestimado.

Tabela 3.2. Cálculo do fator de cascata total

Indicadores	Resultados	Mantau (2015)
Cascata em resíduos industriais	1.15	1.13
Cascata em produtos reciclados	1.09	1.23
Cascata em produtos	1.25	1.35
Fator de cascata total	1.68	1.57

Para os setores individuais apenas foi realizado o estudo relativo a fatores de utilização (como material). Os resultados dos fluxos da produção industrial, que inclui o setor da serração, de painéis de madeira e de pasta e papel, são apresentados na Tabela 3.3. Estes são iguais aos fluxos relativos ao sistema geral, contudo o *input* de biomassa florestal (B^{pi}) é mais baixo, visto que, na produção industrial não entram os resíduos da exploração da floresta, nem rolaria (lenha e péletes) para energia. Na Tabela 3.4 são apresentados os resultados para o uso em cascata na produção industrial. Em Portugal priorizou-se a reutilização de resíduos industriais, dentro dos processos industriais em relação a produtos em fim de vida. De uma forma geral, verifica-se que no país a matéria-prima foi utilizada 1.34 vezes, o que é menos vezes do que no cenário europeu (1.55). Os valores baixos de cascata podem também ser relativos à relação *input* de biomassa florestal e consumo em Portugal, porque o país tem um saldo exportador elevado, o que faz com que haja um *input* muito alto para um consumo relativamente baixo.

Tabela 3.3. Fluxos para a produção industrial em m³ de fibra de madeira

Variáveis	Fluxos de produção industrial
B^{pi}	13236530
$R_{p,p,m}^{pi}$	2754772
$R_{f,p,m}^{pi}$	1684422

Tabela 3.4. Resultado de cascata em produtos de produção industrial

Indicadores	Resultados	Mantau (2015)
Cascata em resíduos industriais	1.21	1.2
Cascata em produtos reciclados	1.13	1.35
Cascata em produtos	1.34	1.55

As quantidades de biomassa florestal e os fluxos de resíduos dos setores de pasta/papel e de painéis de madeira são apresentados na Tabela 3.5. No setor do papel, considera-se que os resíduos dos processos industriais são utilizados para energia e não como material, por isso, optou-se por não calcular o fluxo $R_{p,p,m}$, pois seria zero. No entanto, substitui-se esse pelo $R_{p,p,e}$, variável descrita na Tabela 2.5, corresponde a: F78, F47, F65 e F80. Para o seu cálculo, aplica-se a Equação 7:

$$\frac{(B^{pp} + R_{p,p,e}^{pp})}{B^{pp}} \text{ (Equação 7)}$$

Os resultados para a utilização em cascata, relativa aos produtos nos setores de pasta/papel e painéis de madeira são apresentados na Tabela 3.6. O fator de cascata é mais elevado para o setor dos painéis, uma vez que utiliza quantidades elevadas de resíduos como material na produção. O setor do papel desvia os seus resíduos, industriais e de fim de vida, para utilização energética, o que leva a valores mais baixos de utilização material, o que é evidente quando se compara o valor de $R_{p,p,e}$ com $R_{f,p,m}$ (Tabela 3.5). Por outro lado, a reciclagem é mais reduzida no setor dos painéis que no do papel, visto que os painéis têm um período de vida mais longo que o papel e mais aditivos na sua composição que dificultam a sua reciclagem. O papel tem outra vantagem na reciclagem, porque há um sistema de recolha seletivo exclusivo para o produto. Em relação à Europa, os fatores de cascata são mais baixos em Portugal para o setor do papel, mas mais elevados para os painéis de madeira. No setor do papel, como já foi referido, considerou-se que tudo o que não é usado como

produto é resíduos para energia, por isso quando se calcula a utilização material de resíduos industriais, certas limitações relativas ao estudo são visíveis. Os produtos reciclados são usados mais vezes como matéria-prima na Europa (2.06) do que em Portugal (1.14), contudo o setor de pasta e papel consome mais biomassa florestal que aquela necessária para produção material, utilizando cerca de 40% do *input* de biomassa florestal à entrada para gerar energia. Como a cascata em produtos reciclados relaciona o *input* com a quantidade reciclada, o valor será sempre mais baixo porque 40% do *input* é usado para energia e não para produção material. Dos 40% encaminhados para energia, uma parte é usada para internamente para o processo material, contudo a parcela maior será eletricidade para venda para a rede nacional. Nos painéis de madeira ocorre o oposto, os resíduos do processo industriais são utilizados 3.07 vezes como matéria prima, devido à elevada quantidade de estilha e serradura utilizada na produção de painéis, que, no contexto europeu, foi apenas de 2.02. Assim, a cascata de produtos em Portugal é superior (3.78), utiliza uma porção maior de resíduos industriais e na Europa é inferior (2.38), prioriza o uso de resíduos em fim de vida como material.

Tabela 3.5. Fluxos no setor da pasta e papel em m³ e.f.

Variáveis	Fluxos de pasta e papel
B^{pp}	9705909
$R_{p,p,e}^{pp}$	6460473
$R_{f,p,m}^{pp}$	1326483
Variáveis	Fluxos de painéis
B^{pn}	812239
$R_{p,p,m}^{pn}$	2193956
$R_{f,p,m}^{pn}$	62248

Tabela 3.6. Resultados para setores de pasta e painéis de madeira

Indicadores pasta e papel	Resultados	Mantau (2015)
Cascata em resíduos industriais	1.0	1.32
Cascata em produtos reciclados	1.14	2.06
Cascata em produtos	1.14	2.38
Cascata de resíduos industriais em energia	1.67	
Indicadores painéis	Resultados	Mantau (2015)
Cascata em resíduos industriais	3.7	2.02
Cascata em produtos reciclados	1.08	1.41
Cascata em produtos	3.78	2.43

3.3. Taxa de recuperação e taxa de entrada reciclada

A taxa de recuperação (TR) de papel/cartão para o ano de 2015 foi de 54%. Este resultado significa que a quantidade de papel/cartão reciclada em Portugal correspondeu a 54% da quantidade de papel/cartão produzida nesse ano. No entanto, este valor inclui produtos em fim de vida produzidos em vários anos que se encontravam em *stock* no ano anterior. A taxa de entrada reciclada (TER) para o ano de 2015 foi de 18%, o que significa que do *input* total de fibra de 10.4 milhões de m³ e.f. (somadas dos fluxos F43 e F61) apenas 18 % corresponde a fibra recuperada e reciclada.

Da comparação destes, verifica-se que a TR é mais elevada, pois tem em consideração apenas o papel produzido em Portugal (produto) em vez da biomassa florestal necessária para a produção desse papel. Este fator é importante, pois as duas taxas são indicadores de reciclagem, que por sua vez dá importância à redução de extração e utilização de matéria-prima, no entanto a biomassa florestal só é analisada na TER. Tendo em conta que entre a entrada de recurso para a indústria e a saída do produto final há várias transformações e com essas transformações, perdas, ou seja, a TER faz a análise mais completa da indústria. Contudo, a TER é sensível ao *input* de biomassa florestal. Ao calcular a taxa (TER) não é distinguido o que é a biomassa florestal utilizada para produzir papel do que é consumido apenas com o intuito de gerar energia para venda, que é limitação principal deste estudo. Porventura, a indústria do papel está a utilizar mais biomassa do que aquela que seria estritamente necessária para produção material, uma vez que a geração de energia também contribui para o seu volume de negócios. A partir destas hipóteses, há a possibilidade do valor de *input* total de fibra estar sobrestimado, o que leva a que a TER seja mais baixa.

4. CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo quantificar de forma sistemática os fluxos e *stocks* da cadeia de biomassa florestal em Portugal, desde a sua extração até ao fim de vida dos produtos de si derivados. A análise acumula informação que é posteriormente aplicada para calcular diversos indicadores, como a extração doméstica (ED), a entrada direta de materiais (EDM), o consumo interno de materiais (CIM), o fator de cascata e as taxas de reciclagem para o setor da pasta e papel. Foi desenvolvido um modelo de análise de fluxos materiais (AFM) para o ano de referência, 2015, tendo sido considerada uma unidade de referência homogénea para todo o estudo – m^3 equivalente de fibra de madeira – de modo a que seja possível comparar os fluxos dentro do sistema com outros estudos de AFM. O modelo foi obtido a partir de dados estatísticos e inclui produções, *stocks*, importações e exportações dos produtos, que foram convertidos para a unidade de referência recorrendo a fatores de conversão. Os resultados desta análise foram apresentados na forma de diagrama, a partir do software STAN, para todo o ciclo de vida dos produtos da cadeia florestal.

Os resultados da AFM sugerem, pela análise dos indicadores ED, EDM e CIM, que a quantidade de biomassa florestal extraída em Portugal no ano de 2015 (14.9 milhões de m^3 e.f.) seria suficiente para o consumo interno (11.5 milhões de m^3 e.f.). No entanto, dado que o país exportou 10.5 milhões de m^3 e.f. de produtos derivados de biomassa florestal, foi necessário importar matéria-prima e produtos acabados (7 milhões de m^3 e.f.), para contrabalançar a procura. O consumo total de biomassa florestal em Portugal foi 17.9 milhões de m^3 e.f., sendo que aproximadamente 60% da matéria prima é utilizada para produção de produtos e 40% para energia. A rolaria é distribuída pelos vários setores industriais, sendo o maior consumidor o setor da pasta e papel (9.7 milhões de m^3 e.f.), que utiliza 60% desta para produção de pasta e os restantes 40% para geração de energia (interna e para venda para a rede nacional); seguindo-se os setores de painéis de madeira (73% de resíduos industriais e 27% de rolaria), que utilizaram 55% da matéria prima para produção material e o restante para energia, e a produção de péletes, que utilizou 2.68 m^3 e.f. de biomassa florestal (83% rolaria e 17% resíduos), 85% para produção de péletes e o restante para energia interna para o processo (incluindo possíveis perdas). Concluiu-se, também, que a quantidade de rolaria necessária em 2015 para toda a produção industrial terá sido superior

àquela que foi reportada pelas fontes de dados estatísticos. A maioria dos produtos consumidos em 2015, ficaram em *stock*, com a exceção de parte das embalagens e do papel. O *stock* com mais produtos armazenados em uso é o dos painéis. Quanto ao fim de vida dos produtos, o papel foi o produto mais reciclado, seguido das embalagens de madeira. Nos painéis e no mobiliário, carpintaria e outras obras foi favorecida a incineração como destino de produtos em fim de vida.

O estudo da eficiência do uso dos recursos foi realizado a partir do estudo do fator de cascata e de métricas de reciclagem. O fator de cascata permitiu avaliar a quantidade de vezes que um recurso é utilizado num sistema em cascata. Este foi analisado para todo o sistema e para os setores industrial, da pasta/papel e dos painéis de madeira. Concluiu-se que Portugal tem um fator de cascata total (1.68) superior à Europa (1.57). No fator de cascata total destaca-se a utilização de resíduos industriais para uso material e energético. O setor que mais contribuiu com resíduos industriais para uso material foi o da serração e para uso energético o da pasta/papel. O fator de cascata total é tendencialmente baixo, uma vez que uma parte significativa da produção é exportada e (eventualmente) reciclada noutra país, i.e., fora das fronteiras do sistema em estudo, sendo apenas contabilizado o *input* de biomassa florestal para estes produtos, mas não a sua contribuição para a reciclagem. O setor dos painéis de madeira utiliza quantidades elevadas de resíduos (estilha e serradura) para a sua produção, o que leva a que o fator de cascata seja mais elevado. O setor do papel utiliza 60% do *input* de biomassa florestal para uso material e o restante para energia. Isto leva a que a utilização material em cascata na indústria seja baixa (1.14), pois inclui a parte do *input* destinado à geração de energia. Desta forma, conclui-se que a utilização como energia é importante para o sistema e que em Portugal se prioriza a cascata de estágio único, no entanto, deveria ser utilizada a cascata de múltiplos estágios, para que a eficiência do uso de produtos aumente. O fator de cascata é um indicador muito subjetivo, que não tem regras fixas para o seu cálculo e, por isso, deveria ser uniformizado, pois torna-se difícil compará-lo com outros estudos, dado que as hipóteses consideradas não serão as mesmas.

As métricas de reciclagem foram calculadas apenas para o setor de papel/cartão. A taxa de recuperação (TR) em 2015 foi de 54%, o que significa que, o equivalente a 54% da quantidade de papel/cartão produzida nesse ano foi reciclada. Por outro lado, o cálculo da

TER revelou que, do *input* total de fibra (10.4 milhões de m³ e.f.) para o setor da pasta e papel, apenas 18% constituiu fibra recuperada e reciclada. Contudo, verifica-se que o valor de TER pode estar subestimado, pois contabiliza o *input* de biomassa florestal à entrada do setor de pasta e papel, não é diferenciando a quantidade utilizada para a produção de papel e para geração de energia para venda à rede nacional, pelo que se pode estar a contabilizar mais *input* do que aquele que foi efetivamente utilizado para a produção de papel.

Tal como na maioria dos estudos de AFM, a disponibilidade dos dados constitui a principal limitação deste estudo. Em particular, não foi possível obter as seguintes informações: quantidade de produtos derivados de biomassa florestal encaminhados para energia, quantidade de resíduos de produtos em fim de vida depositos em aterro e quantidade de resíduos de exploração florestal produzidos anualmente. As percentagens de encaminhamento de produtos em fim de vida para incineração e deposição em aterro foram assumidas neste estudo tendo em conta as quantidades recicladas e a hierarquia da gestão de resíduos sólidos. Os resíduos foram calculados a partir das necessidades de biomassa florestal para a produção de carvão vegetal e geração de eletricidade em centrais dedicadas. Ainda nos processos de energia, devido à indisponibilidade de informação, não foi possível distinguir a geração de energia para consumo interno (calor e eletricidade) e para venda de eletricidade à rede elétrica nacional, o que limitou o modelo, pois considerou-se que tudo o que não era utilizado para produção de produtos era encaminhado para energia sem distinguir o seu fim. A fração que se considerou ser encaminhada para energia inclui ainda a parcela referente às potenciais perdas dos processos industriais. A incerteza em relação aos dados disponíveis também limitou o estudo, pois a informação foi obtida a partir fontes de dados estatísticos, que, em alguns casos, não apresentavam de forma clara as unidades dos dados. Futuramente estas limitações poderiam ser contornadas, se as quantidades de resíduos incinerados e depositados em aterro (detalhando ainda o tipo de resíduos) e as percentagens de alocação entre geração de energia térmica e eletricidade estivessem documentadas nos relatórios dos respetivos setores.

As indústrias podem beneficiar dos resultados obtidos nesta AFM, de forma a entender o sistema que envolve a biomassa florestal e melhorar os seus próprios sistemas industriais através dos indicadores de utilização eficiente de recursos, nomeadamente o uso em cascata.

4.1. Trabalhos futuros

Como sugestão para investigação futura, recomenda-se aprofundar questões como a evolução temporal da utilização de biomassa florestal, a partir da construção de AFM para vários anos e comparação dos resultados. O estudo para mais do que um ano reduz a incerteza em relação aos dados que se considerem e permite verificar a evolução do consumo, produção, importações e exportações da biomassa florestal e dos seus produtos derivados. Permite ainda fazer uma projeção futura das necessidades de biomassa florestal através do consumo do recurso ao longo de vários anos.

Este estudo de AFM pode ser expandido para analisar os fluxos e o armazenamento de carbono nos setores de base florestal, bem como os efeitos do aumento da vida útil e da taxa de reciclagem dos produtos sobre armazenamento de carbono em produtos derivados de biomassa florestal. O estudo pode ainda ser alargado de modo a incluir os ciclos de rotação e disponibilidade anual da biomassa florestal, i.e. a produção de biomassa florestal, não incluída no presente estudo.

Para além do âmbito da AFM realizada nesta dissertação, poderia ser realizada uma avaliação de ciclo de vida a produtos com base em biomassa florestal apresentada neste trabalho, de modo a calcular os impactes ambientais associados a cada um dos setores analisados nesta dissertação. Esta análise seria importante para apoiar a definição de estratégias para reduzir os impactes ambientais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA) (2019), “Reciclagem de resíduos de embalagens”. Acedido em 1 de Março de 2019, em: <http://www.apambiente.pt>.
- Agricultura e Mar Comissão de. Relatório – Grupo de Trabalho da Biomassa (2013), Assembleia da República – Divisão de Edições, Lisboa, 2013. Disponível em: https://www.parlamento.pt/ArquivoDocumentacao/Documents/colecoes_relatorio-bio2013-2.pdf.
- Bais, A., Lauk, C., Kastner, T., Erb, K., (2015), Global patterns and trends of wood harvest and use between 1990 and 2010. *Ecol. Econ.* 119,326-337. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.09.011>
- Bioenergy Europe, Statistical Report, 2018 Edition
- Brunet-Navarro, P., Jochheim, H., Muys, B. (2017), The effect of increasing lifespan and recycling rate on carbon storage in wood products from theoretical model to application for the European wood sector. 1193–1205. <https://doi.org/10.1007/s11027-016-9722-z>
- Brunner, P., Rechberger, H. (2003), *Practical Handbook of Material Flow Analysis*, 1ª edição. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Cazzaniga, N.E., Jonsson, R., Palermo, D., Camia, A. (2019). Sankey diagrams of woody biomass flows in the EU-28. EC Joint Research Centre, Publications Office of the European Union, Luxembourg, <https://doi.org/10.2760/227292>
- Conselho de Ministros. (2015). Resolução do Conselho de Ministros n.º 56/2015. *Diário Da República, 1.ª série*(147), 5288–5307
- Decreto-le nº 10/2018 de 14 de fevereiro. Diário da República n.º 32/2018, Série I. Lisboa: Administração Interna
- Dias, A. C. (2005), “Avaliação do contributo do sector florestal para as alterações climáticas”. Tese de Doutoramento em Engenharia Ambiente na especialidade de Ciências Aplicadas ao Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro.
- EPA. (2018). EPA’s treatment of biogenic carbon dioxide (CO₂) emissions from stationary sources that use forest biomass for energy production. U.S. Environmental Protection Agency. Office of Atmospheric Programs. Climate Change Division., abril, 6. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-04/documents/biomass_policy_statement_2018_04_23.pdf
- Essel, R., Breitmayer, E., Carus, M., Fehrenbach, H., von Geibler, D. J., Biengen, K., Baur, P. F. (2014). Discussion paper - Defining cascading use of biomass. *Internal Medicine Journal*, 38(4), 259–264. <https://doi.org/10.1111/j.1445-5994.2007.01480>.
- Eurostat. (2001). *Economy-wide material flow accounts and derived indicators*. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg.
- Ewijk, S., Stegemann, J. A., & Ekins, P. (2018). Global life cycle paper flows, recycling metrics, and material efficiency. *Journal of Industrial Ecology*, 22(4), 686–693. <https://doi.org/10.1111/jiec.12613>
- FAO. (2019). FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations)—

- Forestry production and trade. Acedido a 5 Julho 2019 em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>.
- Fehrenbach, H., Köppen, S., Kauertz, B., Detzel, A., Wellenreuther, F., Breitmayer, E., Ferreira, S., Monteiro, E., Brito, P., & Vilarinho, C. (2017). Biomass resources in Portugal: Current status and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78(May), 1221–1235. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.140>
- Hashimoto, S., Moriguchi, Y., Saito, A., Ono, T. (2004) Six indicators of material cycles for describing society's metabolism: application to wood resources in Japan. *Resources, Conservation and Recycling* 40(2004) 201-223 [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00101-0)
- INEGI. (2019), Energias endógenas de Portugal. 0921-3449,
- Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas – ICNF (2017a), "Síntese-económica-2017".
- Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas – ICNF (2017b). Perfil Florestal Portugal. 1–4. Disponível em: http://www2.icnf.pt/portal/icnf/noticias/resource/press/2017-03-21-anx_floresta.pdf
- Instituto Nacional de Estatística (INE) (2019), “Contribuição das energias renováveis no consumo de energia final”. Acedido em 18 de Julho de 2019, em: <http://www.ine.pt>.
- Instituto Nacional de Estatística (INE) (2019), “Produção Industrial de madeira(2007-1990)”. Acedido em 30 de Maio de 2019, em: <http://www.ine.pt>.
- Instituto Nacional de Estatística (INE) (2019), “Produção Industrial de madeira(2015-2007)”. Acedido em 30 de Maio de 2019, em: <http://www.ine.pt>.
- Kayo, C., Dente, S., Aoki-Suzuki, C., Tanaka, D., Murakami, S., Hashimoto, S. (2018), Environmental Impact Assessment of Wood Use in Japan through 2050 Using Material Flow Analysis and Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 00(0). <https://doi.org/10.1111/jiec.12766>
- Lenglet, J., Courtonne, J., Caurla, S. (2017), Material flow analysis of the forest-wood supply chain: A consequential approach for log export policies in France. *Journal of Cleaner Production*, 165, 1296–1305. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.177>
- Mantau, U. (2012), Wood flows in Europe (Eu27), Tech. rep., Project report. Celle 2012. 24pp.
- Mantau, U. (2015), Wood flow analysis: Quantification of resource potentials, cascades and carbon effects. *Biomass and Bioenergy*, 79, 28–38. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.08.013>
- Marques, A. (2015), "Utilização Energética da Biomassa em Portugal Caso de estudo da Tratolixo" Tese de Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Mehr, J., Vadenbo, C., Steubing, B., Hellweg, S. (2018). Environmentally optimal wood use in Switzerland—Investigating the relevance of material cascades. *Resources, Conservation and Recycling*, 131, 181 – 191. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.026>
- OECD. (2008). Measuring material flows and resource productivity- Synthesis Report. OECD. Tech. rep. <http://www.oecd.org/env/indicators-modelling-outlooks/MFA-Synthesis.pdf>
- Parobek, J., Palus, H., Kaputa, V., Supin, M., (2014). Analysis of Wood Flows in Slovakia. *BioResources* 9(4), 6453–6462. <https://doi.org/10.15376/biores.9.4.6453-6462>
- Pivnenko, K., Laner, D., Astrup, T., (2016) Material cycles and chemicals: dynamic material

- flow analysis of contaminants in paper recycling- Supporting information, <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b01791>
- Quinteiro, P., Tarelho, L., Marques, P., Martín-Gamboa, M., Freire, F., Arroja, L., Dias, C. (2019), Life cycle assessment of wood pellets and wood split logs for residential heating. *Science of the Total Environment* 689 (2019), 580–589. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.420>
- Ramani, K., Ramanujan, D., Bernstein, W., Zhao, F., Sutherland, J., Handwerker, C., Choi, J., Kim, H., Thurston, D. (2010). Integrated sustainable life cycle design: A Review. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 132(9), 0910041–09100415. <https://doi.org/10.1115/1.4002308>
- Sonae Arouco, S.A. (2016). Environmental product declaration- Particleboard, MDF.
- UNECE, FAO (2009), Forest product conversion factors: project overview and status, 1–12. Disponível em: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/meetings/forest-products-conversion-factors.pdf>.
- Van Eygen, E., Feketitsch, J., Laner, D., Rechberger, H. & Fellner, J. (2016), Comprehensive analysis and quantification of national plastic flows: The case of Austria. *Resources, Conservation and Recycling*, 109: 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.10.017>.
- Weimar, H. (2011). Methode und Ergebnis der Modellierung des Stoffflusses von Holz. Johan Heinrich von Thunen e Institut für Forst- und Holzwirtschaft. Arbeitsbericht.

APÊNDICE A

Tabela A. 1. Fluxos e descrição

Fluxos	Descrição
F1	Rolaria para o setor da serração
F2	Madeira serrada para produção de embalagens
F3	Madeira serrada para produção de mobiliário
F4	Madeira serrada para produção de carpintaria
F5	Rolaria para produção de madeira serrada
F6	Resíduos da produção de madeira serrada
F7	Madeira serrada para produção de outras obras de madeira
F8	Resíduos da produção de embalagens
F9	Embalagens
F10	Mobiliário
F11	Resíduos da produção de mobiliário
F12	Carpintaria
F13	Resíduos da produção de carpintaria
F14	Outras obras de madeira
F15	Resíduos da produção de outras obras de madeira
F16	Embalagens em fim de vida para incineração
F17	Mobiliário em fim de vida para incineração
F18	Carpintaria em fim de vida para incineração
F19	Outras obras de madeira em fim de vida para incineração
F20	Embalagens em fim de vida para deposição em aterro
F21	Mobiliário em fim de vida para deposição em aterro
F22	Carpintaria em fim de vida para deposição em aterro
F23	Outras obras de madeira em fim de vida para deposição em aterro
F24	Embalagens em fim de vida para estilha e serradura (reciclagem)
F25	Mobiliário em fim de vida para estilha e serradura (reciclagem)
F26	Carpintaria em fim de vida para estilha e serradura (reciclagem)
F27	Outras obras de madeira em fim de vida para estilha e serradura (reciclagem)
F28	Importações de embalagens, mobiliário, carpintaria e outras obras
F29	Exportações de embalagens, mobiliário, carpintaria e outras obras
F30	Biomassa para energia – incineração
F31	Estilha e serradura para produção de painéis de madeira
F32	Exportações de estilha e serradura
F33	Importações de estilha e serradura
F34	Exportações de madeira serrada
F35	Importações de madeira serrada
F36	Rolaria para o setor de produção de painéis de madeira
F37	Painéis de madeira
F38	Importações de painéis de madeira

Fluxos	Descrição
F39	Exportações de painéis de madeira
F40	Painéis em fim de vida para produção de novos painéis (reciclagem)
F41	Painéis em fim de vida para incineração
F42	Rolaria para lenha
F43	Rolaria para produção de pasta de papel
F44	Pasta de papel
F45	Exportações de pasta de papel
F46	Importações de pasta de papel
F47	Resíduos industriais de produção de pasta de papel para cogeração
F48	Resíduos industriais de produção de painéis de madeira para cogeração
F49	Pasta para produção de papel/cartão
F50	Papel/cartão
F51	Importações de papel/cartão
F52	Exportações de papel/cartão
F53	Papel/cartão em fim de vida para deposição em aterro ou outros destinos
F54	Papel/cartão em fim de vida para incineração
F55	Papel/cartão recuperado (reciclagem)
F56	Exportações de papel/cartão recuperado
F57	Importações de papel/cartão recuperado
F58	Papel/cartão recuperado para recuperação de pasta
F59	Importações de pasta recuperada
F60	Exportações de pasta recuperada
F61	Pasta recuperada (reciclagem)
F62	Biomassa para energia por cogeração
F63	Biomassa para energia a partir de lenha
F64	Resíduos resultantes da exploração florestal para produção de carvão vegetal
F65	Perdas do processo e biomassa para energia interna para produção de papel
F66	Biomassa para energia a partir de carvão vegetal
F67	Biomassa para energia em centrais dedicadas
F68	Rolaria para produção de péletes
F69	Estilha e serradura para produção de péletes
F70	Resíduos resultantes da exploração florestal para centrais dedicadas
F71	Biomassa para energia a partir de péletes
F72	Exportações de péletes
F73	Importações de péletes
F74	Exportações de carvão vegetal
F75	Importações de carvão vegetal
F76	Importações de lenha
F77	Exportações de lenha
F78	Perdas do processo e biomassa para energia interna para produção de pasta recuperada
F79	Rolaria para outros fins
F80	Resíduos de casca da indústria de pasta de papel para energia
F81	Resíduos da indústria de pasta de papel para outros fins

Fluxos	Descrição
F82	Resíduos de casca da indústria de serração para energia

APÊNDICE B

Na Tabela B.1 são apresentados os dados originais dos consumos, importações e exportações de rolaria e madeira serrada em Portugal obtidos de ICNF (2017a) e FAO (2019). Os valores originais em m³ que têm um fator de conversão de 1 m³ de produto equivale a 1 m³.e.f (Lenglet *et al.*, 2017). Aos fluxos de rolaria foi acrescentada a casca, ao aplicar um fator de 1/0.88 (UNECE, 2009) à quantidade de rolaria.

Tabela B. 1. Informação em relação aos dados e fatores de conversão do estudo (rolaria e madeira serrada)

Fluxos	Valores originais (m ³)	Valores finais com casca
Rolaria		
Total extraído em PT	11533376 ^a	13106109 m ³ e.f.
Importações rolaria	2013561 ^b	2288138 m ³ e.f.
Exportações rolaria	318345 ^b	361756 m ³ e.f.
F1	2073225 ^a	2355938 m ³ e.f.
F43	8541200 ^a	9705909 m ³ e.f.
F79	318951 ^a	362444 m ³ e.f.
F36		812239 m ³ e.f. ^c
Rolaria para lenha		
F42	600000 ^a	681818 m ³ e.f.
F76	7103 ^b	8072 m ³ e.f.
F77	5492 ^b	6241 m ³ e.f.
Madeira serrada		
F5	1134255 ^a	1134255 m ³ e.f.
F35	167 007 ^b	167 007 m ³ e.f.
F36	352 453 ^b	352 453 m ³ e.f.

^aICNF (2017a); ^bFAO (2019);

^c valor obtido pela soma da: quantidade de biomassa florestal necessária para a produção de painéis contraplacados, 30% da quantidade de biomassa florestal necessária para a produção de painéis de fibra (alocação:30% biomassa virgem;70% estilha e serradura) e 10% da quantidade de biomassa florestal necessária para a produção de painéis de partículas (alocação:10% biomassa virgem;90% estilha e serradura).

Na Tabela B.2 são apresentados os dados dos consumos, importações e exportações de produtos finais, bem como a forma como foram convertidos e as suas fontes. Aos fluxos dos produtos finais, não é necessário adicionar a casca. Os fatores de conversão da Tabela B.2, representam a quantidade de metros cúbicos equivalentes de fibra de madeira (m^3 e.f.) contidos na unidade original de produto, foram obtidos de Lenglet *et al.* (2017) e Weimar (2011).

Tabela B. 2. Informação em relação aos dados e fatores de conversão do estudo (produtos finais)

Fluxos	Valor original (u.o)	Fator de conversão	Valores finais
Pasta de papel			
F44	2660900 t ^b	2.18 (m^3 e.f./u.o) ^c	5800762 (m^3 e.f.)
F46	124960 t ^b	2.18 (m^3 e.f./u.o) ^c	272412 (m^3 e.f.)
F45	1189833 t ^b	2.18 (m^3 e.f./u.o) ^c	2593837 (m^3 e.f.)
Papel/cartão			
F50	2220200 t ^b	1.54 (m^3 e.f./u.o) ^c	3419108 (m^3 e.f.)
F51	1073688 t ^b	1.54 (m^3 e.f./u.o) ^c	1653479 (m^3 e.f.)
F52	2097306 t ^b	1.54 (m^3 e.f./u.o) ^c	3229851 (m^3 e.f.)
Papel recuperado			
F55	1202000 t ^b	1.54 (m^3 e.f./u.o) ^c	1851080 (m^3 e.f.)
F57	19054 t ^b	1.54 (m^3 e.f./u.o) ^c	29343 (m^3 e.f.)
F56	359701 t ^b	1.54 (m^3 e.f./u.o) ^c	553939 (m^3 e.f.)
Pasta recuperada			
F61	314600 t ^b	2.18 (m^3 e.f./u.o) ^c	685828 (m^3 e.f.)
F59	1924 t ^b	2.18 (m^3 e.f./u.o) ^c	4194 (m^3 e.f.)
F60	133 t ^b	2.18 (m^3 e.f./u.o) ^c	289 (m^3 e.f.)
Painéis de madeira contraplacados			
Quantidade de biomassa florestal necessária para a produção de 1 m^3 de painéis de fibra: 2.47 m^3 de biomassa florestal/1 m^3 de painéis ^a			
F37	79518 m^3 ^b	0.96 (m^3 e.f./u.o) ^c	76337 (m^3 e.f.)
F38	79061 m^3 ^b	0.96 (m^3 e.f./u.o) ^c	75899 (m^3 e.f.)
F39	57348 m^3 ^b	0.96 (m^3 e.f./u.o) ^c	55054 (m^3 e.f.)

Fluxos	Valor original (u.o)	Fator de conversão	Valores finais
Painéis de fibras de madeira			
Quantidade de biomassa florestal necessária para a produção de 1 m ³ de painéis de fibra: 2.5 m ³ de biomassa florestal/1 m ³ de painéis ^a			
F37	494259 m ^{3b}	1.43 (m ³ e.f./u.o) ^c	706790 (m ³ e.f.)
F38	234806 m ^{3b}	1.43 (m ³ e.f./u.o) ^c	335773 (m ³ e.f.)
F39	418928 m ^{3b}	1.43(m ³ e.f./u.o) ^c	599067 (m ³ e.f.)
Painéis de partículas			
Quantidade de biomassa florestal necessária para a produção de 1 m ³ de painéis de partículas: 2 m ³ de biomassa florestal/1 m ³ de painéis ^a			
F37	738335 m ^{3b}	1.25 (m ³ e.f./u.o) ^c	922919 (m ³ e.f.)
F38	201092 m ^{3b}	1.25 (m ³ e.f./u.o) ^c	251365 (m ³ e.f.)
F39	458349 m ^{3b}	1.25 (m ³ e.f./u.o) ^c	572936 (m ³ e.f.)
Estilha e serradura			
F6	938970 m ^{3b}	n.a.	938970 (m ³ e.f.)
F31	n.a.	n.a.	2193956 (m ³ e.f.)
F33	1389000 m ^{3b}	n.a.	1389000 (m ³ e.f.)
F32	52640 m ^{3b}	n.a.	52640 (m ³ e.f.)
F69	n.a.	n.a.	468940 (m ³ e.f.)
Mobiliário			
F3	n.a.	B.2	495760 (m ³ e.f.)
F10	206415 t ^(A.1)	d=461 kg/m ^{3e}	447755 (m ³ e.f.)
F28	93035 t ^(A.1)	d=461 kg/m ^{3e}	201811 (m ³ e.f.)
F29	219069 t ^(A.1)	d=461 kg/m ^{3e}	475205 (m ³ e.f.)
Embalagens			
F2	n.a.	B.2	190337 (m ³ e.f.)
F9	156278 t ^(B.1)	1.1 (m ³ e.f./u.o) ^c	171906 (m ³ e.f.)
F28	30739 t ^(B.1)	1.1 (m ³ e.f./u.o) ^c	33813 (m ³ e.f.)
F29	86213 t ^(B.1)	1.1 (m ³ e.f./u.o) ^c	94834 (m ³ e.f.)
Carpintaria			
F4	n.a.	B.2	201466 (m ³ e.f.)

Fluxos	Valor original (u.o)	Fator de conversão	Valores finais
F12	83883 t ^(B.1)	d=461 kg/m ³ ^e	181958 (m ³ e.f.)
F28	40596 t ^(B.1)	d=461 kg/m ³ ^e	88061 (m ³ e.f.)
F29	77700 t ^(B.1)	d=461 kg/m ³ ^e	168546 (m ³ e.f.)
Outras obras de madeira			
F7	n.a.	B.2	61246 (m ³ e.f.)
F14	25500 t ^(B.1)	d=461 kg/m ³ ^e	55315 (m ³ e.f.)
F28	23890 t ^(B.1)	d=461 kg/m ³ ^e	51823 (m ³ e.f.)
F29	12250 t ^(B.1)	d=461 kg/m ³ ^e	26573 (m ³ e.f.)
Péletes			
F68+F69	1034000 t ^b	1.2 t biomassa/t produto ^f	1240800 t
F68+F69	1240800 t	461 kg/m ³ ^e	2691540 (m ³ e.f.)
Péletes produzidas	1034000 t ^b	2.22 (m ³ e.f./u.o) ^d	2295480 (m ³ e.f.)
F73	69213 t ^b	2.22 (m ³ e.f./u.o) ^d	153652 (m ³ e.f.)
F72	690443 t ^b	2.22 (m ³ e.f./u.o) ^d	1532783 (m ³ e.f.)
Carvão vegetal			
F64	8770 t ^b	5.96 m ³ /t ^e	52269 (m ³)
F64	52269 (m ³)	1.1 (m ³ e.f./u.o) ^c	57496 (m ³ e.f.)
Carvão vegetal produzido	8770 t ^b	1.65 (m ³ e.f./u.o) ^d	14471 (m ³ e.f.)
F75	35417 t ^b	1.65 (m ³ e.f./u.o) ^d	58439 (m ³ e.f.)
F74	9040 t ^b	1.65 (m ³ e.f./u.o) ^d	14915 (m ³ e.f.)

Nota: m³e.f./u.o corresponde aos m³ equivalentes de fibra de madeira contidos na unidade original de produto

^aICNF (2017a); ^bFAO (2019); ^cLenglet *et al.* (2017); ^dWeimar (2011); ^e(UNECE, 2009); ^f(Quinteiro *et al.*, 2019)

Apêndice B.1

As produções, importações e exportações de mobiliário, carpintaria, embalagens e outras obras não estavam disponíveis nas bases de dados de onde foram retirados os restantes dados, pelo que foi utilizado o Instituto Nacional de Estatística (INE, 2019) como fonte para esta cadeia de produtos. Os dados do INE (2019) são apresentados em quilograma (kg) de

produto ou número de unidades produzidas, pelo que, no último caso, foram assumidos os fatores de conversão apresentados na Tabela B.3 para convertê-los em kg. Os valores apresentados na Tabela B.3 foram obtidos a partir do valor médio de massa por unidade de cada tipo de produto indicado no mercado de venda dos mesmos.

Tabela B. 3. Dados originais e fatores de conversão de unidades para mobiliário, embalagens, carpintaria e outras

Produtos	Dados originais	Fator de conversão (kg/ unidade)
Mobiliário		
Móveis de madeira, em quartos de dormir	2050195 unidades	35
Móveis de madeira, em salas de jantar e de estar	1127941 unidades	30
Móveis de madeira	5040996 unidades	20
Embalagens de madeira		
Paletes, aros de paletes	9607633 unidades	15
Caixotes, caixas, engradados, barricas e embalagens semelhantes	12163602 kg	
Carpintaria		
Janelas, janelas de sacada e caixilhos e alizares de madeira	40430 unidades	20
Portas e respetivos caixilhos, alizares e soleiras de madeira	2166010 unidades	10
Cofragem para betão, fasquias para telhados e ripas	14759117 kg	
Outras obras de carpintaria para construções	46654835 kg	
Outras obras de madeira		
Ferramentas, armações, formas e esticadores para calçado	5818291 kg	
Molduras de madeira, fotografias, espelhos ou semelhantes ^a	4920501 m	4

^a Considerando o perímetro da moldura=0.24*2+0.34*2

Apêndice B.2

Para converter os dados da Tabela B.3 (em kg) para a unidade de referência do estudo assumiu-se que a densidade do mobiliário, carpintaria e outras obras é igual à da madeira seca (densidade=461 kg/m³ (UNECE, 2009)) e que o produto final contém 100% de fibra de madeira, uma vez que se considerou que o material não sofre alterações significativas no processo de produção. A partir do valor total (soma das produções de mobiliário,

embalagens, carpintaria e outras obras) indicadas na Tabela B.2, foi calculada a percentagem volúmica de cada produto (Tabela B.4).

Tabela B. 4. Resultados dos balanços de volume

Produtos	Resultados dos balanços de volume	Resultado (%)
Mobiliário de madeira	447755 (m ³ e.f.)	52
Embalagens de madeira	171906 (m ³ e.f.)	20
Carpintaria para construção	181958 (m ³ e.f.)	21
Outras obras de madeira	55315 (m ³ e.f.)	6
Total	856934 (m ³ e.f.)	100

Para distribuir a madeira serrada pelos fluxos de produção de embalagens, mobiliário, carpintaria e outras obras (F2, F3, F4 e F7), foi obtida a quantidade de madeira serrada disponível, através da sua produção, importação e exportação (F5, F35 e F34), que é apresentada na Tabela B.5. À quantidade de madeira serrada disponível (948809 m³ e.f.) foram multiplicadas as percentagens da Tabela B.4 obtendo assim F2, F3, F4 e F7, apresentados na Tabela B.2.

Tabela B. 5. Dados do processo da madeira serrada

Madeira serrada	
F5	1134255 (m ³ e.f.)
F35	167 007 (m ³ e.f.)
F34	352 453 (m ³ e.f.)
Quantidade disponível	948809 (m ³ e.f.)

APÊNDICE C

A Tabela C.1 apresenta as potências instaladas (INEGI, 2019) e os respectivos consumos de biomassa florestal em centrais de cogeração e dedicadas (termoelétricas), apresentados previamente por Marques (2015) e Grupo de trabalho da biomassa (2013), para o ano de 2015 em Portugal. Dado que existe informação detalhada para cada central (com exceções) foi apenas necessário converter os valores originais (t/ano) para a unidade de referência deste estudo. Os valores a sombreado na Tabela C.1, não se encontram disponíveis, por isso, foram estimados a partir do rácio de cada consumo (das centrais de cogeração) pela respetiva potencia instalada, obtendo o consumo de cada central por 1 megawatt. De seguida foi feita a média do consumo unitário das centrais de cogeração. A esse consumo médio foi multiplicada a potência instalada das cinco centrais de cogeração, com consumos desconhecidos.

Tabela C. 1. Consumos de biomassa florestal em centrais em Portugal (Marques, 2015); (Grupo de trabalho da biomassa, 2013)

Encaminhamento para geração de energia em centrais	Potência instalada (MW)	Consumo (t/ano)
Cogeração Amorim	1.1	4029
Cogeração Cacia	35.1	110370
Cogeração Celtejo	30	109892
Cogeração Celbi	70	256415
Cogeração Figueira da Foz (Lavos)	95	219960
Cogeração Caima	9	54600
Cogeração Viana	38.8	142127
Cogeração SONAE indústria (SIAF)	4	14652
Cogeração de Setúbal	53.9	168480
Total em centrais dedicadas		2343873
Termoelétrica de Cacia	12.5	146000
Termoelétrica Terras de Sta. Maria	10	121500
Termoelétrica Centroliva	6	60748
Termoelétrica da PALSER	3	36500
Termoelétrica de Belmonte	2	24300
Termoelétrica de Rodão	13	140000
Termoelétrica Figueira da Foz	34.3	400000
Termoelétrica de Constância	13.7	140000
Termoelétrica de Setúbal	12.5	146000
Termoelétrica de Mortágua	9	115000
Total em centrais dedicadas		1330048

Para converter os consumos de biomassa florestal nas centrais de t para m³, foi utilizada a densidade da madeira seca (densidade=461 kg/m³) (UNECE, 2009). Como as centrais dedicadas e de cogeração recebem resíduos de madeira foi utilizado o fator de conversão correspondente a este resíduo: 1.1 m³ e.f por m³ de resíduo (Tabela C.2). É ainda apresentada a quantidade consumida de biomassa florestal pelo processo de cogeração no setor da passa e papel, obtido através da soma dos consumos das centrais de cogeração deste setor.

Tabela C. 2. Consumos finais de biomassa florestal em centrais de cogeração e dedicadas

Tipo de centrais	Input de biomassa florestal (m3 e.f.)
Cogeração	2578260
Cogeração – indústria do papel	2533683
Dedicadas	3173650