UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E CONTABILIDADE DE RIBEIRÃO PRETO
DEPARTAMENTO DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO DE ORGANIZAÇÕES

FERNANDO DE ALMEIDA CALDAS

Análise da utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos

ORIENTADORA: PROFa. DRa. SONIA VALLE WALTER BORGES DE OLIVEIRA

RIBEIRÃO PRETO
2019

Prof. Dr. Vahan Agopyan
Reitor da Universidade de São Paulo

Prof. Dr. André Lucirton Costa
Diretor da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto

Prof. Dr. Jorge Henrique Caldeira de Oliveira
Chefe do Departamento de Administração

Prof. Dr. João Luiz Passador
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações

FERNANDO DE ALMEIDA CALDAS

Análise da utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências.

ORIENTADORA: PROFA. DRA. SONIA VALLE WALTER BORGES DE OLIVEIRA

RIBEIRÃO PRETO

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Caldas, Fernando de Almeida
Análise da utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos. Ribeirão Preto, 2019.
50 p. : il. ; 30 cm

Dissertação de Mestrado, apresentada à Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto/USP. Área de concentração: Administração.
Orientadora: Oliveira, Sonia Valle Walter Borges de.

1. Pirólise. 2. Resíduos sólidos. 3. Energia.

Nome: CALDAS, Fernando de Almeida.

Título: Análise da utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração de Organizações da Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____
Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____
Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____
Instituição: _____

Julgamento: _____

A meus pais, Antonieto (*in memoriam*) e Moema

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Profa. Dra. Sonia Valle Walter Borges de Oliveira pelo apoio, orientação e ensinamentos, que viabilizaram esta dissertação de mestrado.

À Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto e Escola de Engenharia de São Carlos, por fornecer recursos, profissionais de apoio às atividades acadêmicas competentes e docentes qualificados, atualizados e que transmitiram o conhecimento científico com grau de excelência, sendo também fontes de inspiração.

Aos docentes que compuseram a banca do meu Exame de Qualificação, pelas correções, ideias e informações úteis.

Aos catadores e gestores da Cooperativa Acácia de Araraquara, pelos ensinamentos importantíssimos, impossíveis de serem assimilados na literatura científica, agradecimento este extensivo ao Departamento de Água e Esgoto de Araraquara, responsável coordenação das atividades desta cooperativa.

À minha mãe, Moema, pelo apoio fundamental nesta fase da minha vida.

A Rafael Teubner da Silva Monteiro, que contribuiu decisivamente para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

CALDAS, Fernando de Almeida. **Análise da utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos**. 2019. 50 f. Dissertação (Mestrado em Administração de Organizações) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, 2019.

A pirólise de biomassa é um dos métodos mais promissores para tratamento de diferentes tipos de resíduos. Esta dissertação de mestrado tem como objetivo analisar sua utilização para geração de energia por meio de resíduos sólidos urbanos. Tem como base a Lei 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Inclui o potencial de geração de energia de resíduos, diferentes modos de pirólise e possíveis produtos, aplicações e suas vantagens e desvantagens, histórico desta tecnologia, princípio de funcionamento de um reator de pirólise, noções sobre geradores elétricos para não-especialistas, a dificuldade em conceituar biomassa, termos técnicos como bio-óleo, *syngas*, *biochar* (biocarvão), a importância das biorrefinarias, perspectivas futuras da pirólise de biomassa, aspectos relacionados sobre negócios, a importância das cooperativas de catadores na separação dos resíduos. Discute condições para introdução e disseminação desta tecnologia no Brasil.

Palavras-chave: Pirólise. Resíduo sólido urbano. Energia.

ABSTRACT

CALDAS, Fernando de Almeida. **Viability of pyrolysis plants for electrical power production from municipal waste in the State of Sao Paulo, Brazil**. 2019. 50 p. Dissertation (Masters Degree in Administration of Organizations) - Faculty of Economics, Administration and Accounting of Ribeirão Preto, University of São Paulo, Ribeirão Preto, São Paulo, 2019.

Biomass pyrolysis is one of the most promising methods for treating different types of waste. This master's thesis aims to analyze its use for power generation through urban solid waste. It is based on Brazilian Federal Law 12.305 / 2010, which established the National Policy on Solid Waste. It includes the potential of waste energy generation, different pyrolysis modes and possible products, applications and their advantages and disadvantages, history of this technology, principle of operation of a pyrolysis reactor, notions about electric generators for non-specialists, the difficulty in conceptualizing biomass, technical terms such as bio-oil, syngas, biochar, the importance of biorefineries, future perspectives of biomass pyrolysis, related business aspects, the importance of waste picker cooperatives in waste separation. Discusses conditions for introduction and dissemination of this technology in Brazil.

Keywords: Pyrolysis. Municipal solid waste. Energy.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 13
1.1 Objetivo da pesquisa 13
1.2 Pergunta da pesquisa 13
1.3 Justificativa 14
2 METODOLOGIA 15
2.1 Classificação da pesquisa 15
2.2 Objeto do estudo 15
2.3 Forma de coleta de dados 15
2.4 Sistemática da consulta às bases de dados da literatura científica 16
2.5 Limitações da pesquisa 16
2.6 Resumo do método 17
3 REFERENCIAL TEÓRICO 19
3.1 Resíduos sólidos urbanos: Legislação 19
3.1.1 Evolução da legislação ambiental no Brasil 19
3.1.2 A Lei Federal 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos 19
3.2 O potencial de geração de energia por meio de resíduos 20
3.3 Tecnologias de aproveitamento de resíduos: combustíveis e outros tipos de produtos que podem ser obtidos 22
3.4 Pirólise 23
3.4.1 Definição 23
3.4.2 Pirólise na história da humanidade 24
3.4.3 Pirólise em décadas recentes 25
3.4.4 A classificação dos métodos de pirólise pela perspectiva da aplicação 26
3.4.5 O que é biomassa? 27
3.4.6 Conceitos técnicos básicos sobre a pirólise de biomassa 29
3.4.7 Biorrefinarias 35
3.4.8 Noções sobre geradores de energia elétrica para não-especialistas 36
3.4.9 Produtos e aplicações da pirólise de resíduos 38
3.5 Algumas perspectivas futuras de aplicações de produtos obtidos por pirólise de biomassa 40
3.5.1 Biocombustível para turbinas a gás na geração de energia elétrica 40
3.5.2 Adição de bio-óleos refinados ao óleo diesel 40

3.5.3 O potencial do biocarvão para geração de calor e na agricultura 41
3.6 Usinas de pirólise de biomassa: aspectos da área de negócios 41
4 DISCUSSÕES 43
4.1 A ênfase em pirólise de madeira observada na literatura científica 43
4.2 Lacunas nas pesquisas técnicas sobre pirólise de biomassa 43
4.3 Afirmações de pesquisadores sobre o futuro da pirólise de biomassa 44
4.4 Resíduos sólidos urbanos e pirólise 44
4.5 Resposta para a pergunta da pesquisa 46
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 49

1 INTRODUÇÃO

A relação entre desenvolvimento econômico e danos ao meio ambiente já é objeto de atenção mundial há várias décadas. O tema foi considerado de importância mundial pela Organização das Nações Unidas (ONU). Desde 1972, conferências específicas e relatórios alertando para a gravidade destes danos têm sido realizados (Organização das Nações Unidas, 2017). A conferência de 1987 estabeleceu o conceito de desenvolvimento sustentável publicado em um texto que ficou conhecido como Relatório Brundtland (*Brundtland Report*):

> The World Commission on Environment and Development was created as a consequence of General Assembly resolution 38/161 adopted at the 38th Session of the United Nations in the fall of 1983. That resolution called upon the Secretary-General to appoint the **Chairman** and Vice-Chairman of the Commission and in turn directed them to jointly appoint the remaining members. at least half of whom were to be selected from the developing world. **The Secretary General appointed Mrs. Gro Harlem Brundtland** of Norway....(Organização das Nações Unidas, 2019) [grifos nossos]

O conceito de desenvolvimento sustentável é definido no Relatório Brundtland (Organização das Nações Unidas, 2019):

> **Sustainable development** is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs. It contains within it two key concepts:
>
> * the concept of '**needs**', in particular the essential needs of the world's poor, to which overriding priority should be given; and
>
> * the idea of **limitations** imposed by the state of technology and social organization on the environment's ability to meet present and future needs. (Organização das Nações Unidas, 2019) [grifos nossos]

Este trabalho situa-se entre os termos grifados, ou seja, desenvolvimento sustentável (*sustainable development*), necessidades (*needs*) e limitações (*limitations*) com relação principalmente ao provimento de energia na forma de eletricidade.

1.1 Objetivo da pesquisa

O objetivo da presente pesquisa foi analisar a utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos.

1.2 Pergunta da pesquisa

Como as usinas de pirólise podem ser utilizadas para a geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos?

1.3 Justificativa

As atuais tecnologias disseminadas no tratamento de resíduos sólidos urbanos ainda não são suficientes para atender à demanda, como alerta (Jeevahan et al., 2019):

> **Waste is a global issue**. Waste, if not handled properly, leads to public health problems and environmental pollution. **In the twenty-first century, waste management has become a basic human need**. Solid waste management and sanitation **are regarded now equally important** along with potable water, food, shelter, energy, transport and communications. **However, less importance is often given for waste management as compared to other utility services** (United Nations Environment Programme 2015). It is estimated that the total global municipal solid waste (MSW) is about 2 billion tonnes per year. (Jeevahan et al., 2019) [grifos nossos]

Desta forma, foi considerado relevante desenvolver este trabalho visando a análise da aplicação de uma tecnologia termoquímica capaz de gerar eletricidade e que, adicionalmente, também possibilita obter diversos produtos comercializáveis utilizando resíduos: a pirólise de biomassa. Transformar biomassa de resíduo em biocombustíveis e outros produtos contribui para promover desenvolvimento sustentável e reduz a deposição de rejeitos em aterros sanitários.

2 METODOLOGIA

2.1 Classificação da pesquisa

O Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) classifica as pesquisas em oito grandes áreas: 1. Ciências Exatas e da Terra; 2. Ciências Biológicas; 3. Engenharias; 4. Ciências da Saúde; 5. Ciências Agrárias; 6. Ciências Sociais Aplicadas; 7. Ciências Humanas; 8. Linguística, Letras e Artes e 9. Outros (BRASIL, 2019).

Este projeto de pesquisa posiciona-se como: Ciências Sociais Aplicadas / Administração. Este detalhamento é importante para justificar que a coleta de dados técnicos sobre o processo de pirólise de biomassa será delimitada aos aspectos de interesse da área de Administração.

A classificação da pesquisa é detalhada no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação da pesquisa

CRITÉRIO	CLASSIFICAÇÃO
Finalidade	Pesquisa aplicada
Objetivos gerais	Pesquisa exploratória
Natureza dos dados	Qualitativa
Obtenção de dados	Pesquisa bibliográfica, documental e visita técnica

Fonte: elaborado pelo autor, com base em Gil (2017).

2.2 Objeto do estudo

Trata-se da utilização de usinas de pirólise de biomassa no tratamento de resíduos sólidos urbanos, sob a perspectiva da Lei n° 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

2.3 Forma de coleta de dados

A coleta de dados foi realizada por 1) pesquisa bibliográfica nas bases de dados científicas *Scopus, Web of Science e ScienceDirect*; a base Google Acadêmico também foi utilizada para identificar artigos científicos para posterior obtenção dos textos em formato *Portable Document Format*[1] (PDF) nas três bases citadas; 2) pesquisa bibliográfica por consulta a relatórios, estudos e pesquisas publicados por organizações governamentais e do setor privado; 3) visita técnica buscando

[1] Formato de arquivo eletrônico desenvolvido pela empresa Adobe (www.adobe.com)

informações diretas de especialistas, especificamente uma cooperativa de reciclagem de resíduos sólidos urbanos, a Cooperativa Acácia de Araraquara.

2.4 Sistemática da consulta às bases de dados da literatura científica

Nas bases já citadas na seção 2.3 , as principais expressões e palavras-chave (*keywords*), exatamente como inseridas nos campos de pesquisa das bases de dados, incluindo as aspas, referentes ao procedimento de pirólise, são: *pyrolysis*; "*history*" AND "*pyrolysis*"; "*pyrolysis*" AND "**reactor**"; "*pyrolysis*" AND "*application**"; "*pyrolysis*" AND "*use**"; "*pyrolysis*" and "*kinetics*"; "*pyrolysis*" AND "*product**"; "*pyrolysis*" AND "by**product**"; "**fast * pyrolysis*"; "*slow * pyrolysis*"; "*micro*wave*" AND '*pyrolysis*"; "*pyrolysis*" AND "plasma"; "*pyrolysis*" AND "*mobile*" AND "*reactor*"; "*pyrolysis*" AND "*economics*"; "*pyrolysis*" AND "**investment**"; "*pyrolysis*" AND "**plant**"

Relacionando pirólise com resíduos sólidos urbanos residenciais: "*pyrolysis*" AND "*municipal solid waste*"; "*pyrolysis*" AND "*food * waste*"; "*pyrolysis*" AND "*household * waste*"; "*pyrolysis*" AND "*kitchen * waste*"; "*pyrolysis*" AND "*domestic * waste*".

Com referência a resíduos de varrição urbana, foram pesquisados, relacionados com "*pyrolysis*", os termos "*garden waste*", "*garden trimming waste*" e "*street sweeping waste*".

Termos técnicos complementares também pesquisados nas bases de dados: "*biorefineries*", "*computer simulation*", "*simulation*" "*biofuels*", "*analytical pyrolysis*", "*biochar*", "*charcoal*", "*char*", "*tar*", "*waste * to * energy*". Principais termos técnicos em português, visando esclarecer o vocabulário técnico: "biocarvão", "carvão vegetal", "piche".

Destas consultas às bases de dados resultou em uma seleção de artigos, *webpages*, e artigos de revisão, relacionados nas referências bibliográficas.

2.5 Limitações da pesquisa

Uma limitação muito importante é a ausência de usinas de pirólise para tratamento de resíduos urbanos em funcionamento pleno do ponto de vista comercial no Brasil. Desta forma, o conteúdo obtido é baseado principalmente em usinas de pirólise no exterior utilizando outros tipos de biomassa.

2.6 Resumo do método

O quadro 2 apresenta o resumo metodológico da pesquisa.

Quadro 2 – Resumo metodológico da pesquisa

Pergunta de Pesquisa	Como as usinas de pirólise podem ser utilizadas para a geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos?
Objetivo Geral	Analisar a utilização de usinas de pirólise para geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos.
Tipo de Pesquisa	Aplicada, qualitativa
Técnicas de Pesquisa	Revisão sistemática da literatura; coleta de dados para simulação em pesquisa bibliográfica e visita técnica
Hipótese	As usinas de pirólise são viáveis sob determinadas condições que dependem do volume de energia elétrica que outros fornecedores produzem, em um ambiente de concorrência
Base Teórica	Obtida conforme descrito na seção 2.4

Fonte: Autor da dissertação.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Resíduos sólidos urbanos: Legislação

3.1.1 Evolução da legislação ambiental no Brasil

Embora a legislação federal atual da área de resíduos sólidos seja relativamente recente, ou seja, do ano de 2010, um histórico da legislação ambiental brasileira, dividindo-o, para efeito de clareza, conforme os períodos históricos: Colônia, Império e República, sendo este ainda subdividido em "Período de Evolução, Consolidação e Aperfeiçoamento do Direito Ambiental" é apresentado e explicado por Borges et al. (2009). Estes autores já apontam motivações para leis surgidas pelo excesso de consumo de reservas naturais, em especial do pau-brasil, já há mais de dois séculos.

3.1.2 A Lei Federal 12.305/2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos

No âmbito nacional, a Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

O Art. 3°, incisos XIV, XV, XVI e XVIII definem, respectivamente, reciclagem, rejeito, resíduo sólido e reutilização.

O Art. 6º aborda tópicos centrais para este projeto de pesquisa: 1) "a visão sistêmica, na gestão dos resíduos sólidos, que considere as variáveis ambiental, social, cultural, econômica, tecnológica e de saúde pública;" (inciso III); 2) "o desenvolvimento sustentável;" (parágrafo IV).

O Art. 7 ° relaciona-se com o objeto deste projeto de pesquisa, pirólise de resíduos sólidos urbanos (como já especificado) com a "adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;".

O Art. 3°, inciso XI, também descreve a "gestão integrada de resíduos sólidos" como "conjunto de soluções para a busca de soluções", prevendo, no Art. 14°, a elaboração de planos de tratamento de resíduos sólidos nos níveis nacional, estadual, microrregionais, intermunicipais e municipais.

Todas as etapas, ou seja, o "conjunto de ações exercidas", desde a coleta, transporte, dentre outras, até a "disposição final ambientalmente adequada dos

rejeitos” envolve, como definido nesta lei, o “gerenciamento” dos resíduos sólidos, descrito no Art. 3°, inciso X.

O Art. 8°, inciso IV, destaca um aspecto de grande importância: “o incentivo à criação e ao desenvolvimento de cooperativas ou de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis”.

O Art. 9°, § 1° prevê que “Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental [...]”.

Esta lei classifica os resíduos sólidos da seguinte forma quanto à origem (BRASIL, 2010):

> **a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas**; **b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;** c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”; d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”; e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”; f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais; g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS; h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis; i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades; j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira; k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios; (BRASIL, 2010) [grifos nossos]

Esta dissertação de mestrado envolve os tipos de resíduos das alíneas a) e b).

3.2 O potencial de geração de energia por meio de resíduos

A Revolução Industrial resultou em um considerável aumento da produção bens, inclusive de alimentos, que resultou em um aumento populacional sem precedentes na história da humanidade (Elkhalifa et al., 2019).

De maneira geral, os resíduos surgem na etapa final do ciclo de vida dos produtos. Tradicionalmente passam por incineração e/ou deposição em aterros sanitários, solução esta que também traz danos ao meio ambiente porque gera outros tipos de resíduos como chorume, emissão de gases (Elkhalifa et al., 2019) e outros

tipos de riscos ambientais como vazamentos que podem contaminar águas subterrâneas.

Elkhalifa et al. (2019) explicam que "*Essentially, waste is generated from inefficiencies associated with the transformation of raw material into useful products.*". Aqui, estes autores enfatizam a produção de bens, mas sabe-se que a geração de resíduos também acontece no consumo, evidenciado pelos procedimentos de coleta urbana de lixo nas municipalidades. Desta forma, praticamente todos os setores da economia, ou mais amplamente, toda atividade antropogênica é geradora de resíduos. E o acúmulo destes resíduos no meio ambiente deve-se ao modelo econômico linear que vem desde a Revolução Industrial e perdurou por quase todo o século passado, seguindo a sequência: obter matéria prima, produzir, vender, gerar consumo do produto vendido e depositar o que não foi aproveitado no meio ambiente.

Em paralelo com este aumento populacional, vieram também a utilização massiva dos combustíveis fósseis no século XX e suas consequências danosas para o meio ambiente, como destacado por Sandun et al. (2006):

> Conventional resources mainly fossil fuels are becoming limited because of the rapid increase in energy demand. **This imbalance in energy demand and supply** has placed immense pressure not only on consumer prices but also on the environment, prompting mankind to **look for sustainable energy resources**. (Sandun et al., 2006) [grifos nossos]

Dentre estes danos, está o efeito estufa (Silva, De, & Campos, 2008):

> Durante o intervalo de 1950 a 1998, houve a duplicação dos Gases de Efeito Estufa (GEE) no mundo. Estes gases são capazes de reter o calor do sol, sem os quais a radiação solar se dissiparia no espaço, este fenômeno é chamado comumente de "efeito estufa". O efeito estufa é um fenômeno que ocorre de forma natural na atmosfera. Os GEE são essenciais, portanto, para manter a temperatura necessária para a existência de vida no planeta. Contudo, as atividades humanas e naturais que causam as alterações ambientais vêm, ao longo dos anos, provocando mudanças climáticas em ritmos cada vez mais acelerados. A liberação de gases que causam o efeito estufa aumenta, a cada ano, uma vez que é produzida pela queima de combustíveis fósseis e de florestas, pelo mau uso das técnicas agrícolas e por gases emitidos pelo processo industrial. (Silva, De, & Campos, 2008)

"Os gases que mais contribuem para os GEE são, por ordem de importância, os dióxidos de carbono, os CFC, o metano, o vapor de água, o ozônio e o óxido nitroso." (Silva et al., 2008).

Bridgwater (2004) destaca que "*Bioenergy is now accepted as having the potential to provide the major part of the projected renewable energy provisions of the*

future". Adicionalmente, seu uso minimiza consideravelmente os impactos ambientais dos combustíveis fósseis.

Uma das grandes fontes de bioenergia vem exatamente da ineficiência mencionada por Elkhalifa et al. (2019), que é o desperdício no consumo de alimentos (Jeevahan et al., 2019):

> **One third** of the food produced globally for human consumption is either lost or wasted every year. These food wastes, if not handled with care, lead to public health problems and environmental pollution. Therefore, converting food wastes into energy or products not only generate revenue gains but also solve waste disposal problems thus helping for environmental sustainability. (Jeevahan et al., 2019) [grifos nossos]

Uma das formas mais eficazes de minimizar os impactos da atividade humana no meio ambiente é por meio da inovação no tratamento de resíduos, por exemplo, gerando energia (elétrica e calor) e produtos com valor econômico, quebrando a linearidade do modelo tradicional na forma do conceito conhecido como economia circular (Elkhalifa et al., 2019).

Isto também pode evitar ou reduzir muito a deposição de resíduos em aterros sanitários ou aterros destinados a produtos industriais.

3.3 Tecnologias de aproveitamento de resíduos: combustíveis e outros tipos de produtos que podem ser obtidos

De maneira, geral, as tecnologias de aproveitamento de resíduos podem ser classificadas em biológica, física e térmica, conforme Bridgwater (2007):

> The key difference between thermal and biological conversion is that biological conversion gives single or specific products such as ethanol or biogas (which contains up to 60% methane) and is a slow process, typically taking **hours, days, weeks (anaerobic fermentation and farm digestion) or years (landfill gas by digestion)** for reactions to be completed. Thermal conversion gives multiple and often complex products, with catalysts often used to improve the product quality or spectrum, and takes place in very short reaction times of **typically seconds or minutes**. (Bridgwater, 2007) [grifos nossos]

Embora a ênfase esteja em pirólise rápida, razão que será explicada em outra seção do texto, diversos produtos são exemplificados no Quadro 3 (Bridgwater, 2007).

Quadro 3: Principais produtos de obtidos de biomassa e respectivos tipos de processamentos

Tipo	Produto	Processamento biológico	Processamento físico	Processamento térmico
Combustíveis	Aditivos	Sim	Sim	Sim
	Álcoois	Sim		Sim
	Carvão vegetal			Sim
	Biodiesel		Sim	Sim
	Líquidos Fischer-Tropsch			Sim
	Óleo combustível			Sim
	Metano	Sim		Sim
	Gasolina e diesel			Sim
	Hidrogênio	Sim		Sim
Eletricidade		Sim	Sim	Sim
Prods. químicos	Acetona	Sim		
	Carbono ativado			Sim
	Butanol	Sim		
	Etanol	Sim		Sim
	Fertilizantes			Sim
	Química fina	Sim	Sim	Sim
	Produtos para alimentos	Sim		Sim
	Hidrogênio	Sim		Sim
	Metanol			Sim
	Resinas			sim

Fonte: adaptado de (Bridgwater, 2007).

Em síntese, os processos térmicos, também conhecidos como termoquímicos, podem resultar em mais produtos, mais aproveitamento de resíduos, em um tempo significativamente menor.

3.4 Pirólise

3.4.1 Definição

Moléculas orgânicas têm faixas de temperaturas nas quais permanecem estáveis, ou seja, as ligações químicas entre os átomos componentes não se quebram. Quando estas moléculas são aquecidas a temperaturas que variam conforme o tipo de molécula, acontecem reações denominadas pelos especialistas na

área como despolimerizações. Estas temperaturas situam-se entre 250ºC e 600ºC (Garcia-Nunez et al., 2017) . Consistem no primeiro estágio do conhecido processo de combustão.

Entretanto, para haver combustão é preciso haver um comburente. O mais conhecido é o oxigênio.

Pirólise é a decomposição termoquímica, tipicamente de substâncias orgânicas, na ausência de oxigênio. Como não há oxigênio, não acontece a reação de combustão, ou seja, a queima da substância pirolizada.

Esta ausência de queima, havendo apenas a quebra das ligações químicas, se todo o processo é adequadamente controlado, resulta em moléculas mais simples, que, em geral, conservam o potencial molecular de queima, resultando em biogás combustível, bio-óleo combustível e substâncias sólidas, sendo boa parte destas também aproveitáveis, como, por exemplo, o biocarvão (*biochar*).

A pirólise de biomassa é considerada um dos métodos de aproveitamento de resíduos mais promissores nesta e nas próximas décadas (Bridgwater, 2004).

Esta definição está apresentada na forma ideal como deveria acontecer a pirólise. Na prática, ainda há diversos desafios técnicos para otimizar um dado procedimento de pirólise para uma biomassa específica, de forma a tornar seu uso comercialmente mais atraente.

3.4.2 Pirólise na história da humanidade

A prática de produzir carvão por meio da carbonização de madeira é antiga na humanidade, milhares de anos anterior ao surgimento da escrita. É possível que o carvão tenha sido a primeira substância sintética produzida pelo Homem. Na Antiguidade, há relatos de substâncias obtidas por pirólise no Egito Antigo, para embalsamar mortos, e na Macedônia. No final do século XVIII, tecnologias para recuperar produtos condensados de processos de pirólise já estavam razoavelmente desenvolvidas. O surgimento da indústria do petróleo, no início do século XX, colocou o processo de pirólise em segundo plano (Garcia-Nunez et al., 2017).

Os principais avanços técnicos, ao longo da História, que resultaram nos atuais processos de pirólise são mostrados no Quadro 4.

Quadro 4: Registros históricos relevantes sobre os usos da pirólise

Época/ano	**Registro histórico**
35000-26000 AEC	Desenhos artísticos nas paredes da caverna de Grotte Chauvet (França) com biocarvão
70 EC	Plínio, o Velho descreve usos para líquidos derivados de cinzas
1556	Georgius Agricola descreve em detalhes os usos de carvão vegetal em equipamentos para metalurgia
1653	Glauber confirma a presença de ácido acético em água resultante de pirólise
1661	Robert Boyle descreve a destilação da madeira
1792	Comercialização de gás para iluminação na Inglaterra
1812	Taylor prova a presença de metanol em líquido resultante da destilação de madeira
1835	Metanol é isolado de madeira não queimada
1850	Indústria de destilação de madeira expande-se rapidamente
Década de 1920	A ascensão da indústria petrolífera resulta no declínio da destilação de madeira
Décadas de 1920 a 1960	Produção de carvão por pirólise lenta para a indústria metalúrgica e preparação de alimentos

Fonte: adaptado de Garcia-Nunez et al. (2017).

3.4.3 Pirólise em décadas recentes

Os usos comerciais da pirólise reduziram-se, mas não desapareceram ao longo do século XX. Além disso, diversas etapas da elaboração de produtos derivados do petróleo utilizam pirólise (Bridgwater, 2018). A retomada do interesse pelo processo de pirólise deu-se devido à crise do petróleo na década de 1970, quando surgiram os primeiros reatores de pirólise rápida para a produção de bio-óleos combustíveis (Garcia-Nunez et al., 2017). Outros eventos relevantes são mostrados no Quadro 5.

Quadro 5: Fatos relevantes sobre de pirólise a partir da década de 1970

Época/ano	Evento
Década de 1970	Crise do petróleo
Década de 1980	Pirólise rápida é estudada e procedimento passa a ser comercializado
1989	A empresa Ensyn comercializa ingredientes produzidos por pirólise para dar sabor a alimentos
Década de 1990	Surgem novas estratégias para aprimoramento de bio-óleo e produtos para substituir derivados do petróleo
Anos 2000	Altas no preço do petróleo e o aquecimento global criam demanda para a produção de biocombustíveis e biocarvão
2005	Surge a ideia de usar biocarvão de pirólise para armazenar carbono (reduzindo o efeito estufa) e melhorias no solo para agricultura

Fonte: adaptado de Garcia-Nunez et al. (2017).

Entretanto, as pesquisas científicas buscando substitutos para o petróleo via pirólise concentravam-se especificamente em biomassa de vegetais, por conterem moléculas orgânicas de lignocelulose, como ponderam Garcia-Nunez et al. (2017):

> The renewed interest in pyrolysis is driven by the potential to convert lignocellulosic materials into bio-oil and biochar and the use of these intermediates for the production of biofuels, biochemicals, and engineered biochars for environmental services. (Garcia-Nunez et al., 2017)

Complementando o Quadro 5, partir da década de 1980 diversos tipos de reatores de pirólise rápida (*fast pyrolysis*) já tinham capacidade para obter de 70 a 80% de proporção (em massa) de bio-óleo, considerado um alto rendimento, utilizando madeira seca (Bridgwater, 2004).

Na década de 1990 surgem usinas de pirólise com *status* de quase-comerciais, utilizando madeira, por exemplo, nos Estados Unidos (Winscosin), Canadá (Vancouver) e Finlândia (Bridgwater, 2004).

3.4.4 A classificação dos métodos de pirólise pela perspectiva da aplicação

Considerando a perspectiva do uso desta tecnologia, o método de pirólise pode ser classificado em dois tipos: pirólise analítica e aplicada, detalhados da seguinte forma por Akalin & Karagöz (2014):

> **There are two types of pyrolysis: analytical and applied.** Applied pyrolysis is carried out for the purpose of producing pyrolysis compounds....Analytical pyrolysis involves the characterization of the analyte by decomposition upon heat treatment in the absence of oxygen. Analytical pyrolysis has been used effectively for the decomposition of biomass and biomass components. This technique allows us to understand the decomposition pathway of biomasses. It also gives us important information about the role and the effects of catalysts during decomposition of biomass. (Akalin & Karagöz, 2014) [grifos nossos]

3.4.4.1 Pirólise aplicada (*applied pyrolysis*)

Alguns exemplos são: aplicação na indústria do petróleo (Bridgwater, 2018), tratamento de resíduos para gerar energia, indústria de alimentos para fabricar produtos (*food flavours*) para dar sabor a alimentos (Bridgwater, 2004), aproveitamento de biocarvão de pirólise de embalagens longa-vida (Raclavska et al., 2018) e recuperação de metais de valor de resíduos eletrônicos (Bindini et al., 2015).

3.4.4.2 Alguns exemplos de pirólise analítica (*analytical pyrolysis*)

Na área de perícia forense, a pirólise de substâncias de composição química desconhecida, combinada com o uso da espectrometria com cromatógrafo de massa,

por contribuir em investigações. Neste caso, um reator de pirólise de pequeno porte, em laboratório, pode decompor moléculas complexas de uma amostra coletada na cena de um crime, gerando moléculas mais simples que passam por um espectrômetro de massa, aparelho capaz de determinar quais são as moléculas obtidas do procedimento de pirólise, a proporção em termos de massa, ajudando peritos, a determinar as substâncias presentes na amostra original. Lachowicz et al. (2014) demonstraram esta aplicação coletando amostras de borracha de pneus, deixadas pelo desgaste normal em diferentes tipos de pavimentos de vias públicas, e amostras obtidas dos respectivos pneus antes da realização do trajeto. Quando comparados estes grupos de amostras, foi possível identificar qual veículo transitou por uma determinada via específica, o que pode contribuir, por exemplo, para confirmar o relato de testemunhas ou verificar se um suspeito de fato percorreu um trajeto que faz parte de uma linha de investigação policial.

No campo de investigação sobre as técnicas utilizadas para criar objetos de arte históricos e pinturas, o uso da pirólise, combinado com o surgimento de novas tecnologias de espectrometria de massa, permite análises da composição de tintas ou outros compostos orgânicos sem a necessidade de um pré-tratamento químico. Além disso, possibilita detectar outras substâncias presentes nestas obras, o que não é possível sem a decomposição de característica termoquímica da pirólise (Degano et al., 2018).

Aplicações da pirólise analítica em objetos de arte na década de 1990 também são exemplificadas por (Chiavari & Prati, 2003).

3.4.5 O que é biomassa?

Em princípio, a resposta para esta pergunta é simples: trata-se de um tipo de massa de organismos que já estiveram vivos, ou seja, organismos biológicos. Entretanto, autores da literatura científica utilizam, não raro implicitamente, diferentes definições.

Aqui retorna-se às definições de pirólise.

Ao descrever a faixa de temperaturas na qual a despolimerização (quebra de moléculas orgânicas complexas em outras mais simples) ocorre, a seguinte descrição é dada por Garcia-Nunez et al. (2017):

> Thermochemical depolymerization reactions are important between 250 and 600 °C. (63)[2]. When biomass is heated, thermal cracking of bonds in biomass constituents **(cellulose, hemicellulose, and lignin)** happens. (Garcia-Nunez et al., 2017) [grifos nossos]

Generally, all plant is formed mainly by lignin, cellulose and hemicelluloses.", explicam Maia et al., (2011). Nesta descrição, ao detalhar os grupos de substâncias constituintes da biomassa como sendo, celulose, hemicelulose e lignina, os autores estão referindo-se implicitamente a biomassa de origem vegetal. Isto não inclui biomassa de restos de alimentos de proteína animal, carboidratos, por exemplo.

Descrição semelhante é dada por Bridgwater (2004):

> Bio-oils are multi-component mixtures comprised of different size molecules derived primarily from depolymerization and fragmentation reactions of **three key biomass building blocks**: cellulose, hemicellulose, and lignin. (Bridgwater, 2004) [grifo nosso]

Observa-se que esta definição é igual, em essência, à anterior porque descreve os três principais blocos construtivos da biomassa como sendo celulose, hemicelulose e lignina ou seja, os principais constituintes da biomassa vegetal.

Esta discussão é de grande relevância para este trabalho porque estas definições praticamente tratam madeira como sinônimo de biomassa, desconsiderando biomassa de origem animal, resíduos domésticos (*food waste* ou *domestic waste*) e de derivados de petróleo (biomassa de origem fóssil não renovável), ainda que sejam substâncias patenteadas, como por exemplo, plásticos.

Entretanto, neste mesmo artigo a definição é ampliada e esclarecida por Bridgwater (2004):

> **Any form of biomass** can be considered for fast pyrolysis. While **most work has been carried out on wood** due to its consistency, and comparability between tests, nearly **100 different biomass types** have been tested by many laboratories ranging from agricultural wastes such as straw, olive pits and nut shells to energy crops such as miscanthus and sorghum and solid wastes such as sewage sludge and leather wastes. (Bridgwater, 2004) [grifos nossos]

Ainda assim, entre os exemplos mencionados destes quase 100 tipos de biomassa não há destaque para os resíduos domésticos de alimentos, que são um grande problema atualmente, como explicado na seção 4.1 deste trabalho.

Uma breve incursão do autor desta dissertação no campo do Direito mostra que definir biomassa é muito mais complexo do que parece, quando é necessário considerar o uso deste termo – biomassa – em contratos empresariais, legislação,

---

[2] (63) Montoya, J.; Pecha, B.; Roman, D.; Janna, F. C.; Garcia-Perez, M. Effect of temperature and heating rate on product distribution from the pyrolysis of sugarcane bagasse in a hot plate reactor. J. Anal. Appl. Pyrolysis 2017, 123, 347−362.

normas técnicas e diretrizes governamentais para definição de fontes de financiamento, por exemplo (Brigliadori, 2014).

Uma terceira definição é acrescentada por conter um fator essencial, elaborada por Maschio et al. (1994): "*Biomass is a **renewable** material containing appreciable quantities of hydrogen, oxygen and carbon.*" [grifo nosso].

Desta forma, ao invés de buscar a definição de biomassa, para a qual não há consenso, o autor desta dissertação opta por relacionar fatores que estarão subentendidos na sequência deste trabalho, ao referir-se a este termo: 1) trata-se de substância de organismos biológicos que já estiveram vivos (obtida diretamente na natureza, como madeira para fabricar carvão vegetal, ou industrializada, como couro de cintos e sapatos, por exemplo), excrementos ou outras substâncias produzidas pelo metabolismo de organismos vivos e também micro-organismos presentes em substâncias em pirólise; 2) no sistema tradicional, diversos destes tipos de substâncias orgânicas seriam descartadas como rejeito, ou seja, sem possibilidade de qualquer reaproveitamento, causando danos ao meio ambiente; 3) em décadas recentes, tecnologias foram - e continuam sendo - desenvolvidas para reaproveitar estas substâncias orgânicas na economia: aqui inclui-se o termo renovável (*renewable*) da definição de Maschio et al. (1994).

Justificando os fatores do parágrafo anterior: ao referir-se a organismos biológicos, a presença de determinadas moléculas típicas, ainda que variando conforme a espécie e/ou processo de fabricação, estão implícitas. O reaproveitamento está ligado diretamente com o conceito de desenvolvimento sustentável e à definição de sustentabilidade do Relatório Brundtland. Como as tecnologias de reaproveitamento de resíduos continuam em desenvolvimento, um tipo de resíduo que hoje é considerado rejeito pode vir a ser incluído entre os renováveis no futuro.

Desta forma, já utilizando estes três fatores, o termo biomassa relaciona-se com o da Economia Circular, como destaca Elkhalifa et al. (2019): "*Sustainable waste management necessitates that industries shift from the current linear model to a **circular based economy**, utilizing wastes as raw materials for the production of new products, eg. fuels and chemicals.*".

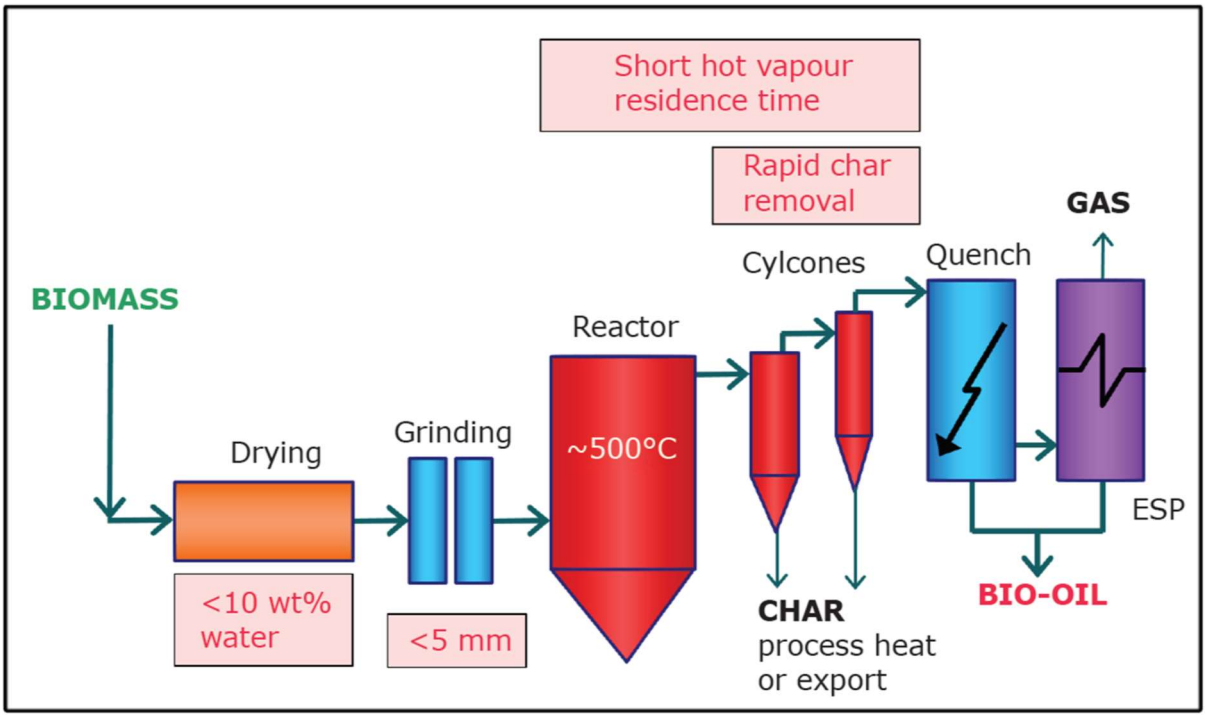
3.4.6 Conceitos técnicos básicos sobre a pirólise de biomassa

3.4.6.1 O reator de pirólise

O procedimento de pirólise é realizado em reatores. Podem ser de pequeno porte, instalados em laboratórios, móveis, acoplados a veículos como caminhões e de médio e grande porte. É comum, no projeto destes dispositivos para tratamento de resíduos, que seja considerada a ampliação da capacidade do reator, conforme o aumento da demanda ao longo da vida útil (Bridgwater, 2004).

Tamanhos e tipos de reatores variam muito conforme o tipo de biomassa e a aplicação. Assim, será utilizada neste trabalho a representação gráfica esquemática de um reator de pirólise rápida, como mostrado na Figura 1.

Figura 1: Esquema de um reator de pirólise rápida



Fonte: (Bridgwater, 2018)[3].

As etapas típicas do processo de pirólise de biomassa, com base nesta Figura 1: 1) a biomassa passa por um processo de secagem porque a umidade prejudica consideravelmente o controle da reação de pirólise e, consequentemente, a possibilidade de aproveitamento comercial dos produtos resultantes (*by-products*); 2) em seguida, realiza-se a moagem (*grinding*), ou qualquer outro tipo de procedimento para reduzir o tamanho das partículas de biomassa, o que promove uma melhor transferência de calor e aquecimento o mais uniforme possível da(s) substância(s). Os tamanhos, conforme o tipo de biomassa, podem variar de alguns milímetros até

[3] Figura reproduzida com autorização dos detentores dos direitos autorais.

centímetros (como exemplo, ao realizar a pirólise de pneus usados, estes não são colocados inteiros no reator, e sim na forma de pequenos pedaços); 3) a biomassa é aquecida no reator (*reactor*); 4) as substâncias resultantes, gases, líquidos e sólidos (Akhtar & Saidina Amin, 2012) passam por um primeiro processo de separação, obtendo sólidos, usualmente cinzas e carvão (*char*); 5) gases e líquidos (óleos) são resfriados (*quench*) e separados.

A composição química das substâncias obtidas varia conforme composição química da biomassa. Adicionalmente, diversos outros tipos de moléculas indesejadas para os objetivos comerciais podem estar presentes (Akhtar & Saidina Amin, 2012).

Como os gases, líquidos e, dependendo do procedimento, sólidos resultantes, são combustíveis, parte destas substâncias, em torno de 25% (em termos de potencial energético, não em proporção de peso) é reaproveitada como fonte de calor do próprio reator (Bridgwater, 2018). Quando não há combustíveis resultantes de pirólise ou o reator está sendo colocado em funcionamento pela primeira vez, combustíveis convencionais são utilizados.

Outras fontes de calor também podem ser utilizadas em reatores de pirólise, como por exemplo micro-ondas (Dong et al., 2018) e gases como argônio e hidrogênio em reatores de plasma, que podem atingir temperaturas de aproximadamente 3000ºK (Zhao et al., 2002).

3.4.6.2 Os principais parâmetros e sua influência nos produtos (*by-products*) da pirólise de biomassa

Os produtos que podem ser obtidos em pirólise de biomassa dependem de sete parâmetros principais: 1) a taxa de aquecimento, ou seja, se a substância em pirólise é aquecida lenta ou rapidamente; 2) o tempo de permanência do material em pirólise no reator, que pode variar de menos de 1 segundo até horas; 3) a temperatura máxima atingida no processo; 4) o tipo de biomassa (há substâncias que podem ser pirolizadas com sucesso mas cujos produtos são inviáveis do ponto de vista econômico; 5) o grau de umidade, quanto menor, melhor, sendo que é comum que reatores de pirólise sejam equipados com redutores da umidade da substância a ser pirolisada; 6) o tamanho do material pirolizado; 7) parâmetros específicos para diversos tipos de substâncias, que, nas altas temperaturas do processo de pirólise, podem produzir

reações químicas formando outros produtos, indesejados (Akhtar & Saidina Amin, 2012).

Os três primeiros destes parâmetros também definem os dois tipos básicos (também referidos como modos) de pirólise, na perspectiva termoquímica: 1) pirólise rápida (*fast pyrolysis*), com taxa de aquecimento rápida, tempo de permanência dentro do reator curto, usualmente por volta de alguns segundos até poucos minutos, e temperatura máxima superior a 500ºC; 2) pirólise lenta (*slow pyrolysis*), com taxa de aquecimento lenta, tempo de permanência que pode chegar a horas e temperatura máxima usualmente abaixo de 400ºC (Akhtar & Saidina Amin, 2012). A possibilidade de variação nestes parâmetros resulta em vários modos de pirólise e diferentes proporções dos tipos de produtos, conforme exemplificado com madeira e mostrado na Figura 2.

Figura 2: Tipos de produtos obtidos por meio de diferentes modos de pirólise (variando parâmetros do procedimento)

Table I Typical Product Weight Yields from Wood (Dry Feed Basis) by Different Modes of Pyrolysis

Mode	Conditions	Liquid	Solid	Gas
Fast	~500°C Short hot vapour residence time <2 s Short solid residence time up to 10 s	75 wt% (bio-oil)	12 wt% char	13 wt%
Intermediate	~400°C Moderate hot vapour residence time 5–20 s Moderate solid residence time up to 20 minutes	40 wt% in two phases	40 wt% char	20 wt%
Slow pyrolysis (Carbonisation)	~400°C Long hot vapour residence time up to hours depending on technology Long solid residence time depending on technology	30 wt% in two phases	35 wt% char	35 wt%
Gasification (allothermal)	~750–900°C Short hot vapour residence time 5 s Short solid residence time	Minimal	Up to 2 wt% char	Up to 98 wt%
Torrefaction (slow)	~250–300°C Solids residence time up to 30 mins	0 wt% unless vapours are condensed, then up to 15 wt%	70–80 wt% solid	15 wt%

Fonte: (Bridgwater, 2018)[4].

Na coluna *Mode*, *allothermal* significa com fonte de calor externa.

[4] Reproduzida com autorização dos detentores dos direitos autorais

Uma aplicação muito importante da carbonização (*carbonisation*) é a produção de combustíveis sólidos que não geram fumaça na queima (Akhtar & Saidina Amin, 2012).

Na Figura 2, a coluna *Conditions* refere-se às condições de funcionamento do reator de pirólise: "*At the heart of a fast pyrolysis process is the reactor and most research and development has focused on the reactor. The rest of the process consists of biomass reception, storage and handling, biomass drying and grinding, product collection, storage and, when relevant, upgrading.*" (Bridgwater, 2004). Isto inclui também simulações computacionais, por exemplo, para obter produtos químicos (Shokrollahi Yancheshmeh et al., 2013).

Nas colunas *Liquid*, *Solid* e *Gas* da Figura 2, *wt%* significa percentagem em peso (*weight*).

Além destas condições e parâmetros, o tipo de biomassa requer variações construtivas específicas para maximizar o(s) produto(s) desejado(s). Um histórico detalhado da evolução técnica que chegou aos atuais reatores de pirólise, passando pelos fornos e retortas para produzir carvão vegetal (carbonização), reatores intermediários de pirólise, diversos tipos de reatores de pirólise rápida, além de versões que entraram em operação comercial podem ser encontrados no trabalho de Garcia-Nunez et al. (2017).

3.4.6.3 Biocarvão (*biochar*) e carvão vegetal (*charcoal*)

Em leituras sobre do processo termoquímico da pirólise na literatura científica no idioma inglês, encontra-se, com certa frequência, os termos *charcoal* e *biochar*. É importante esclarecer que são produtos distintos. O carvão vegetal (*charcoal*) é definido como (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019a):

> O carvão vegetal é um resíduo sólido de coloração preta, obtido pela **carbonização** de madeira ou lenha, que consiste na queima ou aquecimento da madeira em uma atmosfera com pouco ar. Devido à baixa quantidade de oxigênio, não ocorre a queima total da matéria-prima. . . .A qualidade da madeira de origem, o equipamento e as condições operacionais são características que determinam a qualidade do carvão vegetal. . . .Para que o carvão tenha uma boa qualidade é necessário que a madeira tenha 50,5% de carbono; 6,2% de hidrogênio; 42,2% de oxigênio e 0,4% de cinzas e para se obter um ótimo carvão, carbonizado a 500ºC é necessário que sua composição química seja de 84,5% de carbono; 2,5% de hidrogênio; 4,3% de oxigênio; 7,5% umidade (água) e 1,2% de cinzas. (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019a) [grifo nosso]

A grande importância do carvão vegetal para o Brasil é mostrada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2019b):

> A produção de carvão vegetal a partir da biomassa proveniente da madeira proporciona que a lenha seja a quarta fonte primária de energia mais utilizada na matriz energética brasileira. Em 2005, 42,8% de uma produção de 136,6 milhões de m³ de lenha foram destinados à produção de carvão vegetal no Brasil, o que o condiciona a ser o maior produtor mundial, além de ser o maior consumidor. O destino do carvão vegetal produzido é o mercado interno, e o País é praticamente autossuficiente no produto, mesmo apresentando um resultado negativo em sua balança comercial com pouco volume de importação, pois as exportações são nulas desde 2007. Em 2008, 8,5% foi destinado ao setor residencial e quase 90% à indústria. (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2019b).

Uma síntese sobre o que é o biocarvão (*biochar*) é apresentada por Maia et al. (2011):

> In short, biochar is any source of biomass previously heated under low or no oxigen supply, with the purpose of applying to soil in order to improve its agronomic and environmental quality. The process of biochar production is known as **pyrolysis**. (Maia et al., 2011) [grifo nosso]

Características adicionais do biocarvão (*biochar*) são apresentadas na definição de Sorgonà et al. (2016):

> The Biochar is a “porous cabonaceous solid” produced by thermochemical conversion of organic materials in na oxigen depleted atmosphere, which has physiochemical properties suitable for the safe and long-term storage of carbon in the environment and, potentialy, solid improvement. (Sorgonà et al., 2016)

Carvão vegetal (*charcoal*) é um tipo de combustível e biocarvão (*biochar*) é um dos possíveis produtos de um processo de pirólise com aplicações na agricultura para melhorar a qualidade do solo. Fisicamente, diferenciam-se porque, embora ambos tenham coloração escura, o biocarvão é poroso e desmancha-se mais facilmente.

Já há registro de publicações mostrando vantagens do biocarvão datando do início do século XX e também uso para finalidade de plantio por indígenas na Amazônia, neste caso sendo o biocarvão conhecido como Terras Pretas de Índios (Maia et al., 2011).

3.4.6.4 Biogás e *syngas*

Uma das maiores fontes de emissões de metano são os aterros usados para a disposição de resíduos sólidos urbanos. O biogás de aterro é produzido pela decomposição anaeróbia (sem a presença de oxigênio) de resíduos orgânicos. É composto por aproximadamente 50% de metano (CH_4), 40% de dióxido de carbono

(CO_2), 9% de nitrogênio, e concentrações residuais de compostos orgânicos voláteis, poluentes perigosos e outros elementos (Silva et al., 2008).

No Estado de São Paulo, vários aterros sanitários geram energia elétrica por meio deste biogás (São Paulo (Estado), 2019).

Já o biogás conhecido como *syngas* é produzido por processos termoquímicos, como a pirólise, em suas várias modalidades (coluna *Mode* da Figura 1), com proporções em massa mostradas na coluna *gas* da Figura 1, e explicado com mais detalhe por Hagos et al. (2014):

> **Syngas, an abbreviation for synthesis gas**, is an end product of gasification. This is a name given for a mixture mainly comprised of CO and H_2 at varied proportions. It also consists of other gases like methane, nitrogen, and carbondioxide apart from these major gases. It can be produced from different feedstock like **coal, liquid hydrocarbons**, **biomass**, and other waste products and the quality varies depending on the feedstock and the **gasification** process. The name "syngas" is a general term for any gasification product. However, different names were used for different products at different times in the past such as town gas, water gas, producer gas, and blast furnace gas [3] (Hagos et al., 2014) [grifos nossos]

Das substâncias grifadas, atualmente o *syngas* é produzido de carvão, hidrocarbonetos líquidos, sendo que o gás natural também pode gerar *syngas*, como relatado por Rauch et al. (2015).

3.4.6.5 Bio-óleo obtido por pirólise

A porção líquida dos produtos de pirólise é tipicamente um óleo. "*Pyrolysis liquid is referred to by many names including pyrolysis oil, bio-oil, bio-crude-oil, bio-fuel-oil, wood liquids, wood oil, liquid smoke, wood distillates, pyroligneous tar, pyroligneous acid, and liquid wood.*" (Bridgwater, 2004).

Desta forma, ao referir-se a bio-óleos, é fundamental especificar de qual biomassa foram produzidos porque, muito provavelmente, serão líquidos com composições químicas diferentes: *"[...] the elemental composition of bio-oil resembles that of biomass rather than that of petroleum oils.*" (Bridgwater, 2004).

3.4.7 Biorrefinarias

A disseminação dos biocombustíveis e outros produtos químicos obtidos pelo método de pirólise depende de vários fatores.

Como bio-óleos, *syngas* e outros biocombustíveis obtidos por pirólise frequentemente têm características fisico-químicas que variam conforme a biomassa

utilizada no processo, a padronização destas características permitirá que os fabricantes de veículos (terrestres, aquáticos e aéreos), turbinas, caldeiras etc. possam utilizar estas especificações, divulgadas na forma de normas técnicas ou diretrizes e especificações de órgãos públicos, para projetar dispositivos movidos a biocombustíveis. Diversas destas características são descritas por Bridgwater (2004):

> Upgrading of bio-oil to transport fuels The properties that negatively affect bio-oil fuel quality are foremost low heating value, incompatibility with conventional fuels, solids content, high viscosity, incomplete volatility, and chemical instability. Some of those deficiencies can be improved using relatively simple physical methods while others require more complex chemical processing. (Bridgwater, 2004)

Depois de explicar a importância técnica das biorrefinarias, o papel fundamental destes empreendimentos na área de negócios é destacado por este mesmo autor, em artigo posterior (Bridgwater, 2007):

> While biorefineries are not new, the recognition of their strategic and economic potential is recent. A bio-refinery can be defined as the optimised performance of the use of biomass for materials, chemicals, fuels and energy applications, where performance relates to costs, economics, markets, yield, environment, impact, carbon balance and social aspects. In other words, there is optimised use of resources, maximised profitability, maximised benefits and minimised wastes. (Bridgwater, 2007)

A importância das biorrefinarias, aprimorando (*upgrading*), ou seja, minimizando estas características indesejadas é parte fundamental na formação e crescimento de um mercado de biocombustíveis.

Um trabalho acadêmico sobre biorrefinarias, que detalha tipos, instalações já em funcionamento e outros aspectos técnicos foi publicado por Sandun et al. (2006).

3.4.8 Noções sobre geradores de energia elétrica para não-especialistas

Esta seção aborda apenas o essencial para exemplificar a geração de energia elétrica produzida por meio de combustíveis de pirólise. Foi elaborada com base em livro-texto destinado a cursos de graduação em engenharia, física, química e áreas afins (Gussow, 2009).

Métodos utilizados em baterias e pilhas que fornecem energia elétrica para rádios portáteis, relógios eletrônicos, telefones celulares etc. não estão aqui incluídos, como também não estão células de painéis de energia solar.

A ideia é utilizar máquinas de quaisquer tipos que transformem fontes de energia em movimento de rotação. Isto é necessário porque boa parte dos geradores de energia elétrica são máquinas rotativas.

Em 1819, Hans Christian Oersted descobriu uma relação direta entre eletricidade e magnetismo. Se uma corrente elétrica passa em um condutor (um fio elétrico de cobre, por exemplo), surge um campo magnético em volta deste condutor. O contrário também acontece, ou seja, se um condutor não eletrificado é submetido a um campo magnético, surge corrente elétrica nele. Oersted também observou que campos magnéticos são formados por linhas de força. Um experimento escolar muito comum para demonstrar este fenômeno é espalhar limalha de ferro em volta de um ímã e observar a geometria elas formam em volta deste ímã, delineando estas linhas de força.

Em 1831, Michael Faraday descobriu o princípio da indução eletromagnética. Utilizando os elementos do parágrafo anterior: se um fio de cobre (um condutor de eletricidade) for movimentado suficientemente próximo àquele ímã, interceptando suas linhas de força magnética (considerando que as limalhas de ferro não estejam em volta deste ímã), surgirá o que Faraday denominou força eletromotriz (fem). O contrário também produz o mesmo resultado. Se um ímã for movimentado suficientemente próximo a um condutor elétrico, surge uma força eletromotriz.

A força eletromotriz é medida em volts.

Em linguagem não técnica, movimentar condutores elétricos interceptando as linhas de força de campos magnéticos produz eletricidade. E este movimento não precisa ser linear, por exemplo, da esquerda para a direita. Pode ser rotativo.

Isto resultou em um tipo de gerador de energia elétrica muito difundido, constituído de um conjunto de ímãs e condutores de eletricidade, parte montados fixos na carcaça desta máquina, parte sobre um eixo, concêntrico a esta carcaça. Para Obter energia elétrica basta girar o eixo.

Os parágrafos a seguir exemplificam usos deste tipo de gerador de energia elétrica. O termo acoplamento é utilizado em um sentido geral, sem caracterizar detalhes técnicos de cada caso.

Exemplo 1: em uma usina hidrelétrica, a força da queda d´água passando por uma turbina faz com que o eixo desta máquina gire. Este eixo está acoplado ao eixo de um gerador elétrico que gira conforme o eixo da turbina gira, produzindo energia elétrica. A energia potencial da altura da queda d´água foi transformada em energia de rotação pela turbina.

Exemplo 2: o movimento das correntes de ar passando pelas pás de um gerador eólico gera rotação, aproveitada por um gerador elétrico acoplado ao mecanismo que gira as pás, produz eletricidade.

Exemplo 3: em um automóvel, um tipo de gerador elétrico, o alternador, acoplado ao eixo do motor, aproveita o movimento de rotação deste para produzir eletricidade.

3.4.9 Produtos e aplicações da pirólise de resíduos

3.4.9.1 Biocarvão (*biochar)*

O Quadro 5 mostra que a ideia de utilizar biocarvão de pirólise para armazenar carbono da atmosfera, contribuindo para reduzir o efeito estufa, e também na agricultura surgiu em 2005. Tem aproveitamento na compostagem, como catalisador, no tratamento de água de reuso (*wastewater*). Devido a sua porosidade, pode contribuir para a remoção de metais pesados, como níquel, cobre, cádmio e chumbo, e atuar como solvente de poluentes orgânicos e inorgânicos (Zhang et al., 2019).

Por outro lado, problemas e até riscos de seu uso também são destacados por Zhang et al. (2019):

> However, apart from those advantages, biochars generally contains various **heavy metals and other contaminants** [43-47][5], depending on the types of feedstock and the methods used for its production, which carries risk during its application. (Zhang et al., 2019) [grifos nossos]

Mais uma vez, a literatura científica destaca que o tipo de biomassa utilizada para gerar um produto por pirólise é de grande importância para determinar sua viabilidade técnica de aplicação como produto.

---

[5] [43] Kim JH, Ok YS, Choi GH, Park BJ. Residual perfluorochemicals in the biochar from sewage sludge. Chemosphere 2015;134:435e7.
[44] Kusmierz M, Oleszczuk P, Kraska P, Pałys E, Andruszczak S. Persistence of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in biochar-amended soil. Chemosphere 2016;146:272e9.
[45] Madej J, Hilber I, Bucheli TD, Oleszczuk P. Biochars with low polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations achievable by pyrolysis under high carrier gas flows irrespective of oxygen content or feedstock. J Anal Appl Pyrol 2016;122:356e69.
[46] Zielinska A, Oleszczuk P. The conversion of sewage sludge into biochar reduces polycyclic aromatic hydrocarbon content and ecotoxicity but increases trace metal content. Biomass Bioenergy 2015;75:235e44.
[47] Jin J, Li Y, Zhang J, Wu S, Cao Y, Liang P, et al. Influence of pyrolysis temperature on properties and environmental safety of heavy metals in biochars derived from municipal sewage sludge. J Hazard Mater 2016;320:417e26.

3.4.9.2 Biogás (*syngas*)

Como já mencionado na seção 3.4.6.4, o gás de síntese (*syngas*) já é produzido a partir de combustíveis convencionais, com aplicações para produção de calor e energia elétrica (Rauch et al., 2015).

Com relação ao *syngas* produto de gaseificação (relembrando, um dos modos de pirólise mostrados na Figura 2), a importância de combustíveis renováveis para a área de transportes cresceu, de forma que a aplicação do *syngas* voltou-se para a produção de líquidos Fischer-Tropsch (combustíveis), metanol, álcoois, um tipo de gás substituto do gás natural (*substitute natural gas (SNG)*) e hidrogênio de biomassa (Rauch et al., 2015).

3.4.9.3 Bio-óleo

Para mencionar o termo bio-óleo, embora o autor desta dissertação seja repetitivo, a mesma regra do biocarvão de pirólise (*biochar*) aplica-se: não existe um único tipo de bio-óleo, ou seja, sua composição depende da biomassa e processo termoquímico (ou não), utilizados para produzí-lo.

A proporção de oxigênio em bio-óleos situa-se entre 45 e 50% (em massa), sendo este elemento químico detectado em mais de 300 compostos presentes nestes tipos de óleo, incluindo água (H_2O). Isto resulta em um baixo poder calorífico, aproximadamente 50% menor, quando comparado com combustíveis derivados de petróleo. Como o bio-óleo contém substâncias não-voláteis, sendo que uma maior volatilidade de um combustível líquido favorece sua queima, surgem também limitações na sua aplicação. A viscosidade dos bio-óleos também é muito variável. Devido à grande proporção de ácidos orgânicos, o pH situa-se entre 2 e 3, sendo corrosivo para os materiais construtivos típicos de equipamentos de combustão como alumínio de aço carbono, em especial com altas temperaturas e presença de água (Bridgwater, 2004).

Fornos e caldeiras têm menor exigência de características com relação ao tipo de combustível utilizado, em comparação com motores e turbinas, podendo ser uma aplicação economicamente viável para bio-óleos de pirólise. Diversas pesquisas têm sido realizadas, com as devidas adaptações destes fornos e caldeiras, buscando identificar a melhor maneira de aproveitar este tipo de combustível, inclusive verificando emissões de poluentes (Bridgwater, 2004).

Na indústria, bio-óleos tem grande potencial na produção de produtos químicos, por exemplo fertilizantes, adesivos e ingredientes para alimentos (*food flavours*) (Bridgwater, 2004).

3.5 Algumas perspectivas futuras de aplicações de produtos obtidos por pirólise de biomassa

3.5.1 Biocombustível para turbinas a gás na geração de energia elétrica

O uso de turbinas a gás, modificadas para funcionarem com biogás, de menor poder calorífico (dentre outras limitações, como necessidade de biorrefino), é sugerido por Bridgwater (2004):

> Gas turbines are used in a wide range of applications, most important of which are driving electric power generators and providing power to aircraft. Accordingly, the two main categories of turbines in use are industrial and aircraft types. However, **both types of turbines are used in power plants**. Though at present most gas turbines operate on petroleum distillates or gas fuels, **if properly designed, they can essentially burn any fuel**. Certainly, gas turbines can be modified or redesigned to accommodate some of the unusual properties of biomass pyrolysis oils. (Bridgwater, 2004) [grifos nossos]

Aplicando os conceitos da seção 3.4.8, aqui biogás de pirólise é queimado, tendo ar como comburente, produzindo um outro gás, com alta temperatura e pressão, que faz girar o eixo da turbina; acoplado ao eixo de um gerador, produz energia elétrica.

O tipo de turbina do exemplo 1 da seção 3.4.8 é diferente desta. Lá, trata-se de uma turbina hidráulica.

3.5.2 Adição de bio-óleos refinados ao óleo diesel

No Brasil, já é conhecida dos consumidores a adição de etanol à gasolina. Raciocínio similar é proposto com a adição de bio-óleos biorefinados ao óleo diesel, em proporções variando entre 5 e 30%, mas ainda com desafios de danos ao motor a serem superados (Bridgwater, 2004):

> **The simplest use of bio-oil as a transport fuel seems to be in combination with diesel fuel.** Although biomass pyrolysis oils are not miscible with hydrocarbons, with the aid of surfactants they can be emulsified with diesel fuel. Processes for producing stable micro-emulsions with 5-30% of bio-oil in diesel have been developed at CANMET [59] (Canada) and at the University of Florence [51, 38] where emulsions from 10 to 90% bio-oil in diesel were produced. The resultant emulsions showed promising ignition characteristics. A drawback of this approach is the cost of surfactants and the high energy required for emulsification. **In addition significantly higher levels of**

> **corrosion/erosion were observed in engine applications than with bio-oil or diesel alone.** (Bridgwater, 2004) [grifos nossos]

3.5.3 O potencial do biocarvão para geração de calor e na agricultura

Com base em experimentos, verificou-se o potencial de utilização do biocarvão obtido de madeira para a geração de calor, mesmo com baixo poder calorífico típico dos biocombustíveis (Sorgonà et al., 2016).

A continuidade das pesquisas sobre biocarvão é defendida por Sorgonà et al. (2016):

> With other specific analysis it will be possible to have the determination of additional characteristics necessary **for the insert of biochar in the list of soil amendment for an agricultural use**. (Sorgonà et al., 2016) [grifos nossos]

Os grifos desta citação expressam, mais uma vez, a importância fundamental das pesquisas científicas na produção e/ou biorrefino de bioprodutos com especificações padronizadas para que possam ganhar mercado.

3.6 Usinas de pirólise de biomassa: aspectos da área de negócios

Estas perspectivas devem ser analisadas não só pelos produtos gerados, mas também por sua padronização, ou seja, fabricantes de quaisquer tipos de máquinas que possam funcionar com biocombustíveis precisam de normas técnicas, para as propriedades fisico-químicas (e outros aspectos relacionados), de forma a definir adequadamente as especificações construtivas destas máquinas. As biorrefinarias têm um papel fundamental nesta padronização.

Barreiras de caráter econômico, pelo fato de ainda haver reservas de petróleo, resultam em concorrência direta entre combustíveis derivados do petróleo e, no caso brasileiro, o etanol de cana de açúcar, e os biocombustíveis obtidos por pirólise de resíduos, como aponta Bridgwater (2004).

Do ponto de vista do empresariado, como as tecnologias de pirólise ainda não se encontram disseminadas, existem riscos de investimentos em usinas que precisam ser minimizados através de incentivos fiscais e/ou taxação de combustíveis fósseis, além de serem estimulados por políticas públicas que garantam também ganhos em escala, ou seja, praticas dos geradores de resíduos de toda a sociedade, como estímulo à separação de resíduos, de forma a otimizar seu aproveitamento nas usinas de pirólise, em seus vários modos, como descrito na Figura 2, sugere Bridgwater (2004).

Alguns dos aspectos econômicos diretamente ligados à parte operacional de uma usina de pirólise de resíduos, aplicam-se também à realidade brasileira: "***Biomass is a diffuse resource****, arising over very large areas, and thus requiring large land areas,* ***with substantial logistical problems in collection and transport as well as high costs****.*" (Bridgwater, 2007). Considerando a extensão territorial do Brasil, usinas de pirólise podem enfrentar uma barreira de custos operacionais de logística para receber biomassa. Isto pode ser minimizado com a participação nos custos das prefeituras municipais ou empresas atuando em Parcerias Público-Privadas (PPPs), que disponham de recursos de logística otimizados.

As atividades de uma usina típica são relacionadas por Bridgwater (2007):

> In all cases, a commercial process comprises four main stages from feed reception to delivery of one or more useful products: • feed reception, storage, handling and pre-treatment; • conversion of solid biomass to a more usable form of energy by means such as gasification or pyrolysis; • primary product refining or clean-up; • conversion of the primary product to a marketable end product such as electricity, heat, liquid bio-fuels or chemicals (Bridgwater, 2007)

Cerca de 10 a 15% do investimento em uma usina de pirólise está no reator (Bridgwater, 2018). As demais atividades acima citadas completam os valores dispendidos na construção.

É importante lembrar que há também despesas com licenças ambientais, despesas com equipes multidisciplinares para a elaboração do projeto de implantação envolvendo possíveis desapropriações, se for cedido terreno público.

Interessados em investir também podem enfrentar as dificuldades semelhantes às da implantação de um aterro sanitário com relação à resistência de vizinhos da área da usina, que poderão ter seus imóveis desvalorizados, devido à circulação de veículos pesados trazendo resíduos e levando bioprodutos e rejeitos.

4 DISCUSSÕES

4.1 A ênfase em pirólise de madeira observada na literatura científica

Na pesquisa para a elaboração desta dissertação, concluída em maio de 2019, a literatura cientifica de pirólise aplicada de biomassa trazia a maior parte dos artigos abordando pirólise de madeira. Os artigos encontrados sobre o tratamento de resíduos sólidos urbanos por pirólise incluíam alguns dos tipos de resíduos relacionados adiante na seção 4.4, mas não uma solução abrangente, ainda que envolvesse também métodos não termoquímicos.

4.2 Lacunas nas pesquisas técnicas sobre pirólise de biomassa

Algumas das principais linhas de pesquisa nas quais os cientistas estão dedicando-se a preencher lacunas são apresentadas no Quadro 6.

Quadro 6: Algumas das principais lacunas nas pesquisas técnicas sobre pirólise de biomassa

TEMA	LACUNA OBSERVADA
Variação dos parâmetros para obtenção de produtos específicos	"***There seems a tradeoff*** *between biomass conversion and secondary decomposition for liquid oil production. Adjustments of reaction temperatures to optimize char and secondary decomposition will be helpful to obtain high liquid oil yields.*" (Akhtar & Saidina Amin, 2012).
Características desejáveis do biocarvão (*biochar*)	*"With other specific analysis* ***it will be possible*** *to have the determination of additional characteristics necessary* ***for the insert of biochar*** *in the list of soil amendment for na agricultural use."* (Sorgonà et al., 2016).
Características desejáveis do biocarvão (*biochar*)	*"The* ***elucidation*** *of the mechanism involved in biochar formation is fundamental, because a comprehensive understanding [...]"* (Zhang et al., 2019).
Cinética das reações químicas de pirólise e projeto de reatores	*"Decades of classical research on pyrolysis of lignocellulosic biomass has not yet produced a generalized formalism for design and prediction of reactor performance. Plagued by the limitations of experimental techniques such as thermogravimetric analysis (TGA) and extremely fast heating rates and low residence times to achieve high conversion to useful liquid products, researchers are now turning to molecular modeling to gain insights."* (Murillo, Biernacki, Northrup, & Mohammad, 2017).

Solução abrangente da geração de energia elétrica por meio de combustíveis de pirólise, considerando a heterogeneidade dos tipos de resíduos	Não encontrada na literatura científica pela pesquisa para esta dissertação.

Fonte: Autor desta dissertação, com base nas bases de dados científicas (seção 2.3).

4.3 Afirmações de pesquisadores sobre o futuro da pirólise de biomassa

Os parágrafos desta seção constituem uma seleção de conteúdos coletados de artigos com ênfase nas perspectivas futuras para o uso da pirólise de biomassa.

"*Pyrolysis is one of the* ***potential routes*** *to harness energy and useful chemicals from biomass.*" (Akhtar & Saidina Amin, 2012).

"*The production of chemicals from food waste is an* ***emerging area*** [...]" (Elkhalifa et al., 2019).

"Food waste contains various constituents such as amino acids, carbohydrates, lipids, phosphates, vitamins, and a variety of other constituents that contain carbon, ***which makes it a promising source for fuels and chemicals production***[6]*."* (Elkhalifa et al., 2019).

"There are other benefits that can be taken into consideration when ***assessing the feasibility*** *of the food/biomasses pyrolysis process [...]"* (Elkhalifa et al., 2019)

"The ***prospect*** *of syngas as a fuel in ICE* [Internal Combustion Engines] ***is believed*** *to be very promising and cost competitive when compared with natural gas [4]*[7] *[...]"* (Hagos et al., 2014).

"Introduction to the technology, feedstocks and science behind a ***promising source*** *of fuels and chemicals"* (Bridgwater, 2018) [subtítulo deste artigo]

4.4 Resíduos sólidos urbanos e pirólise

Esta seção foi elaborada com base no conteúdo obtido na visita técnica à Cooperativa Acácia de Araraquara e literatura científica.

---

[6] Grycová, B., Koutník, I., Pryszcz, A., 2016a. Pyrolysis process for the treatment of food the processing of food wastes. Polish J. Chem. Technol. 18, 19–23. https://doi.org/10.1515/pjct-2016-0004.

[7] [4] G.A.Richards, K. H. Casleton,and N. T. Weiland, "Syngas Utilization," in Synthesis Gas Combustion Fundamentals and Application,T.Lieuwen,V.Yang, andR.Yetter, Eds.,pp. 197– 222, Taylor and Francis, Boca Raton, Fla, USA, 2010.

Na literatura científica pesquisada para esta dissertação, não foram encontrados artigos propondo uma solução completa através de pirólise para tratamento e reaproveitamento de parte dos resíduos sólidos urbanos. Este tipo de resíduo caracteriza-se por ser muito heterogêneo (Jeevahan et al., 2019), dificultando enormemente o projeto de um reator de pirólise específico, porque as temperaturas de despolimerização das substâncias ali contidas são muito variáveis, além de haver substâncias não pirolisáveis.

Uma solução para este problema é separar os resíduos na geração destes, ou seja, que a população esteja conscientizada e também treinada para separar: 1) latas de alumínio (bebidas); 2) vidro; 3) embalagens longa-vida; 4) papel e papelão; 5) produtos eletroeletrônicos de qualquer tamanho; 6) pilhas e baterias; 7; talheres metálicos; 8) utensílios de cozinha fabricados com polímeros (plásticos etc.); 9) panelas; 10) móveis, cadeiras, mesas etc.; 11) utensílios de borracha; 12) cordões elétricos, dentre outros, que são alguns dos vários tipos de itens encontrados sacos de lixo destinados à coleta regular.

O termo treinamento foi utilizado no parágrafo anterior porque, mesmo se todos estes cuidados forem adotados, ainda restarão inúmeras questões de ordem prática, sobre a separação e descarte de itens específicos, como por exemplo: 1) um talher de alumínio com cabo de plástico; 2) uma embalagem longa-vida com restos de lasanha (separa como alimento, embalagem longa-vida, desperdiça água lavando a embalagem? Não é desperdício de água? Compensa?); 3) a qual depósito ou entreposto devem ser encaminhados rejeitos de grande porte como mobiliário, pneus, fogões, geladeiras, computadores, impressoras etc.; 4) medicamentos com data de validade expirada; 5) produtos de higiene pessoal como shampoos, hidratantes de pele etc.; 6) roupas de algodão; 7) roupas de tecido sintético (e como proceder se minha camisa é de algodão mas o fio utilizado na costura é sintético?)

Para auxiliar nestas questões, a Lei 12.305/2010 inclui o estímulo da formação de cooperativas de catadores, que são profissionais importantíssimos para evitar que resíduos sólidos residenciais urbanos sejam descartados desordenadamente pela população, em geral por desinformação, em locais que causem danos ao meio ambiente.

O profissional catador de resíduos sólidos também tem papel decisivo na disseminação de usinas de pirólise. Quanto mais homogêneo for o tipo de resíduo,

resultado do trabalho dos catadores, menos difícil será projetar reatores de pirólise específicos, como produtos mais facilmente biorrefináveis, simplificando a padronização de biocombustíveis e outros produtos gerados e, consequentemente, abrindo um grande mercado promotor do desenvolvimento sustentável, proposto pelo Relatório Brundtland.

Adicionalmente, catadores ou pequenas lojas, frequentemente abertas por entidades assistenciais, podem criar oportunidades de gerar renda por meio do reuso de produtos, por exemplo, venda de utensílios domésticos, roupas, mobiliário, CDs, DVDs, produtos eletrônicos, computadores antigos que possam ser reaproveitados para treinamento ou aplicações que não requeiram sistemas operacionais atualizados etc.

4.5 Resposta para a pergunta da pesquisa

Pergunta da pesquisa: Como as usinas de pirólise podem ser utilizadas para a geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos?

Com base na pesquisa realizada para esta dissertação, a resposta para esta pergunta envolve aspectos que dependem da ação integrada de diferentes grupos sociais, sendo os principais: geradores de resíduos sólidos urbanos, poder executivo, empresários, catadores cooperados, fabricantes de máquinas adaptadas para combustíveis de pirólise, poder legislativo, órgãos federais reguladores na área de combustíveis e comunidade científica.

Esta integração precisa ser realizada pelo governo federal, com base na política pública, instituída pela Lei 12.305/2010: a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Colocar cada vez mais em prática esta política pública, que ainda muito longe do ideal, por exemplo: 1) a separação adequada dos resíduos sólidos urbanos já na fonte geradora, o que envolve a conscientização da população, tornando isto uma prática rotineira e parte da cultura do país; 2) considerando que dentre os servidores públicos, em especial municipais, não é comum encontrar pessoal qualificado para implantar e operar usinas de pirólise com geração de energia elétrica, parcerias com a iniciativa privada neste sentido devem ser estimuladas, por exemplo, através de fontes de financiamento e integração da distribuição energia elétrica de combustível de pirólise com o sistema nacional; 3) facilitar a criação de cooperativas de catadores, reciclagem e reuso de resíduos e também fornecer apoio na forma de equipamentos (inclusive manutenção). A importância do papel dos catadores está expressa pela

inclusão destes profissionais e das cooperativas na lei que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Oferecer incentivos para que fabricantes de máquinas que possam ser acopladas a geradores elétricos adaptem seus projetos para o funcionamento destas com biocombustíveis de pirólise.

Regulamentar o setor de biocombustíveis para atrair investimentos em usinas de pirólise para geração de energia elétrica.

Estimular pesquisas científicas destinadas à inovação e projeto de reatores de pirólise adaptados às características dos resíduos tipicamente gerados no Brasil, o mesmo aplicando-se às biorrefinarias. Oferecer linhas de financiamento para que estas soluções cheguem ao mercado via empresas. Também para a comunidade científica e empresariado: trazer soluções de outros países, se aplicáveis no Brasil.

Os principais obstáculos para que surjam usinas de pirólise produzindo biocombustíveis para a geração de energia elétrica são: 1) falta de prioridade para a Política Nacional de Resíduos Sólidos, resultando em não integração dos esforços destes grupos sociais; 2) falta de recursos financeiros para a implementação destas ações integradas; 3) dificuldades em superar desafios relacionados ao projeto de reatores, biorrefino e outros aspectos técnicos; 4) concorrência com outras fontes de energia utilizadas na geração de eletricidade.

Considerando um cenário favorável e integração dos grupos sociais citados, uma vez que haja volume suficiente e tipos de resíduos adequados em um determinado município, um primeiro passo é implantar uma usina piloto com biorrefinaria e unidade geradora de energia elétrica como parte do projeto, divulgar os resultados nacionalmente (tanto os sucessos como os problemas) dentro do ambiente acadêmico e dos poderes executivo e legislativo e fabricantes de máquinas, com o objetivo de oferecer referências tanto para empresas interessadas em investir em pirólise como para o poder público, estimulando a replicação dos bons resultados e corrigindo/aperfeiçoando dispositivos e procedimentos. Esta estratégia pode contribuir para reduzir parcialmente os riscos do negócio por parte de empresários e do poder executivo, contribuindo para o surgimento de novas usinas e favorecendo a disseminação desta tecnologia de tratamento de resíduos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pirólise de biomassa, em especial de resíduos, é uma tecnologia promissora. Investimentos em pesquisa científica precisam continuar, com ênfase em reatores, nas suas diversas variações, para a produção otimizada de bio-óleos, *syngas* e biocarvão (*biochar*), de forma a tornar reaproveitáveis número mais amplo possível de tipos de resíduos.

Com relação à produção de energia elétrica, tem vantagens consideráveis por possibilitar um tempo de obtenção dos biocombustíveis da ordem de segundos ou horas, em comparação com meses ou anos dos métodos anaeróbios, em particular biogás de aterro sanitário.

Por outro lado, vários desafios ainda precisam ser superados: técnicos, adaptação de máquinas que possam funcionar acopladas a geradores elétricos, de regulamentação, formação de um mercado sólido com oferta e demanda de energia elétrica por biocombustíveis de pirólise e na separação dos resíduos adequados para este método termoquímico de tratamento de resíduos, em volume comercialmente viável.

Adicionalmente, por possibilitar a conversão de boa parte dos resíduos sólidos urbanos em produtos, dentro do conceito de Economia Circular, reduzindo a utilização de aterros sanitários, pode contribuir para consubstanciar no Brasil a definição de desenvolvimento sustentável do Relatório Brundtland.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akalin, M. K., & Karagöz, S. (2014). Analytical pyrolysis of biomass using gas chromatography coupled to mass spectrometry. *TrAC - Trends in Analytical Chemistry*, *61*, 11–16.

Akhtar, J., & Saidina Amin, N. (2012). A review on operating parameters for optimum liquid oil yield in biomass pyrolysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *16*(7), 5101–5109.

Bindini, G., Fantozzi, F., Bartocci, P., D´Alessandro, B., D´Amico, M., Laranci, P., … Zagaroli, M. (2015). Recovery of Precious Metals from Scrap Printed Cicuit Boards through Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, (111), 140–147.

Borges, L. A. C., Rezende, J. L. P. de, & Pereira, J. A. A. (2009). Evolution of the Environmental Legislation in Brazil. *Revista Em Agronegócios e Meio Ambiente*, *2*(3), 447–466.

BRASIL. (2010). LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm

BRASIL. (2019). Tabela de áreas do conhecimento. Disponível em: http://cnpq.br/documents/10157/186158/TabeladeAreasdoConhecimento.pdf

Bridgwater, A. V. (2007). The production of biofuels and renewable chemicals by fast pyrolysis of biomass. *International Journal of Global Energy Issues*, *27*(2), 160.

Bridgwater, T. (2018). Challenges and Opportunities in Fast Pyrolysis of Biomass: Part I. *Johnson Matthey Technology Review*, *62*(2), 150–160.

Bridgwater, A. V. (2004). Biomass fast pyrolysis. *Thermal Science*, *8*(2), 21–49.

Brigliadori, V. (2014). The Definition of “ BIOMASS ” in European and Italian Legislation: When it is Waste, *1*, 35–39.

Chiavari, G., & Prati, S. (2003). Analytical Pyrolysis as Diagnostic Tool in the Investigation of Works of Art. *Chromatography*, *58*(9), 543–554.

Degano, I., Modugno, F., Bonaduce, I., Ribechini, E., & Colombini, M. P. (2018). Recent Advances in Analytical Pyrolysis to Investigate Organic Materials in Heritage Science. *Angewandte Chemie - International Edition*, *57*(25), 7313–7323.

Dong, Q., Li, H., Niu, M., Luo, C., Zhang, J., Qi, B., … Zhong, W. (2018). Microwave pyrolysis of moso bamboo for syngas production and bio-oil upgrading over bamboo-based biochar catalyst. *Bioresource Technology*, *266*(May), 284–290.

Elkhalifa, S., Al-Ansari, T., Mackey, H. R., & McKay, G. (2019). Food waste to biochars through pyrolysis: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *144*(September 2018), 310–320.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2019a). O que é carvão vegetal. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000fbl23vn002wx5eo0sawqe3j8fin0u.html

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. (2019b). Produção de carvão vegetal. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000gc6fompl02wx5ok01dx9lc67w62o0.html

Garcia-Nunez, J. A., Pelaez-Samaniego, M. R., Garcia-Perez, M. E., Fonts, I., Abrego, J., Westerhof, R. J. M., & Garcia-Perez, M. (2017). Historical Developments of Pyrolysis Reactors: A Review. *Energy and Fuels*, *31*(6), 5751–5775.

Gil, A. C. (2017). *Como elaborar projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas.

Gussow, M. (2009). *Eletricidade básica (Coleção Schaum)* (2 ed.). Porto Alegre: Bookman.

Hagos, F. Y., Aziz, A. R. A., & Sulaiman, S. A. (2014). Trends of syngas as a fuel in internal combustion engines. *Advances in Mechanical Engineering*, *2014*.

Jeevahan, J., Anderson, A., Sriram, V., Durairaj, R. B., Joseph, G. B., & Mageshwaran, G. (2019). Waste into energy conversion technologies and conversion of food wastes into the potential products: A review. *International Journal of Ambient Energy*, *0750*.

Lachowicz, T., Zieba-Palus, J., & Kościelniak, P. (2014). Pyrolysis Gas Chromatography-Mass Spectrometry for the Characterization of Tire Marks for Forensic Analysis. *Analytical Letters*, *47*(7), 1107–1117.

Maia, C. B. F., Madari, B., & Novotny, E. H. (2011). Advances in Biochar Research in Brazil BT - Dynamic Soil, Dynamic Plant. *Dynamic Soil, Dynamic Plant*. Disponível em: http://www.alice.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/915016/1/AdvancesinBiocharResearchinBrazil.pdf%5Cnpapers2://publication/uuid/A1D89215-B93D-4778-8C6F-6CDD9E4E7DBE

Maschio, G., Lucchesi, A., & Stoppato, G. (1994). Production of syngas from biomass. *Bioresource Technology*, *48*(2), 119–126.

Murillo, J. D., Biernacki, J. J., Northrup, S., & Mohammad, A. S. (2017). Biomass pyrolysis kinetics: A review of molecular-scale modeling contributions. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, *34*(1), 1–18.

Organização das Nações Unidas. (2017). Conference and Reports on the Environment. Disponível em: http://research.un.org/en/docs/environment/conferences

Organização das Nações Unidas. (2019). Report of the World Commission on Environment and Development : note / by the Secretary-General. Disponível em: https://digitallibrary.un.org/record/139811

Raclavska, H., Ruzickova, J., Skrobankova, H., Koval, S., Kucbel, M., Raclavsky, K., … Juchelkova, D. (2018). Possibilities of the Utilization of char from the pyrolysis of Tetrapak. *Journal of Environmental Management*, (219), 231–238.

Rauch, R., Hrbek, J., & Hofbauer, H. (2015). Biomass Gasification for Synthesis Gas Production and Applications of the Syngas. *Advances in Bioenergy: The Sustainability Challenge*, *3*(August 2014), 73–91.

Sandun, F., Sushil, A., Chauda, C., & Naveen, M. (2006). Biorefineries: Current status, challenges and future direction. *Energy and Fuels*, *20*(3), 1727–1737.

São Paulo (Estado). (2019). Usinas de biogás de aterro sanitário. Disponível em: http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalcev2/intranet/Renovaveis/index.html

Shokrollahi Yancheshmeh, M. S., Seifzadeh Haghighi, S., Gholipour, M. R., Dehghani, O., Rahimpour, M. R., & Raeissi, S. (2013). Modeling of ethane pyrolysis process: A study on effects of steam and carbon dioxide on ethylene and hydrogen productions. *Chemical Engineering Journal*, *215–216*, 550–560.

Silva, T. N., De, L. M., & Campos, S. (2008). Evaluation of the Production and Quality of the Landfill Gas to Energy at Bandeirantes Landfill – SP, *13*, 88–96.

Sorgonà, A., Longo, L., Proto, A. R., Cavalletti, P., Cecchini, M., Salvati, L., … Colantoni, A. (2016). Characterization of Biochar and Syngas Obtained from Pellets of Grape Vine and Sun Flower Husk Using A Pyrolysis System. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, *223*, 871–878.

Zhang, Z., Zhu, Z., Shen, B., & Liu, L. (2019). Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. *Energy*, *171*, 581–598.

Zhao, Z., Huang, H., Wu, C., Li, H., & Chen, Y. (2002). Biomass Pyrolysis in an Argon/Hydrogen Plasma Reactor. *Engineering in Life Sciences*, *1*(5), 197.