



# PRODUÇÃO DE BIOCHAR POR PIRÓLISE DE RESÍDUOS VERDES DE UM HORTO E AVALIAÇÃO DO SEU POTENCIAL NO CRESCIMENTO DE *Lactuca sativa*

**JOÃO GABRIEL CHAIB**

Junho de 2019

**PRODUÇÃO DE *BIOCHAR* POR PIRÓLISE DE RESÍDUOS  
VERDES DE UM HORTO E AVALIAÇÃO DO SEU  
POTENCIAL NO CRESCIMENTO DE *Lactuca sativa***

João Gabriel Chaib  
1160047

**2019**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

**PRODUÇÃO DE *BIOCHAR* POR PIRÓLISE DE RESÍDUOS  
VERDES DE UM HORTO E AVALIAÇÃO DO SEU  
POTENCIAL NO CRESCIMENTO DE *Lactuca sativa***

João Gabriel Chaib  
1160047

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Energias Sustentáveis, realizada sob a orientação da Professora Nídia de Sá Caetano

**2019**

Instituto Superior de Engenharia do Porto  
Departamento de Engenharia Mecânica

POLITÉCNICO  
DO PORTO

isep

# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Manuel Carlos Malheiro de Carvalho Felgueiras  
Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Orientador**

Doutora Nídia de Sá Caetano  
Professora Coordenadora do Instituto Superior de Engenharia do Porto

## **Arguente**

Doutora Gisela Marta Teixeira de Sousa Oliveira  
Investigadora da Universidade Fernando Pessoa



## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos familiares, amigos, colegas de turma, colegas de trabalho, funcionários e docentes do ISEP que, de certa forma, participaram dessa jornada contribuindo diretamente ou indiretamente para a minha formação e para a consolidação dos meus objetivos. Obrigado.

## PALAVRAS-CHAVE

*Biochar*, Biomassa residual, *Lactuca sativa*, Pirólise, Reciclagem orgânica, Resíduos de jardinagem.

## RESUMO

O constante aumento de catástrofes ambientais gera uma maior discussão e implantação de medidas que visam proteger o planeta tendo em vista a sustentabilidade. Medidas como reaproveitamento e valoração de resíduos e utilização de energias limpas, visando-se controlar alterações climáticas e esgotamento de recursos, são discutidas em convenções sobre esse tema. Com isso, há aumento da preocupação com manutenção de áreas verdes, havendo seguramente maior geração de resíduos verdes, ou seja, maior oferta de biomassa. A biomassa pode ser utilizada em inúmeros setores, desde a geração de bio-óleo para combustíveis, até à produção de *biochar* para correções de solo. O objetivo do presente trabalho foi determinar as condições ideais de produção de *biochar* (fase sólida) por meio da pirólise da biomassa residual proveniente de um horto, e avaliar a utilização do mesmo como condicionador de substrato para o crescimento de Alface (*Lactuca sativa*). O Horto da Boavista produz cerca de 400 kg/mês de biomassa oriunda de serviços de jardinagem, em sua maioria. A biomassa foi proporcionada entre galhos, folhas e ervas, e caracterizada quanto ao teor de humidade, cinzas, lenhina e poder calorífico superior. Foi realizado um planeamento experimental compreendendo 3 fatores (temperatura, velocidade de aquecimento e tempo de patamar), e foram realizados ensaios de pirólise com temperaturas de 300, 375 e 450 °C; velocidades de aquecimento de 10, 15, 20 °C/minuto; e tempos de patamar de 10, 15 e 20 minutos. Foram caracterizados os produtos da pirólise (rendimento em sólido e líquido) e poder calorífico superior do *biochar*. Um *biochar* comercial e um carvão vegetal comum foram testados em mistura com um substrato comum para plantas em 5 proporções em massa: 0%, 25%, 50%, 75% e 100%. Avaliou-se a altura média das plantas, número de folhas verdadeiras, massas frescas das raízes e parte aérea e massas secas das raízes e parte aérea para todos os tratamentos. Foram obtidos resultados satisfatórios para a produção de *biochar* em fase sólida, sobretudo para os parâmetros de 375 °C de temperatura patamar, 15 °C/minuto de velocidade de aquecimento e 15 minutos de tempo de patamar. O *biochar* gerado com temperaturas de patamar de 300 °C, de maior rendimento, apresentou coloração castanha, o que

sugere a ocorrência de carbonização incompleta do mesmo. Ainda, o *biochar* gerado neste estudo, apresentou valor de poder calorífico superior abaixo do esperado, fato que se deve, principalmente, ao tipo de biomassa utilizada. Revelou-se, entretanto, produtivo para o crescimento de mudas de alface quanto adicionado em proporção de 25% ao substrato comercial, sendo que o linear aumento dessa proporção indicou prejuízos qualitativos às mudas já que, possivelmente, não oferece de imediato os nutrientes essenciais para o desenvolvimento das mesmas. Considerando-se o rendimento e a proporção ideais encontrados neste estudo, é possível afirmar que o horto poderia gerar 2256 kg/ano de *biochar*, condicionando 12.891 tabuleiros/ano de alface e economizando 2256 kg/ano de substrato.

**KEYWORDS**

*Biochar, Garden Waste, Lactuca sativa, Organic recycling, Pyrolysis, Residual Biomass*

**ABSTRACT**

*The constant increase of environmental catastrophes leads to increase discussions and implementation of measures aiming to protect the planet towards sustainability. Measures such as reuse and valorization of waste and use of clean energy, aiming to control climate change and depletion of resources, are addressed in conventions about these themes. Therefore, there is also an increase in the concern with the maintenance of green areas, ending in a higher generation of green waste, which means a higher supply level of biomass. Biomass can be used in several sectors, from the generation of bio-oil for fuels, to the production of biochar for soil correction. The objective of this thesis was to search for the ideal conditions of biochar production using the pyrolysis process of the residual biomass available in a commercial garden center and to evaluate its use as a soil conditioner for lettuce (*Lactuca sativa*) development. Horto da Boavista produces around 400 kg/month of biomass, mostly from gardening services. Biomass was separated in branches, leaves and herbs, and each component was characterized for ash, moisture, lignin content and higher heating value. Pyrolysis tests were carried out with landing temperatures of 300, 375, 450 °C; heating rates of 10, 15, 20 °C/minute and landing times of 10, 15 and 20 minutes. The pyrolysis products (solid and liquid) were characterized in yield and biochar for its higher heating value. A commercial biochar and a common charcoal were tested together with a common commercial soil for plants in 5 weight proportions: 0%, 25%, 50%, 75% and 100%, evaluating the average height of plants, number of true leaves, fresh root and shoot masses and dry root and shoot masses for all treatments. Satisfactory results were obtained for the production of solid biochar, mainly for the parameters of 375 °C of landing temperature, 15 °C/minute of heating rate and a landing time of 15 minutes. The highest yields of biochar produced with temperatures of 300 °C revealed a dark brown color that did allowed one to suppose the occurrence of complete carbonization of the bio-waste samples. In general, the biomass produced in this study showed a lower higher heating value than expected, a fact that could be mainly due to the type of biomass used. The biochar proved to be productive for the lettuce growth when added in a proportion of 25% to the commercial soil, and the linear increase of this proportion revealed qualitative losses to the seedlings*

*since it probably does not immediately provide the essential nutrients for their development. Considering the ideal yield and proportion found in this study, it is possible to conclude that the garden center would produce 2256 kg/year of biochar, conditioning 12,891 trays/year of lettuce and saving 2256 kg/year of substrate.*

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA DE PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA (MME, 1982)	11
FIGURA 2 – DIAGRAMA DE PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA (ADAPTADO DE BRIDGWATER & PEACOCKE, 2000)	20
FIGURA 3 – LOCALIZAÇÃO DO HORTO DA BOAVISTA (GOOGLE EARTH, 2018)	34
FIGURA 4 – SEPARAÇÃO DA BIOMASSA UTILIZADA EM GALHOS, FOLHAS E ERVAS (ARQUIVO DO AUTOR)	36
FIGURA 5 – TRITURAÇÃO E SECAGEM DO MATERIAL (ARQUIVO DO AUTOR)	37
FIGURA 6 – AGITAÇÃO CONSTANTE EM BANHO TERMOSTÁTICO E EBULIÇÃO DA MISTURA (ARQUIVO DO AUTOR)	38
FIGURA 7 – CALORÍMETRO PARA DETERMINAÇÃO DO PODER CALORÍFICO SUPERIOR (ARQUIVO DO AUTOR)	39
FIGURA 8 – FORNO PIROLÍTICO DO TIPO <i>SPLIT</i> UTILIZADO (ARQUIVO DO AUTOR)	42
FIGURA 9 – CESTO DE PIRÓLISE PREENCHIDO COM BIOMASSA TRITURADA (ARQUIVO DO AUTOR)	43
FIGURA 10 – <i>KITASATO</i> PARA COLETA DO BIO-ÓLEO (ARQUIVO DO AUTOR)	44
FIGURA 11 – <i>BIOCHAR</i> PENEIRADO E TRITURADO (ARQUIVO DO AUTOR)	46
FIGURA 12 – TABULEIRO COM SEMENTES <i>PELLETIZADAS</i> DE ALFACE (ARQUIVO DO AUTOR)	47
FIGURA 13 – MUDAS DE ALFACE EM MEDIÇÕES DE ALTURA E NÚMERO DE FOLHAS VERDADEIRAS (ARQUIVO DO AUTOR)	48
FIGURA 14 – OBSERVAÇÃO DE GERMINAÇÃO DOS TRATAMENTOS NO TABULEIRO (ARQUIVO DO AUTOR)	48
FIGURA 15 – <i>BIOCHAR</i> GERADO EM ENSAIOS À TEMPERATURA DE PATAMAR DE 300 °C EM COLORAÇÃO MISTA (À DIREITA) EM COMPARAÇÃO COM ENSAIO DE 375 °C (À ESQUERDA) (ARQUIVO DO AUTOR)	58
FIGURA 16 – VARIAÇÃO DE RENDIMENTO POR PARÂMETROS	63
FIGURA 17 – TABULEIRO COM TRATAMENTOS DE MUDAS DE ALFACE EM ESTÁGIO DE ANÁLISE DE PARÂMETROS (ARQUIVO DO AUTOR)	66
FIGURA 18 – ALTURA MÉDIA DAS PLANTAS PARA OS CONDICIONADORES A E B NOS TRATAMENTOS ESTUDADOS	68
FIGURA 19 – MASSAS SECA E FRESCA DA PARTE AÉREA PARA O CONDICIONADOR B	69
FIGURA 20 – MASSAS SECA E FRESCA DAS RAÍZES PARA O CONDICIONADOR B	69
FIGURA 21 – TESTE RODADO PARA CONDICIONADOR TIPO A COM OS DADOS DE ALTURA DAS PLANTAS (AP)	99
FIGURA 22 – TESTE RODADO PARA CONDICIONADOR TIPO B COM OS DADOS DE ALTURA DAS PLANTAS (AP)	99
FIGURA 23 – TESTE RODADO PARA CONDICIONADOR TIPO A COM OS DADOS DE NÚMERO DE FOLHAS VERDADEIRAS (NFV)	100
FIGURA 24 – TESTE RODADO PARA CONDICIONADOR TIPO B COM OS DADOS DE NÚMERO DE FOLHAS VERDADEIRAS (NFV)	100



## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – RENDIMENTOS DE PESO DE PRODUTOS DE PIRÓLISE EM PERCENTAGEM (BASE SECA)	19
TABELA 2 – TIPOS DE REATORES PIROLÍTICOS E SUAS CARACTERÍSTICAS	21
TABELA 3 – VALORES DOS PARÂMETROS DO DESENHO COMPOSTO CENTRAL	40
TABELA 4 – COMBINAÇÃO DE PARÂMETROS GERADOS PELO <i>SOFTWARE</i> ESTATÍSTICO JMP	40
TABELA 5 – RESULTADOS E REFERÊNCIAS PARA TEOR DE HUMIDADE DA BIOMASSA UTILIZADA	51
TABELA 6 – RESULTADOS E REFERÊNCIAS PARA TEOR DE CINZAS DA BIOMASSA UTILIZADA	53
TABELA 7 – RESULTADOS E REFERÊNCIAS PARA PODER CALORÍFICO SUPERIOR DA BIOMASSA UTILIZADA	54
TABELA 8 – RESULTADOS E REFERÊNCIAS PARA TEOR DE LENHINA TOTAL DA BIOMASSA UTILIZADA	55
TABELA 9 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE PIRÓLISE	57
TABELA 10 – PARÂMETROS E RESULTADOS DOS ENSAIOS ADICIONAIS COM TEMPERATURA DE PATAMAR 300 °C	58
TABELA 11 – PARÂMETROS E RESULTADOS DOS ENSAIOS ADICIONAIS COM TEMPERATURA DE PATAMAR 375 °C	59
TABELA 12 – ESTIMATIVA DE PARÂMETROS <i>FIT MODEL</i>	61
TABELA 13 – RESUMO DOS EFEITOS DOS PARÂMETROS	61
TABELA 14 – SOLUÇÃO DADA EM PONTO CRÍTICO	62
TABELA 15 – COEFICIENTES POR CRUZAMENTO DE PARÂMETROS	62
TABELA 16 – RESULTADOS MÉDIOS DAS MEDIÇÕES DOS PARÂMETROS DOS DIFERENTES TRATAMENTOS DE CULTIVO DE <i>LACTUCA SATIVA</i>	67



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	OBJETIVOS	3
1.2	ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1	BIOMASSA	7
2.2	PIRÓLISE	16
2.3	BIOCHAR	22
2.4	ALFACE ( <i>Lactuca sativa</i> )	26
3	METODOLOGIA.....	31
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	31
3.2	CASO DE ESTUDO	33
3.3	METODOLOGIA APLICADA	35
3.3.1	Caracterização da biomassa utilizada.....	36
3.3.2	Ensaios de pirólise .....	39
3.3.2.1	Planeamento experimental dos ensaios de pirólise .....	39
3.3.2.2	Descrição experimental do processo de pirólise .....	41
3.3.3	Caracterização dos produtos da pirólise .....	44
3.3.3.1	Quantificação do rendimento em fase sólida (biochar) .....	44
3.3.3.2	Quantificação do rendimento em fase líquida (bio-óleo).....	44
3.3.3.3	Determinação do poder calorífico do biochar .....	45
3.3.4	Utilização do biochar no cultivo da alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) .....	45
3.3.4.1	Descrição do procedimento de composição de substrato e semeadura da Alface ( <i>Lactuca sativa</i> ) .....	45
3.3.4.2	Análise de parâmetros de crescimento dos cultivos da Alface ( <i>Lactuca sativa</i> ).....	47
3.3.5	Análise dos resultados.....	48

3.3.5.1	Descrição do método analítico .....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA</b>	<b>51</b>
4.1.1	Teor de Humidade (TH) .....	51
4.1.2	Teor de Cinzas (TC) .....	52
4.1.3	Poder Calorífico Superior (PCS) .....	53
4.1.4	Teor de Lenhina Total (TLT) .....	55
<b>4.2</b>	<b>ENSAIOS DE PIRÓLISE</b>	<b>56</b>
4.2.1	Rendimento em Sólido ( <i>biochar</i> ).....	58
4.2.2	Análise Estatística do Rendimento em Sólido .....	60
4.2.3	Rendimento em Líquido (Bio-óleo) .....	63
4.2.4	Poder Calorífico Superior do <i>Biochar</i> .....	65
<b>4.3</b>	<b>CRESCIMENTO DOS CULTIVOS DE ALFACE (<i>Lactuca sativa</i>)</b>	<b>66</b>
<b>4.4</b>	<b>AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ADITIVAÇÃO DE SOLO COM <i>BIOCHAR</i> GERADO A PARTIR DOS RESÍDUOS PRODUZIDOS NO HORTO</b>	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
<b>5.1</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>75</b>
<b>5.2</b>	<b>SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>76</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>79</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>91</b>
<b>7.1</b>	<b>ANEXO A – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>91</b>
7.1.1	ANEXO A.1 – Determinação do Teor de Humidade (TH).....	91
7.1.2	ANEXO A.2 – Determinação do Teor de Cinzas (TC).....	92
7.1.3	ANEXO A.3 – Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) .....	93
7.1.4	ANEXO A.4 – Determinação do Teor de Lenhina Total .....	94
<b>7.3</b>	<b>ANEXO B – CÁLCULOS DE PROPORÇÃO REAL EM BASE HÚMIDA</b>	<b>97</b>
<b>7.5</b>	<b>ANEXO C – CORREÇÃO DE TEMPERATURA DE PATAMAR DO PIROLISADOR</b>	<b>98</b>
<b>7.7</b>	<b>ANEXO D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (TESTE DE KRUSKAL-WALLIS)</b>	<b>99</b>

# INTRODUÇÃO

- 1.1 OBJETIVOS
- 1.2 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

## 1 INTRODUÇÃO

Os grandes desafios ambientais do século XXI estão nas principais pautas políticas mundiais e são discutidos em todo o planeta. Medidas como a redução dos gases do efeito estufa, reaproveitamento e valoração de resíduos (do lixo) e utilização de energias limpas<sup>1</sup>, visando-se controlar alterações climáticas e esgotamento de recursos, são incansavelmente abordadas em convenções de grandes e pequenos portes, por entidades públicas ou privadas (Jacobi, 2003). Tais controles, por sua vez, têm como objetivo principal a sadia qualidade de vida humana, com devido acesso a recursos ambientais, enfocando-se também em gerações futuras. É o intitulado desenvolvimento sustentável.

Com o aumento dos problemas associados à temática, como grandes catástrofes ambientais, esgotamento de recursos, entre outros, e também o aumento das discussões de medidas a serem tomadas, pode-se sugerir uma maior conscientização por parte da sociedade, leiga ou não (Jacobi, 2003). Tal consciência ou valorização ambiental pode atingir os cidadãos de maneira com que deem, cada vez mais, importância diferenciada aos espaços verdes os quais estão em contato usualmente. A manutenção e cuidado com espaços verdes que nos cercam, urbanos ou rurais, além da preocupação com cultivos naturais que não agridam a saúde ou o meio ambiente tornam-se exemplos do que os cidadãos vêm a considerar como parte do próprio dever perante a atual conjuntura (Barros, 2003).

Nesse sentido, pode-se afirmar que há, então, potencial aumento de organizações que proporcionam implementações e manutenções de áreas verdes, sobretudo em áreas urbanas, onde, embora exista interesse e apego, há menor priorização pela atividade e maior concentração de renda (Correa, 1995). Portanto, encontram-se disponíveis para satisfação dos deveres pessoais do cidadão as empresas que oferecem serviços de jardinagem e paisagismo, assim como aquelas que comercializam os produtos relacionados. Consequentemente, com o aumento de serviços voltados para esta área, há significativo aumento de resíduos gerados por atividades relacionadas aos espaços verdes, sendo que os mesmos são majoritariamente de origem vegetal, seres vivos ou que estiveram recentemente vivos, matéria então classificada como biomassa (Lima & Moura, 2016).

---

<sup>1</sup> Entende-se por energias limpas aquelas produzidas prevendo-se reduzidos impactos ambientais negativos, sendo geralmente provenientes de fontes renováveis.

Especificamente para Portugal, os últimos 20 anos propiciaram o aumento da preocupação com catástrofes ambientais, sobretudo pelas alterações climáticas. O problema dos incêndios é pontualmente um dos principais relacionados ao ambiente que o país apresenta, sendo relacionado aos aumentos de temperatura e redução de precipitação em áreas sujeitas ao surgimento de incêndio. Devido a este fato, o governo português alterou em 2018 uma lei que obriga os cidadãos a tomarem medidas que auxiliem na redução dos problemas de queimadas, sobretudo relacionados à limpeza de terrenos, anunciando maiores fiscalizações e multas para aqueles não a cumprirem (Portugal, 2018). O fato atual contribui para o aumento da geração de resíduos verdes, ou seja, aumento da biomassa disponível pelo país. Sabendo-se que a biomassa é definida como “toda a matéria orgânica utilizável para a geração de energia e biocombustíveis”, ou, ainda, “gama de materiais que podem ser usados como combustíveis ou matérias-primas para inúmeras utilizações” (Lima & Moura, 2016), temos que o lixo gerado pelas atividades anteriormente descritas representa grande potencial de reutilização. Com a grande oferta desse material, faz-se, então, necessários, os estudos que aliem tal fato com a valoração de resíduos e geração de energia limpa, integrando-se às medidas ambientais globalizadas em pauta para o desenvolvimento sustentável.

O alinhamento da reutilização do resíduo verde com as necessidades ambientais atuais aparenta depender de uma sociedade em bom nível de avanço tecnológico, a qual poderia vir a viabilizá-la por meios próprios. De fato, temos um consolidado cenário da utilização de biocombustíveis para veículos, ou de bio-óleos para geração de energia elétrica, nos Estados Unidos, Brasil, China e Europa (Lopes, 2008).

Porém, com uma breve pesquisa sobre os povos ancestrais, os primitivos que habitaram por milhares de anos o mesmo planeta que o nosso, conclui-se que os mesmos já praticavam essa reutilização. A geração de calor por meio da queima do material pode-se considerar a primeira forma de reaproveitamento da biomassa, datada da época do descobrimento do fogo pelo Homem, por volta de 500.000 a.C (Guardabassi, 2006 *apud* IEEUSP, 2018a).

Soma-se a isto o fato da descoberta, pelos navegantes descobridores das Américas, da “Terra Preta do Índio”. Uma terra de cor escura e fértil, situada no entorno de povoados indígenas, identificada na época do descobrimento do Brasil. Sobre a tal terra, afirmou-se que a mesma é proveniente de reinserção de dejetos orgânicos no solo, carbonizados ou não, propositadamente ou não, justificando os benefícios qualitativos da mesma. Há quem conclua que o material é resultado de um sistema agricultor sustentável e eficiente praticado pelos indígenas ao longo de milhares de anos. Com isso, há, indiscutivelmente, indícios de que há aproximadamente 30 mil anos a espécie humana já havia gerado uma espécie de carvão por meio da queima de amontoados de biomassa. É o surgimento do *biochar* (PRONATURA, 2012).

O *biochar* representa matéria com grande potencial de aproveitamento dentro da gama de biomassa disponível, com aplicações nomeadamente energéticas ou para

remediação e correção de solos e até mesmo promovendo o sequestro de gás carbônico da atmosfera.

A sociedade atual tem, inevitavelmente, de buscar referências nos seus ancestrais, os quais supostamente protegeram o planeta de disfunções climáticas, mantendo os recursos ambientais íntegros. Aliando-se a isso temos o grande avanço científico e tecnológico, ferramenta essencial para o desenvolvimento de medidas que se tornem soluções para revertermos a então problemática ambiental que assola o planeta. O reaproveitamento da biomassa como material produtivo representa atividade de extremo potencial frente aos fatores inerentes a esta matéria, sendo que a possibilidade de “retornar” aos espaços verdes o *biochar* de forma a otimizar suas funções pode representar o fechamento de um ciclo importante para a redução dos problemas ambientais atuais vivenciados pela população.

## 1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo determinar as condições ideais de produção de *biochar* em fase sólida por meio da pirólise da biomassa (matéria-prima) proveniente de um horto e avaliar a utilização do mesmo como condicionador de substrato para o crescimento de uma hortaliça.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Produzir, por meio da pirólise, o *biochar* sólido proveniente de amostras representativas de resíduos de jardinagem do centro comercial Horto da Boavista previamente secas, compostas por galhos folhas e ervas na proporção de 40%, 35% e 25% em base húmida, respetivamente, e analisar as respetivas características de rendimentos;
- Analisar o crescimento de cultivos de Alface (*Lactuca sativa*) utilizando-se de substratos condicionados por *biochar* nas seguintes proporções em massa de *biochar*:substrato vegetal comum: 0:100%, 25:75%, 50:50%, 75:25% e 100:0%.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

Esta Dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. No primeiro capítulo, foi feito um breve enquadramento do tema e apresentados os objetivos do trabalho. Após a introdução, no capítulo 2, estão apresentadas as revisões da literatura acerca das origens e características do *biochar*, proveniente da biomassa, assim como do processo de pirólise e as principais características de crescimento de alface, hortaliça objeto de estudo neste trabalho. O capítulo 3 tem como foco apresentar o caso de estudo e descrever as metodologias aplicadas frente às medições e análises propostas tanto para

o processo de pirólise da biomassa – e geração do *biochar*, quanto para a germinação de sementes e crescimento de mudas de alface. O capítulo 4 é dedicado à apresentação dos resultados e discussões a respeito dos mesmos, no mesmo âmbito da divisão proposta no capítulo anterior. No capítulo 5 serão apresentadas as conclusões do trabalho, assim como sugestões para trabalhos futuros.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 BIOMASSA
- 2.2 PIRÓLISE
- 2.3 BIOCHAR
- 2.4 ALFACE (*Lactuca sativa*)



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BIOMASSA

O termo biomassa foi inicialmente introduzido pelo físico Eugene Adam, sendo o mesmo associado por diversos autores ao material produzido por seres dos reinos vegetal, animal, fungi e protista. É representado pela matéria orgânica originada por meio do princípio da absorção da energia do sol pelas células dos vegetais para realização da fotossíntese, carreada ao longo das etapas da cadeia alimentar (Bristoti & Silva, 1993 *apud* Lima & Moura, 2016).

Nesse contexto, a biomassa pode ser vista como uma gama de materiais que podem ser usados como combustíveis ou matérias-primas para inúmeras utilizações, sendo, essencialmente, derivados de organismos vivos ou que estiveram recentemente vivos (Lima & Moura, 2016), excluindo-se das definições os tradicionais combustíveis fósseis, que utilizaram-se de milhões de anos para conversão em estados em que são encontrados atualmente.

Tratando-se do contexto energético, a biomassa pode ser dita como toda matéria orgânica utilizável para geração de energia (Sousa *et al.*, 2015). Essa matéria orgânica, de origem vegetal ou animal, deriva-se de insumos como grãos, árvores, plantas, além dos resíduos florestais e agrícolas (Hinrichs *et al.*, 2010).

Por armazenar a energia solar em resultado da fotossíntese, a biomassa pode ser referenciada como uma fonte natural de energia, tendo, normalmente, a hemicelulose, a lignina e a celulose como principais componentes, havendo variações para estas proporções, dependendo da sua natureza (Ushima, 2006 *apud* IEEUSP, 2018a). Vale ressaltar que a biomassa também é composta por diversos sais e outros minerais que podem influenciar as reações de conversão térmica para aproveitamento energético da mesma.

Em Portugal, o Decreto-Lei nº178/2006, de 5 de setembro, emitido pelo Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional, refere, em seu Artigo 3º, a Biomassa como:

*“Produtos que consistem, na totalidade ou em parte, numa matéria vegetal proveniente da agricultura ou da silvicultura, que pode ser utilizada como combustível para efeitos de recuperação do seu teor energético, bem como os resíduos a seguir enumerados quando utilizados como combustível: i) Resíduos vegetais provenientes da agricultura e da silvicultura*

*que não constituam biomassa florestal ou agrícola; ii) Resíduos vegetais provenientes da indústria de transformação de produtos alimentares, se o calor gerado for recuperado; iii) Resíduos vegetais fibrosos provenientes da produção de pasta virgem e de papel se forem co-incinerados no local de produção e o calor gerado for recuperado; iv) Resíduos de cortiça; v) Resíduos de madeira, com exceção daqueles que possam conter compostos orgânicos halogenados ou metais pesados resultantes de tratamento com conservantes ou revestimento, incluindo, em especial, resíduos de madeira provenientes de obras de construção e demolição”.*

O decreto diferencia, ainda, biomassa agrícola de florestal, conforme a seguir:

*“Biomassa agrícola: a matéria vegetal proveniente da actividade agrícola, nomeadamente de podas de formações arbóreo-arbustivas, bem como material similar proveniente da manutenção de jardins;*

*Biomassa florestal: a matéria vegetal proveniente da silvicultura e dos desperdícios de actividade florestal, incluindo apenas o material resultante das operações de condução, nomeadamente de desbaste e de desrama, de gestão de combustíveis e da exploração dos povoamentos florestais, como os ramos, bicadas, cepos, folhas, raízes e casca”.*

Por sua vez, o Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho, redefiniu alguns termos, sendo os bio-resíduos constituídos por:

*“(…) resíduos biodegradáveis de espaços verdes, nomeadamente os de jardins, parques, campos desportivos, bem como os resíduos biodegradáveis alimentares e de cozinha das habitações, das unidades de fornecimento de refeições e de retalho e os resíduos similares das unidades de transformação de alimentos”.*

O aproveitamento energético da biomassa apresenta longa data de existência. Estima-se que as primeiras utilizações da biomassa em sua forma bruta estão relacionadas à geração de calor, com queima de material proveniente de árvores, para proteção humana contra temperaturas baixas e também para cozimento de alimentos crus. Tais atividades estão atreladas à época do descobrimento do fogo pelo Homem, por volta de 500.000 a.C (Guardabassi, 2006 *apud* Lima & Moura, 2016).

A partir desse marco na história da humanidade, a madeira foi, ao longo dos anos, a principal fonte energética utilizável, sobretudo no preparo de alimentos e aquecimento de ambientes. Embora óleos de origem animal e vegetal também tivessem determinadas utilizações, o grande destaque, para o consumo de biomassa como matéria prima, deu-

se no período que antecedeu a revolução industrial, com o consumo de lenha na siderurgia (Lima & Moura, 2016).

Ainda no contexto histórico da utilização da biomassa, afirma-se que o uso de madeira originária de florestas nativas tem significativa participação no desmatamento das áreas verdes do planeta, sobretudo nas florestas nativas europeias, africanas e americanas. No Brasil, a decadência da Mata Atlântica baseou-se principalmente na exploração da madeira como fonte de energia de forma não sustentável (IEEUSP, 2018a).

Em função destes fatos, pode-se afirmar que o consumo de biomassa foi visto de forma negativa por longos períodos, sendo usualmente atribuído à fonte de combustível para países subdesenvolvidos, segundo Lima & Moura (2016). Com as crises mundiais do fornecimento de petróleo da década de 1970, o uso da biomassa como fonte de energia recebeu diferente valoração, sendo apresentado como uma opção alternativa em substituição aos combustíveis usuais (IEEUSP, 2018a).

Conforme já explicitado anteriormente, a biomassa é constituída de lignina, hemicelulose e celulose, com variadas quantidades de sais minerais.

A celulose está significativamente presente na parede celular dos vegetais, sendo um carboidrato ou polissacarídeo de cadeia longa e não ramificada, constituindo estrutura de microfibras compactas com composição elementar  $C_6H_{10}O_5$ . Representa, então, maior resistência a decomposições, solubilidade, digestão, entre outros (Brito, 2008).

A hemicelulose, por sua vez, é um polissacarídeo de composição variada. Revela uma estrutura próxima à da celulose, entretanto com possíveis ramificações e encurtamentos. Justamente em função das aberturas na composição estrutural e ao menor grau de polimerização, a hemicelulose apresenta menor estabilidade que a celulose (Ogata, 2013).

Por fim, a lignina é a polimerização de álcoois, resultando em diferentes tipos de composto e estrutura. Pode ser referenciada como uma macromolécula que confere proteção biológica e mecânica para os tecidos vegetais. Tal variação confere maior ou menor aptidão para decomposição, em função dos devidos fins escolhidos para a biomassa em questão.

Em suma, conforme explicitado por Ogata (2013), a biomassa é formada, basicamente, por carbono, sendo a maior parte da matéria seca (de 30 a 60%), seguido do oxigênio, enquanto o hidrogênio é o terceiro maior componente com aproximadamente 5% da matéria seca, além, dos outros componentes seguintes.

A biomassa enquanto matéria-prima pode ser classificada em função da sua origem. Conforme a autora Marques (2015), podem ser chamados de Biomassa Primária os materiais retirados diretamente da natureza, como, por exemplo, resíduos florestais. Já a Biomassa Secundária é representada por materiais obtidos por meio de processamento físico, químico ou biológico dos recursos primários. Por fim, a Biomassa Terciária engloba materiais biodegradáveis originados por homem e animais.

A diferenciação das fontes de biomassa é de suma importância para estudo da eficiência da mesma como fonte para geração de energia, sobretudo pela determinação do mais adequado processo de transformação a ser aplicado. Ainda, é igualmente importante que sejam analisadas a origem e finalidade de determinada bioenergia, para identificação dos seus respectivos potenciais e seus impactos.

Nessa abordagem, diversos autores, incluindo o Estudo Municípios Canavieiros de 2013, diferenciam as fontes de biomassa em 3 categorias:

Vegetais não lenhosos: associados a culturas ou cultivos anuais, classificados de acordo com a principal substância de armazenamento de energia.

- Sacarídeos: açúcares (ex: cana-de-açúcar);
- Celulósicos: ausência de reservas (ex: capim);
- Amiláceos: amido (ex: milho);
- Oleaginosas: óleos e gorduras (ex: óleo de girassol);
- Aquáticos: plantas aquáticas (ex: algas e microalgas).

Vegetais lenhosos: associados aos vegetais capazes de produzir madeira como tecido de suporte.

Resíduos orgânicos: associados aos subprodutos de atividades humanas, classificadas de acordo com as origens:

- Resíduos Agropecuários: produção agrícola ou pecuária (ex: esterco);
- Resíduos Agroindustriais: indústria (ex: bagaço);
- Resíduos Urbanos: resíduos sólidos gerados nos ambientes doméstico e comercial (ex: podas urbanas).

Outras formas de categorizar a biomassa, consideram-na como fonte de matéria-prima para biocombustíveis de primeira, segunda e terceira geração, conforme se trate de biomassa habitualmente usada para fins alimentares, residual ou não alimentar produzida especificamente para o efeito, ou ainda, a “nova biomassa” (caso das microalgas, cianobactérias, leveduras ou insetos, entre outros), respectivamente.

A conversão da biomassa em energia ocorre sob a forma de calor ou eletricidade, ou, ainda, de combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos, que podem vir a serem utilizados para a produção de energia final (biocombustíveis).

Tais processos podem ser classificados como termoquímicos ou biológicos, sendo que diversos são os fatores de escolha de um processo. A origem, o tipo e disponibilidade da matéria-prima, a forma de energia pretendida, a sua procura, entre outros, são exemplos de ponderações na escolha, conforme citam Fiorese *et al.* (2014).

Processos biológicos de conversão são processos em que há utilização de agentes biológicos, como microrganismos, para converter biomassa em açúcares e posteriormente em biocombustíveis líquidos ou gasosos (Marques, 2015). Os processos que exemplificam esta categoria são: fermentação alcoólica, compostagem, digestão anaeróbia, entre outros.

Por sua vez, segundo o mesmo autor, os processos de conversão termoquímica caracterizam-se pela ocorrência de transformações químicas que são desencadeadas pelas condições de temperatura utilizadas no processo. Os processos que exemplificam esta categoria são: pirólise, gaseificação, combustão, entre outros (Marques, 2015).

O diagrama (Figura 1) proposto por um conjunto de estudos (MME, 1982) define, dentre as fontes de biomassa, os respectivos processos de conversão associados e o produto energético final.

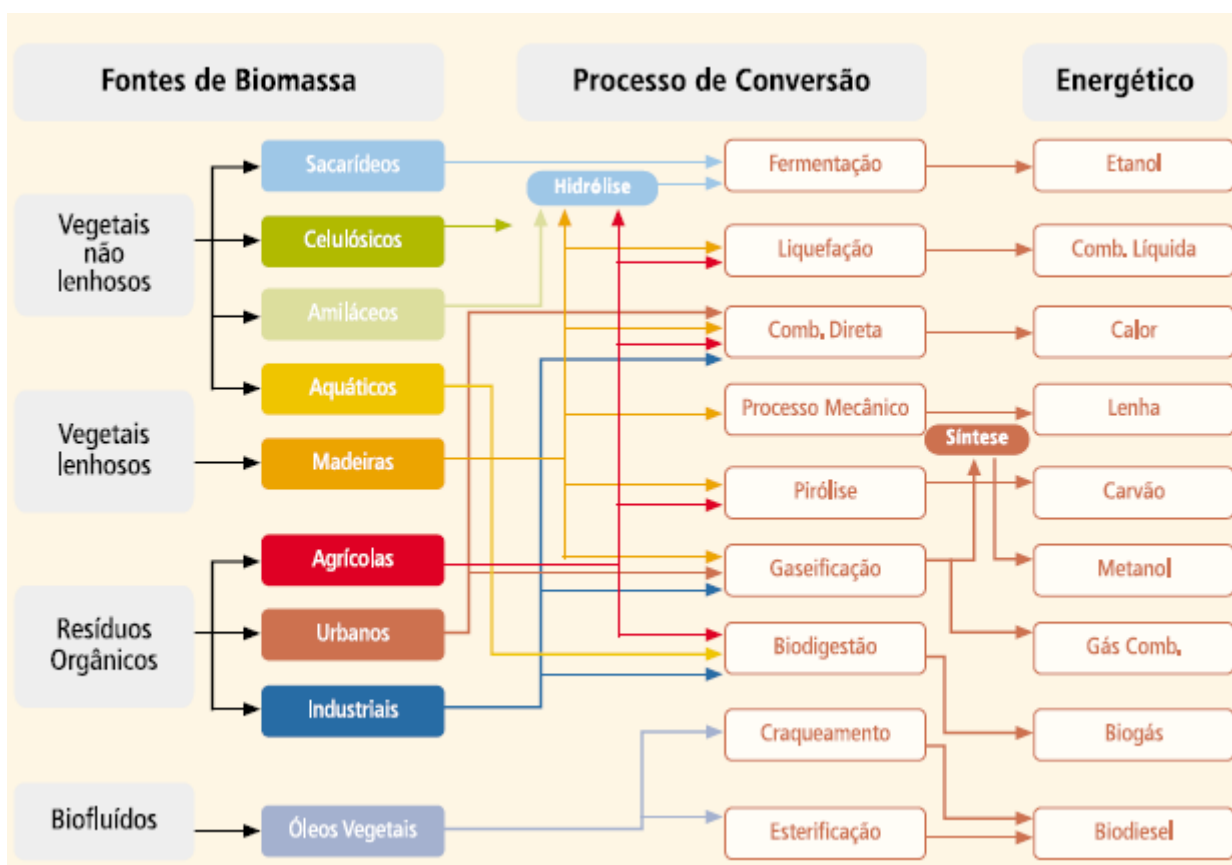


Figura 1 - Diagrama de processos de conversão energética da biomassa (MME, 1982)

A utilização da biomassa como fonte energética mostra-se vantajosa em um panorama da gestão energética de entidades governamentais de modo geral. Em Portugal, a entidade Soluções de Bioenergia (SOBIOEN) destaca, dentre outras, as principais vantagens:

- Dinamização de zonas rurais com criação de empregos;
- Redução da emissão dos Gases do Efeito Estufa com redução do impacto negativo pelo balanço final de CO<sub>2</sub>, por exemplo;

- Auxílio no cumprimento das metas de produção de energia por meio de fontes renováveis;
- Alta disponibilidade de matéria-prima;
- Diminuição de riscos de incêndio;
- Diminuição de pragas;
- Dinamização e criação de florestas sustentáveis.

Naturalmente, em função do uso e logística envolvida, diversas são as desvantagens elencadas pela mesma organização em Portugal, seguindo-se as principais:

- Altos impostos;
- Falta de experiência de uso;
- Inexistência de equipamentos específicos de recolha de resíduos;
- Ausência de mercado para resíduos florestais;
- Falta de conhecimento científico;
- Falta de informação quanto às políticas e os incentivos utilizáveis.

A mesma entidade cita, ainda, que há obstáculos significativos pelo fato de o sistema econômico e social português ter tido maior foco em energias convencionais (carvão mineral, petróleo, gás natural e energia nuclear) e da produção de energia elétrica.

*“Um dos problemas na difusão e maior aproveitamento dos resíduos é a sua baixa densidade energética que ao encarecer o transporte, implica que o mesmo só se faça de forma rentável para pequenas distâncias. Terão que ser equacionadas práticas de compactação ou estilhaçamento no local de recolha do material vegetal, de modo a rentabilizar economicamente o transporte e evitar um acréscimo da circulação rodoviária. Existe alguma relutância por parte da sociedade Portuguesa, em aceitar o recurso à biomassa como fonte de energia renovável. É um produto novo para uma grande parte da população em geral e existe uma falta de divulgação deste tipo de energia renovável”.*

A procura de biomassa como fonte de calor ou eletricidade, assim como produção de combustíveis líquidos e gasosos pode ser justificada por fatores positivos como: contribuição para a diminuição da pobreza em vários países em desenvolvimento; satisfação das necessidades de energia sem necessidade de recurso a equipamentos de conversão dispendiosos; produção de energia sob diferentes formas; contribuição para a requalificação de terrenos degradados, aumentando a biodiversidade (IMFLORESTAL, 2014) e fertilidade do solo e retenção de água (UFPR, 2014).

Tecnicamente, Gulyurtlu (2007) relata que a utilização da biomassa é vantajosa pela queima ou gaseificação ser mais fácil que do carvão mineral; por conter baixo teor de cinzas ou enxofre e apresentar boa razão H/C; pela composição de C, H e O pouco variar em função da biomassa; e por ser fonte de energia renovável com matéria-prima imediatamente disponível.

Como desvantagens, o mesmo autor cita que os meios logísticos envolvidos na recolha e transporte podem influenciar no custo; que a biomassa pode apresentar quantidades significativas de água; que o material pode apresentar-se de forma muito variável, dificultando a preparação do combustível; e efeitos indesejados da cinza que podem causar *fouling* ou corrosões.

Relativamente às vantagens apresentadas, com base em diversas afirmações feitas em estudos envolvendo a biomassa, pode-se dizer que a mesma é apontada como uma fonte primária e renovável de energia. Pelo fato de não conter metais pesados nem gerar gases que possam contribuir para o efeito estufa, considera-se a energia da biomassa com boa propensão a ser considerada limpa.

Conforme já revisto, a biomassa é composta maioritariamente por carbono, oxigênio e hidrogênio. O teor de carbono da biomassa é significativamente inferior ao de outros combustíveis fósseis, sendo o teor de oxigênio maior (Cortez *et al.*, 1990 *apud* Moret, 2004).

Uma vantagem, segundo Moret (2004), para a utilização de resíduos agrícolas como matéria-prima, seria o fato de que as emissões de carbono estão próximas de serem consideradas nulas, essencialmente em função do sequestro de carbono pela fotossíntese pelos organismos vegetais, sendo que, mesmo que a eventual eficiência de conversão seja inferior, as emissões ainda serão menores.

O conceito de desenvolvimento sustentável traduz-se em um alerta quanto à possibilidade da exaustão dos recursos naturais terrestres enquanto cobra a responsabilidade nos usos para atendimento às necessidades de gerações futuras. Tal desenvolvimento deve ser empregado e sintonizado em 3 pilares, de forma concomitante, sendo estes: social, econômico e ambiental.

Considerando-se um uso em escala global, pode-se afirmar que a biomassa, por meio dos biocombustíveis, representa significativa ajuda às medidas internacionais que visam à redução das emissões de gases de efeito estufa frente aos combustíveis fósseis.

Deve-se ressaltar, entretanto, que o desenvolvimento sustentável não se limita apenas à redução das emissões de gases de efeito estufa. Segundo Sousa *et al.* (2015), é de suma importância para a sustentabilidade o contexto de produção, consumo e uso de energias sustentáveis ser globalmente envolvido por responsabilidade, austeridade e equidade.

A biomassa é, atualmente, muito utilizada em países em desenvolvimento, fornecendo aproximadamente um terço do consumo de energia primária (IMFLORESTAL, 2014). Sabe-se que florestas podem fornecer fonte renovável de matéria-prima para tal.

Entretanto, pensando-se no desenvolvimento sustentável, deve-se atingir equilíbrio dentre os três pilares já citados, ambiental, social e econômico para adequada utilização desta fonte.

Conforme já revisto, a utilização da madeira como combustível é prática recorrente por toda a história da humanidade, sendo as florestas largamente exploradas em décadas de necessidade de maior valoração do combustível.

Nesse contexto, estatísticas mostram que, relativamente ao consumo de energia, a percentagem de biomassa manteve-se estável pelos últimos 20 anos (IEA, 2018). Segundo a Agência Internacional de Energia, o consumo mundial de energia por biomassa foi de 16% no ano de 2014. Tal número encontrava-se próximo ao consumo final de energia por outras fontes, sendo estas eletricidade (15%) e gás (16%) (IEA, 2018).

Conforme pontuado anteriormente, as regiões em desenvolvimento como a Ásia, África e América do Sul, representam maiores consumos comparadas com regiões desenvolvidas (IEA, 2018). De acordo com o mesmo órgão internacional, cerca de metade da população desses países utiliza como fonte primária de energia a biomassa, sendo que o nível pode chegar pontualmente a 73%. Chamada de fonte de energia “dos pobres”, sobretudo pela matéria-prima eventualmente gratuita (Karekezi & Kithyoma, 2002), correlaciona-se, então, o uso da biomassa sob forma tradicional e os níveis de pobreza (IEA, 2018).

Dois são os mais comuns usos da biomassa nos dias atuais, sendo o mais tradicional por meio da combustão direta, para aproveitamento do calor, e o mais complexo como forma de combustíveis líquidos, gás e eletricidade (ANEEL, 2005).

Relativamente ao contexto europeu, sabe-se que as políticas energéticas vêm frisando, nos últimos anos, maior comprometimento em cumprimentos de metas para utilização de energias sustentáveis. Segundo estudo realizado por IMFLORESTAL (2014), a política se mostrou em avanço em três frentes específicas:

- Procura de competitividade, que leve ao crescimento econômico e à criação de emprego;
- Segurança do abastecimento, reduzindo a dependência energética dos países;
- Sustentabilidade, comprometendo-se com a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE).

No ano de 1997, a União Europeia estabeleceu o objetivo de atingir a contribuição global de 12% em energias renováveis até o ano de 2010 (SOBIOEN, 2018). Já em 2009, surgiu a Diretiva 2009/28/EC que representa um marco na história da legislação europeia relativamente ao uso de energias renováveis. Tal documento prevê uma entrega pelos vinte e sete estados membros da União Europeia de um plano de ação nacional para as energias renováveis.

Nesta diretiva, até 2020, os seguintes objetivos ficam estabelecidos:

*“Aumentar a quota de fontes de energia renováveis no consumo final de energia Europeu para 20%, a partir de aproximadamente 8,5% em 2005, através de metas nacionais obrigatórias; Alcançar a meta de 10% de energias renováveis nos transportes em todos os estados membros”.*

Tal documento elucida que as políticas voltadas ao uso de energias sustentáveis estão crescentes e almejam objetivos a longo prazo. Neste âmbito, a Comissão Europeia acaba por elaborar um Plano de Ação por nações. Este Plano de Ação fixa os objetivos nacionais de cada Estado-Membro relativos à quota de energia proveniente de fontes renováveis consumida nos sectores dos transportes, da eletricidade e do aquecimento e arrefecimento em 2020, bem como as respetivas trajetórias de penetração de acordo com o ritmo da implementação das medidas e ações previstas em cada um desses sectores (European Commission, 2018).

Inclui-se, dentre outras diretrizes, a proposta de revisão do valor de impostos governamentais quando do aquecimento de edifícios a biomassa; implementação de culturas energéticas; incentivo a investigação na área das biorrefinarias e biocombustíveis; e desenvolvimento de uma estratégia temática para o aproveitamento de resíduos (SOBIOEN, 2018).

O protocolo de Kyoto, cujo objetivo principal era responsabilização para a redução de GEE entre 2008 e 2012, favorece o desenvolvimento da biomassa em escala europeia. O comércio de licenças de emissão, o qual já vigora na Europa e está regulamentado pela diretiva 2003/87/CE, dá a possibilidade aos produtores de energia de reduzirem as emissões por meio da combustão de biomassa.

Já o Acordo de Paris, aprovado em 12 de dezembro de 2015, representa atualmente o tratado que rege medidas de redução da emissão de gases com efeito de estufa a partir de 2020, com o objetivo de conter o aquecimento global abaixo de 2 °C. Prevê medidas, metas e direções de redução de GEE e de utilização de energias renováveis.

Assim, fica nítido que as centrais dedicadas de biomassa podem auxiliar a redução das emissões de GEE. Dentro das metas estabelecidas, pode-se estimar um potencial bioenergético de 15% das necessidades energéticas europeias em 2030, conforme explicita Wiesenthal *et al.* (2006).

Em Portugal, o uso da biomassa sempre esteve associado ao uso da madeira para satisfação das necessidades domésticas e industriais, sendo que tal finalidade perdura até os dias de hoje (IMFLORESTAL, 2014).

A utilização de matéria-prima proveniente de extrações florestais, permite, mesmo que involuntariamente, contribuição para redução de incêndios florestais, uma vez que extrai-se no processo material apto à combustão. A problemática dos incêndios em Portugal tem causado significativos impactos negativos ao longo dos últimos 20 anos (Público, 2017).

Finalmente, a biomassa existente nas florestas continentais do país, convertida em energia térmica e elétrica abrange benefícios nos âmbitos sociais, econômicos e ambientais para a sociedade. A utilização atual de energias renováveis é imprescindível para o país especialmente questões de natureza econômica. Conforme IMFLORESTAL (2014), a utilização da biomassa deve ser equacionada e fomentada nesse âmbito, uma vez que, possibilita o desenvolvimento de empresas locais no meio rural e pode constituir uma fonte de rendimento alternativa para os agricultores em Portugal.

## 2.2 PIRÓLISE

As intempéries associadas ao intenso uso de combustíveis fósseis em escala global fizeram com que houvesse significativo aumento na busca por processos termoquímicos de conversão de biomassa, sobretudo devido à própria disponibilidade a nível mundial, para produção de energias sustentáveis.

A conversão termoquímica é apontada como atual e viável tecnologia de tratamento de resíduos de biomassa, com o reaproveitamento integral de material lignocelulósico, como madeira e seus derivados (Pereira *et al*, 2016).

Os processos de conversão termoquímica de maior relevância na literatura são: combustão, gaseificação, liquefação e a pirólise. Dentre os processos elencados, Lima & Moura (2016) afirma que a pirólise diferencia-se como o processo de maior potencial de aplicação em conversão termoquímica da biomassa. Da pirólise da biomassa, obtém-se produtos gasosos, líquidos e sólidos, como o *biochar*, sendo que, dependendo das condições utilizadas no processamento, há otimização ou não de tais produtos. (Bridgwater, 2012 *apud* IEEUSP, 2018b).

A pirólise é o processo de conversão termoquímica com registro de utilização mais antigo na história e representa a transformação de um material combustível em outra substância, composta ou não, de diferente qualidade e conteúdo energético (carvão, essencialmente).

O processo implica na ruptura de ligações carbono-carbono (C-C) e na formação de ligações carbono-oxigênio (C-O) por meio de redução de materiais macromoleculares, em reação endotérmica (Caetano, 2014), conforme representado esquematicamente:



A pirólise dá-se por meio do aquecimento do material combustível, com temperaturas que mediam os 300 a 500 °C, em ausência parcial ou total de material oxidante. Pode classificar-se como analítico ou aplicado. O processo analítico busca a caracterização da amostra original pela análise dos produtos, enquanto a aplicada visa gerar produtos

voltados para um determinado objetivo previamente estabelecido (Irwin, 1982 *apud* IEEUSP, 2018b).

O aquecimento da biomassa utilizada no processo provoca rupturas e recombinações de interações físicas e químicas, fracionando, portanto, a sua estrutura molecular. São liberados, então, substâncias com diferentes teores de carbono que podem ser utilizadas como combustíveis (Diniz, 2005 *apud* Ferreira, 2014).

A primeira etapa de reação da pirólise ocorre com a quebra térmica das ligações químicas dos compostos da biomassa. Nesta etapa, ressalta-se, segundo Ferreira (2014), que:

*“(...) as espécies formadas durante a primeira etapa podem se submeter a reações adicionais de quebra de ligações na fase condensada para formar mais compostos voláteis ou podem realizar reações de policondensação/polimerização para formar compostos maiores, que constituirão a fase líquida ou a sólida dos produtos”.*

Os compostos voláteis podem vir a reagir com sólidos residuais ou com gases em reações homogêneas, caracterizando a segunda etapa de reação da pirólise. Isso pode vir converter alguns produtos de óleo em gases e carvão.

Conforme indica Garcia-Perez (2004), as reações destas etapas podem ser essencialmente minimizadas em função do tempo de reação. Se os produtos primários formados deixam rapidamente a zona de aquecimento, não resta tempo para reação com material não pirolisado, evitando-se reações secundárias não previstas. Há, entretanto, a possibilidade de reações caso o aquecimento seja lento ou as amostras forem grandes.

A pirólise é chamada lenta quando são utilizadas temperaturas baixas e tempos de residência longos, fatos que favorecem a produção de fase sólida (carvão vegetal) (Ferreira, 2014). Nessas circunstâncias, se utilizadas temperaturas altas, há favorecimento da produção de gases. Almeida (2008) destaca a pirólise lenta como processo de tempo de residência de horas/dias, com temperaturas entre 300-500 °C, taxa de aquecimento muito baixa e produto principal o carvão vegetal.

Já a pirólise rápida acontece no emprego de temperaturas moderadas e pequenos tempos de residência dos gases (Tabela 1), fatos que, por sua vez, favorecem a produção de líquidos (Bridgwater, 2004 *apud* Perez, 2004).

Consoante já explicitado neste estudo, a estrutura da biomassa é composta essencialmente de celulose, hemicelulose e lignina, sendo que todos são constituídos de distintos comportamentos térmicos, acarretando em diferentes respostas para a pirólise.

As hemiceluloses, de menores dimensões e massa molecular, são mais suscetíveis à hidrólise, por exemplo, e são facilmente degradadas com o aumento de temperatura na

pirólise, formando componentes voláteis, como CO, CO<sub>2</sub>, e H<sub>2</sub>O (Macedo, 2012). A decomposição térmica da hemicelulose ocorre entre 200 e 300 °C (Garcia-Perez, 2004).

A decomposição térmica de celulose ocorre entre 300 e 400 °C e é significativamente mais complexa do que a da hemicelulose conforme pontua Macedo (2012). A estrutura é rígida e a pirólise leva a uma quebra de ligações começando das cadeias poliméricas antes da quebra de ligações glicosídicas entre os próprios monômeros do componente (Greenhalf, 2012 *apud* Macedo, 2012).

Já os componentes de lignina em face de pirólise térmica apresentam compostos maioritariamente fenólicos e ligeiramente mais complexos do que os fenóis de celulose e hemicelulose, degradando-se mais lentamente, numa larga faixa que varia entre 250 e 500 °C (Perez, 2004).

Di Blasi (2008) afirma que a lignina apresenta maior tendência à geração de sólidos como produto, sendo que a celulose e as hemiceluloses têm tendências a degradarem-se produzindo elementos voláteis a temperaturas acima de 300 °C.

Tratando-se dos produtos da decomposição térmica da biomassa, pode-se distingui-los em três fases: sólida (carvão ou sólido torreficado), líquida (água, compostos orgânicos e lipídios) e gases.

Kaiyang (2010) referiu que o gás gerado no processo possui, basicamente, elementos provenientes da quebra térmica de biomassa, sendo estes o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) hidrogênio (H<sub>2</sub>), hidrocarbonetos leves, vestígios de componentes orgânicos e vapor de água.

A fração sólida, chamada de *biochar*, apresenta numerosas aplicações, dentre as quais podem ser consideradas ambientalmente apropriadas. Por exemplo, estudos indiciam a melhora de propriedades do solo (Conz, 2015), além de ser usado na área siderúrgica, com a função de substituir o coque mineral visando reduzir o óxido de ferro a ferro metálico (Macedo, 2012).

Sabe-se que a proporção entre o volume do material combustível e o do carvão produzido pode variar em função do teor de humidade do material e das características empregadas no processamento. Em processos controlados, com acompanhamento de temperatura e coleta de material volátil, a proporção de carvão pode chegar a 30% do material de origem (Giglio, 2016). Ainda, há possibilidade de uso do líquido produzido, ou do óleo combustível, após tratamento específico (Macedo, 2012).

Embora utilizada desde a antiguidade para a obtenção de carvão vegetal, a pirólise gerou distintos interesses apenas nos últimos 40 anos. Com a pirólise rápida, determinadas temperatura e tempo de reação de gases pode vir a elevar o rendimento de produtos líquidos, ou bio-óleos, que podem, por sua vez, serem usados diretamente para diversas aplicações, como a geração de energia (Czernik, 2004 *apud* Ferreira, 2014).

A busca por combustíveis líquidos e gás para geração de energia elétrica ganhou destaque no panorama energético mundial (Lopes, 2008). Contudo, a utilização de bio-

óleos de pirólise como combustíveis líquidos ainda tem sido retardada por propriedades indesejadas dos líquidos.

A pirólise rápida pode ocorrer sob temperaturas que variam entre 800 e 900 °C, sendo que aproximadamente 60% do material é convertido em gás como hidrogênio e monóxido de carbono. A parcela sólida é reduzida, fato que faz com que esta seja uma tecnologia competitiva com outras, como a gaseificação. Entretanto, o tratamento dos resíduos por tal tipo de pirólise ainda é considerado um entrave, fazendo com que a pirólise convencional seja destacada como a tecnologia mais atraente para investimentos dentro do presente contexto (Ramage & Scurlock, 1996 *apud* Sousa, 2015).

Berton (2012), afirma que a pirólise chamada rápida, que atinge temperaturas de 550 °C, apresenta rendimento próximo a 75% de líquido. Entretanto a pirólise com temperaturas em torno de 400 °C, chamada lenta, pode gerar 30% de líquido, 35% de carvão e 35% de gás, enquanto a gaseificação, que ocorre em temperaturas acima de 600 °C, acaba por gerar 5% de líquido, 10% de carvão e 85% de gás.

A Tabela 1 apresenta exemplos de rendimentos em peso de produto por material em base seca em função dos processos e condições de operação, segundo Bridgwater (2018).

**Tabela 1 – Rendimentos de peso de produtos de pirólise em percentagem (base seca)**

Processo	Condições de Operação	Líquidos (%)	Sólidos (%)	Voláteis (%)
Pirólise lenta	Temperatura de ~400 °C; Tempo de residência de horas.	30	35	35
Pirólise rápida	Temperatura de ~500 °C; Tempo de residência de segundos.	75	12	13
Pirólise tipo gaseificação	Temperatura de ~750-900 °C; Tempo de residência de segundos.	5	10	85

Fonte: Adaptado de Bridgwater (2018).

As propriedades das classes de produtos do processo de pirólise variam em função dos principais parâmetros a serem empregados como temperatura, tempo de patamar, fluxo de gás ambiente e a taxa de aquecimento. Seguramente, propriedades de biomassa, como forma, densidade, humidade, entre outros, geram significativa influência na composição dos produtos gerados (Di Blasi, 2008). Sabe-se que quanto

menor for o teor de água, menor é o uso de tempo para atingir a temperatura escolhida, enquanto a redução da dimensão das partículas de matéria a ser pirolisada auxilia a receção de calor, acelerando o processo.

O carvão vegetal foi originalmente produzido por meio de fornos em valas ou elevações, sendo que, com evoluções tecnológicas e visando-se melhores rendimentos, passou-se a utilizar fornos de tijolo, metal e cimento, até o desenvolvimento de reatores específicos (Branco, 2013).

Os processos de pirólise são viabilizados por meio de reatores dos mais diversos, possuindo funções e eficiências distintas, sendo que os de leito fluidizados e leito fixo são comumente utilizados (Berton, 2012).

O reator de leito fluidizado opera em altas temperaturas em ambiente inerte, sendo as partículas fluidizadas e os produtos obtidos após resfriamento (Bridgwater, 2003).

Por sua vez, o reator de leito fixo opera com controle de aquecimento e de fluxo de gás de arraste, sendo que a biomassa tem granulometria pré-definida e é contatada seca e resfriada, havendo possibilidade de coleta de produtos fora do leito em direção a frascos coletores (Almeida, 2016).

Conforme referido por Teixeira (2018), o processo de pirólise engloba etapas que permitem a otimização do aumento do contato das partículas com os gases e o calor, além da recuperação dos produtos gerados. Tais etapas estão representadas pela trituração e moagem antes do ensaio; e filtração e condensação, pós ensaio.

A Figura 2 esquematiza as principais etapas da pirólise, com possibilidades de reciclagem de gases e/ou calor.

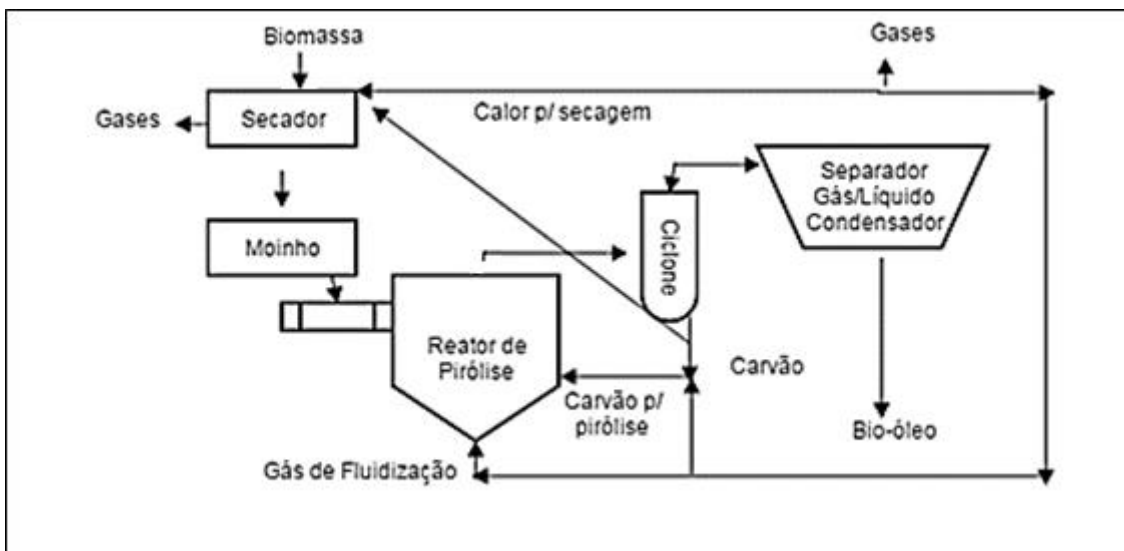


Figura 2 – Diagrama de processos de conversão energética da biomassa (Adaptado de Bridgwater & Peacocke, 2000)

A temperatura e a velocidade do processo são fatores cruciais para determinação dos produtos (Silva, 2007). Para o primeiro fator, pode-se relacionar os produtos com

maiores concentrações de carbono em função de aplicações de maiores temperaturas. Para o segundo, relaciona-se o aumento na velocidade de carbonização com a redução da densidade aparente e rendimento do carvão, redução do teor de materiais voláteis e aumento do teor de cinzas (Silva, 2007).

A Tabela 2 resume as principais divergências dentre os reatores mais utilizados para pirólise.

**Tabela 2 – Tipos de reatores pirolíticos e suas características**

Leito Fixo	Leito Fluidizado	Forno Rotativo	Transporte
Longo tempo de residência de gases	Resíduo fluidizado pelo gás	Forno aquecido indiretamente e retorta 100% isenta de O <sub>2</sub>	Produz óleo combustível
Material sólido tende a formar aglomerados	Ausência de aglomerações em material sólido	Forno cilíndrico com leve inclinação que roda lentamente	Baixo tempo de residência do resíduo sólido
Pode ocorrer caminhos preferenciais	Melhor controle de temperatura	-	Calor necessário fornecido por recirculação do alcatrão quente formado
-	Possibilidade de tratamento de matéria de pequenas dimensões e elevados teores de humidade	-	-
-	Maiores perdas de combustível;	-	-
-	Menor consumo de combustível no rearranque	-	-

Fonte: Adaptado de Caetano (2014).

De acordo com Lira (2012), os efluentes gerados no processo são hidrocarbonetos leves (C<sub>x</sub>H<sub>y</sub>), como o metano. Ainda que sejam gases considerados nocivos ao ambiente, é correto afirmar que em função do consumo de dióxido de carbono durante a vida útil da espécie provedora de biomassa tais danos são compensáveis.

O mesmo autor destaca como uma vantagem da pirólise a possibilidade de desenvolvimento de reatores pequenos e transportáveis, permitindo-se a operação já nos locais de obtenção de matéria-prima. Além disso, a pirólise tem como fator positivo

a possibilidade de reaproveitamento do calor, por ser fonte de energia térmica, utilizado para aquecer pequenas caldeiras, sobretudo para regiões remotas ou produtores rurais.

As técnicas mecanizadas de produção de *biochar*, principalmente *in loco*, podem diminuir o volume de material vegetal destinado a aterros sanitários. Entretanto, a atividade de produção de biochar em pequenas propriedades e quintais periurbanos pode auxiliar a produção própria de alimentos, contribuir de maneira indireta para a qualidade de vida de uma parcela da população e promover o avanço da agricultura urbana (Malheiro, 2014).

O conceito de agricultura urbana ou periurbana está relacionado ao uso de pequenas superfícies situadas nas cidades para a produção agrícola e criação de pequenos animais, destinados ao comércio ou consumo próprio, ou para fins recreativos e ornamentais como jardins urbanos. Dentre as vantagens que essa atividade pode acarretar está a produção de alimentos, utilização racional do espaço, educação ambiental, formação de microclimas e manutenção da biodiversidade, favorecimento da infiltração de água no solo e diminuição do escoamento superficial, desenvolvimento e recreação da comunidade e aumento da renda da população (Roese, 2003).

Neste contexto, a produção de biochar a partir da pirólise colabora com a destinação correta dos resíduos de uma pequena propriedade e o *biochar* produzido pode ser reinserido em diversas circunstâncias as quais geram benefícios para o ambiente, como adubagem de solo (Malheiro, 2014).

### 2.3 BIOCHAR

Durante as grandes expedições em direção à América nos séculos XV e XVI, na busca por metais preciosos como ouro e prata, houve registros documentados à letra os quais já faziam referência ao solo encontrado em terras que hoje pertencem ao Brasil. Em 1870, um geólogo registrou a ocorrência de um solo preto e altamente fértil, em concorrência com um já conhecido solo basáltico, nas terras americanas, sobretudo na região amazônica, em exploração.

Registros mais antigos de composição da terra preta na região americana datam compostos de carbono de aproximadamente 8000 a.C, uma vez que organismos vivos não têm capacidade de processar o carvão e o carbono pode permanecer por milhares de anos na terra. Há, nesse sentido, indícios de que há 30 mil anos a espécie humana já havia gerado carvão por meio da queima de amontoados de biomassa (Antal Jr. & Gronli, 2003).

Posteriormente às pesquisas dos séculos XVII e XVIII sobre a fertilidade da terra preta, no século seguinte uma importante descoberta foi feita acerca do tema: o armazenamento de biomassa e carvão no solo tem potencial para sequestrar carbono da atmosfera (PRONATURA, 2012).

Ainda, com o avanço dos estudos sobre o tema, afirma-se, de modo geral, que a terra preta tem melhor capacidade de manter a fertilidade de um solo em comparação à utilização de químicos fertilizantes, segundo PRONATURA (2012). Tendo como composto essencial o carbono, com até 9% em composição contra 0,5% em solos comuns, tal substrato altera o comportamento químico do solo, facilitando a retenção de nutrientes como cálcio, beneficiando as condições de crescimento.

Na prática, o mesmo autor aponta estudos realizados em 2008 em campos de milho no Quênia, os quais mostram que a produção dobrou em sítios recuperados pelo *biochar* em comparação com aqueles recuperados por fertilizantes químicos.

Sabe-se que o *biochar* pode ser obtido por meio de inúmeras matérias orgânicas, sendo as mais comuns aquelas advindas das atividades agrícolas. Dentre as matérias-primas destacam-se: serragens e cavacos de madeira, resíduos de poda de árvores, resíduos da agricultura, dejetos de animais, esterco, lodos, entre outros (Lorenz & Lal, 2014).

Em tempo, Conz (2015) afirma que o *biochar* é usualmente associado aos solos de origem antropogênica, pela proximidade no processo de decomposição térmica do material vegetal, sendo que os mesmos utilizam-se de milhares de anos para geração.

Quanto às características físicas e químicas desse produto, inúmeros estudos sugerem que as mesmas sofrem variações em função das diferentes composições químicas e morfologia da biomassa utilizada, assim como as condições do processo de pirólise. Tais características podem ser utilizadas para avaliar a qualidade do *biochar*, sendo, especificamente, a porosidade, superfície específica, pH, teor de carbono e cinzas, teor de lenhina solúvel e insolúvel, teor de nitrogênio, capacidade de troca iônica, recalcitrância, capacidade de retenção de água e densidade aparente (Maia, 2011).

Complementarmente, Downie *et al.* (2009) afirmam que o manuseio do material antes e depois da carbonização pode vir a influenciar as características do *biochar*.

Face ao exposto, pode-se exprimir que a temperatura de reação é fator decisivo para composição das características físico-químicas do *biochar* gerado, sendo apontada por Pereira *et al.* (2016) como o parâmetro mais importante a se considerar no processo de pirólise. O autor sugere que temperaturas relativamente baixas podem gerar *biochar* com baixo pH, sendo indicado caso a venha a agir como fertilizante de solos de pH alto.

Já segundo Onay (2013) *apud* Conz (2015), o rendimento em *biochar* diminui a uma temperatura elevada. Temperaturas altas estão diretamente proporcionais aos teores de C fixo e de cinzas gerados no processo. Baixas temperaturas, assim como baixas taxas de aquecimento, podem resultar para processos com pretensões de obtenção de grande quantidade de material sólido.

A granulometria da biomassa utilizada está relacionada com a reatividade da mesma, sendo que quanto menor granulometria utilizada, maior a reatividade do *biochar* (Pereira *et al.*, 2016).

A porosidade do *biochar* pode resultar dos poros e da composição estrutural da biomassa empregada, sendo que a estrutura pode ser alterada em função da liberação de gases durante o processo (Conz, 2015). Devido à porosidade, pode-se considerar o aumento da retenção de água do solo.

Inúmeros são os setores da economia que beneficiam-se com os produtos finais gerados por meio das reações, a exemplo do farmacêutico, automotivo, da construção civil, agronegócio e outros (Vaz Júnior, 2011).

Há diversos registros de uso do *biochar* na agricultura como um adsorvente alternativo, incorporado para remoção e controle de possíveis contaminantes. Com isso, pode ocorrer o aumento da eficiência da adubação do solo (Madari *et al.*, 2010 *apud* Pereira *et al.*, 2016). Já outros estudos indicam que sua aplicação no solo possibilita o aumento de seu pH (Malheiro, 2016).

Com a inserção do *biochar* no solo, características físico-químicas podem ser alteradas, sendo que pode existir importante contribuição para o aumento de nutrientes disponíveis no mesmo (Malheiro, 2016), uma vez que o teor de cinzas, usualmente acessíveis e solúveis em solos com *biochar*, é considerado fonte de fósforo e potássio, entre outros nutrientes. Conforme explicitou Cha *et al.* (2016), o *biochar* pode ser utilizado como adsorvente para o controle de poluição do ar.

Avaliando a pirólise de resíduos orgânicos, Enders *et al.* (2012) *apud* Conz (2015) analisaram o *biochar* proveniente de diversos tipos biomassa, como esterco de animais, águas residuais, lodo de esgoto, biomassa lenhosa, de indústria de papel e a mistura de alguns destes. Empregou-se temperaturas de pirólise de 300 a 600 °C, em intervalos de 50 °C, e rampa de aquecimento de 10 °C por minuto e tempo de pirólise de 15 a 20 minutos. Como resultados, os autores concluíram que o *biochar* originário de materiais lenhosos apresentou maior variação de pH, indo de 4 a 9.

Cha *et al.* (2016) observaram que o teor de cinzas, pH e a porosidade do *biochar* proveniente de matéria orgânica aumentaram com o aumento da temperatura, enquanto o rendimento e os teores de N e O foram reduzidos com o aumento da temperatura devido à volatilização durante a pirólise.

O efeito positivo de *biochar* aplicado a culturas em curto prazo, para diferentes quantidades e tempos de incubação fica evidente observando-se os estudos em questão (UFPR, 2014). Misturas de biochar e cinzas provenientes da pirólise de matéria orgânica e lenhosa de diversas fontes naturais resultaram em significativas vantagens em, por exemplo, crescimento de savanas, palha de arroz, trigo, espécies como eucalipto e pinheiros, como:

- Desusos de aplicação suplementar de Fósforo do solo;
- Manutenção nos teores de Fósforo na região de atuação das raízes;
- Aumento no teor de matéria orgânica do solo;

- Aumento das fontes de Potássio do solo;
- Aumento de disponibilidade de Cálcio e Magnésio no solo;
- Aumento do pH do solo;
- Aumento na retenção de amônio do solo;
- Redução da densidade do solo;
- Aumento da disponibilidade de água do solo;
- Redução da condutividade hidráulica do solo;
- Aumento da incidência de fungos micorrizos;
- Aumento da adsorção de substâncias provenientes de herbicidas e inseticidas.

É importante ressaltar, entretanto, que as condições dos experimentos a serem realizados com incorporação do *biochar* em solo podem condicionar os resultados esperados em função do objetivo desejado. A exemplo do que indica Abujabhah *et al.* (2016) *apud* UFPR (2014), o pH do solo pôde ser reduzido por meio da aplicação de 47 t/ha de *biochar* de acácia de pH 6,35, elevando-se, ainda, enzimas envolvidas nos ciclos de fosfato, enriquecendo o solo.

Tratando-se de produtividade no crescimento vegetal, nota-se igualmente benefícios apontados por estudos da literatura sobre o tema. Em uma compilação de mais de 50 estudos, Jeffery *et al.* (2011) avaliaram que, em linhas gerais, a utilização do *biochar* aumentou 10% da produtividade agrícola, em média. Ainda, concluiu-se que a maior produtividade foi obtida no emprego de pelo menos 100 t/ha de *biochar*.

Na Indonésia, experimentos indicam que a produtividade de milho aumentou 25% com relação ao tratamento controle através da aplicação de 25 t/ha de *biochar* de origem orgânica (Yamato *et al.*, 2006 *apud* Jeffery *et al.*, 2011). Na Colômbia, por sua vez, a aplicação de 20 t/ha de *biochar* para produção de milho não reproduziu diferença significativa no primeiro ano, sendo que gerou aumentos de 28, 30 e 140% no total de grãos produzidos a partir do segundo ano de produção.

Outros estudos realizados nos últimos 10 anos envolvendo os crescimentos de culturas de trigo, soja, rabanete, arroz, mostarda, cevada, trevo vermelho, aveia, com aplicações que variam de 8 a 100 t/ha de *char* apontaram vantagens produtivas em comparação ao crescimento na ausência do *biochar* (UFPR, 2014).

Plunchon *et al.* (2014) *apud* Jeffery *et al.* (2011), por sua vez, avaliaram o crescimento de mudas de quatro espécies florestais produzidas em solos com *biochar* proveniente de coníferas e folhosas. Como resultado obtiveram efeito positivo ou neutro no crescimento das mudas.

Já na África, o *biochar* de resíduos agrícolas proporcionou benefícios na emergência das sementes de sete espécies arbóreas, sendo que na maioria das mudas utilizadas, o crescimento foi maior quando o *biochar* foi utilizado como substrato (Chidumayo, 1994 *apud* UFPR, 2014).

Frente ao exposto, pode-se dizer que o *biochar* difere do carvão vegetal, uma vez que é gerado por transformações específicas, utilizando-se de matérias-primas (de variadas composições) e parâmetros controlados, para determinadas utilizações de seus produtos. O carvão vegetal pode ser resultado de uma queima não controlada de material essencialmente lenhoso, na ausência de controle de atmosfera, sem rigores de parâmetros (como granulometria) e sem objetivar destinações específicas de produto.

#### 2.4 ALFACE (*Lactuca sativa*)

A alface é um vegetal da família das *Compositae* que engloba diversas variedades de espécies, sendo a mais popular e consumida em Portugal a *Lactuca sativa*. É uma hortaliça de folhas que tem origem na região do Mediterrâneo (Tavares, 1988). É considerada pela Organização Não Governamental (ONG) Plantar Portugal como um dos alimentos mais consumidos do mundo devido à facilidade de cultivo, diversidade de produção e praticidade de consumo, sendo este feito usualmente *in natura*.

No Brasil esse vegetal manteve-se como a folhosa mais consumida por diversos anos, nos últimos 20 anos. Destaca-se, também, por representar, dentre as hortaliças, grandes volumes de produção, segundo a Associação Brasileira do Comércio de Sementes e Mudanças (ABCSEM).

Segundo informações provenientes do órgão brasileiro CEASA (Centrais de Abastecimento de Produtos de Hortifruticultura), a alface está entre os 10 produtos mais consumidos do ano (2016), gerando importante movimentação socioeconômica para os estados, tendo chegado ao terceiro maior consumo num dos estados mais populosos do país, o Rio de Janeiro, no ano de 2013 (CEASA-RJ, 2013).

O vegetal em pauta representa uma cultura de adaptação a climas temperados, sendo que, em sua maioria, aprecia temperaturas mais amenas, de aproximadamente 6 até 30 °C (Radin *et al.*, 2004). Vale ressaltar que, conforme referiram Radin *et al.* (2004), o excesso de umidade pode ocasionar o aumento de doenças relacionadas ao cultivo em estufas, sendo que umidade inferior a 60% pode representar uma condição favorável.

Ainda, pode-se afirmar, segundo Tavares (1988), que maiores variações no pH mostraram-se negativas às culturas de alface, sendo estas sensíveis a excessos de alcalinidade ou acidez, desenvolvendo-se melhor em solos com pH neutro ou levemente ácidos (pH de 6,8 a 7,0).

É igualmente importante ressaltar que culturas de alface exigem diferentes condições de luminosidade, espaçamento, rega, adubações, entre outros, quando plantadas em

estações do ano diferentes, sobretudo para verão e inverno. Diferentes variedades de espécies de alface adaptam-se melhor em condições de frio ou calor, representando variedades de culturas em verão ou inverno (Medeiros *et al.*, 2001).

O cultivo de hortaliças como a alface em estufas representa atividade atrativa comercial e logisticamente, sobretudo no entorno de grandes concentrações urbanas. Nestas localizações, há grande demanda, favorecendo produção intensiva (Medeiros *et al.*, 2001). A atratividade dos grandes centros urbanos alia a facilidade de produção com a logística de venda, gerando, principalmente, retorno rápido de capital investido. Assim, representa, para os produtores, boa fonte de renda (Ferreira, 2011).

É fato comprovado que as condições nutricionais das plantas podem ser bem representadas pela avaliação das folhas. A variação de nutrientes do solo influencia significativamente a diagnose foliar, sendo que esta pode levar a possível identificação de deficiências ou necessidades de adubações da planta (Radin *et al.*, 2004).

Segundo Petter *et al.* (2012), o uso de substratos naturais passíveis de reutilização em outros plantios, como o *biochar*, representa uma opção para minimizar possíveis custos de cultivos com compostos de mercado, além de promover melhorias na produtividade da planta.

Em estudo a respeito da análise do crescimento de mudas de alface utilizando-se de biomassa de madeira de eucalipto como condicionante de substrato, o autor avaliou o desenvolvimento das mudas 31 dias após semeadura, medindo-se o número de folhas verdadeiras (NFV), altura média das plantas (AP), massa fresca da parte aérea (MFPA) e a massa fresca das raízes (FMFR), a massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca das raízes (FMSR). Como conclusão, infere-se que a adição de até 15% de *biochar* a um prévio substrato comercial utilizado revelou-se como boa alternativa como condicionadores de substrato, enquanto a adição de concentrações acima desse valor revelou prejuízos à produção de mudas de alface (Petter *et al.*, 2012).

Complementarmente, o estudo de Rodrigues & Casali (1999) revela que há estimativa de maior produtividade de alface em massa em 36 dias para solos adubados com composto orgânico em doses de 13 t/ha do que de 37,7 t/ha. Nesse sentido, pode afirmar-se que a mistura do composto com *biochar* pode aumentar a altura e massa de matéria fresca das plantas (Schulz *et al.*, 2013 *apud* Pereira, 2016).

O estudo de Monteiro *et al.* (2017) avaliou o número de folhas, comprimento do sistema radicular e massa fresca da parte aérea e do sistema radicular de culturas de alface sobre substrato condicionado por *biochar* de lodo de tratamento de esgoto e outros. O substrato proporcionado de 20% de *biochar*, 40% de vermiculita e 40% de cinza de casca de arroz foi o que gerou os melhores resultados para o crescimento de mudas de alface.

Por outro lado, Pereira (2016) realizou aplicações de adubo mineral, adubo mineral com *biochar*, composto orgânico e composto orgânico com *biochar* para avaliações de desempenho foliar de culturas de alface. Como resultado, obteve que o composto orgânico e a adubação mineral atendem à demanda nutricional da alface, sendo que o

*biochar* inserido nas adubações não interferiu na produtividade foliar da alface. Contudo, o autor refere que:

*“(...) apesar das condições do solo e da composição do composto orgânico interferirem no rendimento, o composto orgânico pode ser vulnerável a perda de nutrientes no solo e provocar alterações na produtividade do alface. Dessa forma, as vezes, é necessária a mistura do composto orgânico com outros materiais para que se evitem decréscimos na produtividade do alface.”*

# METODOLOGIA

- 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO
- 3.2 CASO DE ESTUDO
- 3.3 METODOLOGIA APLICADA



## 3 METODOLOGIA

### 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os resíduos de podas de espécies vegetais em pequenas propriedades e quintais periurbanos podem ter usos múltiplos desde pequenas produções de lenha, energia e até mesmo adubos orgânicos. Entretanto, o volume do material gerado das podas representa uma dificuldade de manejo ou destinação. A falta de locais adequados para a disposição deste tipo de resíduo e o custo elevado das técnicas para seu tratamento representam um grande problema da atualidade nesta temática (Malheiro, 2014).

A biomassa de origem urbana é um recurso oferecido pelo meio ambiente, como forma de manutenção do seu próprio ecossistema e sua grande vantagem está relacionada ao baixo custo associado à matéria-prima utilizável. No caso da biomassa advinda das podas das árvores urbanas, sabe-se que as mesmas podem ser utilizadas diretamente na condição em que se encontram ou transformados por processos mecânicos em partículas menores, como cavacos, serragem ou briquetes, elevando-se o potencial calorífico e aumentando-se sua eficiência (Silva, 2007).

No Brasil, conforme estabelece a Lei 12.305, da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) de 2010 (Brasil, 2010), não há impeditivo de uso desses resíduos para recuperação energética, desde que exista viabilidade econômica, social e ambiental. Ainda de acordo com a referida lei, o art. 9º estabelece “*na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos*”. Assim a reutilização desses resíduos de podas de árvores urbana, se torna uma das diretrizes aplicáveis num eventual planejamento de reutilização por iniciativa privada, por exemplo.

Segundo a Norma Brasileira (NBR) 10.004 de 2004, os resíduos de poda são classificados como resíduos sólidos classe II, ou seja, não perigosos. Caso ocorra a disposição deste tipo de resíduo em lugares abertos, como aterros sanitários, há possibilidade de ocorrência de degradação ambiental, pois pode misturar-se com outros resíduos preexistentes, causando impactos ambientais negativos no solo, água e ar, além de reduzir a capacidade do aterro (Cortez *et al.*, 2008). Nesse sentido, a produção de *biochar* apresenta-se como uma alternativa viável para precaver tal incidente, uma vez

que viabilizaria um melhor manejo dos referidos resíduos com potencial para aplicação na agricultura urbana.

Já em Portugal, o Decreto-Lei nº 73/2011, de 17 de junho, que altera o já citado Decreto-Lei nº 178/2006, de 5 de setembro, reforça a reutilização e reciclagem de resíduos, promovendo um mercado próprio para estes, bem como estimula o aproveitamento de resíduos específicos com elevado potencial de valorização. A exemplo, medidas citadas no DL 73/2011 englobam:

- Distinção entre os conceitos de valorização e eliminação de resíduos;
- Aprovação de programas de prevenção;
- Metas de preparação para reutilização e reciclagem até 2020;
- Previsão de utilização de pelo menos 5% de materiais reciclados em empreitadas de obras públicas;
- Critérios para que determinados resíduos deixem de ter o estatuto de “resíduo”;
- Introdução do mecanismo da responsabilidade alargada do produtor.

O referido DL define os biorresíduos como os resíduos biodegradáveis de espaços verdes, nomeadamente os de jardins, parques, campos desportivos, entre outros, enquadrando-os na promoção dos programas de reutilização e reciclagem abordados no documento. Neste sentido, tem-se que os resíduos de um horto de comercialização de plantas e serviços de jardinagem se enquadram neste segmento.

A região do Porto, situada no norte do país, conta com a gestão pública integrada da LIPOR (Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto) como entidade responsável pela gestão, valorização e tratamento dos resíduos urbanos produzidos pelos municípios que a integram.

Apoiada sob diretrizes sustentáveis, a LIPOR atua sobre a gestão dos resíduos sólidos urbanos preconizando a adoção de sistemas integrados de tratamento de resíduos e a minimização da deposição de resíduos em aterros sanitários. São tratados aproximadamente 500.000 toneladas de resíduos sólidos urbanos, dentre os quais enquadram-se os resíduos de poda de jardins e áreas verdes, produzidos por cerca de 1 milhão de habitantes (LIPOR, 2018a).

Especificamente para o município do Porto, localizado na região do Porto, sob gestão da *PortoAmbiente*, são predispostos dois pontos de disposição pública de resíduos de maiores volumes, os chamados ecocentros. Ecocentro da Prelada e Ecocentro das Antas funcionam, segundo, informações da entidade, recebendo resíduos durante toda a semana, períodos da manhã e tarde, os quais são enviados à LIPOR.

Dentre os resíduos verdes, é admissível o recebimento de restos de jardinagem, sem terras ou outro tipo de contaminantes; ramos de pequenas podas; e flores e plantas não envasadas. Não são admissíveis, por sua vez, o recebimento de flores e plantas envoltas

em celofane ou outro tipo de embalagem; flores e plantas envasadas; raízes e troncos de palmeiras (grandes dimensões); terras, relvas com terra e varreduras (LIPOR, 2018b).

O resíduo orgânico urbano recolhido é enviado para a LIPOR, para a Central de Valorização Orgânica, a qual produz, maioritariamente, corretivo orgânico por meio de processo de compostagem (LIPOR, 2018b).

Porém, embora o recebimento de resíduos de jardinagem e afins esteja contemplado nas funções da entidade, a gestora dos pontos de recolha, *PortoAmbiente*, afirma que os particulares apenas poderão depositar até 200 kg por mês de resíduos verdes nos ecocentros.

Ainda tratando-se de Portugal, é válido afirmar o infeliz histórico com eventos de incêndios em áreas verdes por todo o país nos últimos anos. Tais eventos levaram a gestão pública a implementar legislação (Decreto-Lei nº 124/2006) visando à limpeza de terrenos e matas com espécies vegetais objetivando-se o maior controle e prevenção de alastramento de incêndios. Com fatídicos episódios ocorridos no ano de 2017, alterações foram propostas e implantadas, conforme detalha o Decreto-Lei nº 10/2018, de 14 de fevereiro, destacando-se as seguintes ressalvas frente ao anterior: o poder dado aos municípios, a especificação das medidas para pinheiros e eucaliptos, a mudança na avaliação dos matos a cortar e as coimas a aplicar (Portugal, 2018).

Nesse âmbito, muitas são as preocupações da população de forma geral sobre o tema. Pensando-se não somente nas queimadas em si, mas também nas alterações climáticas, apontadas como condicionantes para ignição das mesmas, a população tem sido incumbida, legal e moralmente de manter atenção prioritária às limpezas de terrenos e matas. Tais fatos são indícios de aumentos significativos na geração de biomassa disponível para diversos fins.

### 3.2 CASO DE ESTUDO

O empreendimento denominado Horto da Boavista atua no município do Porto como comerciante retalhista de flores e plantas, imprimindo também atividades de construções e manutenções de pequenos jardins para terceiros. Com área de aproximadamente 1600 m<sup>2</sup>, o local consiste em estufas não controladas compostas por diversos tipos de plantas e árvores, ornamentais ou não, entre áreas a céu aberto e áreas fechadas, além de promover externamente os serviços de jardinagem para entidades particulares na região do Porto. A Figura 3 ilustra a localização do empreendimento.



Figura 3 – Localização do Horto da Boavista (Google Earth, 2018)

Nessas circunstâncias, é correto afirmar que o volume de resíduos provenientes das atividades desempenhadas pelo Horto da Boavista é relativamente elevado, sobretudo em função dos serviços de manutenção e construção de jardins particulares, sendo que estes acarretam em grande geração de material verde.

Em mensuração informal, o Horto da Boavista afirma gerar cerca de 15 m<sup>3</sup> de biomassa mensalmente (aproximadamente 400 kg), sendo que cerca de metade desta é destinada nos ecocentros disponibilizados pela Câmara Municipal do Porto (*PortoAmbiente*) no município do Porto.

A outra metade dos resíduos encontra-se em situação desfavorável para destinação, uma vez que não são admissíveis para ecocentros mais de 200 kg por mês, conforme mencionado anteriormente. Restam ao horto alternativas que dependem de significativos gastos financeiros para adequada destinação, além da possibilidade de destinação como lixo comum, o que possivelmente acarreta em ocupação indevida de volume disponível em contentores de lixo e posteriormente em aterros sanitários.

O Horto da Boavista afirma que de 2017 para 2018, o volume de resíduo verde gerado aumentou em função do grande volume de serviços relacionados à limpeza de terrenos com mata e árvores. Tal fato pode estar relacionado com a severidade de notificações para cuidados com os eventos de queimadas que aumentaram consideravelmente nos últimos anos em Portugal. Os clientes do empreendimento que possuem terrenos na região, conscientes da problemática dos incêndios e das alterações climáticas, podem representar potenciais fábricas de resíduos verdes ou biomassa por meio da contratação dos serviços de empresas especializadas.

O presente trabalho avaliará, conforme destacado nos objetivos do mesmo, a viabilidade de transformação do resíduo verde originário do Horto da Boavista em

*biochar* utilizável para crescimento de culturas a serem reaproveitadas para complementar as atividades do empreendimento em questão.

Tal reaproveitamento pode vir a representar economias frente à utilização corrente de substratos comerciais para tais atividades além da não privação de espaços disponíveis em aterros sanitários pertinentes.

### 3.3 METODOLOGIA APLICADA

A metodologia aplicada do presente trabalho baseia-se na seguinte planificação de atividades a desenvolver:

#### Caracterização da biomassa utilizada

- Determinação do teor de humidade;
- Determinação do teor de cinzas;
- Determinação do teor de lenhina;
- Determinação do poder calorífico superior.

#### Ensaio de pirólise

- Planeamento experimental dos ensaios de pirólise;
- Descrição do processo de pirólise.

#### Caracterização dos produtos da pirólise

- Quantificação do rendimento em fase sólida (*biochar*);
- Quantificação do rendimento em fase líquida (bio-óleo);
- Determinação do poder calorífico do *biochar*.

#### Utilização do biochar no cultivo da alface (*Lactuca sativa*)

- Descrição do procedimento de composição de substrato e sementeira da Alface (*Lactuca sativa*);
- Análise de parâmetros de crescimento dos cultivos da Alface (*Lactuca sativa*).

#### Análise dos resultados

- Descrição do método analítico.

### 3.3.1 Caracterização da biomassa utilizada

A biomassa utilizada neste estudo foi recolhida fresca no local da execução de atividade de jardinagem pelo Horto da Boavista. No mesmo dia o material foi separado entre apenas galhos (G), folhas (F) e ervas (E), conforme Figura 4. Os galhos e folhas verdes são provenientes da espécie *Metrosideros excelsa* enquanto as ervas são de espécies gramíneas variadas.

Tal separação foi realizada para posterior comparação com dados da literatura, que permitam análises detalhadas para cada composição do material, permitindo a compreensão da possível influência de fração num resultado final.

As três amostras foram trituradas e secas em estufa a 105 °C e preservadas em exsicador para os restantes ensaios (Figura 5). Uma fração foi usada para fazer a determinação imediata do teor de humidade em bruto. Os materiais e métodos utilizados neste procedimento estão descritos em detalhe no Anexo A.



Figura 4 – Separação da biomassa utilizada em galhos, folhas e ervas (arquivo do autor)



Figura 5 – Trituração e secagem do material (arquivo do autor)

- Determinação do Teor de Humidade (TH)

Realizou-se a determinação do teor de humidade por meio de método direto (método de estufa) (APHA, 1999). Pesou-se cerca de 10 g de cada porção de biomassa para cadinhos previamente secos e pesados, e colocou-se na estufa (*WTB Binder*) a  $105 \pm 5$  °C; depois de duas horas na estufa retirou-se para um exsicador para arrefecer. Após o arrefecimento pesou-se e voltou-se a colocar na estufa, este procedimento foi repetido até peso constante da amostra (Anexo A.1).

O cálculo do teor de humidade é efetuado a partir do quociente entre a variação de massa registrada (massa da porção de biomassa húmida menos a massa seca) e a massa de biomassa húmida.

- Determinação do Teor de Cinzas (TC)

A determinação do teor de cinzas foi efetuada a partir do procedimento descrito no *Standard Methods* (APHA, 1999), (método 2540 E). Resumidamente, pesou-se cerca de 5 g de cada porção de biomassa (G, F e E), secas em estufa a  $105 \pm 5$  °C, para um cadinho de porcelana previamente seco em mufla a 550 °C, e colocou-se a calcinar na mufla (*Nabertherm*) a 550 °C durante uma hora. Retirou-se e deixou-se arrefecer em exsicador e pesou-se; repetiu-se o ciclo de calcinação, arrefecimento e pesagem até obter peso constante (Anexo A.2).

O cálculo do teor de cinzas é efetuado a partir do quociente entre a variação de massa registrada (massa da porção de biomassa seca menos a massa calcinada) e a massa da porção de biomassa seca.

- Determinação do Teor de Lenhina (TL)

Para a determinação do teor de lenhina insolúvel seguiu-se o procedimento descrito na norma TAPPI T222om-11, 2009 (Anexo A.4), que consiste na digestão de 1 g de cada porção de biomassa (G, F e E) com 15 mL de  $H_2SO_4$  a 72% (% m/m), em banho termostático (*Selecta Unitronic OR-C*) a 20 °C durante 2 horas, sob agitação constante. Após conclusão da reação, adicionam-se 575 mL de água desionizada sujeitando a mistura à ebulição durante 4 horas. Seguidamente, a solução é filtrada em vácuo e o resíduo é lavado com água desionizada até pH neutro. Posteriormente é seco na estufa até obtenção de peso constante, obtendo-se assim a lenhina insolúvel (Figura 6). Para a determinação da lenhina solúvel é quantificada através da leitura da absorvância, a 205 nm, do filtrado obtido no procedimento anterior, utilizando para esse efeito o espectrofotómetro *UV-Vis, Shimadzu, UV-160 A*.



Figura 6 – Agitação constante em banho termostático e ebulição da mistura (arquivo do autor)

- Determinação do Poder Calorífico Superior

Para a determinação do poder calorífico superior (PCS), recorreu-se ao procedimento descrito na norma ASTM D586510 (ASTM, s.d.). Foi utilizado um calorímetro (Parr 6772 *Calorimetric Thermometer*) acoplado a uma bomba calorimétrica (*Oxygen Bomb Calorimeter*) conforme representado na Figura 7. O poder calorífico superior corresponde à soma da energia libertada sob a forma de calor e a energia gasta na vaporização da água formada numa reação de combustão, ou seja, permite aferir o conteúdo energético da biomassa inserida (Anexo A.3).



Figura 7 – Calorímetro para determinação do Poder Calorífico superior (arquivo do autor)

### 3.3.2 Ensaios de pirólise

#### 3.3.2.1 Planeamento experimental dos ensaios de pirólise

Num processo experimental, para avaliar a influência de fatores sobre determinada resposta, pode-se alterar uma variável de cada vez (efeito da variável na resposta de cada um dos fatores, mantendo os restantes constantes). Embora tal estratégia seja usual na prática industrial, há desvantagens por permitir que sejam avaliadas as possíveis interações entre todos os fatores.

Outra estratégia seria de variar diversos parâmetros simultaneamente. Nesse caso, dever-se-á realizar a planificação fatorial variando todos os níveis dos fatores em estudo. Um plano fatorial é definido por  $k$  fatores representados por  $n$  níveis, sendo então definido como um planeamento fatorial  $nk$ . Quando se recorre apenas a dois níveis, habitualmente representados por nível mais elevado (+), menos elevado (-) e dois ensaios ao centro (0), tem-se um plano  $2k$ . Para se planejar o conjunto de experiências a realizar, a fim de testar quais os principais parâmetros que necessitariam de ser estudados para otimizar o rendimento e qualidade do produto, considerou-se um desenho personalizado, incidente em 3 variáveis independentes, que poderão afetar o processo de pirólise, sendo estas:

- Velocidade de aquecimento;
- Temperatura de patamar;
- Tempo de patamar.

Os valores de cada um destes parâmetros encontram-se resumidos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Valores dos parâmetros do desenho composto central**

Codificação	Temperatura (°C)	Tempo de patamar (min)	Velocidade de aquecimento (°C/min)
-1	300	10	10
0	375	15	15
+1	450	20	20

Assim sendo, para o conjunto destas variáveis realizou-se um plano fatorial de  $2^3 = 16$ .

Com a realização dos ensaios de pirólise pretendeu-se avaliar a influência dos 3 parâmetros, sendo o conjunto de ensaios a realizar planejado por meio de *software* estatístico JMP (v14) (ferramenta DOE – *Design of Experiments*), o qual gerou combinações destes parâmetros, considerando dois pontos de centro, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4 – Combinação de parâmetros gerados pelo *software* estatístico JMP**

Nº ensaios	Temperatura (°C)	Tempo de patamar (min)	Velocidade de aquecimento (°C/min)
1	375	20	10
2	450	15	15
3	300	15	10
4	300	20	10
5	450	10	20
6	375	15	15
7	300	10	10
8	375	20	20
9	300	10	20
10	300	10	20
11	450	10	10
12	375	15	15
13	300	20	20
14	450	20	15

Nº ensaios	Temperatura (°C)	Tempo de patamar (min)	Velocidade de aquecimento (°C/min)
15	450	15	10
16	375	10	15
17	375	10	10
18	450	20	20
19	300	20	15
20	375	15	20

Os conjuntos de extremos utilizados neste planeamento tiveram como base características que permitissem o maior rendimento em fase sólida no produto da pirólise, conforme sugerido na literatura.

### 3.3.2.2 Descrição experimental do processo de pirólise

O processo de pirólise foi efetuado num forno pirolítico (tipo *split*) da *Termolab*, representado na Figura 7. O forno é vertical, de leito fixo, sendo constituído por uma unidade de controlo que permite fixar:

- Tempo de aquecimento;
- Temperatura de patamar;
- Tempo de patamar.



Figura 8 – Forno pirolítico do tipo *split* utilizado (arquivo do autor)

O forno tem ainda uma unidade de aquecimento (fornalha) constituída por uma camisa isolante de material refratário, resistências de aquecimento com uma potência de 2000 W, e ainda um tubo de porcelana refratária (com 1 m de comprimento, sendo a altura da zona quente de 300 mm, e diâmetro interno de 29 mm), que constitui o reator de pirólise.

Existe ainda na unidade, um painel de regulação do caudal de gás alimentado, constituído por rotâmetros e válvulas. A atmosfera de pirólise pode ser condicionada, mediante a alimentação de CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> ou de uma mistura destes 2 gases, a um caudal regulável com rotâmetros.

As amostras de cada porção de biomassa residual (G, F e E) são mescladas nas seguintes proporções:

- 40% de galhos;
- 25% de folhas;
- 35% de ervas.

Tal procedimento foi tomado em função de gerar produtos em consonância com a realidade da mescla de resíduos gerados nas atividades do empreendimento em estudo.

Deve-se ressaltar que foram utilizados os valores em base húmida para a mescla das amostras. Sendo os 40, 25 e 35% aplicados considerando-se os teores de humidade (TH) das amostras (Galhos, Folhas e Ervas), conforme cálculos expostos no Anexo B, obtendo-se diferentes percentagens de mistura final.

Após rigorosa mescla manual, são pesadas para o cesto de pirólise (previamente seco e pesado) até cerca de  $\frac{3}{4}$  da sua capacidade (Figura 9) e o mesmo é colocado no tubo do forno que é fechado. Liga-se o azoto ao caudal máximo, de modo a arrastar o oxigênio que ficou retido na tubagem e no tubo de reação, para evitar que ocorra combustão.



Figura 9 – Cesto de pirólise preenchido com biomassa triturada (arquivo do autor)

Após programação dos parâmetros a estudar, liga-se o gás de arraste, azoto, a um caudal constante de aproximadamente 260 mL/min. Durante o processo o efluente gasoso irá arrastar o bio-óleo para um *kitasato* contendo água previamente pesado, que por sua vez está em banho de água e gelo, de forma a condensar o óleo (Figura 10).



Figura 10 – *Kitasato* para coleta do bio-óleo (arquivo do autor)

Após terminar a pirólise deixa-se o forno arrefecer até temperatura ambiente, antes de o abrir de modo a não ocorrer um choque térmico que origina a quebra do tubo do forno, evitando-se, também, a combustão do produto retido no cesto, em contato com o ar (Anexo A.2).

### 3.3.3 Caracterização dos produtos da pirólise

#### 3.3.3.1 *Quantificação do rendimento em fase sólida (biochar)*

Para a quantificação do rendimento dos produtos sólidos gerados nos ensaios de pirólise, dividiu-se as massas de *biochar* após o ensaio no cesto pelas massas aferidas de biomassa inserida, transformando-se o resultado em percentagens para posterior análise.

#### 3.3.3.2 *Quantificação do rendimento em fase líquida (bio-óleo)*

Já para a quantificação do rendimento dos produtos líquidos gerados nos ensaios, dividiu-se as massas de bio-óleo condensado no *kitasato* após os ensaios, pelas massas aferidas de água previamente adicionada ao *kitasato*, transformando-se o resultado em percentagens para posterior análise.

### 3.3.3.3 Determinação do poder calorífico do biochar

O poder calorífico superior (PCS) do *biochar* foi determinado conforme método utilizado para determinação do PCS das biomassas (matérias-primas) utilizadas (G, F e E) neste estudo, descrito no item 3.3.1.

### 3.3.4 Utilização do biochar no cultivo da alface (*Lactuca sativa*)

#### 3.3.4.1 Descrição do procedimento de composição de substrato e semeadura da Alface (*Lactuca sativa*)

Para a composição do substrato de cultivo de alface condicionado pelo *biochar*, foram propostos 5 tipos de tratamentos, divididos em proporções em massa de *biochar* (%) / substrato de cultivo vegetal comercial (%), nomeados conforme segue:

- T0 → 0% / 100%;
- T25 → 25% / 75%;
- T50 → 50% / 50%;
- T75 → 75% / 25%;
- T100 → 100% / 0%.

Foram testados dois tipos de carvão vegetal, sendo estes o *biochar* comercial (a) e o carvão vegetal comum (b). Foram utilizadas quatro repetições para cada tratamento, totalizando 40 plantios.

As fontes de *biochar* utilizadas são obtidas em comércio local, sendo os mesmos triturados e peneirados por malhas de abertura padronizadas pelo sistema internacional Tyler – Mesh 16 (1,19 mm) e Mesh 35 (0,5 mm) – para otimização na mescla ao substrato vegetal comercial e na funcionalidade como substrato para semeadura. A mistura de cada carvão manteve-se próxima a 40% e 60% em massa de cada precipitado das malhas utilizadas, respetivamente.

O *biochar* gerado nos ensaios de pirólise deste estudo não foi utilizado devido a não ter sido produzido volume suficiente para os testes de crescimento de plantas propostos, tendo-se optado pela aquisição de um *biochar* comercial para a realização dos referidos testes.



Figura 11 – *Biochar* peneirado e triturado (arquivo do autor)

Já para a fonte de substrato vegetal comercial foi escolhido o substrato de cultivo Biomax 20 kg, composto leve e próprio para a germinação de sementes. A mescla com os carvões foi feita manualmente.

Para a sementeira de cultivos de alface foram utilizados como base os procedimentos de Cultura em Estufa e Cuidados Culturais propostos por Tavares (1988) em seu livro *Cultivo de Alface*, publicado pelo já extinto Ministério da Agricultura, Pescas e Alimentação em Portugal. Foi escolhida a espécie *Alface Regina 2000* por representar cultivo adequado para a estação regente de sementeira (verão).

Em suma, utilizou-se um tabuleiro de plástico preto com 50 células de dimensões 3x3x4 cm, com capacidade para aproximadamente 14 g de substrato por célula, utilizando-se uma semente comercial *pelletizada*<sup>2</sup> de alface por célula, cobertas por fina camada de perlite.

O tabuleiro foi mantido em ambiente exterior coberto, a uma altura de 0,50 m, voltado à faceta nascente, sem incidência de radiação solar direta. O ambiente conta com ventilação natural e de temperatura e umidade do ar não controláveis, oscilantes entre 18-25 °C e 60-80%, aproximadamente.

---

<sup>2</sup> Sementes *pelletizadas* são sementes selecionadas e revestidas com material propício para a proteção de fatores externos e consequente maior garantia de germinação, além de promover o melhor manuseamento (Tavares, 1988).



Figura 12 – Tabuleiro com sementes *pelletizadas* de alface (arquivo do autor)

A irrigação foi realizada pelo sistema de microaspersão duas vezes por dia durante os 10 primeiros dias, passando para uma vez por dia durante o restante dos dias. O cultivo teve tempo total de 24 dias após emergência, sendo esta considerada quando os cotilédones estiveram totalmente abertos.

#### 3.3.4.2 *Análise de parâmetros de crescimento dos cultivos da Alface (Lactuca sativa)*

Para comparação dos tratamentos utilizando diferentes composições de *biochar* e substrato vegetal comercial, foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Altura média das plantas (AP)
- Número de folhas verdadeiras (NFV);
- Massa fresca da parte aérea (MFPA);
- Massa fresca das raízes (MFR);
- Massa seca da parte aérea (MSPA);
- Massa seca das raízes (MSR).

A AP foi determinada por meio da medida, utilizando-se de régua milimetrada, da base ao ápice da folha mais nova da planta. O NFV resulta da contagem das folhas verdadeiras de cada planta.

Após tais medições, realizou-se o seccionamento da parte aérea e do sistema radicular de cada planta, incluindo limpeza cuidadosa do substrato residual nas raízes, pesando-se, então, em balança analítica, cada porção das plantas, antes e após a secagem das

mesmas em estufa a 60 °C até peso constante. Com isso obteve-se as MFPA, MFR, MSPA e MSR.

Foram consideradas como folhas verdadeiras aquelas cujo desenvolvimento avançou do estágio de cotilédones. Também foi calculada a taxa de germinação pela observação do desenvolvimento ou não da semente.



Figura 13 – Mudas de alface em medições de altura e número de folhas verdadeiras (arquivo do autor)



Figura 14 – Observação de germinação dos tratamentos no tabuleiro (arquivo do autor)

### 3.3.5 Análise dos resultados

Os resultados foram analisados para cada item anteriormente descritos, sendo utilizados média e desvio-padrão e comparados com valores da literatura, quando pertinente.

### 3.3.5.1 Descrição do método analítico

Para os resultados de rendimento sólido dos ensaios de pirólise, foi utilizado o *software* JMP, ferramenta de análise *Fit Model* e ferramentas gráficas, com o intuito de entender-se as significâncias e efeitos de cada parâmetro, assim como as interações dos mesmos com a estimativa dos rendimentos.

Para os resultados de altura das plantas e número de folhas verdadeiras das mudas de alface, foi utilizado o *software* Bioestat 5.0, pelo qual procedeu-se a análise de variância (ANOVA), que permite avaliar afirmações sobre as médias de populações, verificando se existe uma diferença significativa entre elas e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. O teste utilizado foi o de Kruskal-Wallis, teste não paramétrico, utilizado para n menor que 30 em amostras não normais e não homogêneas.



# RESULTADOS E DISCUSSÃO

- 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA
- 4.2 ENSAIOS DE PIRÓLISE
- 4.3 CRESCIMENTO DOS CULTIVOS DE ALFACE (*Lactuca sativa*)
- 4.4 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ADITIVAÇÃO DE SOLO COM *BIOCHAR* GERADO A PARTIR DOS RESÍDUOS PRODUZIDOS NO HORTO

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

#### 4.1.1 Teor de Umidade (TH)

Os resultados encontrados para a caracterização da biomassa, especificamente o Teor de Umidade (TH) encontram-se em destaque na Tabela 5, juntamente com valores encontrados na literatura para medições semelhantes.

**Tabela 5 – Resultados e referências para Teor de Umidade da biomassa utilizada**

Amostra	Fonte	Descrição	TH
Galhos	<b>Este trabalho</b>	<b>Galhos de <i>Metrosideros excelsa</i></b>	<b>46%</b>
	Foelkel, 2016	Galhos de eucalipto recém-colhido	50-56%
	Revista da Madeira, 2012	Galhos de árvores de diferentes espécies recém-colhidas	40-70%
	Souza, 2016	Poda de árvores urbanas	36%
	Souza, 2016	Serragem misturada de árvores urbanas	40%
	IMFLORESTAL, 2012	Galhos de eucalipto verde	54%
Folhas	<b>Este trabalho</b>	<b>Folhas verdes de <i>Metrosideros excelsa</i></b>	<b>59%</b>
	EMBRAPA, 2017	Folhas de eucalipto	40-80%
	Cavalheiro <i>et al.</i> , 2014	Folhas de oliveiras de diferentes variedades	46-58%
	Ferreira, 2014	Folhas de eucaliptos de diversas idades	52-63%
Ervas	<b>Este trabalho</b>	<b>Ervas gramíneas frescas</b>	<b>74%</b>
	Santos, 2014	Vários tipos de gramíneas	54-77%

O teor de humidade de biomassa fresca pode variar drasticamente em função de diversos fatores como a estação do ano, o clima, o tipo de biomassa, as condições recentes de precipitação e humidade relativa do ar, incidência solar, entre outros. Nesse sentido, pode-se esperar um amplo intervalo para cada tipo de biomassa, o qual a humidade irá sofrer alterações intrínsecas.

Conforme referido, o material utilizado foi coletado em fresco sendo dividido prontamente entre galhos (G), folhas (F) e ervas (E). Imediatamente, separou-se determinada porção para quantificação do teor de humidade de cada fração, prezando-se pela integridade do valor a ser determinado.

De acordo com a Tabela 5, nota-se que os valores de humidade para as três frações encontram-se dentro do esperado e estão próximos dos valores citados nas referências utilizadas para os mesmos materiais.

Naturalmente, a fração de ervas pode apresentar maior humidade (74% nesta medição) por estar suscetível às regas frequentes nos respetivos jardins supervisionados, como o do trabalho em questão. Ainda, nota-se que as folhas apresentam maior humidade que os galhos (59% vs. 46%), fato também esperado pela composição do material e tipo de árvore coletada.

A variação das percentagens dos TH dos galhos para as de referência justificam-se pelo diferente comportamento de espécies, uma vez que não foram encontrados valores de referência para a espécie em estudo. Contudo, foram referidos valores para árvores do mesmo gênero (*Myrtaceae*), como os eucaliptos. Além disso, referem-se as variações temporais, conforme já explicitado anteriormente, sendo que o fato do clima estar mais seco e com menos precipitações na época da colheita do material pode justificar a ligeira inferioridade nos valores encontrados, tanto de G como para F.

#### 4.1.2 Teor de Cinzas (TC)

Os resultados encontrados para a caracterização da biomassa, especificamente o Teor de Cinzas (TC) em base seca encontram-se em destaque na Tabela 6, juntamente com valores encontrados na literatura para medições semelhantes.

Os teores de cinzas encontrados neste estudo estão condizentes com o que diz Almeida *et al.* (2003), que indica que TC elevados podem significar a abundância de elementos minerais no material.

Tabela 6 – Resultados e referências para Teor de Cinzas da biomassa utilizada

Amostra	Fonte	Descrição	TC (%)
	<b>Este trabalho</b>	<b>Galhos de <i>Metrosideros excelsa</i></b>	<b>1,01</b>
Galhos	Silva, 2013	Galhos de eucalipto	0,32
	Vale <i>et al.</i> , 2005	Madeiras de árvores nativas do Brasil	0,35-1,50
	Conz, 2015	Serragem de madeiras diversas	1,17
	<b>Este trabalho</b>	<b>Folhas verdes de <i>Metrosideros excelsa</i></b>	<b>3,32</b>
Folhas	Paula <i>et al.</i> , 2008	Folhas de pimenta ( <i>Myrtaceae</i> )	3,71-6,60
	Couto <i>et al.</i> , 2009	Folhas de <i>Eugenia dysenterica</i> ( <i>Myrtaceae</i> )	2,94
	Sartório, 2014	Folhas de eucalipto de diferentes densidades	3-5
	<b>Este trabalho</b>	<b>Ervas gramíneas frescas</b>	<b>8,23</b>
Ervas	Conz, 2015	Palha de cana-de-açúcar (gramínea)	8,48
	Santos, 2008	Espécies de gramíneas	10,4-11,5
	Santos, 2004	Média de gramíneas diversas	10,23

As biomassas de Folha e Erva utilizadas neste estudo contém maiores teores de minerais, frações inorgânicas, do que os galhos, que contém maiores teores de frações orgânicas, lenhina, celulose e hemicelulose, sendo que, desta forma, podem sofrer variações em reações de conversão térmica, apresentando reduzido teor de cinzas (Karayildirim *et al.*, 2006).

Sabe-se que, em geral, nas plantas com elevados minerais constituintes, as cinzas representam de 5-10%, o que foi constatado neste estudo (Almeida *et al.*, 2003).

#### 4.1.3 Poder Calorífico Superior (PCS)

Os resultados encontrados para a caracterização da biomassa, especificamente o Poder Calorífico Superior (PCS) encontram-se em destaque na Tabela 7, juntamente com valores encontrados na literatura para medições semelhantes.

Conforme refere Rocha (2011), a composição química da madeira exerce grande influência no poder calorífico superior da madeira, sobretudo a lenhina, para madeira não tratada, como os galhos de árvores. Diversos estudos apontam uma variação média de PCS de

madeira de diferentes tipos de árvores de aproximadamente 4200 a 4700 cal/g (Quirino *et al*, 2005).

**Tabela 7 – Resultados e referências para Poder Calorífico Superior da biomassa utilizada**

Amostra	Fonte	Descrição	PCS (cal/gseco)
	<b>Este trabalho</b>	<b>Galhos de <i>Metrosideros excelsa</i></b>	<b>4529</b>
Galhos	Rocha, 2011	Eucaliptos de diferentes idades e espaçamentos	4505
	Carneiro, 2013	Madeira de clones de eucalipto de diferentes idades	4542-4660
	Vale <i>et al.</i> , 2002	Biomassa de árvores do cerrado brasileiro	4516-4990
	<b>Este trabalho</b>	<b>Folhas verdes de <i>Metrosideros excelsa</i></b>	<b>4809</b>
Folhas	Sartório, 2014	Folhas de eucaliptos de diferentes densidades	5321-5708
	Pincelli, 2011	Folhas residuais de eucalipto	4663
	<b>Este trabalho</b>	<b>Ervas gramíneas frescas</b>	<b>4056</b>
Ervas	Silva, 2016	Capim elefante (gramínea)	4061
	Silva, 2016	Biomassa de folhas de bambu (gramínea)	3765
	Dantas, 2013	Folhas de milho (gramínea)	4227-4365
<b>Média ponderada e desvio-padrão G, F e E deste trabalho</b>			<b>4495 ±310</b>

Notadamente os valores aferidos neste estudo para o PCS das biomassas utilizadas encontram-se dentro do esperado, ou seja, estão próximos dos valores encontrados nos referenciais bibliográficos, conforme Tabela 7. Naturalmente, pela maior composição de lenhina, os galhos e folhas apresentam maiores valores de poder calorífico que as ervas (Jara, 1989 *apud* Rocha, 2011).

Novamente, buscou-se referências que se aproximassem das espécies utilizadas, como os eucaliptos, para G e F e espécies de gramíneas para E.

Realizou-se a média ponderada para os três tipos de biomassa (G, F e E), juntamente com desvio-padrão, com base nas proporções em base húmida utilizadas para os ensaios de pirólise, para comparações com os PCS dos *biochar* gerados.

#### 4.1.4 Teor de Lenhina Total (TLT)

Os resultados encontrados para a caracterização da biomassa, especificamente o Teor de Lenhina Total (TLT) em base de massa seca encontram-se em destaque na Tabela 8, juntamente com valores encontrados na literatura para medições semelhantes.

**Tabela 8 – Resultados e referências para Teor de Lenhina Total da biomassa utilizada**

Amostra	Fonte	Descrição	TLT (%)
	<b>Este trabalho</b>	<b>Galhos de <i>Metrosideros excelsa</i></b>	<b>38</b>
Galhos	Martins & Brito, 1996	Fuste de eucalipto	21
	Trugilho, 2015	Espécies de eucalipto jovem	30-32
	Braz, 2011	Lenho de clone de eucalipto	29
Folhas	<b>Este trabalho</b>	<b>Folhas verdes de <i>Metrosideros excelsa</i></b>	<b>19</b>
	Novaes <i>et al.</i> , 2010	Folhas de eucalipto	21
	ARATO, 2006	Folhas de espécies amazônicas	16-28
Ervas	<b>Este trabalho</b>	<b>Ervas gramíneas frescas</b>	<b>3</b>
	EMBRAPA, 2017	Espécies capoeiras de pastejo	7
	Silva, 2007	Ervas gramíneas frescas	5

O TLT para a biomassa analisada esteve dentro do esperado para os tipos de materiais utilizados. Para a biomassa tipo G, nota-se ligeira superioridade no valor encontrado em comparação aos valores utilizados como referência. Segundo Simetti (2016), que estudou biomassas de diferentes tipos de eucalipto, árvore da família *Myrtaceae*, a mesma família da árvore utilizada neste estudo, os teores de lignina podem aumentar em função da proximidade da extração do lenho e a base da árvore, assim como em função da idade da mesma.

Para Folhas e Ervas, notou-se proximidade dos valores, sendo que ambos apresentam linearmente, redução no teor de lenhina, uma vez que representam materiais não-lenhosos, sendo, conseqüentemente, de composição e comportamentos relativamente diferentes quando comparados com os galhos de uma mesma árvore, por exemplo.

## 4.2 ENSAIOS DE PIRÓLISE

A biomassa foi utilizada como mescla triturada em base húmida entre as partes Galhos, Folhas e Ervas para os cestos do forno pirolítico, conforme descrito na metodologia de trabalho.

Os resultados dos ensaios de pirólise encontram-se na Tabela 9, a qual discrimina a temperatura e tempo de patamar e a velocidade de aquecimento para cada ensaio, estipuladas em função do planeamento experimental aplicado (*software DOE*), além dos resultados de Poder Calorífico Superior para cada ensaio.

As devidas correções de temperatura aplicadas para o forno encontram-se no Anexo C.

Tabela 9 – Resultados dos ensaios de pirólise

Ensaio	Temperatura de patamar (°C)	Tempo de patamar (min)	Velocidade de aquecimento (°C/min)	Rendimento Sólido (%)	Rendimento Líquido (%)	Poder Calorífico Superior (cal/g)
E1	375	20	10	46,25%	6,05%	5709
E2	450	15	15	35,80%	34,54%	5590
E3	300	15	10	78,26%	11,14%	4945
E4	300	20	10	75,76%	12,13%	5078
E5	450	10	20	30,56%	37,21%	5083
E6	375	15	15	46,86%	14,71%	5721
E7	300	10	10	76,21%	10,67%	5019
E8	375	20	20	47,49%	19,54%	5590
E9	300	10	20	77,23%	10,49%	5040
E10	300	10	20	76,43%	11,59%	4896
E11	450	10	10	36,61%	38,37%	5714
E12	375	15	15	50,18%	-1,54%	5587
E13	300	20	20	73,24%	10,83%	5042
E14	450	20	15	35,73%	40,87%	5551
E15	450	15	10	36,72%	27,53%	5626
E16	375	10	15	49,25%	22,60%	5709
E17	375	10	10	44,26%	15,16%	5704
E18	450	20	20	35,57%	38,21%	5816
E19	300	20	15	76,30%	-2,73%	4877
E20	375	15	20	42,73%	13,26%	5644

#### 4.2.1 Rendimento em Sólido (*biochar*)

Os ensaios destacados em verde na Tabela 9, que representam ensaios de temperatura de patamar de 300 °C, apresentaram, em geral, aspecto diferente do esperado para o produto sólido, o *biochar*. A coloração esperada em preto escuro e fosco não representa por completo o produto coletado, o qual apresentou também partes em marrom e preto claro (Figura 15). Aparentemente não houve carbonização por completo para todos os ensaios nesta temperatura.



Figura 15 – *Biochar* gerado em ensaios à temperatura de patamar de 300 °C em coloração mista (à direita) em comparação com ensaio de 375 °C (à esquerda) (arquivo do autor)

Os mesmos ensaios geraram rendimentos sólidos que variam de 73,2% (E13) até 78,3% (E3), o qual teve velocidade de aquecimento médio (15 °C/min) e tempo de patamar baixo 10 minutos.

Mesmo os ensaios E3, E4, E13 e E19, que apresentam maiores tempos de residência no forno e menores velocidades de aquecimento, fato que pode favorecer a carbonização completa, não apresentaram aspecto uniforme de carvão. Nesse sentido, foram realizados dois novos ensaios, utilizando-se as condições mais propícias para a total carbonização da biomassa. Os parâmetros e resultados encontrados encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros e resultados dos ensaios adicionais com temperatura de patamar 300 °C

Ensaio	Temperatura (°C)	Tempo de patamar (min)	Velocidade de aquecimento (°C/min)	Rendimento em sólido (%)
E21	300	30	10	73,27%
E22	300	30	10	70,42%

Para os ensaios E21 e E22, utilizou-se a mesma temperatura de patamar de 300 °C com baixa taxa de aquecimento, aumentando-se o tempo de residência da biomassa para 30 minutos. Desta forma, a expectativa foi de obter os mesmos níveis de rendimento da fase sólida da biomassa convertida em *biochar*, com garantia de total carbonização da mesma. Conforme a Tabela 10, o rendimento manteve-se próximo dos ensaios realizados na mesma faixa de temperatura, entretanto, o aspeto e coloração do *biochar* não esteve homogêneo, ou seja, não pode-se afirmar que houve total carbonização do material.

Já os ensaios destacados em amarelo na Tabela 9, de 375 °C de temperatura de patamar, estão aparentemente totalmente carbonizados, com coloração homogênea, com bons rendimentos em geral, além de apresentar a maior variação de rendimento, de aproximadamente 7%. O menor rendimento foi do E20 com 42,73% e o maior para E12 com 50,18%, sendo este máximo testado com os valores médios para os 3 parâmetros variáveis: 375 °C de temperatura de patamar, 15 minutos de tempo de patamar e taxa de aquecimento de 15 °C por minuto. Entretanto, os outros valores encontram-se bem próximos sendo que o mesmo ensaio com os mesmos parâmetros obteve 46,86%.

A fim de tentar maximizar os valores de rendimento sólido, buscando-se confirmar os parâmetros mais ideais para tal, realizou-se, então, outros dois ensaios, nas mesmas condições de E12, conforme descrito abaixo na Tabela 11.

**Tabela 11 – Parâmetros e resultados dos ensaios adicionais com temperatura de patamar 375 °C**

Ensaio	Temperatura (°C)	Tempo de patamar (min)	Velocidade de aquecimento (°C/min)	Rendimento em sólido (%)
E23	375	15	15	43,65%
E24	375	15	15	44,24%

Conforme nota-se nos resultados apontados acima, os ensaios E23 e E24 mantiveram-se dentro do mesmo intervalo já encontrado para rendimentos de fase sólida deste patamar de temperatura, não excedendo os 50,18% já encontrados na primeira leva de ensaios. As amostras geradas de *biochar*, contudo, apresentaram aspeto de carvão totalmente carbonizado.

Finalmente, voltando-se à Tabela 9, os ensaios destacados com a cor rosa, que representam o patamar de temperatura de 450 °C também tiveram pouca variação, assim como os de 300 °C, sendo que, ainda que uma temperatura de patamar relativamente alta, também teve rendimentos acima de 30%, o que é satisfatório tratando-se de rendimentos sólidos para pirólise de biomassa em temperaturas moderadas à elevadas.

O menor rendimento ficou para o E5, que teve menor tempo de residência no forno, com 10 minutos de patamar e taxa de aquecimento de 20 °C por minuto. Já os outros

ensaios estiveram muito próximos sendo o maior o E15, por 0,11%, com tempo médio de patamar e lento aquecimento.

Relativamente ao melhor rendimento sólido, pode-se apontar os ensaios médios (375-15-15) como potencialmente ideais, a exemplo do E12. É possível que o alto rendimento esteja associado ao tipo de material utilizado e a humidade (Di Blasi, 2008). Entretanto, pode-se explorar tais padrões em futuros ensaios visando-se obter rendimentos ainda superiores, sendo que os ensaios à 300 °C podem residir por mais tempo com baixas taxas de aquecimento visando-se obter produto sólido 100% carbonizado, com rendimentos próximos, por exemplo, de 70%.

Os valores encontrados como referência na literatura sugerem rendimentos que variam entre 30-35% para temperaturas baixas, de 400-450 °C em processos chamados de pirólise lenta (Bridgwater, 2003; Giglio, 2016). Pode-se afirmar, então, que os resultados encontrados para os ensaios em 450 °C são similares ao sugerido, uma vez que todos estiveram acima dos 30% e abaixo de 37%.

O fato de produtos sólidos de alto rendimento não estarem 100% carbonizados não indica que não seja possível utilizar-se os mesmos na composição de solos e substratos. Entretanto, para os efeitos do estudo, não foram considerados como potenciais pela utilização de *biochar* carbonizado para os ensaios de cultivo de plantas.

Considerando-se o caso de estudo, o qual o Horto da Boavista afirma gerar aproximadamente 400 kg de biomassa mensais, e considerando-se também os parâmetros centrais 375-15-15, é possível afirmar, por fim, que, há potencial de geração mensal de 188 kg de *biochar* por parte do empreendimento. Tal cálculo foi feito com base no rendimento médio de *biochar* desta gama de parâmetros, de aproximadamente 47%. O potencial descrito faz referência meramente a questões quantitativas, uma vez que, não leva em consideração os custos operacionais e viabilidade energética do processo como um todo.

#### 4.2.2 Análise Estatística do Rendimento em Sólido

Como já referido na seção 3.3.5, construiu-se um desenho personalizado para otimização do processo de pirólise, conjugando o efeito de três variáveis independentes: temperatura de patamar, tempo de patamar e velocidade de aquecimento. A intenção do desenho era simplificar o estudo de otimização visando a realização de cada experimento uma única vez, além da realização de dois pontos centrais, maximizando a qualidade da informação obtida a partir destes ensaios.

Por meio das ferramentas de análise utilizadas, foi possível obter a Tabela 12, de estimativa dos parâmetros, a qual representa a estimativa da influência dos mesmos no rendimento. Por meio da tabela, é possível notar que os parâmetros representados pela intersecção, a temperatura de patamar e o seu quadrado possuem valor de *P* (probabilidade) positivos e pequenos o suficiente para indicar convincente significância.

**Tabela 12 – Estimativa de parâmetros *Fit Model***

<i>Term</i>	<i>Estimate</i>	<i>Std Error</i>	<i>DFDen</i>	<i>t Ratio</i>	<i>Prob&gt; t </i>
Intersecção	0,4771	0,0087	9,36	54,75	<,0001
Temperatura (300,450)	-0,2080	0,0064	6,90	-32,62	<,0001
Tempo de patamar (10,20)	0,0032	0,0064	4,76	0,51	0,6345
Velocidade de aquecimento (10,20)	-0,0074	0,0059	4,69	-1,26	0,2654
Temperatura*Tempo de patamar	0,0116	0,0065	6,69	1,77	0,1221
Temperatura*Velocidade de aquecimento	-0,0040	0,0072	9,95	-0,55	0,5917
Tempo de patamar*Velocidade de aquecimento	0,0005	0,0077	9,75	0,07	0,9487
Temperatura*Temperatura	0,0996	0,0085	3,61	11,59	<b>0,0005</b>
Tempo de patamar*Tempo de patamar	-0,0028	0,0089	4,37	-0,31	0,7688
Velocidade de aquecimento*Velocidade de aquecimento	-0,0231	0,0081	2,25	-2,82	0,0924

Complementarmente, a Tabela 13 representa o resumo dos efeitos em questão por ordem crescente de *P* por parâmetro.

**Tabela 13 – Resumo dos efeitos dos parâmetros**

<i>Source</i>	<i>LogWorth</i>		<i>PValue</i>
Temperatura (300,450)	8,094	+++++	0,0000
Temperatura*Temperatura	3,262	+++++	0,0005
Velocidade de aquecimento*Velocidade de aquecimento	1,034	++	0,0924
Temperatura*Tempo de patamar	0,913	++	0,1220
Velocidade de aquecimento (10,20)	0,576	+	0,2654
Temperatura*Velocidade de aquecimento	0,228	+	0,5917
Tempo de patamar (10,20)	0,198		0,6345
Tempo de patamar*Tempo de patamar	0,114		0,7687
Tempo de patamar*Velocidade de aquecimento	0,023		0,9486

Por sua vez, o *software* disponibilizou a Tabela 14, a qual apresenta a solução dada para as variáveis ao atingir ponto crítico, dentro do intervalo oferecido, com o rendimento estimado em 38,45%.

**Tabela 14 – Solução dada em ponto crítico**

<i>Variable</i>	<i>Critical Value</i>
Temperatura (300,450)	442.63
Tempo de patamar (10,20)	27.15
Velocidade de aquecimento (10,20)	13.93

Tal solução é dada por meio dos coeficientes da Tabela 15, originando a Equação 1 em sequência.

**Tabela 15 – Coeficientes por cruzamento de parâmetros**

	Temperatura (300,450)	Tempo de patamar (10,20)	Velocidade de aquecimento (10,20)	Y
Temperatura (300,450)	0.099630574	0.011618003	-0.004013463	-0.208796264
Tempo de patamar (10,20)	-	-0.00280131	0.000512416	0.003253202
Velocidade de aquecimento (10,20)	-	-	-0.023108045	-0.007494921

$$\begin{aligned}
 &0,4771493089; \\
 &+ (-0.208796264 \times [(T-375) / 75]); \\
 &+ 0.0032532021 \times [(t-15) / 5]; \\
 &+ (-0.007494921 \times [(v-15) / 5]); \\
 &+ [(T-375) / 75] \times \{ [(t-15) / 5] \times 0,00116180032 \}; \\
 &+ [(T-375) / 75] \times \{ [(v-15) / 5] \times (-0,004013463) \}; \\
 &+ [(t-15) / 5] \times \{ [(v-15) / 5] \times 0,0005124159 \}; \\
 &+ [(T-375) / 75] \times \{ [(T-375) / 75] \times 0,0996305737 \}; \\
 &+ [(t-15) / 5] \times \{ [(t-15) / 5] \times (-0,00280131) \}; \\
 &+ [(v-15) / 5] \times \{ [(v-15) / 5] \times (-0,0023108045) \};
 \end{aligned}$$

*Equação 1*

A Figura 16 representa a variação dada pelo rendimento  $Y$  (em fração) em função dos três parâmetros em questão

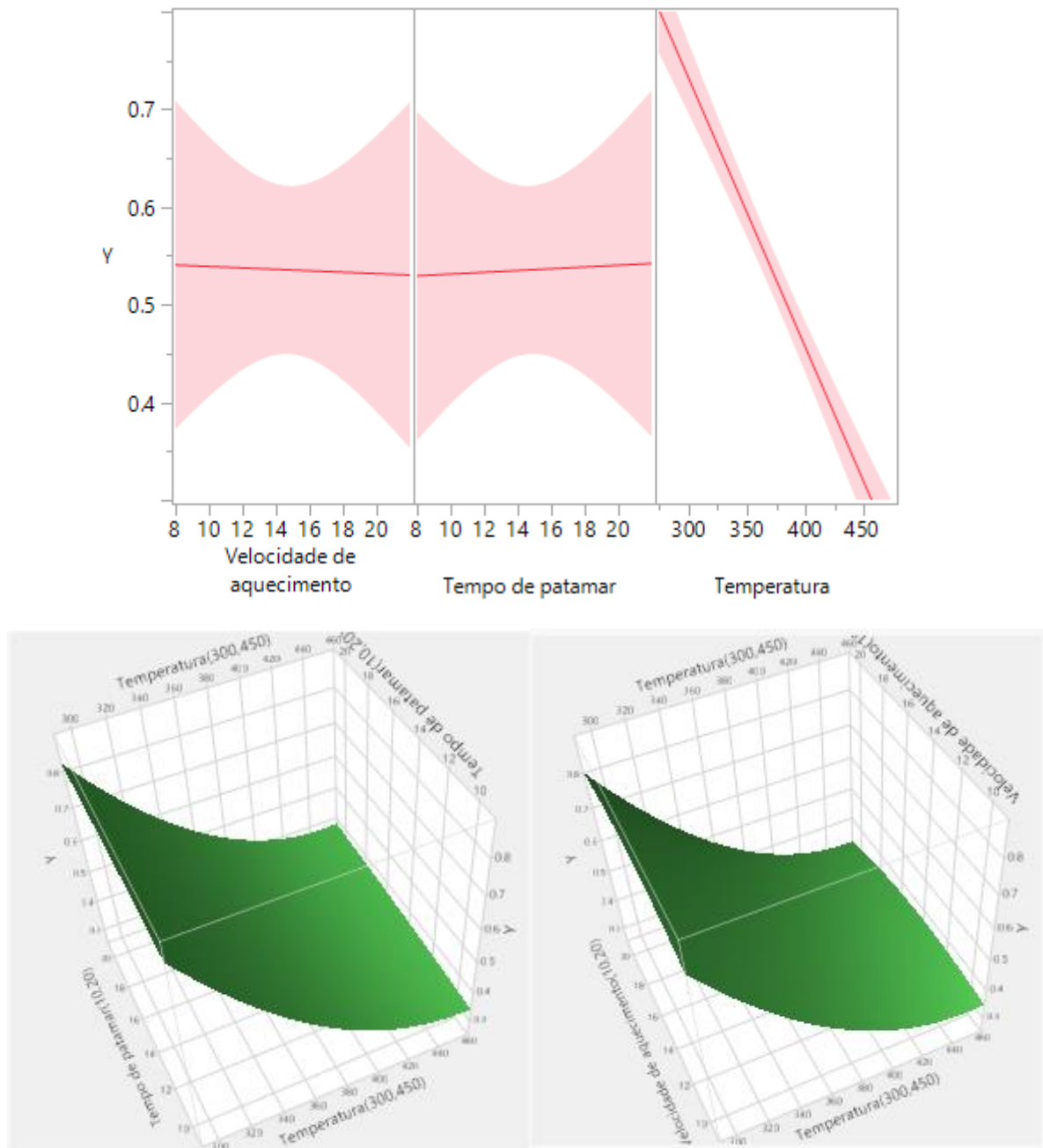


Figura 16 – Variação de rendimento por parâmetros

#### 4.2.3 Rendimento em Líquido (Bio-óleo)

Analisando-se novamente a Tabela 9, nota-se grande irregularidade de valores encontrados para o rendimento de produto líquido da pirólise da biomassa utilizada. Tal fato deve-se, principalmente, a questões intrínsecas ao sistema utilizado, sendo que o

mesmo não apresenta condições ideais para a coleta do líquido arrastado pelos gases de pirólise para o *kitasato*. A posição de cotovelo da tubulação, assim como a possibilidade de encrustamentos ao longo dos caminhos e na saída de gás/líquido influenciaram negativamente na obtenção de resultados concretos, sendo que, alguns ensaios ou não produziram o esperado bio-óleo (destacados em vermelho) ou geraram muito abaixo do esperado.

Para os ensaios de 300 °C (verde), a média de rendimento é de aproximadamente 11% com pouca variação em função da variação dos parâmetros utilizados. Pode-se dizer que tal rendimento era esperado uma vez que a temperatura é relativamente baixa para a pirólise, fato que desfavorece a geração de bio-óleo (Silva, 2007). Desconsiderou-se o ensaio E19 que teve rendimento nulo.

Na sequência, os ensaios de 375 °C (amarelo) geraram grande variação de rendimentos, desconsiderando-se o ensaio E12, que não gerou bio-óleo, sendo o maior de 22,60% (E16) com pouco tempo de residência e médio aquecimento. O menor ficou em 6,05% (E1), sendo um resultado abaixo da maioria dos ensaios com temperatura 300 °C, o que pode representar uma das anomalias justificada anteriormente. Outros ensaios mantiveram-se naturalmente acima, pelo aumento de temperatura, com resultados entre 14-19% de rendimento líquido.

Por sua vez, os ensaios de 450 °C (rosa) tendem a gerar maiores valores de líquido uma vez que há maior temperatura de patamar. Os valores variam de 27,53% a 40,87%. Curiosamente o valor de maior rendimento teve como parâmetro 20 minutos de patamar, ou seja, maior tempo, o que normalmente considera-se fator restritivo para geração de fase líquida (Alho, 2012). Entretanto, foi pouco significativa a variação dos parâmetros para estes resultados de rendimento, os quais mostram-se ótimos para aproveitamento desta fase nestas condições, sendo que o ensaio idealizado como maior gerador de bio-óleo, ou seja, de alta temperatura, baixa residência e alta taxa de aquecimento, obteve 37,21% (E5).

Segundo Alho (2012), os processos de pirólise com temperaturas próximas de 400 °C podem gerar rendimento líquido de 30%, fato que condiz com os resultados encontrados neste estudo, sendo que a média de rendimento para este patamar de temperatura (450 °C) foi de 36%. O mesmo autor afirma que em temperaturas acima de 550 °C o rendimento pode aproximar-se de 75%. Bridgwater (2003), por sua vez, indica os 30% a serem encontrados para a pirólise lenta, com tempo de residência de dias ou horas.

Pode-se dizer que os valores encontrados aproximam-se daquele pontuado como referência para esta faixa de temperatura ensaiada, mesmo o processo não sendo realizado sob as condições ideais para coleta de produto líquido. Sugere-se que o aumento de temperatura e volume de líquido/gás favorecem tal coleta, evitando-se, possivelmente, incrustações ou condensações indevidas.

#### 4.2.4 Poder Calorífico Superior do *Biochar*

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 9, pode-se afirmar que os ensaios realizados sob temperaturas de 300 °C tiveram os menores valores de poder calorífico superior para o *biochar* resultante. Estes mantiveram-se à volta de 5000 cal/g, sendo que a média dos 7 ensaios fica em  $4985 \pm 73$  cal/g. Tais valores são considerados baixos uma vez que a própria biomassa utilizada obteve PCS entre 4000-4500 cal/g, intervalo próximo do resultado do carvão gerado. Conforme referiram Chaves & Zoch (2013), o poder calorífico está diretamente ligado ao teor de carbono fixo. Nesse sentido, sabendo-se que os ensaios dessa faixa de temperatura não sofreram as alterações físico-químicas esperadas para o processo de pirólise empregado, ou seja, não encontraram-se carbonizações totais nos *biochar* gerados, pode-se dizer que o teor de carbono fixo manteve-se significativamente inferior ao esperado.

As outras faixas de temperaturas utilizadas obtiveram PCS levemente maior, mantendo-se entre 5500-5700 cal/g. Embora os ensaios de 450 °C tenham gerado o maior PCS com E18 (5816 cal/g), os de 375 °C obtiveram a média ligeiramente superior, de  $5666 \pm 54$  cal/g, contra  $5563 \pm 131$  cal/g, além de manterem-se mais constantes, não apresentando nenhum valor abaixo de 5500 cal/g, uma vez que os ensaios de 450 °C também apresentam o menor PCS dentre os dois com E5 (5083 cal/g).

O aumento da temperatura empregada pode ser a principal justificativa para o aumento do PCS encontrado para estas duas faixas de temperatura. Conforme verificaram os autores Silva (1986), Barbosa (1986) e Almeida (1983) *apud* Klitzke (1998), há aumentos nos teores de carbono fixo em função do aumento da temperatura de patamar empregada, sendo que até 550 °C há redução de densidade aparente. Nesse sentido, por sua vez, os teores de carbono fixo estão proporcionalmente ligados aos teores de lenhina da madeira (Carmo, 1988).

Segundo Barcellos (2007), os valores de PCS para o carvão vegetal podem variar de acordo com diversos fatores, sobretudo pelo tipo de biomassa utilizado e temperatura, sendo que média sugerida fica em 6800 cal/g. Vale *et al.* (2002) encontraram para carvão proveniente de madeira de eucalipto, em temperaturas inferiores a 500 °C, 7571 cal/g, enquanto Oliveira *et al.* (1989) encontraram valores superiores para temperaturas acima dos 500 °C.

Com isso, tem-se que os valores de PCS encontrados neste estudo para os *biochar* gerados estão significativamente abaixo do valor esperado para carvão vegetal. Supostamente, tal fato deve-se, sobretudo, à biomassa utilizada, a qual contém mistura em base húmida de galhos, folhas e ervas, sendo que as duas últimas apresentam baixos teores de lenhina e representam boa parte de volume utilizado no processo. Além disso, pode-se afirmar que as faixas de temperatura e tempos de residência utilizados, embora propícios para obtenção de rendimento de *biochar*, não favoreceram a fixação de

carbono de modo geral. Tais fatos podem justificar a baixa geral entre os PCS encontrados.

Deve-se notar que a importância do aumento do PCS do *biochar* relativamente à biomassa original se justifica quando a aplicação do *biochar* é como biocombustível, não sendo relevante nos restantes casos.

#### 4.3 CRESCIMENTO DOS CULTIVOS DE ALFACE (*Lactuca sativa*)

Após os 24 dias de semeadura, as células com as alfaces desenvolvidas em diferentes proporções de carvão vegetal e substrato vegetal foram removidas para as devidas mensurações propostas. A Figura 17 representa o tabuleiro na fase da remoção das plantas.



Figura 17 – Tabuleiro com tratamentos de mudas de alface em estágio de análise de parâmetros (arquivo do autor)

A Tabela 16, por sua vez, representa os resultados médios com desvio-padrão medidos para os respetivos cultivos.

Tabela 16 – Resultados médios das medições dos parâmetros dos diferentes tratamentos de cultivo de *Lactuca sativa*

Tratamento	AP (cm)	NFV	MFPA (g)	MFR (g)	MSPA (g)	MSR (g)	TXG
T0a	7,99 ±0,89	2,7 ±0,8	0,0133 ±0,0028	0,0010 ±0,0001	0,0059 ±0,0017	0,0007 ±0,0001	100%
T25a	9,88 ±1,65	3,5 ±0,5	0,0157 ±0,0009	0,0011 ±0,0001	0,0063 ±0,0004	0,0009 ±0,0000	100%
T50a	8,06 ±0,89	2,7 ±0,4	0,0129 ±0,0009	0,0010 ±0,0001	0,0060 ±0,0010	0,0007 ±0,0001	100%
T75a	8,88 ±0,78	2,5 ±0,5	0,0110 ±0,0007	0,0009 ±0,0001	0,0048 ±0,0007	0,0006 ±0,0001	100%
T100a	6,74 ±0,32	2,0 ±0,0	0,0083 ±0,0012	0,0008 ±0,0001	0,0041 ±0,0007	0,0005 ±0,0000	100%
T0b	7,43 ±0,99	3,0 ±0,0	0,0130 ±0,0014	0,0010 ±0,0002	0,0066 ±0,0010	0,0008 ±0,0001	75%
T25b	6,73 ±0,65	3,3 ±0,4	0,0115 ±0,0011	0,0010 ±0,0002	0,0063 ±0,0004	0,0009 ±0,0001	75%
T50b	8,04 ±1,99	2,6 ±0,4	0,0138 ±0,0018	0,0010 ±0,0002	0,0069 ±0,0010	0,0008 ±0,0002	75%
T75b	6,56 ±0,87	2,0 ±0,8	0,0103 ±0,0017	0,0007 ±0,0002	0,0050 ±0,0009	0,0005 ±0,0002	75%
T100b	3,34 ±1,28	1,0 ±0,5	0,0070 ±0,0036	0,0004 ±0,0002	0,0028 ±0,0013	0,0003 ±0,0001	75%

Sendo, AP: altura média das plantas; NFV: média do número de folhas verdadeiras; MFPA: média da massa fresca da parte aérea das plantas; MFR: média da massa fresca das raízes das plantas; MSPA: média da massa seca da parte aérea das plantas; MSR: média da massa seca das raízes das plantas; TXG: média da taxa de germinação de cada tratamento

A Figura 18 é a representação gráfica dos valores obtidos para ambos os tratamentos relativos à altura média das plantas (AP) em função da quantidade de carvão aplicado.

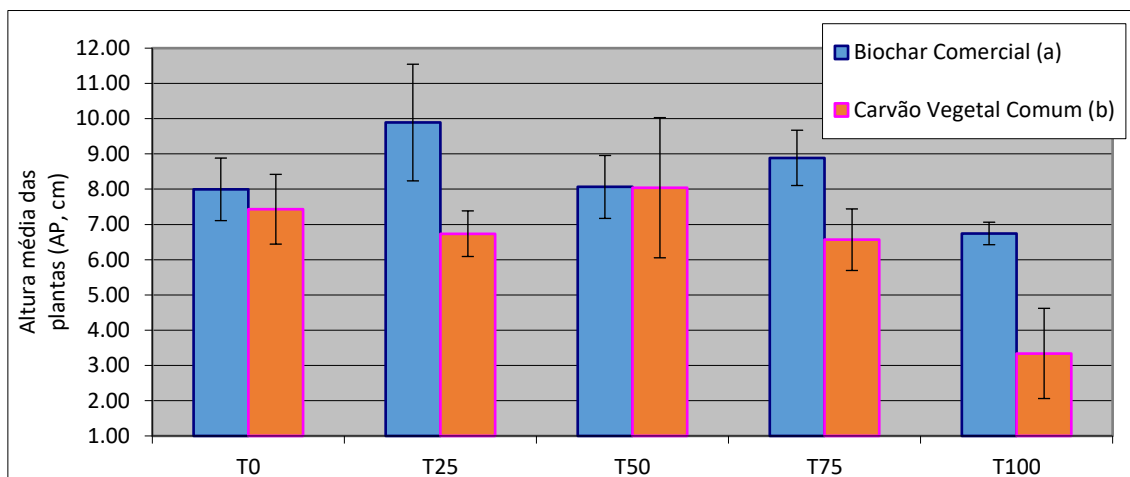


Figura 18 – Altura média das plantas para os condicionadores a e b nos tratamentos estudados

Primeiramente, é importante ressaltar que os parâmetros de altura das plantas (AP) e número de folhas (NFV), tanto para os condicionadores de solo a quanto para b, que submetidos ao Teste de Kruskal-Wallis, não revelaram diferenças estatisticamente significativas, com valor de  $P$  maior que  $\alpha$ . Os gráficos gerados encontram-se no Anexo D.

Observando-se os resultados apresentados, nota-se uma ligeira vantagem qualitativa do tipo de carvão a (*biochar* comercial) em relação ao carvão b (carvão vegetal comum), uma vez que a média das taxas de germinação dos tratamentos do primeiro foram de 100%, enquanto o segundo obteve 75%.

Ainda, o próprio gráfico acima expõe que todos os valores médios de altura das plantas a foram superiores em relação às plantas b. Curiosamente, mesmo o T0a, que consistiu apenas de substrato comercial preparado, obteve valor superior ao T0b, assim como o da taxa de germinação.

O mesmo raciocínio de benefício qualitativo de adição do carvão a em relação ao carvão b vale para os outros parâmetros. O maior número de folhas verdadeiras foi de T25a com média de 3,5, contra 3,3 de T25b, sendo que T100a obteve 2, contra 1 de T100b.

As aferições de massas secas e frescas de parte aérea ou de raízes seguiram a mesma tendência. Em geral, os cultivos com adição de carvão a foram superiores aos cultivos com adição de carvão b, sendo que, quando inferior, manteve-se bem próximo, sobretudo para os tratamentos T50, T75 e T100.

Nota-se, claramente, um grande pico de valores para T25a para os tratamentos com *biochar* comercial, elucidados no gráfico, sendo que tal curva acaba por representar todos os outros parâmetros mensurados. Os valores de T0a encontram-se relativamente elevados, sendo que aumentam com a adição de 25% desse tipo de carvão ao substrato.

Posteriormente, iniciam um declínio em função do aumento da proporção de carvão no substrato, sendo o T100a o de menor valor qualitativo. Possivelmente, nos cultivos com maior incorporação de carvão, as plantas não têm todos os nutrientes de que necessitam, e que um solo convencional pode mais prontamente fornecer. A hortaliça em questão apresenta um ciclo rápido, o que significa que a fixação de nutrientes pelo carvão fique pouco propícia em cultivos não sucessivos.

Já para as medições de massas cultivadas com adição de carvão b (carvão vegetal comum), nota-se uma tendência para pico em T50, conforme observa-se nos gráficos abaixo, sendo que, apenas para os valores MSR tal fenômeno não ocorreu, ficando extremamente próximos os tratamentos T0, T25 e T50.

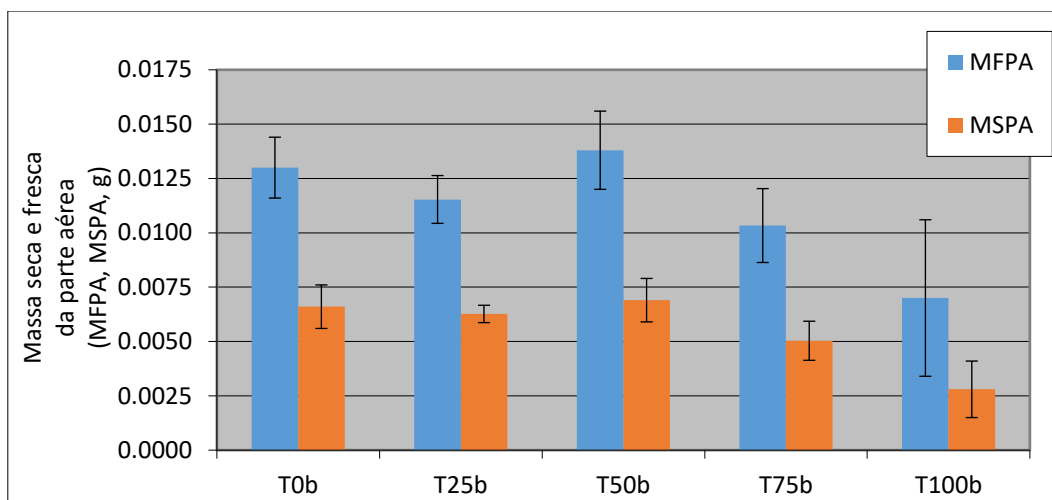


Figura 19 – Massas seca e fresca da parte aérea para o condicionador b

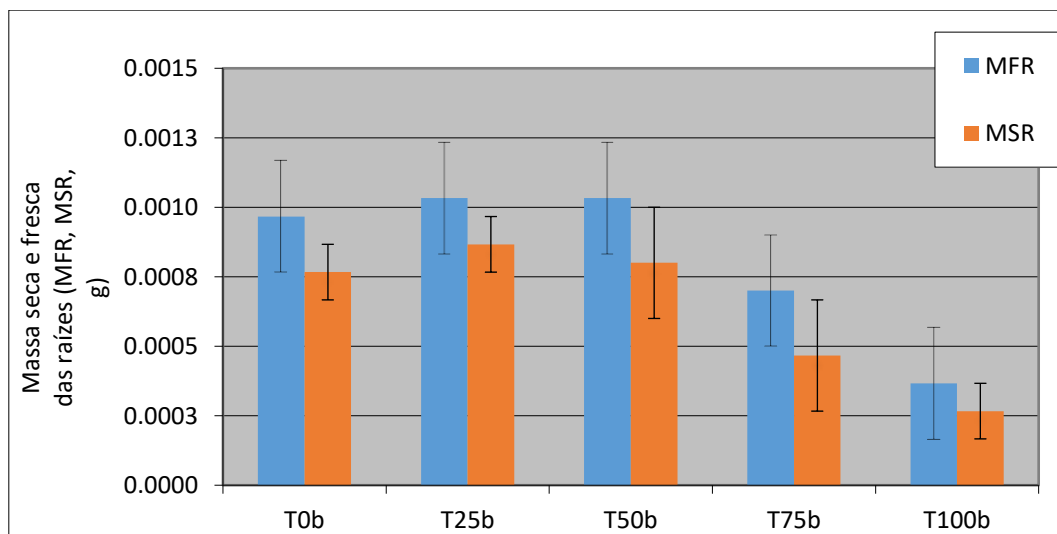


Figura 20 – Massas seca e fresca das raízes para o condicionador b

Embora haja o referenciado pico para T50b, é correto afirmar que, quando comparado com T25a, 6 dos 7 parâmetros estudados são inferiores por diferenças importantes para parâmetros como AP, NFV, TXG. Apenas para a massa seca da parte aérea (MSPA) T50b é superior ao T25a, sendo que o primeiro obteve 0,0069 g enquanto o segundo 0,0063 g. Tal diferença não mostra-se relevante pela proximidade dos números, sendo considerado, então, uma proporção de qualidade inferior.

Os resultados aqui apresentados encontram-se, conceitualmente, em proximidade àqueles apresentados por Petter *et al.* (2012), assim como Monteiro *et al.* (2017) e Schulz *et al.* (2013) *apud* Pereira (2016). Todos encontraram algum tipo de melhoria no desenvolvimento de mudas de alface que utilizaram-se de misturas de *biochar* nos substratos. Especificamente para os 2 primeiros autores citados, os números encontram-se em certa conformidade, sendo que Petter *et al.* (2012) obteve bons resultados utilizando-se de uma adição de até 15% de *biochar* a um prévio substrato comercial, enquanto a adição de concentrações acima desse valor revelou prejuízos à produção de mudas de alface. Já o segundo autor utilizou em um dos substratos a proporção de 20% de *biochar*, 40% de vermiculita e 40% de cinza de casca de arroz, que foi o que gerou os melhores resultados para o crescimento de mudas de alface.

Considerando-se os 25% de *biochar* comercial adicionados a um prévio substrato comercial, apontado neste estudo como a melhor proporção encontrada para os parâmetros estudados, é possível afirmar que há relação com os estudos referenciados. A adição de quantidades pequenas de *biochar* revela ligeiros benefícios ao desenvolvimento de mudas de alface, enquanto adições superiores podem trazer prejuízos qualitativos.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ADITIVAÇÃO DE SOLO COM *BIOCHAR* GERADO A PARTIR DOS RESÍDUOS PRODUZIDOS NO HORTO

Tomando como base a quantidade de bio-resíduos gerados anualmente no Horto da Boavista em função do rendimento considerado, descrita na seção 4.2.1, de 188 kg mensais de *biochar*, e considerando que 25% é a maior percentagem de incorporação de *biochar* no solo de modo a melhorar a produção nos cultivos de alface, estima-se que seja possível utilizar 2256 kg/ano de *biochar*.

Face ao exposto, tendo em vista os mesmos tabuleiros de células utilizados neste estudo, de 50 células e capacidade aproximada de 14 g de substrato por célula, seriam adicionados à cada célula 3,5 g (25%) de *biochar*, ou seja, 175 g por tabuleiro. Isso significa que a cada sementeira desta espécie de planta, seriam poupados 175 g de substrato vegetal.

Caso os 2256 kg/ano de *biochar* forem revertidos integralmente na produção de tabuleiros de alface, seria possível condicionar os substratos de aproximadamente 12.891 tabuleiros/ano. Consequentemente, seriam economizados 2256 kg de

substrato/ano. Pensando-se em produtividade em grande escala, tais poupanças podem vir a ser financeiramente significativas para o empreendimento, sendo que há eminente possibilidade de conversão de um resíduo em um condicionador de substrato o qual proporcionaria, ainda, maior qualidade às plantas. Ainda, com desenvolvimento beneficiado pela maior qualidade das mudas, há possibilidade de maior volume de produção, além de maior angariação e fidelização de compradores. Deve-se ressaltar, contudo, que não foram levados em consideração outros custos associados à produção do *biochar*.



# CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

5.1 CONCLUSÕES

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS



## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

Para atingir o objetivo proposto, procedeu-se a caracterização da biomassa residual de um empreendimento de manutenção de áreas verdes (horto), separados em três frações: Galhos, Folhas e Ervas. Foram obtidos os seguintes valores, respetivamente, para as três frações: 46, 59 e 74% de Teor de Humidade; 1,01, 3,32 e 8,23% de Teor de Cinzas; 4529, 4809 e 4056 cal/g de Poder Calorífico Superior; e 38, 19 e 3% de Teor de Lenhina Total.

Foi realizada a pirólise da biomassa residual representativa dos resíduos de um horto, em temperaturas de 300, 375 e 450 °C, com taxa de aquecimento de 10, 15 e 20 °C/min, e tempo de patamar de 10, 15 e 20 min. Os ensaios realizados permitem concluir que os parâmetros apontados como os de maior potencial gerador de *biochar* em fase sólida são o tempo de patamar 15 minutos, com temperatura de patamar de 375 °C e taxa de aquecimento de 15 °C por minuto. Tais parâmetros resultaram em rendimentos que variam entre 42,73% e 50,18%. Com base em uma média destes rendimentos e no valor aferido para geração mensal de biomassa pelo empreendimento em estudo, foi possível prever uma possível produção mensal de *biochar*, estimada em 188 kg.

Os ensaios realizados com temperatura de 300 °C apresentaram rendimentos sólidos acima de 73,24%, contudo, o produto não apresentou aparência de material 100% carbonizado. Foram realizados ensaios adicionais para esta faixa de temperatura aumentando-se o tempo de patamar para 30 minutos, sendo que não foram obtidos, resultados satisfatórios quanto à carbonização da biomassa utilizada.

Os ensaios de pirólise também permitiram encontrar valores de rendimento líquido (bio-óleo) que estão em conformidade com a literatura, sendo os mesmos crescentes em função das faixas de temperatura utilizadas: 300, 375 e 450 °C. Contudo, questões intrínsecas ao sistema de coleta do líquido utilizado geraram incoerências que não permitem afirmar que os resultados foram obtidos em condições experimentais ideais.

Foram obtidos valores que variam entre 4877 e 5816 cal/g de Poder Calorífico Superior para os *biochar* gerados neste estudo, sendo que os parâmetros considerados ideais para a geração de fase sólida, 375-15-15, obteve valores mínimo e máximo de 5587 e

5721 cal/g, respectivamente. Os valores em geral encontram-se abaixo do esperado conforme as referências utilizadas, sendo que os principais motivos podem estar relacionados às faixas de temperatura utilizadas, assim como às proporções das frações de galho, folha e ervas utilizadas na mistura que compôs a biomassa em uso.

Foram realizados ensaios de crescimento de alface (*Lactuca sativa*) em solo condicionado com *biochar* comercial ou carvão vegetal comercial (nas proporções em massa de 0:100, 25:75, 50:50, 75:25 e 100:0). A adição de *biochar* revelou-se benéfica para desenvolvimento de alface quando utilizado em até 25% de proporção com um prévio substrato vegetal comercial. O aumento da proporção pode gerar prejuízos ao desenvolvimento da muda, possivelmente por carência de nutrientes essenciais não imediatamente disponíveis no *biochar* ou no carvão vegetal.

Considerando-se o rendimento e a proporção ideais encontrados neste estudo, é possível afirmar que o horto poderia gerar 2256 kg/ano de *biochar*, condicionando 12.891 tabuleiros/ano de alface e economizando 2256 kg/ano de substrato, além de proporcionar como produto final uma hortaliça de maior qualidade.

A possibilidade de reutilização de um resíduo proveniente da jardinagem e sua reinserção na área agrícola é eminente, a exemplo da biomassa gerada por meio de resíduos de poda de jardim, transformada em *biochar*, o qual pode ser utilizado como condicionador de substrato para germinação de sementes de hortaliças. O *biochar* representa significativo potencial energético como matéria-prima. Contudo, é importante avaliar o balanço energético do processo como um todo para, eventualmente, declarar a viabilidade energética do mesmo.

## 5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões de trabalhos futuros relacionados à presente temática, sugere-se, relativamente ao processo de pirólise, o aumento do tempo de residência de amostras para as temperaturas de patamar de 300 °C, projetando-se obter o maior número de rendimento para a biomassa utilizada. Os ensaios adicionais realizados neste estudo revelaram a não carbonização total do material, sendo então, proposta a utilização de tempo de patamar superior aos 30 minutos (1-3 horas) utilizados nos mesmos.

Ainda no processo de pirólise, sugere-se a utilização de um sistema de coleta de bio-óleo em condições propícias, as quais não gerem incertezas sobre os resultados. Com isso, seria possível uma quantificação desse líquido, caracterizando melhor os produtos da pirólise da biomassa utilizada, além de estipular o Poder Calorífico Superior.

Relativamente ao cultivo da hortaliça utilizada (alface), sugere-se a realização de ensaios com cultivos sucessivos. Conforme discutido anteriormente, por ser um vegetal de ciclo

rápido, existe a possibilidade de que a adição de *biochar* como condicionador de substrato seja prejudicial para maiores proporções *biochar*:substrato uma vez que este material não possui naturalmente nutrientes essenciais para o desenvolvimento da planta. Com cultivos sucessivos, há mais possibilidades do *biochar* fixar alguns nutrientes, enriquecendo o substrato, alterando os resultados para tais proporções.

Outra sugestão quanto aos cultivos, seria a utilização de espécies de vegetais distintas, como rúcula ou couve, por exemplo. Plantas distintas podem demandar maior tempo de desenvolvimento, com ciclos maiores, permitindo análises mais detalhadas dos nutrientes, das diferenças de desenvolvimento da planta, demanda hídrica, condições de fixação de elementos, entre outros em substratos adicionados de *biochar*.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 1983. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8112. Carvão vegetal - Análise imediata. Rio de Janeiro, Brasil.

ABNT, 1985. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9165. Carvão vegetal - Determinação da densidade relativa aparente, relativa verdadeira e porosidade. Rio de Janeiro, Brasil.

Alho, C. F. B. V. 2012. Efeito da temperatura final de pirólise na estabilidade de biocarvão produzido a partir de madeira de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.* Dissertação de Mestrado, s.d., Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil.

Almeida, M. M. B., Lopes, M. F. G., Sousa, P. H. M., Nogueira, C. M. D., Magalhães, C. E. C. 2003. Determinação de umidade, fibras, lipídios, cinzas e sílica em plantas medicinais. B.CEPPA, Curitiba, 21(2), 343-350.

Almeida, M. B. B. 2008. Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico. 2008. 167 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Acesso em: 20 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.tpqb.eq.ufrj.br/download/bio-oleo-a-partir-da-pirolise-rapida.pdf>

Almeida, A. F. S. 2016. Estudo da gasificação do glicerol em reator de leito fixo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – Optimização Energética na Indústria Química. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal. Acesso em: 25 de novembro de 2018. Disponível em: [https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/8563/1/DM\\_AnaAlmeida\\_2016\\_MEQ.pdf](https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/8563/1/DM_AnaAlmeida_2016_MEQ.pdf)

ANEEL, 2005. Agência Nacional de Energia Elétrica, Atlas de Energia Elétrica, 2ª ed. Cap.5 Biomassa, p.92, Brasília, Brasil. Acesso em: 29 de outubro de 2018. Disponível em: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/biomassa/5\\_3.htm](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/biomassa/5_3.htm)

Antal Jr. & Gronli, 2003 M. J. Antal Jr, M. J. Gronli, M. The Art, Science, and Technology of Charcoal Production. Industrial & Engineering Chemistry Research. 42(8), 1619-1640.

APHA, 1999. American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed. APHA, Washington DC.

ASTM, s.d. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. ASTM D 5865. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

Barcellos, D. C. 2007. Caracterização do carvão vegetal através do uso de espectroscopia no infravermelho próximo. Tese – UFV, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Minas Gerais, Brasil. Acesso em: 9 de dezembro de 2018. Disponível em: <https://www.ipef.br/servicos/teses/arquivos/>

- Barros, M. V. F. 2003. Praças: espaços verdes na cidade de Londrina. Projeto de Pesquisa CPG/Uel 1178/2002, do Grupo Imagem, Paisagem e Personagem (IMAP&P), do Departamento de Geografia – Centro de Ciências Exatas – Universidade Estadual de Londrina. v.12, n.1, Jan/Jun/2003. Acesso em: 25 de novembro de 2018. Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/6713/>
- Berton, R. P. 2012. Análise teórica comparativa de eficiência energética de sistemas integrados para pirólise rápida de biomassa. Dissertação – Mestrado em Engenharia Mecânica – Eng. Térmica e de Fluidos, Universidade Estadual de Campinas, Brasil. Acesso em: 10 de outubro de 2018. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/264913/1/Berton\\_RafaelPiatto\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/264913/1/Berton_RafaelPiatto_M.pdf)
- Branco, L. A. L. C. 2013. Carvão vegetal: desenvolvimento de indicadores tecnológicos a partir da análise de documentos de patentes. Dissertação (Pós-Graduação) - Universidade Federal de São Carlos, Brasil.
- Brasil, 2010. Lei N° 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).
- Bridgwater, A. V. Peacocke, G. V. C. 2000. Fast pyrolysis processes for biomass. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, v.4, p.1-73.
- Bridgwater, A. V. 2003. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass Bioenergy*, v.38, p.68-94.
- Bridgwater, A. V. 2018. Challenges and opportunities in fast pyrolysis of biomass: part i. Introduction to the technology, feedstocks and science behind a promising source of fuels and chemicals. *Johnson Matthey Technology. Rev.* 2018, p.118–130. Acesso em: 11 de outubro de 2018. Disponível em: <https://www.technology.matthey.com/>
- Brito, M. S. 2008. Polissacarídeos não amiláceos na nutrição de monogástricos – revisão. *Rev. Veterinária Brasília*, v.2, n.4, p.111-117, Areia – PB, Brasil.
- Brown, L. R. 1994. Qualidade de Vida- 1994: Salve o Planeta. Um Relatório do Worldwatch Institute sobre o progresso em direção a uma sociedade Sustentável. Trad. Marco Antônio F. Bueno. Worldwatch Institute. SP, Ed. Globo.
- Caetano, N. S. 2014. Módulo Biomassa. Slides de disciplina Energias Renováveis 1, Mestrado em Energias Sustentáveis. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.
- Carmo, J.S. 1988. Propriedades físicas e químicas do carvão vegetal destinado à siderurgia e metalurgia. 1988. 36p. Monografia (Graduação em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Brasil.
- Cavalheiro, C. V. Rosso, V. D. Paulus, E., Cichoski, A. J., Wgner, R., Menezes, C. R., Barin, J.S. 2014. Composição química de folhas de oliveira (*Olea europaea L.*) da região de Caçapava do Sul, RS. *Ciência Rural*, 44(10), 1874-1879. <http://dx.doi.org/10.1590/0103-8478cr20131139>

CEASA-RJ, 2013. Centrais de Abastecimento do Estado do Rio de Janeiro S.A. Governo do Estado do Rio de Janeiro Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional, Abastecimento e Pesca. Conjuntura de Mercado, dezembro, 2013. Acesso em: 2 de junho de 2019. Disponível em: [http://www.ceasa.rj.gov.br/ceasa\\_portal/view/ConjunturaDezembro2013.pdf](http://www.ceasa.rj.gov.br/ceasa_portal/view/ConjunturaDezembro2013.pdf)

Cha, J. S. Park, H. S. Jung, J. K. 2016 Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1-15.

Chaves, A. M. B., Zoch, V. P. 2013. Características energéticas da madeira e carvão vegetal de clones de *Eucalyptus spp.* *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia*, 9(17), 534.

Cleveland, C. C. Townsend, A. R. 2006. Nutrient additions to a tropical rain forest drive substantial soil carbon dioxide losses to the atmosphere. *PNAS July 5, 2006 103 (27) 10316-10321*. Stanford University, Stanford, CA.

Conz, R. F. 2015. Caracterização de matérias-primas e *biochars* para aplicação na agricultura. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, Brasil. Acesso em: 17 de setembro de 2018. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11140/tde-13052015-142608/pt-br.php>

Correa, R. L. 1995. O Espaço Urbano. Livro de Editora Ática, Série Princípios, 3ª. edição, n.174, 1995. p.1-16.

Cortez, C. L. Coelho, S. T. Grisoli, R. Gavioli, F. 2008. Compostagem de Resíduos de Poda Urbana. Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO). Instituto de Eletrotécnica e Energia. Universidade de São Paulo, Nota Técnica IX, p.17.

Di Blasi, C. 2008. On the experimental evidence of exothermicity in wood and biomass pyrolysis. *Energy Technology. Review*, v.5, p.19-29.

Downie, A. Crosky, A. Munroe, P. 2009. Biochar for Environmental Management. *Science and Technology book. Chapter 2: Physical Properties of Biochar*, p.20.

EMBRAPA, 2017. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Anais do V Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais. Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

Estudo Municípios Canavieiros, 2013. A energia das plantas. *Cadernos do Professor, Bioeletricidade*, Cap.4, p.21-24, Projeto AGORA, Brasil.

European Commission, 2018. The 2020 national renewable energy action plans – Portugal - Plano Nacional de Acção Para As Energias Renováveis ao Abrigo da Directiva 2009/28/CE.

Ferreira, A. C. 2011. Cultivo orgânico de alface. Artigo publicado em arquivo digital. Acesso em: 2 de junho de 2019. Disponível em: <http://cultivehortaorganica.blogspot.com/2011/01/cultivo-organico-de-alface.html>

Ferreira, N. L. 2014. Pirólise de biomassa lignocelulósica utilizando diferentes catalisadores para produção de bio-óleo. Dissertação - Departamento de Química do Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil. Acesso em: 12 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/>

Fiorese G. Catenacci M. Bosetti V. Verdolini E. 2014. The power of biomass: Experts disclose the potential for success of bioenergy technologies. *Energy Policy*, 65, p.94–114.

Foelkel, C. 2016. Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. Parte 3: Resíduos florestais energéticos. *Eucalyptus Online Book*. Cap.45. p.23. Acesso em: 1 de novembro de 2018. Disponível em: [http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT45\\_Residuos\\_Florestais\\_Energeticos.pdf](http://eucalyptus.com.br/eucaliptos/PT45_Residuos_Florestais_Energeticos.pdf)

Garcia-Perez, M. Lapass, P. Roy, C. 2004. An Overview of the Potential Use of Bio-oils as Fuels in Advanced Combustion Systems. In *Proceedings of: Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion*. STCBC, Victoria, British Columbia, Canada.

Giglio, A. M. 2016. Modelo de previsão de qualidade de coque metalúrgico para utilização em altos-fornos utilizando produção em escala piloto. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, Brasil.

Gulyurtlu, I. 2007. Tecnologias de aproveitamento energético de biomassa. Seminário Integração de Processos, Cogeração e Biomassa. Tomar, Portugal. INETI, GENIP. Instituto Superior Técnico;

Hinrichs, R. A. Kleinbach, M. H. 2010. Energia e meio ambiente. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, c2010. XIV, p.543 ISBN 85-221-0337-2.

IEA, 2018. International Energy Agency. Renewables Statistics. Comprehensive historical review and current market trends in renewable energy. Acesso em: 29 de outubro de 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/statistics/renewables/>

IEEUSP, 2018a. Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo. Conceituando Biomassa. Grupo de Pesquisa em Bioenergia, e-Book. Acesso em: 29 de novembro de 2018. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/conceituando-biomassa>

IEEUSP, 2018b. Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo Tecnologias de aproveitamento. Grupo de Pesquisa em Bioenergia, e-Book. Acesso em: 29 de novembro de 2018. Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/conceituando-biomassa>

IMFLORESTAL, 2014. Ibero Massa Florestal. Estudo do potencial energético de calor de cada biomassa/resíduo agrícola e vegetal. Projeto n.34001. Acesso em: 12 de outubro de 2018. Disponível em: <https://www.imflorestal.com/wp-content/uploads/2016/01/1.5.-Estudo-do-potencial-energe%CC%81tico-de-calor-de-cada-biomassa.pdf>

Jacobi, P. 2003. Educação ambiental, cidadania e sustentabilidade. Cadernos de Pesquisa, n.118, p.189-205, março/2003. Acesso em: 20 de novembro de 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/%0D/cp/n118/16834.pdf>

Jeffery, S. , Verheijenm, F. G. A., van der Velde, M., Bastos, A. C. 2011. A Quantitative Review of the Effects of Biochar Application to Soils on Crop Productivity Using Meta-Analysis. Agriculture Ecosystems & Environment, 144(1), 175-187.

Kaiyang, J. 2010. Soil microbial biomass carbon and nitrogen in forest ecosystems of Northeast China: a comparison between natural secondary forest and larch plantation. Journal of Plant Ecology, 3(3),175–182.

Karayildirim, T., Yanik, J., Yuksel, M., Bockhorn, H. 2006. Characterisation of products from pyrolysis of waste sludges. Fuel 85(10-11), 1498–1508.

Karekezi, S. Kithyoma, W. 2002. Renewable Energy Strategies for Rural Africa: is a PV led renewable energy strategy the right approach for providing modern energy to the rural poor of sub-Saharan Africa, Energy Policy (Vol. 30), pp. 1071-1086.

Klitzke, R. J. 1998. Avaliação do carvão da Bracatinga (*Mimosa scabrella bentham*) em função da idade, do teor de umidade da madeira e da temperatura final de carbonização. Dissertação - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, Brasil.

Lima, T. V. Moura, A. R. 2016. A biomassa no contexto ecológico. Publicado em 2016 na plataforma digital Webartigos. Acesso em: 25 de novembro de 2018. Disponível em: <https://www.webartigos.com/artigos/a-biomassa-no-contexto-ecologico/139542>

LIPOR, 2018a. Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. Cartilha de Arquivo Digital: Ecocentros. Acesso em: 2 de novembro de 2018. Disponível em: [https://www.lipor.pt/fotos/localidades/ecocentros\\_porto\\_112103319050a39d56814ff.pdf](https://www.lipor.pt/fotos/localidades/ecocentros_porto_112103319050a39d56814ff.pdf)

LIPOR, 2018b. Serviço Intermunicipalizado de Gestão de Resíduos do Grande Porto. Valorização Orgânica. Arquivo digital. Acesso em: 3 de novembro de 2018. Disponível em: <https://www.lipor.pt/pt/residuos-urbanos/valorizacao-organica/>

Lira, C. S. 2012. Pirólise rápida da semente de tucumã-do-Amazonas (*Astrocaryumaculeatum*): caracterização da biomassa in-natura e dos produtos gerados. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Brasil.

Lopes, H. 2008. Etanol e biodiesel como recursos energéticos alternativos: perspectivas da América Latina e da Ásia. Artigo em Revista Brasileira Política Internacional n.51 p.60-79. Brasil

Lorenz, K. Lal, R. 2014. Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 177(5), 651-670.

Macedo, L. A. 2012. Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação. Dissertação de Mestrado - Ciências Florestais - Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Florestal - Programa de Pós-

Graduação em Ciências Florestais, Brasil. Acesso em: 10 de outubro de 2018. Disponível em: [http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13150/1/2012\\_LuceliaAlvesdeMacedo.pdf](http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/13150/1/2012_LuceliaAlvesdeMacedo.pdf)

Maia C. M. B. F., 2011. Produção de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa. IX Encontro Brasileiro de Substancias Húmicas, Aracaju / Sergipe, Brasil.

Malheiro, I. C. 2014. Projeção de um protótipo de pirolisador para pequena escala de produção. Dissertação de Graduação em Engenharia Ambiental na UNESP – Sorocaba, Brasil.

Malheiro, C. C. L. 2016. Efeitos do biochar na qualidade e remediação de Solos. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Aveiro, Portugal. Acesso em: 10 de outubro de 2018. Disponível em: <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/17692/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o.pdf>

Marques, A. L. M. 2015. Utilização Energética da Biomassa em Portugal Caso de estudo da Tratolixo. Dissertação de mestrado em Engenharia e Gestão Industrial. Instituto Superior Técnico (ULisboa), Lisboa, Portugal.

Martins, A. L. P. S. Brito, J. O. 1996. Caracterização química e energética de resíduos de exploração de madeira de *Eucalyptus grandis*. Artigo Rev. Árvores, Dep. Cie. Florestais/ESALQ-USP, Brasil.

Medeiros, L. A. M., Manfron, P. A., Medeiros, S. L. P. 2001. Crescimento e desenvolvimento da alface (*Lactuca sativa* L.) conduzida em estufa plástica com fertirrigação em substratos. Ciência Rural, Santa Maria, Brasil. 31(2), 199-204.

MME. 1982. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional. 1982, Brasília, Brasil.

Monteiro, A. B., Pereira, I. S., Stöcker, C. M., Peres, M. A., Martinazzo, R., Bamberg, A. L., Timm, L. C. 2017. Substratos a base de lodo de esgoto solarizado e pirolisado para produção de mudas de alface. Revista da Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa - Congrega URCAMP, 14ª Jornada. 2571-2583.

Moret, A. S. 2004. Desafios ao setor elétrico de Rondônia, como a biomassa sustentável pode contribuir para o aumento da oferta de eletricidade: o caso dos resíduos agrícolas. XV Congresso Brasileiro de Resíduos Agrícolas, Professor Adjunto da Fundação Universidade Federal de Rondônia, Brasil. Acesso em: 21 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.gpers.unir.br/docsgpers/artigo%20biomassa%20congresso%202004.pdf>

Ogata, B. H. 2013. Caracterização das frações celulose, hemicelulose e lignina de diferentes genótipos de cana-de-açúcar e potencial de uso em biorrefinarias. Dissertação de mestrado em Alimentos, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ-USP), Brasil.

Oliveira, E. Vital, B. R. Valente, O. F. Gomide, J. L. 1989. Efeito da qualidade da madeira sobre o rendimento e a qualidade do carvão vegetal de *Eucalyptus grandis*. Revista Árvore. 13(1): 85-97.

Paula, J. A. M., Paula, J. R., Bara, M. T. F., Rezende, M. H., Ferreira, H. D. 2008. Estudo farmacognóstico das folhas de *Pimenta pseudocaryophyllus* (Gomes) L.R. Landrum – Myrtaceae. Rev. Brasileira de Farmacognosia 18(2), 265-278. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-695X2008000200022>

Pereira, D. C. 2016. Efeito de adubações orgânica e mineral associadas ao biochar sobre parâmetros do solo e produtividade da alface. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, Brasil.

Pereira, L. L. Zubiolo, C. Nascimento, J. S. Freitas, L. S. Ruzene, D. S. Silva, D. P. 2016. Produção de biochar a partir da pirólise de resíduos agroindustriais. Anais do VIII Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe (2016), Brasil. Acesso em: 12 de outubro de 2018. Disponível em: [www.simprod.ufs.br](http://www.simprod.ufs.br)

Perez, J. M. M. 2004. Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização. Tese de Doutorado na Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Agrícola, Brasil. Acesso em: 10 de outubro de 2018. Disponível em: [http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/257207/1/MesaPerez\\_JuanMiguel\\_D.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/257207/1/MesaPerez_JuanMiguel_D.pdf)

Petter, F. A. Marimon Júnior, B. H. Andrade, F. R., Schossler, T. R., Gonçalves, L. G., Marimon, B. S. 2012. Biochar como condicionador de substrato para a produção de mudas de alface. *Agrarian*, 5(17), 243-250.

Plantar Portugal, 2018. Organização Não Governamental. Arquivo digital. Acesso em: 2 de junho de 2019. Disponível em: <https://www.plantarportugal.org/>

Portugal, 2011. Decreto-Lei n.º 73/2011. Publicação: Diário da República n.º 116/2011, Série I de 2011-06-17, Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, 3251 – 3300.

Portugal, 2018. Decreto-Lei n.º 10/2018. Publicação: Diário da República n.º 32/2018, Série I de 2018-02-14, Ministério da Administração Interna, 967 – 968.

PRONATURA, 2012. Conquistadors, cannibals and climate change: A brief history of biochar. Pro-Natura International. Innovation Towards Sustainable Development. Acesso em: 22 de novembro de 2018. Disponível em: <http://www.pronatura.org/>

Público, 2017. Uma reflexão sobre os incêndios florestais de 2017. Secção Sociedade. Domingos Xavier Viegas. 19/15/2017. Portugal. Acesso em: 30 de novembro de 2018. Disponível em: <https://www.publico.pt/2017/11/19/sociedade/ensaio/uma-reflexao-sobre-os-incendios-florestais-de-2017-1792896>

Quirino, W. Vale, A. Andrade, A. Abreu, V. Azevedo, A. 2005. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. *Revista da Madeira*, 89, 100–106.

Radin, B., Reisser Júnior, C., Matzenauer, R., Bergamaschi, H. 2004. Crescimento de cultivares de alface conduzidas em estufa e a campo. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 22(2), 178-181, abril-junho 2004. Acesso em: 2 de junho de 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/hb/v22n2/21011.pdf>

Revista da Madeira, 2012. Colheita da biomassa florestal para a geração de energia. Artigo em *Biomassa*, ed.131. Arquivo digital. Acesso em: 4 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.remade.com.br/>

- Rocha, M. F. V. 2011. Influência do espaçamento e da idade na produtividade e propriedades de eucaliptos para energia. Dissertação para Mestrado na Universidade Federal de Viçosa, MG, Brasil.
- Rodrigues, E. T. Casali, V. W. D. 1999. Rendimento e concentração de nutrientes em alface, em função das adubações orgânica e mineral. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 17(2), 125-128.
- Roese, A. D. 2003. Agricultura Urbana: uma apresentação. In: *Revista de Agricultura Urbana*, Brasil. Acesso em: 11 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/ADM036.pdf>
- Santos, I. P. A. 2004. Morfofisiologia e valor nutritivo de gramíneas forrageiras tropicais sob fontes e doses de fósforo. Tese (Doutorado) – UFLA, Lavras, MG, Brasil.
- Santos, L. C. Bonomo, P. Silva, C. C. F. 2008. Produção e composição química da *Brachiaria brizantha* e *Brachiaria decumbens* submetidas a diferentes adubações. *Ciência Animal Brasileira*, v.9, n.4, p.856-866. Acesso em: 8 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbz/v33n1/a24v33n1.pdf>
- Sartório, R. C. 2014. Densidade básica e variação dimensional de um híbrido clonal de *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*. *Revista Árvore* 2009; 33(2): 277-288. Acesso em: 8 de outubro de 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622009000200009>
- Silva, A. P. 2007. Produção de briquetes dos carvões de casca, maravalha e serragem de eucalipto (*Eucalyptus pellita*), pirolisados às temperaturas máximas de 400 °C e 600 °C. Dissertação de Graduação em Engenharia Florestal da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Brasil.
- Silva, S. B. 2016. Caracterização de pellets de diferentes biomassas para fins energéticos. Dissertação - Universidade Federal do Espírito Santo Centro de Ciências Agrárias e Engenharias - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Acesso em: 9 de outubro de 2018. Disponível em: [http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/7635/1/tese\\_10035/](http://repositorio.ufes.br/bitstream/10/7635/1/tese_10035/)
- Simetti, R. D. 2016. Biomassa de cinco espécies de *Eucalyptus* para uso como biocombustível. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal – UFPR, Brasil.
- SOBIOEN, 2018. Soluções de Bioenergia. Tema Biomassa. Arquivo digital. Acesso em: 12 de outubro de 2018. Disponível em: <http://www.energia.pt/biomassa>
- Sousa, V. H. A. Santos, L. T. Pagel, U. R. Scarpati, C. B. L. 2015. Aspectos sustentáveis da biomassa como recurso energético. *rev. Augustus*, Rio de Janeiro, 20(40), 105-123, jul/dez.
- Tavares, H. M. R. 1988. A Cultura da Alface. Livro do Ministério de Agricultura, Pesca e Alimentação, Edição: Direcção Geral de Planeamento e Agricultura, Lisboa. Acesso em: 29 de novembro de 2018. Disponível em: <https://www.dgadr.gov.pt/mediateca/send/9-producao-vegetal/20-cultura-da-alface>

Teixeira, T. 2018. Estudo da pirólise da borra de café com vista à produção de biochar e bioóleo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química - Tecnologias de Proteção Ambiental. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal.

Trugilho, P. F. Goulart, S. L. Assis, C. O. 2015. Características de crescimento, composição química, física e estimativa de massa seca de madeira em clones e espécies de *Eucalyptus* jovens. Ciência Rural, Santa Maria, Brasil, 45(4), 661-666.

UFPR. 2014. Palestra Magna de Abertura da Semana do Meio Ambiente, arquivos do autor. Universidade Federal do Paraná. S.d. Acesso em: 12 de agosto de 2018. Disponível em: [http://www.floresta.ufpr.br/biblioteca/pdf\\_dr/2014/t378\\_0449-D.pdf](http://www.floresta.ufpr.br/biblioteca/pdf_dr/2014/t378_0449-D.pdf)

Vale, A. T.; Brasil, M. A. M.; Leão, A. L. 2002. Quantificação e caracterização energética da madeira e casca de espécies do cerrado. Ciência Florestal, Santa Maria, 12(1), 71-80.

Vaz Júnior, S. 2011 Uso dos coprodutos e resíduos de biomassa para obtenção de produtos químicos renováveis. EMBRAPA: Cartilha Agroenergia, Brasil.

Wiesenthal, T. Mourelatou, A. Petersen, J. E. Taylor, P. 2006. How much bioenergy can Europe produce without harming the environment?, European Environment Agency, 67 pp.



# ANEXOS

7.1 ANEXO A – PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

6.1 7.2

## ANEXO B – CÁLCULOS DE PROPORÇÃO REAL EM BASE HÚMIDA

6.2 7.4

## ANEXO C – CORREÇÃO DE TEMPERATURA DE PATAMAR DO PIROLISADOR

6.3 7.6

ANEXO D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (TESTE DE KRUSKAL-WALLIS)

## 7 ANEXOS

### 7.1 ANEXO A – PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais utilizados para a realização do trabalho: caracterização de cada fração de biomassa (Galho, Folha ou Erva) utilizada e processo de pirólise.

#### 7.1.1 ANEXO A.1 – Determinação do Teor de Humidade (TH)

A determinação do teor de humidade foi efetuada a partir do método direto, em que a amostra é colocada numa estufa a uma temperatura controlada (105 °C) e onde a água presente na amostra é evaporada. O teor de humidade é calculado através da diferença de peso da amostra antes e depois da secagem.

- Material:
  - ✓ Balança analítica, Kern ALJ220-4;
  - ✓ Cadinho de porcelana;
  - ✓ Estufa a 105 ± 5 °C (WTB Blinder);
  - ✓ Exsicador.
- Matéria-prima:
  - ✓ Frações de biomassa.
- Procedimento:
  - ✓ Secar previamente o cadinho de porcelana na estufa a 105 ± 5 °C e deixar arrefecer no exsicador;
  - ✓ Pesar o cadinho de porcelana;
  - ✓ Pesar rigorosamente 10 ± 0,001 g da fração de biomassa para o cadinho de porcelana;
  - ✓ Colocar na estufa a 105 ± 5 °C durante 2 horas;
  - ✓ Retirar para o exsicador até arrefecer e estabilizar a temperatura;
  - ✓ Pesar o cadinho com a amostra seca;

- ✓ Voltar a colocar na estufa a  $105 \pm 5$  °C durante 1 hora e repetir o procedimento de secagem, arrefecimento e pesagem, até obtenção de peso constante.

O teor de humidade (%) é determinado a partir da Equação 2:

$$\text{humidade(\%)} = [m(\text{amostra}) - m(\text{amostra seca})] / m(\text{amostra}) \times 100$$

*Equação 2*

Onde:

m(amostra) – Massa de amostra de fração de biomassa antes da secagem (g);

m(amostra seca) – Massa de amostra de fração de biomassa após secagem a 105 °C (g).

### 7.1.2 ANEXO A.2 – Determinação do Teor de Cinzas (TC)

O teor de cinzas corresponde à percentagem de produto resultante da calcinação de uma amostra. Foi determinado segundo o método descrito no Standard Methods (método 2540 E)

• Material:

- ✓ Cadinho de porcelana;
- ✓ Mufla (Nabertherm);
- ✓ Balança analítica, Kern ALJ220-4;
- ✓ Exsicador.
- ✓ Matéria-prima:
- ✓ Fração de biomassa.
- ✓ Procedimento:
- ✓ Secar previamente o cadinho de porcelana na mufla a  $555 \pm 5$  °C e deixar arrefecer no exsicador;
- ✓ Pesar o cadinho de porcelana;
- ✓ Pesar  $5 \pm 0,0001$  g da fração de biomassa previamente seca;
- ✓ Calcinar na mufla  $555 \pm 5$  °C;
- ✓ Retirar o cadinho da mufla e colocar no exsicador, deixar arrefecer;
- ✓ Pesar o cadinho rigorosamente.

O teor de cinzas é calculado a partir da Equação 3:

$$\text{Cinzas(\%)} = (m(\text{cinzas}) / m(\text{amostra seca})) \times 100$$

*Equação 3*

Onde:

m(cinzas) – Massa de cinzas (g);

m(amostra seca) – Massa de fração de biomassa (g).

### 7.1.3 ANEXO A.3 – Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS)

O poder calorífico superior corresponde à quantidade de energia interna contida na amostra e é dado pela soma da energia libertada na forma de calor e a energia gasta na vaporização da água que se forma numa reação de combustão.

Para esta determinação seguiu-se o procedimento da norma ASTM D5865-10.

- Material:

- ✓ Calorímetro e bomba calorimétrica (Parr 6772);
- ✓ Termopar;
- ✓ Agitador;
- ✓ Fio de fusão;
- ✓ Cápsula de combustão;
- ✓ Balança decimal (KERN)
- ✓ Reagentes:
- ✓ Água desionizada;
- ✓ Fração de biomassa.

- Procedimento:

- ✓ Pesar exatamente 2000,0 g de água desionizada para o balde calorimétrico, previamente tarado;
- ✓ Colocá-lo no calorímetro;
- ✓ Pesar cerca de  $0,5 \pm 0,0001$  g de fração de biomassa seca para uma cápsula de combustão, previamente tarada;
- ✓ Inserir a cápsula no aro situado na cabeça da bomba calorimétrica;
- ✓ Cortar exatamente 10 cm de fio condutor;
- ✓ Prender o fio condutor nos orifícios dos elétrodos existentes na cabeça da bomba calorimétrica, travando-os adequadamente.
- ✓ A meio do fio condutor moldar um pequeno arco. O arco de fio condutor deverá estar ligeiramente acima da superfície da amostra.
- ✓ Introduzir a cabeça na bomba calorimétrica;
- ✓ Fechar a bomba, humedecendo o vedante;
- ✓ Fechar a válvula de saída de gases e colocar o ponto de contacto na bomba;
- ✓ Encher lentamente a bomba com oxigénio até a pressão de 30 bar;
- ✓ Colocar a bomba dentro do balde calorimétrico;
- ✓ Instalar os cabos e verificar a inexistência de saída de gases (bolhas); colocar a tampa do corpo do calorímetro, que contém o agitador e o termopar;
- ✓ Colocar a correia no topo do calorímetro e iniciar a rotação;
- ✓ Inserir todos os dados necessários no calorímetro e iniciar o ensaio.

O poder calorífico superior é calculado através da Equação 4:

$$PCS(final) \times m(final) = PCS(amostra) \times m(amostra) + PCS(\acute{a}cido) \times m(\acute{a}cido)$$

Equação 4

Onde:

PCS(final) – Poder calorífico final (cal/g);

m(final) – massa final (g);

PCS(amostra) – Poder calorífico superior da amostra de fração de biomassa (cal/g);

m(amostra) – Massa de amostra de fração de biomassa (g);

PCS(ácido) – Poder calorífico do ácido benzóico (cal/g);

m(ácido) – Massa de ácido benzoico (g).

Nota: o ácido benzóico não foi utilizado (sendo a massa da amostra introduzida diretamente no painel), assim como a equação referida, uma vez que o equipamento fornece eletronicamente o resultado final.

#### 7.1.4 ANEXO A.4 – Determinação do Teor de Lenhina Total

A lenhina total é determinada a partir da soma da lenhina solúvel e insolúvel. A determinação deste parâmetro envolveu então duas etapas, a determinação da lenhina solúvel e da lenhina insolúvel. A determinação deste parâmetro foi realizada de acordo com a norma TAPPI T222om-11.

##### ➤ Determinação do teor de lenhina insolúvel

##### • Material:

- ✓ Vidro de relógio;
- ✓ Balança analítica (Kern ALJ 220-4);
- ✓ Gobelés;
- ✓ Pipeta volumétrica de 15 mL;
- ✓ Banho termostaticado com agitação (Selecta Unitronic OR-C);
- ✓ Provetas;
- ✓ Placa de aquecimento (Raypa);
- ✓ Bomba de vácuo (Neuberger);
- ✓ Filtros de membrana de vidro;
- ✓ Estufa a  $105 \pm 5$  °C (WTB Binder);
- ✓ Cadinho de porcelana;
- ✓ Exsicador.

##### • Reagentes e soluções:

- ✓ Água desionizada;

- ✓ Fração de biomassa;
  - ✓ Solução de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 72%.
- Procedimento:
- ✓ Pesar 1 ± 0,0001 g de amostra seca para o vidro de relógio;
  - ✓ Colocar num gobelé e adicionar lentamente 15,00 mL de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 72%, com agitação constante;
  - ✓ Manter o gobelé num banho a 2 ± 1 °C até a dispersão da amostra;
  - ✓ Após dispersão, tapar o gobelé com vidro de relógio e levar a um banho termostatizado a 20 ± 1 °C com agitação constante, durante 2 horas;
  - ✓ Terminado este período, adicionar 575 mL de água desionizada e levar à ebulição durante 4 horas (ter em atenção em manter o volume de solução igual à inicial, adicionando água desionizada em ebulição sempre que necessário).
  - ✓ Após as 4 horas, aguardar até deposição de todas as partículas em suspensão;
  - ✓ Filtrar num sistema de filtração a vácuo a solução, utilizando uma membrana de fibra de vidro tarada (previamente seca na estufa a 105 ± 5 °C e pesada);
  - ✓ Efetuar a lavagem do resíduo com água desionizada em ebulição;
  - ✓ Colocar o filtro com o resíduo num cadinho de porcelana, previamente seco na estufa a 105 ± 5 °C, e levar a estufa a 105 ± 5 °C durante duas horas;
  - ✓ Retirar para o exsicador até arrefecer e estabilizar a temperatura;
  - ✓ Pesar a amostra;
  - ✓ Voltar a colocar na estufa a 105 ± 5 °C durante 1 hora e voltar a repetir o procedimento de secagem, arrefecimento e pesagem até peso constante.

O teor de lenhina insolúvel (%) é calculado através da Equação 5:

$$\text{lenhina insolúvel(\%)} = \frac{m(\text{lenhina})}{m(\text{amostra seca})} \times 100$$

Equação 5

Onde:

m(lenhina) – Massa de lenhina após secagem (g);

m(amostra seca) – Massa de amostra de fração de biomassa (g).

➤ Determinação da lenhina solúvel:

A partir do filtrado resultante da determinação da lenhina insolúvel procedeu-se a leitura da absorvância no comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 205 nm que corresponde à lenhina solúvel.

• Material:

- ✓ Espectrofotómetro UV-VIS (Shimadzu, UV-160 A),  $\lambda = 205$  nm;
- ✓ Cuvetes de quartzo;
- ✓ Pipeta de Pasteur.

- Reagentes e soluções:
  - ✓ Filtrado resultante da determinação da lenhina solúvel.
- Procedimento:
  - ✓ Medir o volume de filtrado obtido na determinação anterior;
  - ✓ Colocar uma amostra na cuvete de quartzo e ler a absorvância a 205 nm;
  - ✓ Caso se verifique uma absorvância superior a 1, diluir quantitativamente o filtrado e ler novamente.
  - ✓ Repetir este passo até obtenção de absorvância inferior a 1.

O teor de lenhina solúvel (%) é determinado a partir da Equação 6:

$$\text{lenhina solúvel}(\%) = (\text{Abs}(205\text{nm}) \times V(\text{filtrado}) \times f / \epsilon \times m(\text{amostra})) \times 100$$

*Equação 6*

Onde:

Abs(205 nm) – Absorvância lida no espectrofotômetro UV-VIS no comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 205 nm;

V(filtrado) – Volume de filtrado (mL);

f – fator de diluição;

$\epsilon$  – fator de conversão igual a 100 dm<sup>3</sup>/g.cm.

A determinação do teor de lenhina total (%) é feita a partir da soma da lenhina solúvel e insolúvel tal como referido anteriormente, e é dada pela Equação 7:

$$\text{lenhina Total}(\%) = \text{Lenhina insolúvel}(\%) + \text{Lenhina solúvel}(\%)$$

*Equação 7*

### 7.3 ANEXO B – CÁLCULOS DE PROPORÇÃO REAL EM BASE HÚMIDA

Os cálculos para obtenção de valores de fração em proporção real em base húmida (uma vez que foram secos em estufa anteriormente) tomaram como base os seguintes cálculos:

$$45\% \times (1-TUGalhos) = \text{Proporção 1}$$

$$25\% \times (1-TUFolhas) = \text{Proporção 2}$$

$$35\% \times (1-TUErvas) = \text{Proporção 3}$$

Para cada proporção calculada (P), obteve-se, então, a proporção real em base húmida (Pbh) dividindo-se pelo somatório das mesmas:

$$P1 + P2 + P3 = PT$$

$$P1bh = P1/PT$$

$$P2bh = P2/PT$$

$$P3bh = P3/PT$$

As proporções de mescla finais e reais em base húmida foram: 53% para Galhos; 25% para Folhas; e 22% para Ervas.

## 7.5 ANEXO C – CORREÇÃO DE TEMPERATURA DE PATAMAR DO PIROLISADOR

O forno de pirólise utilizado neste estudo apresenta uma curva de correção intrínseca ao sistema, a qual segue:

$$T_i = 0,9619 \times T_c + 60,043$$

*Equação 8*

Onde:

$T_i$  – Temperatura de patamar planeada inicialmente (inicial);

$T_c$  – Temperatura de patamar a ser inserida no sistema (corrigida).

## 7.7 ANEXO D – ANÁLISE DE VARIÂNCIA (TESTE DE KRUSKAL-WALLIS)

O Teste de Kruskal-Wallis procedeu-se por meio do *software* Bioestat 5.0, utilizando-se dados de todas as 4 repetições de AP e de NFV dos 5 tratamentos a e b, o qual originou os seguintes gráficos:

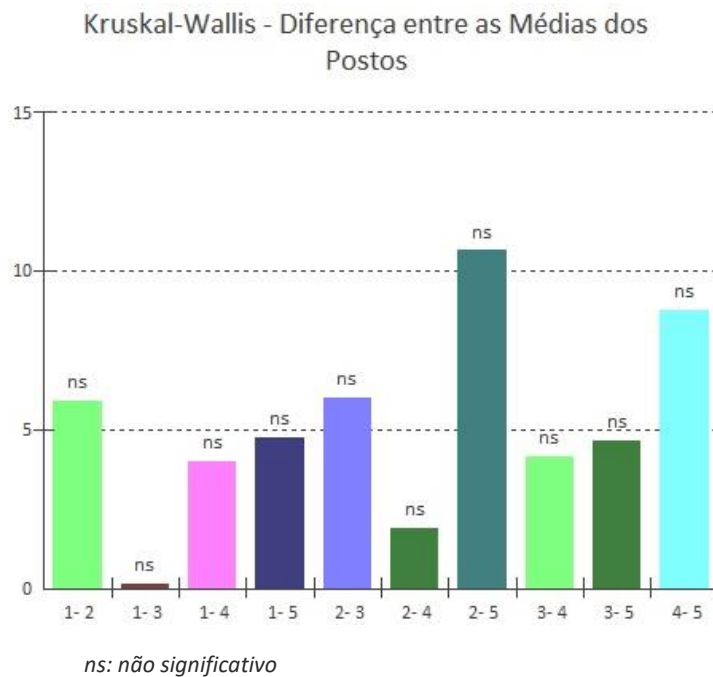


Figura 21 – Teste rodado para condicionador tipo a com os dados de Altura das Plantas (AP)

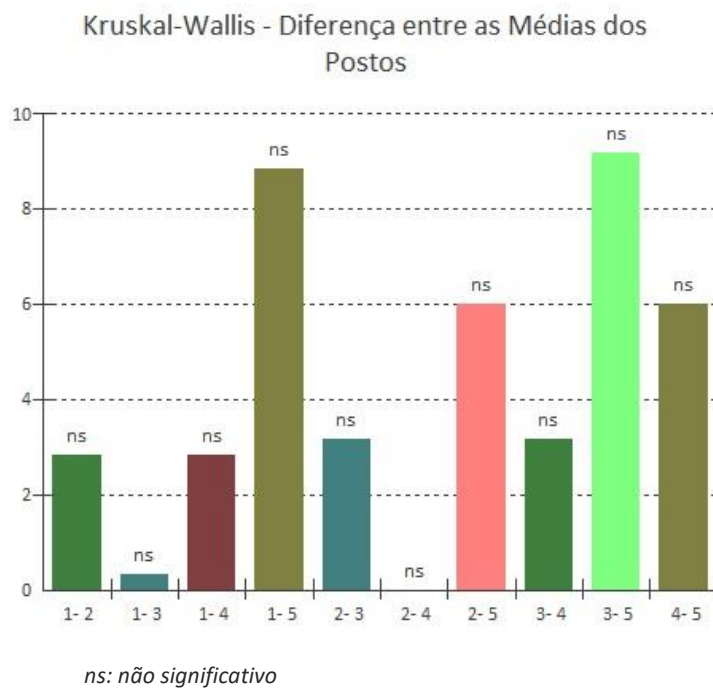
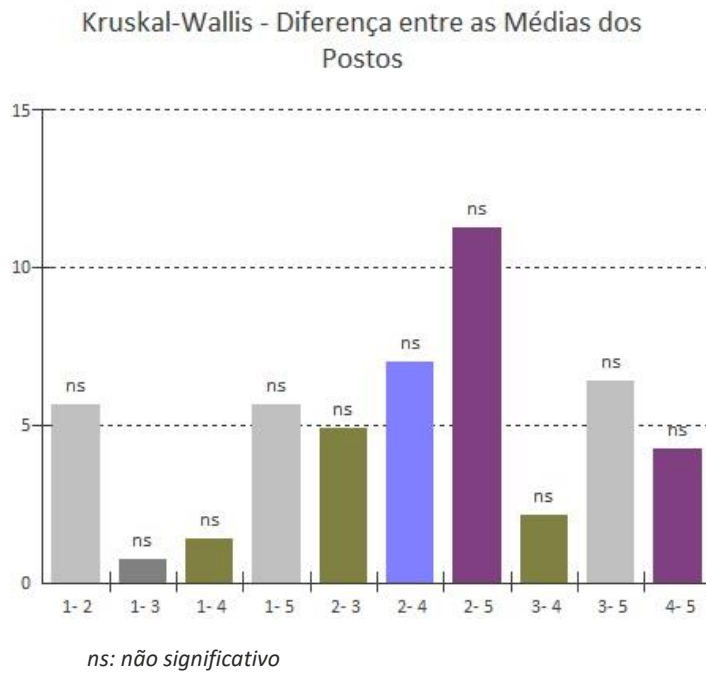
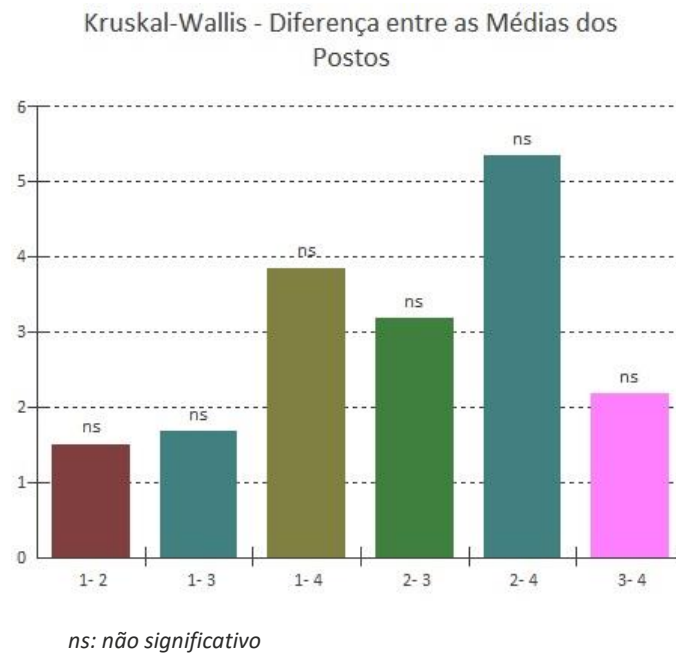


Figura 22 – Teste rodado para condicionador tipo b com os dados de Altura das Plantas (AP)



**Figura 23 – Teste rodado para condicionador tipo a com os dados de Número de Folhas Verdadeiras (NFV)**



**Figura 24 – Teste rodado para condicionador tipo b com os dados de Número de Folhas Verdadeiras (NFV)**