



Estudo do poder calorífico de biomassa agrícola e florestal carbonizado pelo processo de pirólise

Projeto n.º 34001

Ibero Massa Florestal, Lda



Outubro 2014



ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE QUADROS	6
INTRODUÇÃO	7
CONVERSÃO DE BIOMASSA	8
2.1 Processos de Conversão	9
2.2 Pirólise	10
CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA AGRÍCOLA E FLORESTAL.....	12
3.1 Biomassa Agrícola	12
3.2 Biomassa Florestal.....	14
ENSAIOS.....	19
4.1 – Método.....	19
4.2 – Descrição das Amostras	20
4.2.1 – Biomassa Agrícola	20
4.2.2 - Biomassa Florestal.....	22
RESULTADOS.....	27
5.1 – Carbonização de Biomassa Agrícola	27
5.1.1 – Carbonização Vide	27

5.1.2 – Carbonização poda de Kiwi.....	29
5.2 – Carbonização de Biomassa Florestal	32
5.2.1 – Carbonização de Sobre	32
5.2.2 – Carbonização de Pinho	35
5.2.3 – Carbonização de Eucalipto.....	38
5.2.4 – Carbonização de Acácia	40
5.2.4 – Carbonização de Azinho	43
CONCLUSÃO	46
BIBLIOGRAFIA.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1 – Caracterização do consumo de energia primária em Portugal no ano de 2012 [1].</i>	8
<i>Figura 2 – Processos de conversão de biomassa.</i>	10
<i>Figura 3 – Produtos resultantes do processo de Pirólise.</i>	10
<i>Figura 4 – Peso das podas resultantes da poda de videira, oliveira; pereira; macieira; castanheiro e Kiwi no total considerado.</i>	13
<i>Figura 5 – Ocupação de Área por espécie Florestal [7].</i>	14
<i>Figura 6 – Podas de Videira.</i>	20
<i>Figura 7 – Poda de Kiwi.</i>	22
<i>Figura 8 – Imagem amostra de eucalipto.</i>	23
<i>Figura 9 – Imagem de sobreiro.</i>	24
<i>Figura 10 – Imagem da amostra de Azinho utilizado nos ensaios.</i>	25
<i>Figura 11 – Imagem de amostra de acácia utilizada nos ensaios.</i>	26
<i>Figura 12 – Imagem vide carbonizada.</i>	27
<i>Figura 13 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de vide.</i>	28
<i>Figura 14 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de vide.</i>	29
<i>Figura 15 – Imagem poda de kiwi carbonizada.</i>	30
<i>Figura 16 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de poda de kiwi.</i>	31
<i>Figura 17 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de poda de kiwi.</i>	32
<i>Figura 18 – Imagem de sobreiro carbonizado.</i>	33
<i>Figura 19 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de sobreiro.</i>	34
<i>Figura 20 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de sobreiro.</i>	35
<i>Figura 21 – Imagem de pinho carbonizado.</i>	36
<i>Figura 22 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de pinho.</i>	36
<i>Figura 23 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de pinho.</i>	37
<i>Figura 24 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de eucalipto.</i>	39
<i>Figura 25 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de eucalipto.</i>	40
<i>Figura 26 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de acácia.</i>	41
<i>Figura 27 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de acácia.</i>	42
<i>Figura 28 – Imagem de azinho carbonizado.</i>	43

Figura 29 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de azinho. 44

Figura 30 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de azinho. 44

ÍNDICE DE QUADROS

<i>Tabela 1 – Quantificação de quantidade média produzidas por podas de culturas permanentes [6].</i>	13
<i>Tabela 2 – Área de espécies florestais, em mil ha [7].</i>	15
<i>Tabela 3 – Resíduos anuais produzidos por unidade [8].</i>	16
<i>Tabela 4 – Resíduos florestais anuais produzidos por espécie</i>	17
<i>Tabela 5 – Resíduos florestais secos produzidos por zona.</i>	18
<i>Tabela 6 – Análise Poda de Videira.</i>	21
<i>Tabela 7 – Características Eucalipto.</i>	23
<i>Tabela 8 – Resultados da análise do carvão de vide.</i>	29
<i>Tabela 9 – Resultados da análise do carvão de poda de Kiwi.</i>	32
<i>Tabela 10 – Resultados da análise do carvão de sobre.</i>	35
<i>Tabela 11 – Resultados da análise do carvão de pinho.</i>	38
<i>Tabela 12 – Resultados da análise do carvão de acácia.</i>	42
<i>Tabela 13 – Resultados da análise do carvão de azinho</i>	45
<i>Tabela 14 – Resumo valores obtidos nas várias análises para as várias amostras.</i>	46

INTRODUÇÃO

O presente estudo foi elaborado com o objectivo de caracterizar ao nível do poder calorífico o produto obtido pela carbonização de biomassa agrícola, proveniente de podas, especificamente de podas: de videira e kiwi; assim como de biomassa florestal, nomeadamente: eucalipto, pinheiro, sobreiro, azinho e acácia, que representam 75% da área florestal nacional.

No primeiro capítulo serão apresentados os processos existentes de valorização energética da biomassa florestal e agrícola, descrevendo de forma pormenorizada o processo de pirólise a ser utilizado no presente estudo.

O segundo capítulo visa elaborar a caracterização da matéria-prima a ser utilizada, distinguindo entre a biomassa agrícola, resíduos provenientes da poda, e biomassa florestal. Será ainda elaborada uma pequena análise do potencial disponível para valorização energética dos produtos identificados.

No terceiro capítulo será definido a metodologia de ensaios a aplicar, assim como descrição dos equipamentos e do processo. O quarto capítulo visa apresentar os resultados obtidos pelos ensaios descritos no capítulo três.

As conclusões obtidas pela análise do capítulo quatro, serão apresentadas no capítulo cinco. O sexto, e último, capítulo apresenta a bibliografia consultada para a elaboração do presente trabalho.

CONVERSÃO DE BIOMASSA

A utilização da biomassa como fonte de energia tem vindo a ser fundamental para o desenvolvimento da civilização. Nos tempos recentes, as pressões relacionadas com o ambiente, assim como a sustentabilidade dos recursos fósseis, têm vindo a gerar um interesse crescente na utilização de energia de fontes renováveis.

A situação energética do País é marcada pela sua elevada dependência de fontes de energia como o petróleo, o gás natural e o carvão. Em 2012 estas três formas de energia representaram no consumo de energia primária de cerca de 75.87% do consumo total de energia primária [1].

**Consumo de Energia Primária 2012
(ktep)**

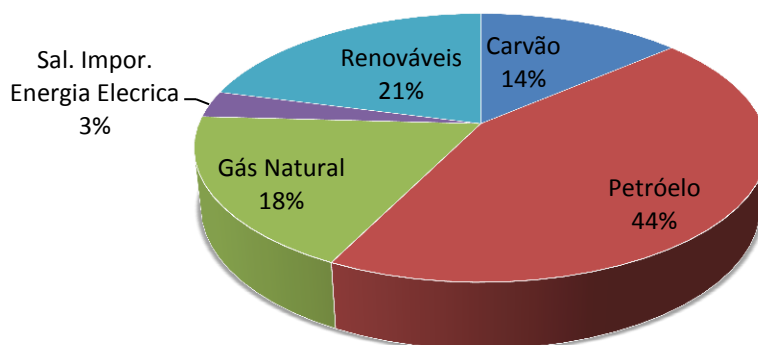


Figura 1 – Caracterização do consumo de energia primária em Portugal no ano de 2012 [1].

Surge assim um problema de segurança do abastecimento e de independência energética, estando o país sujeito à volatilidade do preço do petróleo e também do gás natural e do carvão, embora em menor escala. Esta é uma das mais importantes razões para que hoje a maioria dos países esteja a apostar nas energias renováveis e na

eficiência energética.

Existe também a razão ambiental, visto que o elevado consumo de recursos energéticos de origem fóssil está a conduzir a um aumento artificial do efeito de estufa, pelo que é imperativo apostar num abastecimento de energia sustentável que não prejudique o meio ambiente, exigindo a introdução e divulgação de energias renováveis.

A necessidade de encontrar alternativas viáveis para o consumo de energia produzida a partir de combustíveis fósseis, bem como a necessidade de independência energética, leva um interesse crescente na produção de energia através de biomassa.

2.1 Processos de Conversão

A conversão de biomassa em energia pode ser realizada através de diferentes processos, sendo que os factores que influenciam a escolha do processo são o tipo e quantidade de biomassa, a utilização final da energia, entre outros. A utilização final da energia tem tendência a ser o factor determinante na escolha do processo a utilizar [2].

Os processos de conversão de biomassa podem ser divididos em quatro categorias básicas: Combustão directa; Processos termoquímicos; Processos bioquímicos e Processos agroquímicos [3].

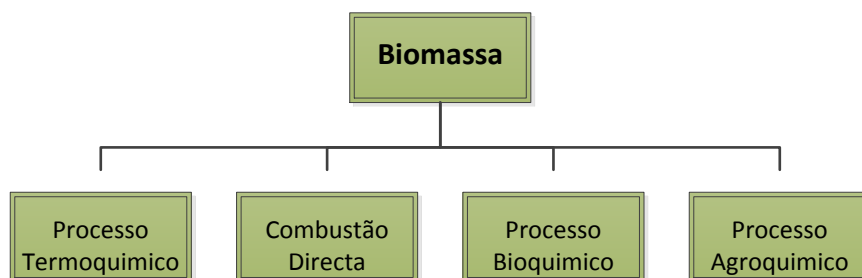


Figura 2 – Processos de conversão de biomassa.

2.2 Pirólise

Os processos termoquímicos, onde se inclui o processo de pirólise, permitem uma série de formas de valorização da biomassa. A pirólise é definida como a degradação térmica de material orgânico na ausência de oxigénio.

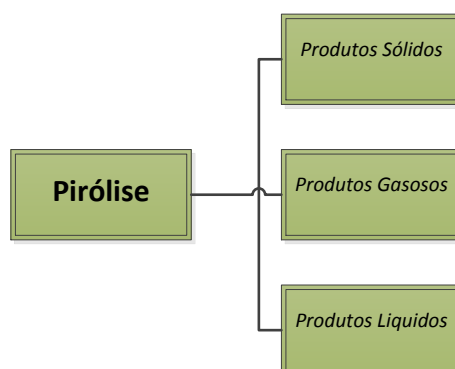


Figura 3 – Produtos resultantes do processo de Pirólise.

Os produtos formados pelo processo de Pirólise são produzidos em proporções diferentes, em função dos parâmetros utilizados, como a temperatura final do processo, a pressão de operação, e as propriedades iniciais da biomassa. O objectivo do processo de pirólise é o de obter um produto com densidade energética superior ao da biomassa inicial [4].

A carbonização (pirólise) da biomassa com vista à produção de carvão vegetal é desenvolvida a temperaturas médias de 300°C, sendo que a biomassa é queimada com baixo teor de oxigénio o que impede a combustão completa, sendo obtido o carvão vegetal que possui em média o dobro da densidade energética da biomassa inicial.

CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA AGRÍCOLA E FLORESTAL

3.1 Biomassa Agrícola

Cerca de 34% da superfície total de Portugal é ocupada pela Agricultura, sendo que esta ocupação é mais expressiva no Alentejo e no Norte, onde corresponde a 41% e 21% da área ocupada respectivamente.

A agricultura nacional é maioritariamente direccionada para o cultivo de cereais, nas culturas temporárias, e para o olival e a vinha nas culturas permanentes [5].

Entende-se como biomassa agrícola, os resíduos provenientes de actividades agrícolas, sem utilização posterior na própria exploração. Assim, estão incluídas nesta definição as palhas dos cereais, os caules do girassol e do milho, as partes aéreas das principais plantas herbáceas e os ramos das podas das árvores.

As podas são uma operação necessária para a manutenção das próprias culturas. Em Portugal são produzidas aproximadamente 7 milhões de toneladas de biomassa residual agrícola de culturas permanentes [6], passíveis de serem utilizadas para produção de energia. Na tabela 1 apresentamos a quantificação média de biomassa residual agrícola no que se refere apenas aos ramos das podas das árvores.

Tabela 1 – Quantificação de quantidade média produzidas por podas de culturas permanentes [6].

Culturas	Podas Produzidas (ton)
Ameixoeira	19 568
Amendoeira	11 806
Castanheiro	21 646
Cerejeiro	9 199
Figueira	7 145
Kiwi	12 240
Citrinos	271 496
Macieira	243 262
Nogueira	4 103
Pereira	140 162
Pessegueiro	52 856
Frutos secos	37 976
Olival	201 505
Vinha	153 020
Total	1 185 984

No presente trabalho apenas serão consideradas as podas resultantes das seguintes culturas: videira e Kiwi, apresentadas na figura 4 no total de podas produzidas.

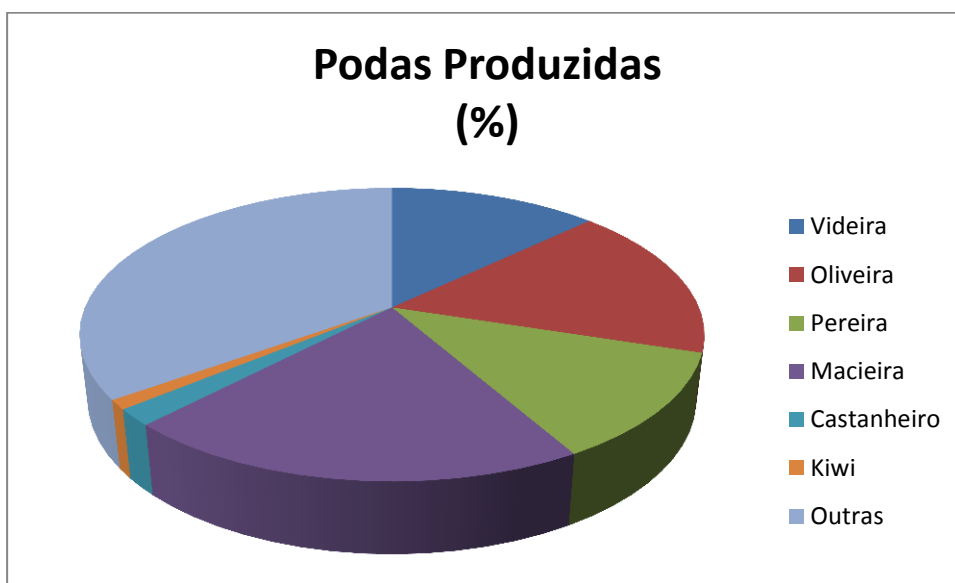


Figura 4 – Peso das podas resultantes da poda de videira, oliveira; pereira; macieira; castanheiro e Kiwi no total considerado.

3.2 Biomassa Florestal

Floresta portuguesa cobre cerca de 38% do território [7]. Esse valor demonstra claramente o potencial de biomassa florestal em Portugal. Contudo a área florestal tem sofrido reduções ao longo dos anos, devido aos inúmeros incêndios. A limpeza das matas é um factor de prevenção contra incêndios e o produto obtido possui características de elevado interesse energético.

O pinheiro bravo, o sobreiro, o eucalipto e a azinheira são as quatro principais espécies, ocupando cerca de 83% da área de floresta portuguesa com base em dados de 2006 (Figura 19).

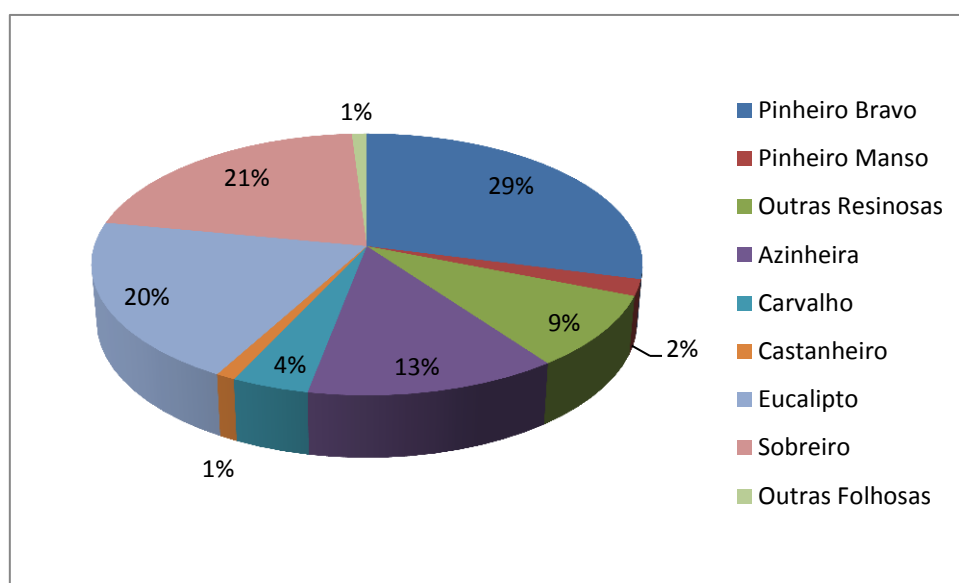


Figura 5 – Ocupação de Área por espécie Florestal [7].

Na última década têm sido apresentadas diversas estimativas para o potencial de biomassa existente no país, valores que nem sempre são convenientemente identificados de acordo com a sua representatividade face ao universo da biomassa

florestal.

Na tabela que se segue encontra-se, discriminada, a área ocupada por espécie florestal por região.

Tabela 2 – Área de espécies florestais, em mil ha [7].

	Pinheiro	Eucalipto	Sobreiro	Azinheira	Outras folhosas	Outras resinosas	Total
Norte	246	143	21	20	152	21	604
Centro	571	227	28	32	86	4	948
Lisboa e Vale do Tejo	110	143	140	3	19	1	416
Alentejo	112	131	484	398	11	0,3	1136
Algarve	15	29	40	9	6	0	98
Total	1054	672	713	462	274	27	3202

A biomassa florestal é classificada como a fracção biodegradável dos produtos e dos desperdícios de actividade florestal, incluindo operações de condução: desbaste e desrama; ou da exploração dos povoamentos florestais: ramos, bicadas, cepos, folhas, raízes e cascas (Tabela 26).

Tabela 3 – Resíduos anuais produzidos por unidade [8].

Espécies Florestais	Resíduos Anuais	
	(kg _{verdes} / árvore)	(kg _{secos} / árvore)
Pinheiro	1,4	0,6
Eucalipto	2,3	1,1
Azinheta	3,3	1,4
Sobreiro	3,3	1,4

A estimativa de resíduos florestais anuais é calculada com base nos valores de densidade florestal para os diferentes povoamentos [7], de acordo com os valores da Tabela 3, e a área ocupada por cada espécie (Tabela 2).

Tabela 4 – Resíduos florestais anuais produzidos por espécie

Espécies Flores- tais	Densidade (espécie/ha)	Base	
		Resíduos verdes	Resíduos Secos
		(ton/ano)	(ton/ano)
Pinheiro	412	607.947	260.549
Eucaliptos	545	843.606	403.464
Azinheira	41	62.509	26.519
Sobreiro	83	195.291	82.851

A produção estimada de resíduos florestais é de 1.709 milhões de toneladas de resíduos verdes por ano, ou seja 773 milhões de toneladas de resíduos secos por ano. Os resultados obtidos mostram que a produção de resíduos deve-se essencialmente á exploração do pinheiro e de eucalipto, sendo de salientar a zona centro como aquela que apresenta um maior potencial (Tabela 5).

Tabela 5 – Resíduos florestais secos produzidos por zona.

Zona	Resíduos secos
	(ton)
Norte	150.128
Centro	282.328
Lisboa e Vale do Tejo	129.361
Alentejo	185.307
Algarve	26.258
Total	773.382

ENSAIOS

4.1 – Método

O processo utilizado nos resultados apresentados no presente trabalho foi o de pirolise lenta. A conversão térmica com ruptura das ligações de carbono (pirólise lenta) é um processo de oxidação-redução no qual parte do produto inicial é transformado em carbono, a temperaturas entre os 450 e 500 °C. Neste processo os resíduos ligno-celulósicos sofrem alterações físicas e químicas irreversíveis dando origem à obtenção final de biocarvão. Podemos dizer, duma forma geral, que o processo de pirólise lenta passa por etapas diferentes com a libertação de CO, CO₂ e vapor de água e líquidos tais como o alcatrão e o ácido acético.

Especificando, o processo de pirólise lenta pode ser dividido em quatro etapas:

- Abaixo de 200° de temperatura: é a etapa da secagem da madeira dando-se a evaporação e eliminação de água entre 110-200° C.
- De 200° a 280° C: é a etapa das reações endotérmicas. Quando a temperatura atinge cerca de 260°, a madeira passa a ser quimicamente degradada e os materiais voláteis (ácido acético, metanol, água, CO₂ e outros) começam a ser evaporizados.
- De 280 a 500°C: é a etapa das reações exotérmicas. Nesta fase, parte da biomassa é carbonizada e ocorre a libertação dos gases combustíveis (CO, CH₄ e outros) bem como a maioria do alcatrão solúvel e do ácido pirolenhoso.

- Acima de 500°C: ocorre a libertação de pequenas quantidades de voláteis em especial H₂, considerado aqui o fim da pirólise lenta e o início do arrefecimento do reator.

Convém ressaltar que durante este processo de pirólise lenta estas etapas podem ocorrer em simultâneo. As características do reator onde é feita a pirólise lenta permite queimarem no seu forno todos os gases combustíveis e materiais voláteis. Deste modo, o calor libertado na queima dos gases da pirólise assegura a auto-sustentabilidade do processo que se desenrola até o material atingir os 500°C garantindo, deste modo que apenas existe biocarvão na câmara de pirólise.

4.2 – Descrição das Amostras

4.2.1 – Biomassa Agrícola

A biomassa agrícola em estudo no presente trabalho são as podas de videira e podas de kiwi.



Figura 6 – Podas de Videira.

As podas de videira utilizadas, recolhidas na zona do Douro (imagem 6), apresentaram uma densidade de 160 kg/m^3 , e um PCI de 17.794 KJ/kg (tabela 6).

Tabela 6 – Análise Poda de Videira.

Produto	Densidade (kg/m^3)	PCI (KJ/Kg)
Poda de Videira	150.128	17.794

As podas de kiwi foram recolhidas na região de Trás-os-Montes e Alto Douro. As podas no kiwi são realizadas uma vez por ano, entre os meses de Dezembro e Fevereiro. O objectivo da poda é obter uma boa frutificação, permitindo o arejamento a polinização e a luminosidade da copa.



Figura 7 – Poda de Kiwi.

4.2.2 - Biomassa Florestal

A biomassa florestal em estudo no presente trabalho são as podas de eucalipto, pinheiro, sobreiro, azinho e acácia.

O **eucalipto**, *Eucalyptus globulus*, é uma angiospérmica dicotiledónea, também identificada como folhosa. Pertence à ordem das Mirtale, família das Mirtáceas, género *Eucalyptus*, sendo a espécie *Eucalyptus globulus* a mais comum e economicamente importante em Portugal. Existem em todo o mundo cerca de 600 espécies diferentes de eucalipto. Esta que predomina em Portugal é originária da Tasmânia e Austrália.

Na figura que se segue pode observar-se a imagem da amostra considerada.



Figura 8 – Imagem amostra de eucalipto.

Das análises efectuadas à amostra, e resumidas na tabela que se segue, destacam-se o PCI de 20.226 KJ/kg.

Tabela 7 – Características Eucalipto.

Tipo	Humidade verde (%)	Diâmetro médio (mm)	Densidade (kg/m ³)		PCI (kJ/kg)	Análise Elementar (%)					Holocelulose (%)	Lignina (%)	Cinzas (%)
						H	C	O	N	S			
Eucalipto	54%	200	858	516	20 226	7,50	47,00	42,00	1,97	0,13	60	30	0,5

O **pinheiro**, pertencente à família *Pinophyta*, tradicionalmente incluída no grupo das gimnospérmicas, é uma árvore de elevado porte, podendo atingir os 30 – 40m de altura. O tronco apresenta uma casca espessa, profundamente fissurada. As folhas são agulhas, emparelhadas, de cor verde-escura, com 10-25 cm, rígidas e grossas.

O **sobreiro**, uma das árvores florestais mais abundantes em Portugal, é caracterizado pelo elevado desenvolvimento que pode atingir o tronco e ramos (imagem 9). O sobreiro apresenta uma densidade de 800 kg/m³.



Figura 9 – Imagem de sobreiro.

As **azinheiras**, *Quercus ilex*, medem até 10 metros de altura. São incluídas na família das fagáceas. As suas folhas são ligeiramente espinhosas. Na figura que se segue pode-se observar uma imagem da amostra considerada. O azinho apresenta uma densidade de 800 kg/m³, e um PCI de 14 mil KJ/kg.



Figura 10 – Imagem da amostra de Azinho utilizado nos ensaios.

A **Acácia**, uma das espécies infestantes mais agressivas actualmente identificadas, sendo original das florestas tropicais do Sudeste da Austrália e da Tasmânia, actualmente existe em quase toda a Europa. A acácia apresenta um PCI médio de aproximadamente 18.930 KJ/kg. Na figura que se segue pode observar-se uma imagem da amostra considerada.



Figura 11 – Imagem de amostra de acácia utilizada nos ensaios.

RESULTADOS

5.1 – Carbonização de Biomassa Agrícola

5.1.1 – Carbonização Vide

Para o ensaio de carbonização das podas resultantes das videiras (vides) foi utilizado um peso de matéria inicial de 8.750 kg. A produção de carvão obtida foi de 2.65 kg, correspondendo a uma conversão de 30% (figura 12).



Figura 12 – Imagem vide carbonizada.

O processo de carbonização, nas suas etapas, demorou aproximadamente sete horas, tendo sido iniciado às 13:13 horas e terminou às 19.15 horas. A fase I e a fase II tiveram uma duração de três horas, e a fase III de uma hora.

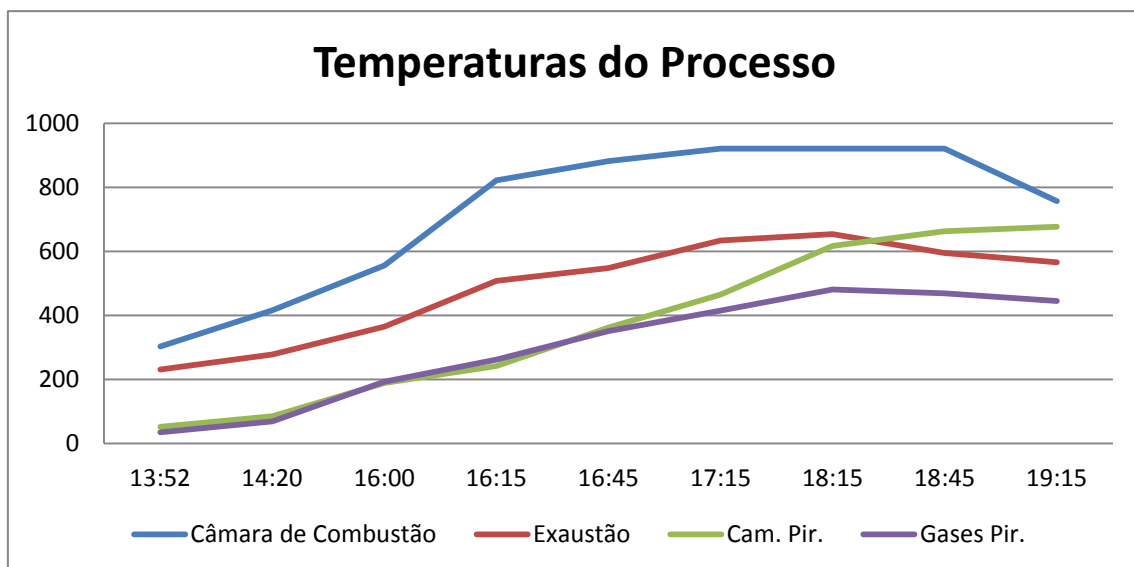


Figura 13 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de vide.

O primeiro registo de temperatura na câmara de combustão, às 13:52 horas, 39 minutos após o início do processo, foi de 303 °C. O valor máximo de temperatura foi de 921 °C tendo-se registado às 17:15 h, uma hora após o início da Fase II (figura 13), e tendo-se mantido constante na leitura das 18:15 e 18:45 horas.

A temperatura na exaustão atingiu um máximo de 634 °C às 17:45 horas (Fase II) sendo que no registo de início da fase II (16:00 horas) registava 365 °C. No início da fase III a temperatura de exaustão registou um valor de 566 °C.

O primeiro registo de temperatura na câmara de pirolise indicou 52 °C (13:52 horas). A temperatura máxima foi de 677 °C registada no início da fase III (19:15 horas).

A temperatura dos gases de pirólise atingiu os 481 °C no registo das 18:15 horas. O registo inicial de temperatura foi de 35 °C às 13:52 horas, e no fim da fase III registava 445 °C.

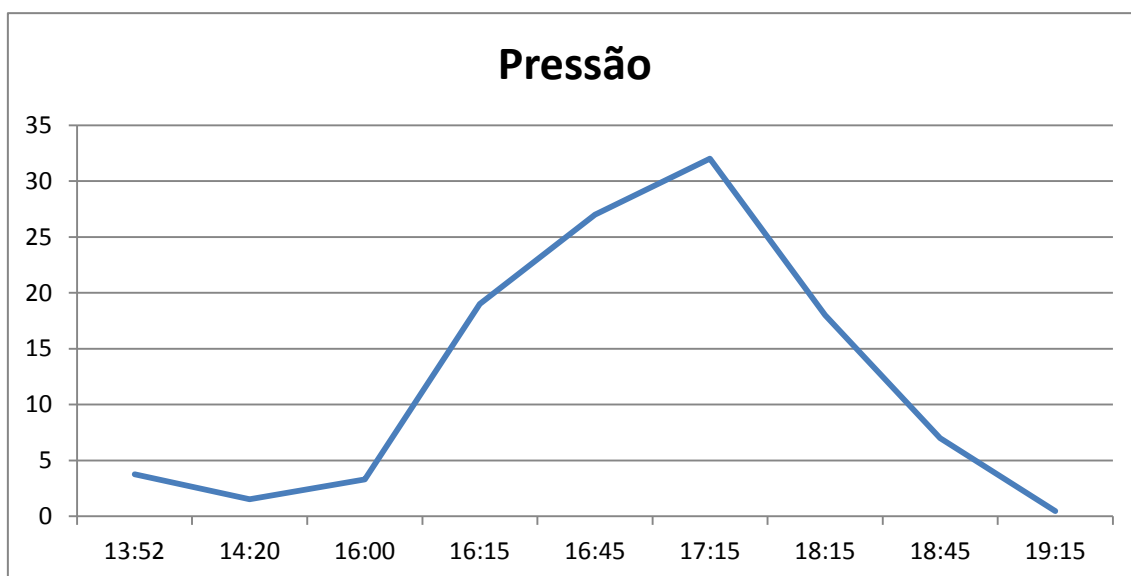


Figura 14 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de vide.

O registo de pressões na câmara de pirólise foi iniciado, como todos os outros registos, às 13:52 horas. O primeiro registo indica uma pressão de 3.77 mbar. O pico de pressão atingida foi de 32 mbar às 17:15 horas.

As análises efectuadas ao carvão produzido indicam um teor de carbono de 85%. Em relação às cinzas o teor é de 7.78% e de voláteis 7.14%. O teor de humidade é 6.10% (tabela 8).

Tabela 8 – Resultados da análise do carvão de vide.

Amostra	Teor de Humidade (%)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)
Videira	6.10	85	7.78	7.14

5.1.2 – Carbonização poda de Kiwi

A amostra considera de kiwi foi de 21.4 kg. O processo teve uma duração de 9 horas e 11 minutos e a produção de carvão foi de 2 kg, obtendo-se um rácio de conversão de 9% (figura 15).



Figura 15 – Imagem poda de kiwi carbonizada.

O início do processo foi às 09:00 horas tendo terminado às 16 horas. No gráfico que se segue pode observar-se as temperaturas registadas na câmara de combustão, exaustão, câmara de pirólise e gases de pirólise.

O primeiro registo de temperatura na câmara de combustão, realizado às 09:10 horas, indica uma temperatura de 342 °C. O registo indica um crescimento contínuo de temperatura até às 12:30 horas, onde se observa uma temperatura de 182 °C. Esta quebra de temperatura deve-se ao facto de a pressão (figura 18) ter atingido valores de segurança e por isso houve a necessidade de interromper o processo. O pico máximo

de temperatura na câmara de combustão foi de 812 °C registado às 14:02 horas.

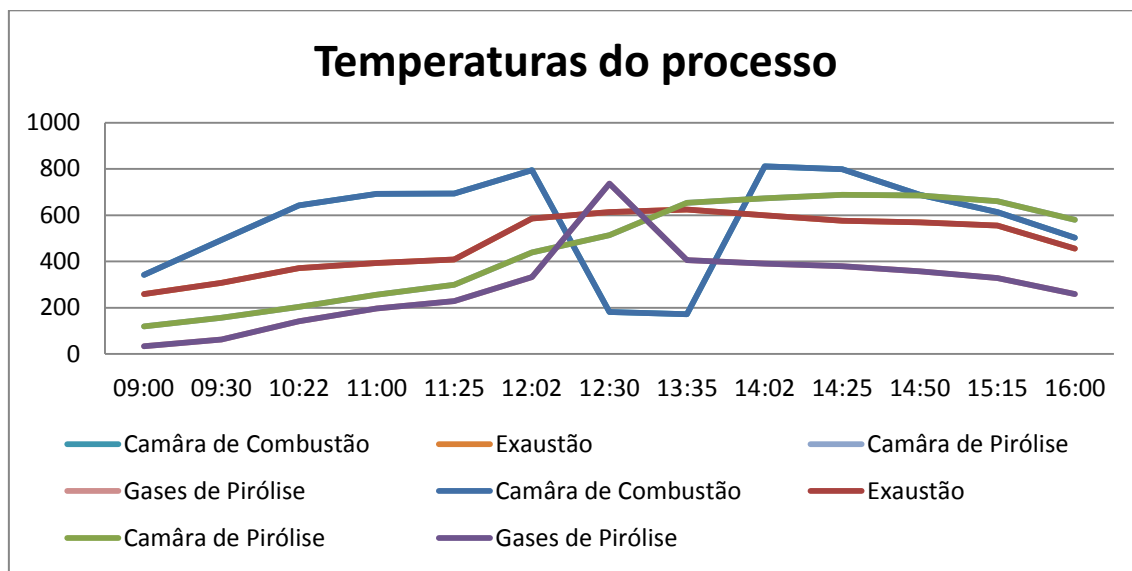


Figura 16 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de poda de kiwi.

As temperaturas de exaustão atingiram o pico às 13:35 horas com uma temperatura de 624 °C. No fim do processo o valor de temperatura era de 456 °C.

Na câmara de pirólise o pico de temperatura foi de 685 °C, às 14:50 horas, coincidente com o pico de temperatura na câmara de combustão. Os gases de pirólise atingiram como valor máximo 406 °C, no momento em que ocorreu a quebra de temperatura na câmara de combustão.

A pressão na câmara de pirólise atingiu o pico de 34.45 mbar, obrigando, como já descrito anteriormente, à quebra de temperatura na câmara de combustão e reinício do processo. A pressão mínima foi de 0.8 mbar às 09:10 horas (início do processo). No fim do processo, às 16:00 horas, a pressão registada foi de 10 mbar.

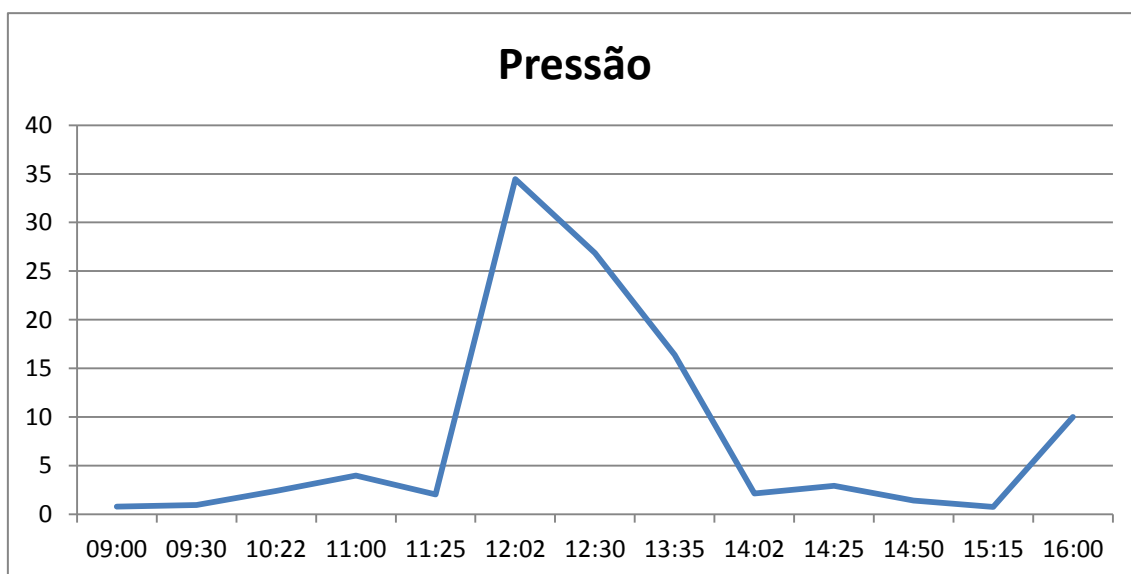


Figura 17 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de poda de kiwi.

A análise do carvão produzido indicou um teor de humidade de 7.48%. O teor de carbono é de 86%, de cinzas é de 8.37% e de voláteis é de 6.09% (tabela 9)

Tabela 9 – Resultados da análise do carvão de poda de Kiwi.

Amostra	Teor de Humidade (%)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)
Poda Kiwi	7.48	86	8.37	6.09

5.2 – Carbonização de Biomassa Florestal

5.2.1 – Carbonização de Sobreiro

A amostra de sobreiro considerada tinha um peso de 29.5 kg. O processo teve uma duração de 7 horas e 30 minutos. A produção de carvão foi de 7.25 kg, correspondendo a uma conversão de 24.5%.



Figura 18 – Imagem de sobra carbonizado.

O início do processo foi às 07:52 horas e o fim do mesmo às 14:54 horas. No gráfico que se segue pode observar-se o registo de temperaturas na câmara de combustão, exaustão, câmara de pirólise e gases de pirólise (figura 19).

O pico máximo de temperatura na câmara de combustão foi de 895 °C, registado às 11:50 horas. No fim do processo, registo efectuado às 14:54 horas, a temperatura registada foi de 599 °C.

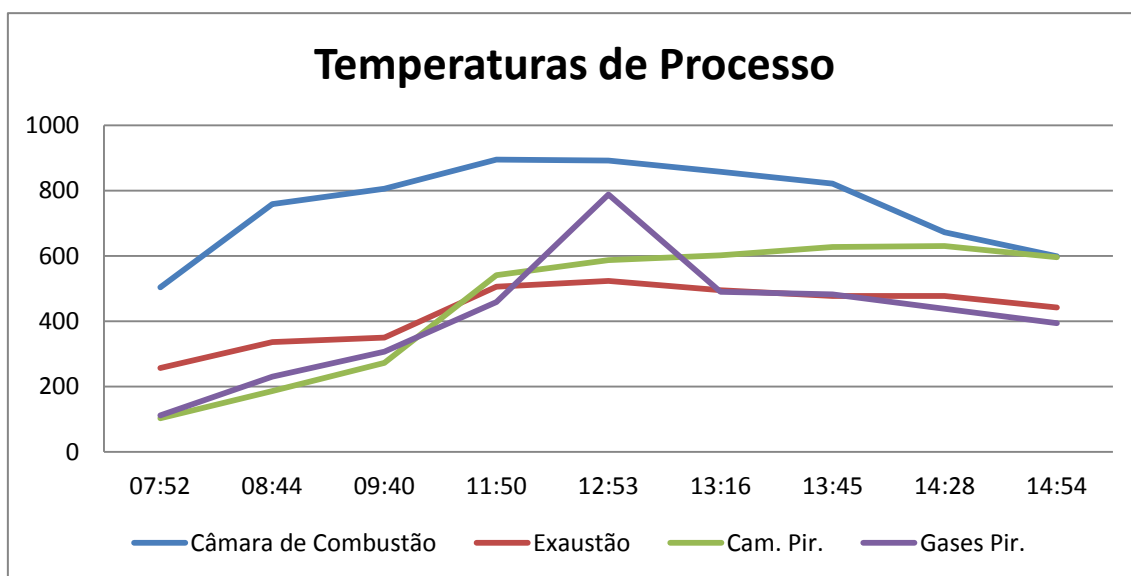


Figura 19 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de sobre.

As temperaturas na exaustão atingem um máximo de 523 °C, às 12:53 horas. No início do processo a temperatura foi de 257 °C, e no fim do processo de 442 °C.

Na câmara de pirólise a temperatura máxima foi de 630 °C, registado às 14:28 horas, fim da fase II. A temperatura no fim do processo era de 596 °C e no início do processo de 103 °C. Os gases de pirólise atingiram o valor máximo de 490 °C às 13:16 horas (meio de fase II), e no fim do processo o valor era de 394 °C.

O pico de pressão na câmara de pirólise foi de 25.8 mbar registado às 11:50 horas. A pressão mínima registada foi de 0 mbar, no início de processo, e no fim do processo a pressão registada foi de 0.51 mbar (figura 20).

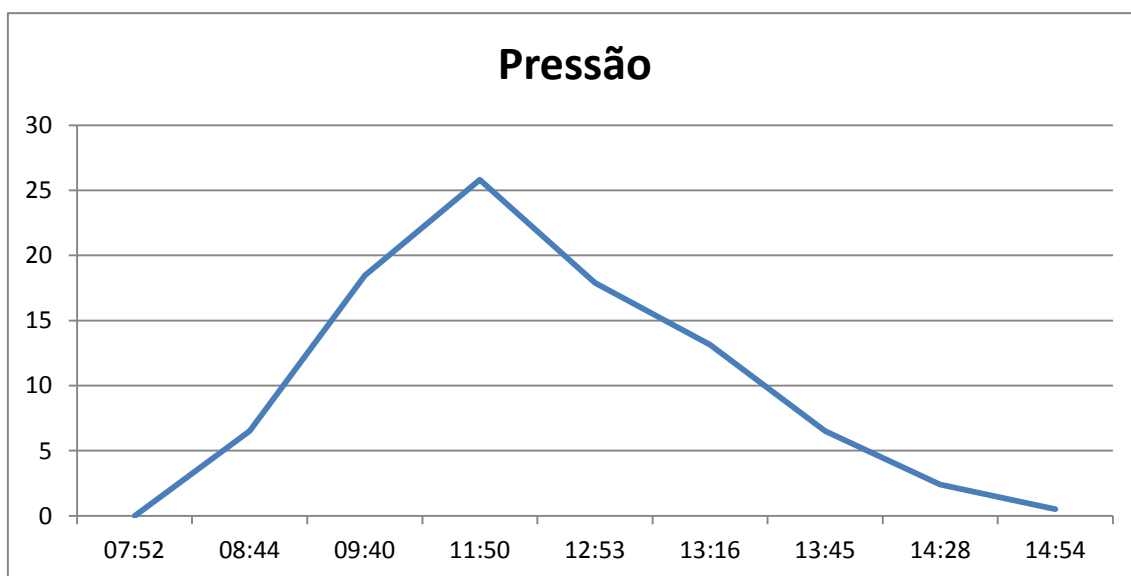


Figura 20 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de sobre.

Nas análises efectuadas ao carvão de sobre produzido obteve-se como teor de humidade o valor de 3.85%. Ao nível de cinzas o resultado foi de 6.67%, de voláteis 7.63% e de carbono 86% (tabela 10).

Tabela 10 – Resultados da análise do carvão de sobre.

Amostra	Teor de Humidade (%)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)
Sobre	3.85	86	6.67	7.63

5.2.2 – Carbonização de Pinho

Para o ensaio de carbonização de pinho foi utilizada uma amostra com 31.4 kg. A massa de carvão produzida foi de 5 kg, correspondente a um factor de conversão de 16%. O processo teve uma duração de 10 horas e trinta minutos, com início às 04:40 horas e fim a 12:03 horas.



Figura 21 – Imagem de pinho carbonizado.

No gráfico que se segue (figura 22) pode observar-se os valores de temperatura registados durante o processo na câmara de combustão, exaustão, câmara de pirólise e gases de pirólise.

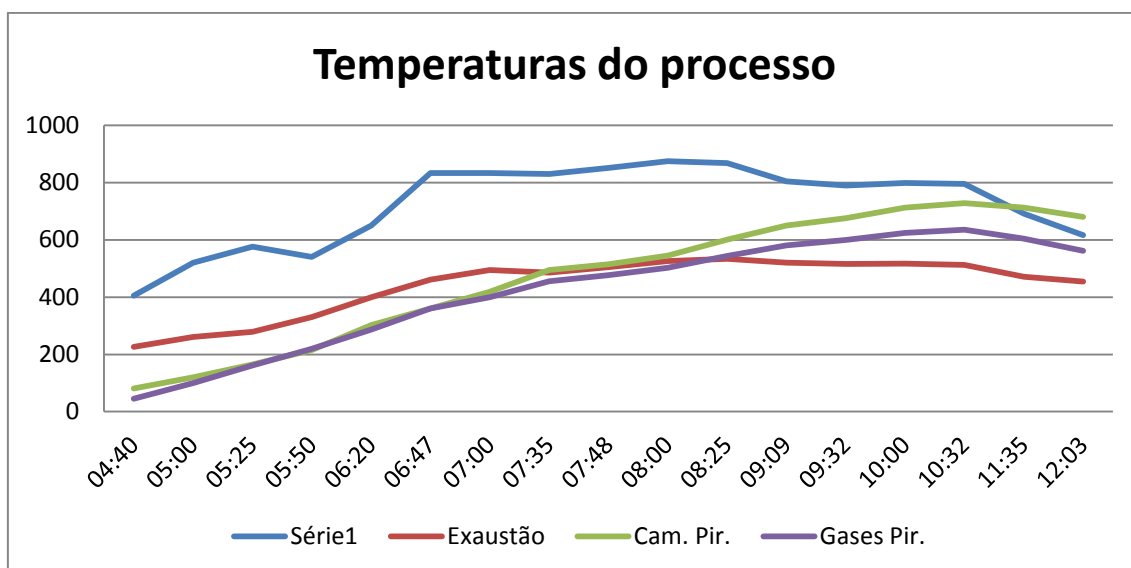


Figura 22 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de pinho.

Na câmara de combustão a temperatura máxima registada foi de 874 °C às 08:00 horas (decorrer da fase II). No primeiro registo, efectuado às 04:40 horas a

temperatura era de 405 °C e no fim do processo, às 12:03 horas era de 616 °C.

Na exaustão a temperatura máxima registada foi de 534 °C e a mínima de 226 °C no início do processo. No término do processo a temperatura de exaustão era de 454 °C.

A câmara de pirólise atingiu a temperatura de 728 °C às 13:32 horas, correspondente ao fim da fase II. No fim do processo a temperatura era de 680 °C. Os gases de pirólise registavam na primeira leitura uma temperatura de 45 °C, sendo o máximo registado de 635 °C às 10:32 horas, mesma hora que o pico de temperatura registado na câmara de pirólise.

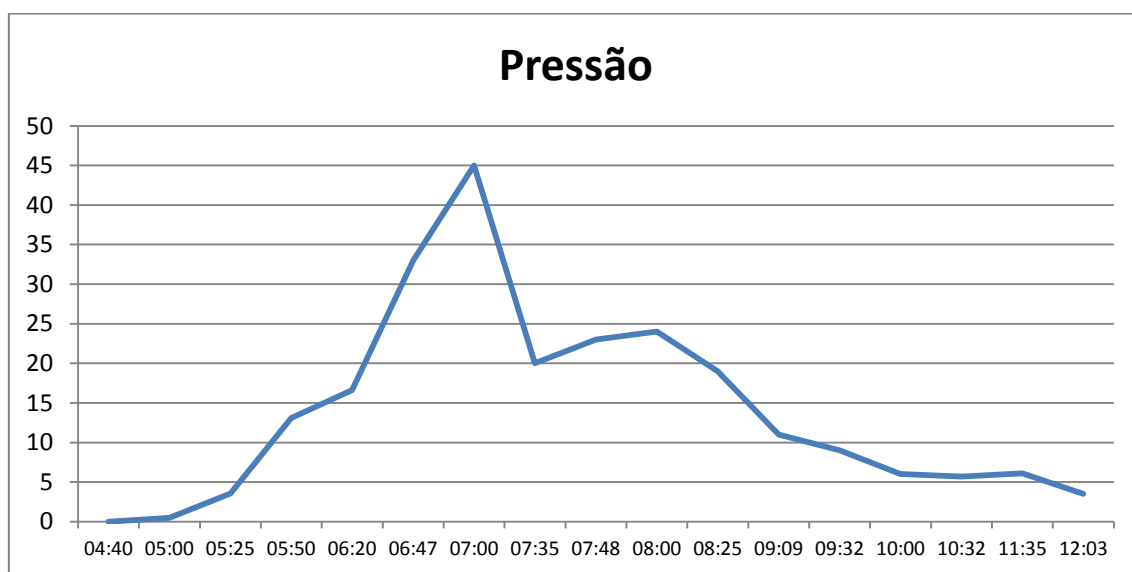


Figura 23 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de pinho.

O processo registou várias oscilações em relação à pressão na câmara de pirólise. O primeiro pico, registado às 07:00 horas foi de 45 mbar. Após este pico nota-se uma quebra continua na pressão até aos 3.5 mbar no fim do processo.

As análises efectuadas ao carvão produzido demonstraram um teor de

humidade de 7.53%. As cinzas apresentam um teor de 1.28%, os voláteis de 4.70% e o carbono apresenta um teor de 94% (tabela 11).

Tabela 11 – Resultados da análise do carvão de pinho.

Amostra	Teor de Humidade (%)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)
Pinho	7.53	94	1.28	4.70

5.2.3 – Carbonização de Eucalipto

A amostra de eucalipto tinha um peso de 835 kg. A produção de carvão foi de 183 kg, registando um valor de conversão de 22%.

O processo de carbonização teve uma duração de 10 horas e 26 minutos tendo início às 21:26 horas e fim às 06:00 horas.

No gráfico que se segue tem descrito as temperaturas obtidas no decorrer do processo na câmara de combustão, exaustão, câmara de pirólise e gases de pirólise.

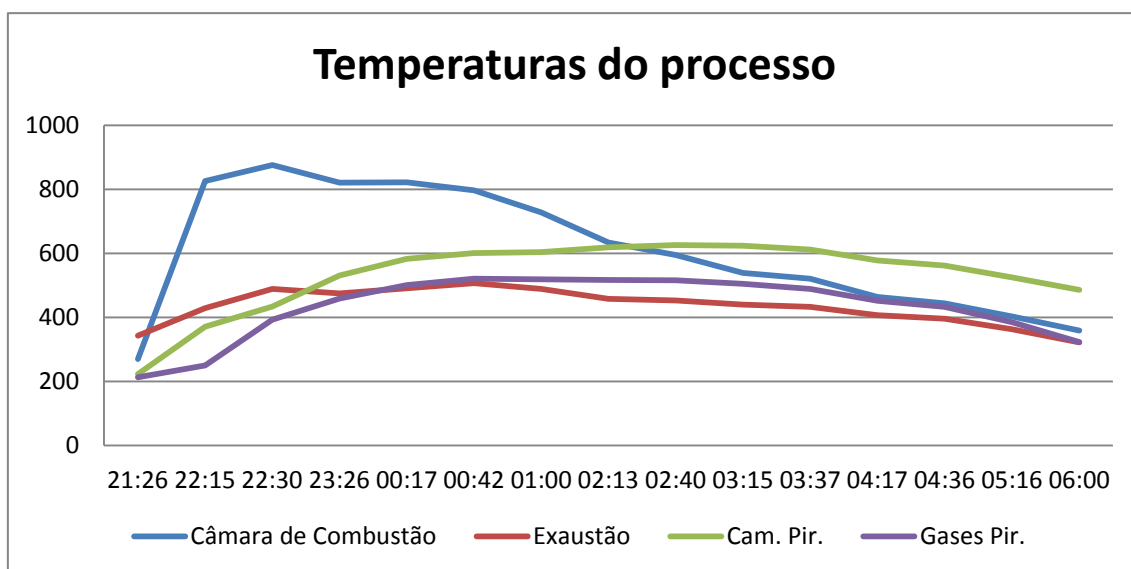


Figura 24 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de eucalipto.

A temperatura máxima na câmara de combustão foi de 822 °C, registada às 00:17 horas, no decorrer da fase II. No fim do processo, às 06:00 horas, a temperatura era de 359 °C. A exaustão atinge a temperatura máxima às 01:00 horas com uma leitura de 489 °C.

Na câmara de pirólise a temperatura máxima atingida foi de 626 °C registada na leitura efectuada às 02:40 horas. No primeiro registo, 21:26 horas, a temperatura era de 223 °C e a temperatura de final de processo foi de 06:30 horas.

Os gases de pirólise apresentam uma temperatura máxima de 521 °C, com registo às 00:42 horas. No fim do processo a temperatura era de 323 °C.

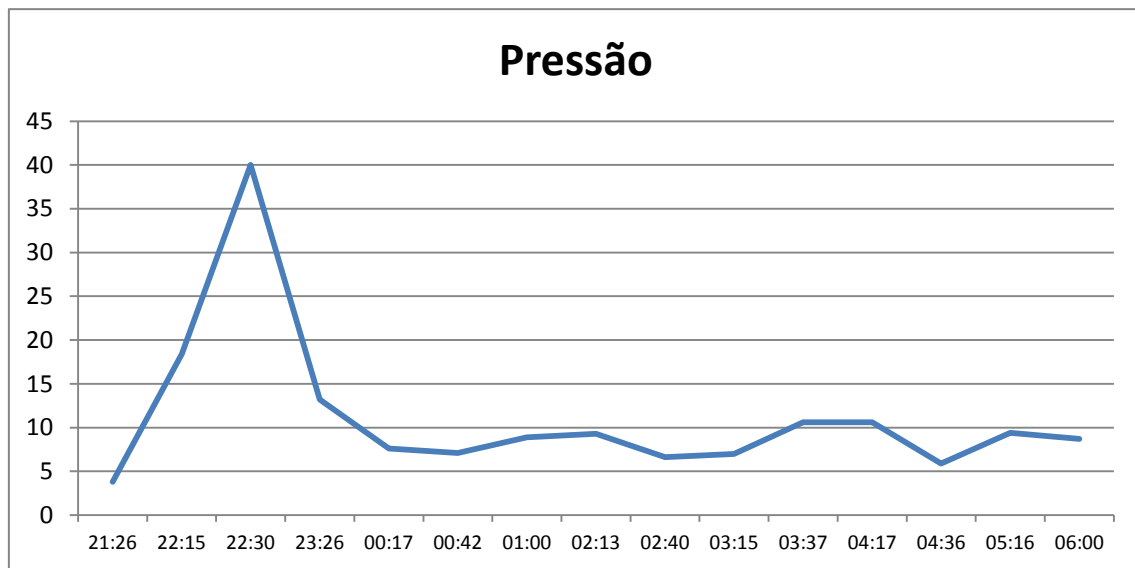


Figura 25 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de eucalipto.

A pressão máxima na câmara de pirólise foi de 40 mbar registada às 22:30 horas. Até às 00:17 horas a pressão baixou para 706 mbar, tendo-se mantido entre os 6 e os 10 mbar até ao fim do processo.

5.2.4 – Carbonização de Acácia

A amostra de acácia utilizada para o ensaio tinha uma massa de 836 kg. O processo de carbonização teve uma duração de três horas, com início às 12:43 horas e fim às 17:30 horas. A massa de carvão produzida foi de 170 kg, resultando num valor de conversão de 20%.

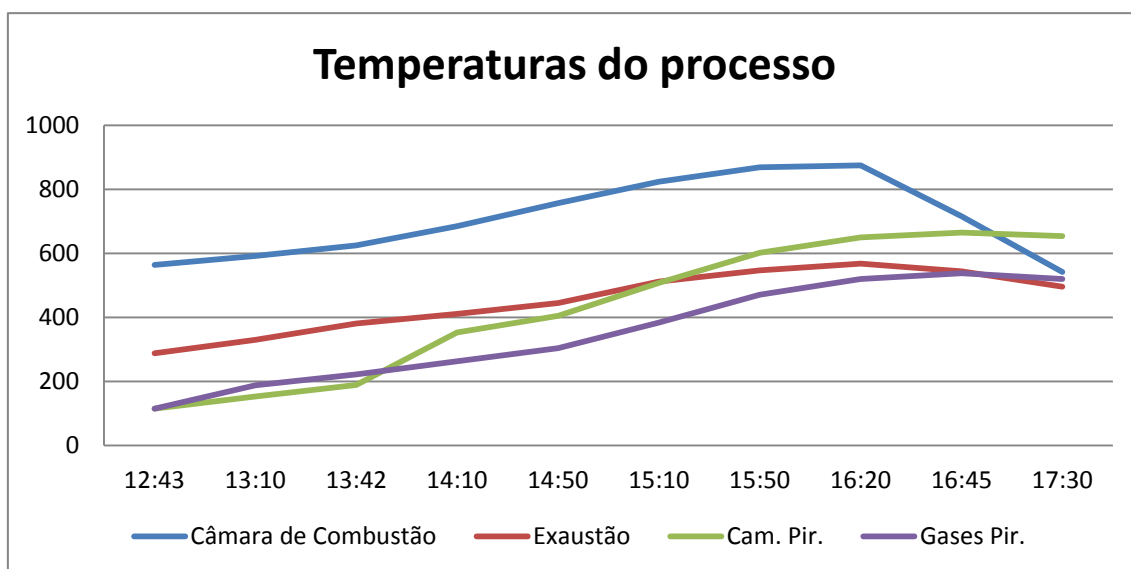


Figura 26 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de acácia.

O pico de temperatura registado na câmara de combustão foi de 875 °C, registado às 16:20 horas. No primeiro registo, efectuado às 12:43 horas, a temperatura na câmara de combustão era de 564 °C. No fim do processo a temperatura era de 542 °C.

Na exaustão a temperatura no início do processo era de 288 °C, registando um aumento contínuo até às 16:20 horas, atingindo uma leitura de 568 °C. No fim do processo a temperatura era de 496 °C.

Na câmara de pirólise a temperatura máxima foi de 665 °C, registada às 16:45 horas, tendo posteriormente reduzido até aos 654 °C no fim do processo. Os gases de pirólise registam o pico de temperatura ao mesmo tempo que a câmara de pirólise, tendo sido a leitura de 538 °C.

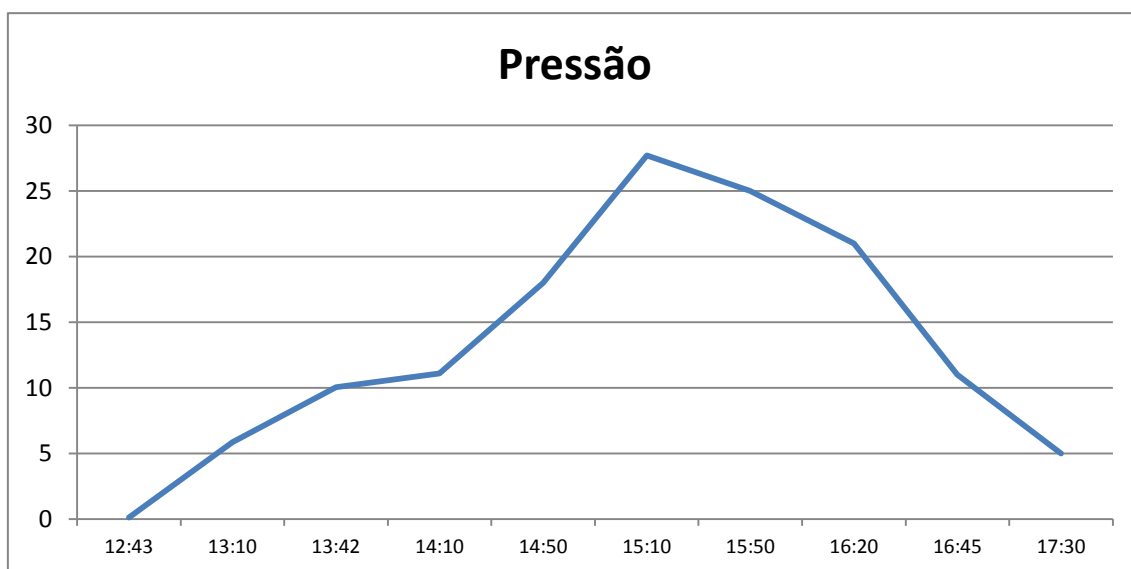


Figura 27 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de acácia.

As pressões registadas na câmara de pirólise (figura 27) registam um aumento de pressão desde o início do processo, com uma leitura de 0.11 mbar, até às 15:10 horas atingindo a pressão de 27.70 mbar. Após esse registo a pressão tende a diminuir terminando o processo com uma leitura de 5 mbar.

Tabela 12 – Resultados da análise do carvão de acácia.

Amostra	Teor de Humidade (%)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)
Acácia	1.75	98	0.8	1.28

As análises realizadas na amostra revelam um teor de humidade de 1.75%. O teor de cinzas é de 0.8%, de voláteis apresenta um teor de 1.28% e o teor de carbono é de 98%.

5.2.4 – Carbonização de Azinho

Para os ensaios de carbonização de azinho foi utilizada uma amostra com 673 kg. O processo de carbonização demorou 08:30 horas. A massa de carvão produzida foi de 176 kg, correspondendo a uma conversão de 26% (figura 28)



Figura 28 – Imagem de azinho carbonizado.

Na figura 26 pode observar-se o registo de temperaturas do processo na câmara de combustão, exaustão, câmara de pirólise e gases de pirólise.

Na câmara de combustão a temperatura máxima foi de 860 °C, registada às 01:10 horas. No fim do processo a temperatura foi de 449 °C. A exaustão atinge o pico de 537 °C pelas 02:0 10 horas, e termina o processo com uma leitura de 376 °C.

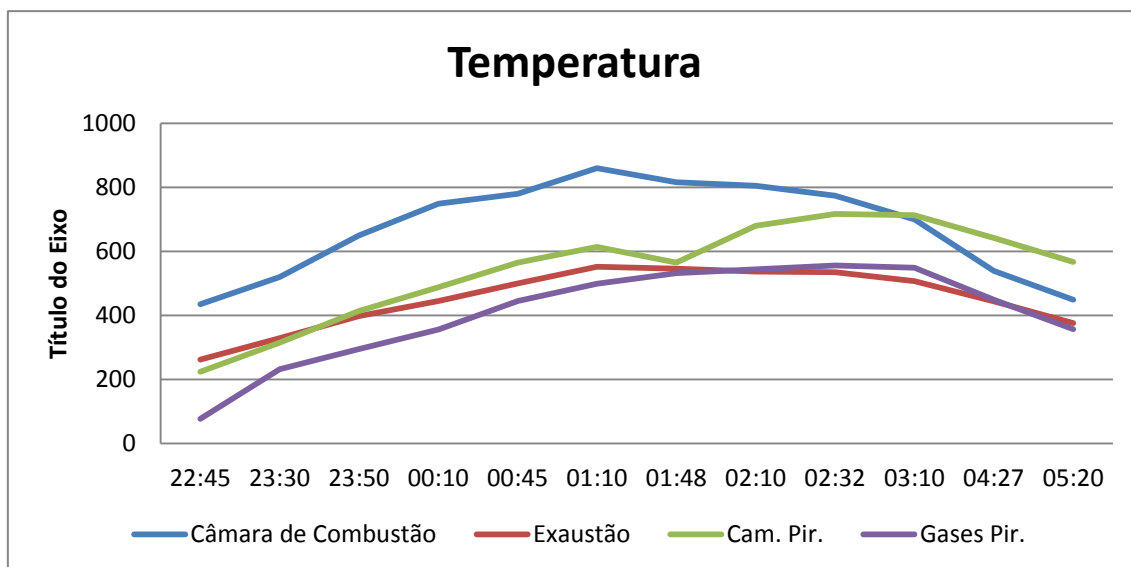


Figura 29 – Registo de temperaturas obtidas na Câmara de Combustão, na Exaustão, Câmara de Pirólise e Gases da Pirólise no processo de carbonização de azinho.

A câmara de pirólise registou uma temperatura máxima de 717 °C no registo efectuado às 02:32 horas. A leitura de fim de processo indica um valor de 567 °C. Os gases de pirólise atingem o pico de temperatura na mesma hora que a câmara de pirólise e têm uma leitura de 556 °C. A leitura de início de processo indica 77 °C, e a de fim do processo de 357 °C.

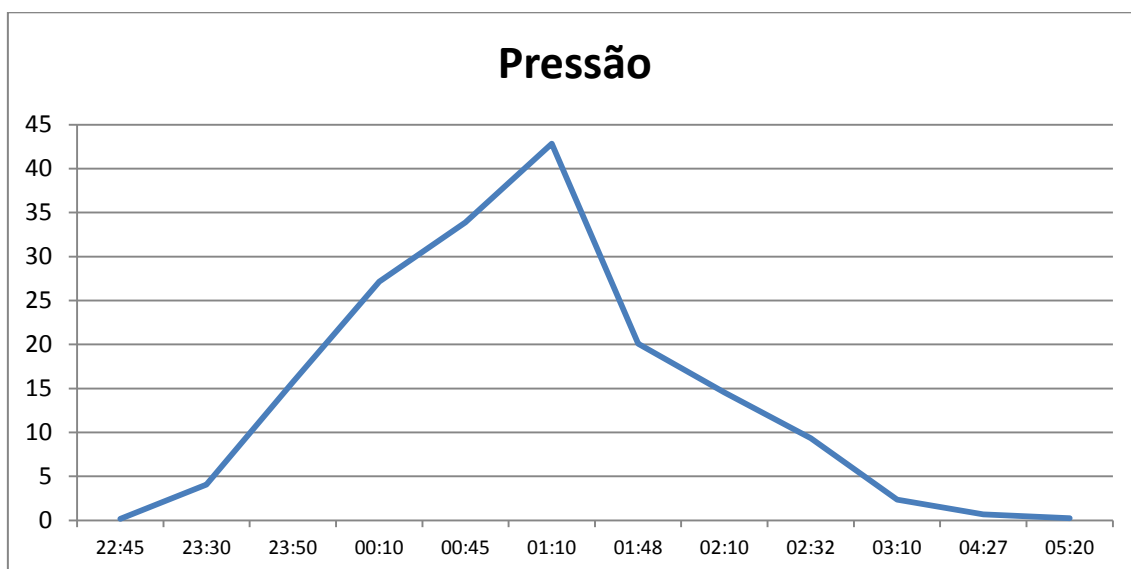


Figura 30 – Registo de pressões obtidas Câmara de Pirólise no processo de carbonização de azinho.

A leitura de pressões na câmara de pirólise indica uma subida constante da

pressão. A primeira leitura indica uma pressão de 0.17 mbar, atingindo o pico às 01:10 horas com uma pressão de 42.85 mbar. No fim do processo a pressão registada foi de 0.23 mbar.

Tabela 13 – Resultados da análise do carvão de azinho

Amostra	Teor de Humidade (%)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)
Azinho	4.11	84	6.22	10.07

Das análises efectuadas no carvão de azinho produzido obteve-se um teor de humidade de 4.11%. O teor de cinzas é de 6.22% e o de voláteis de 10.07%. O resultado para o teor de carbono é de 84%.

CONCLUSÃO

Os ensaios realizados permitiram a caracterização ao nível do teor de humidade, de carbono, cinzas e voláteis, do carvão produzido usando como matéria o resultante da poda de videira, de Kiwi, sobro, pinho, acácia e azinho.

Os resultados resumidos encontram-se apresentados na tabela 14.

Tabela 14 – Resumo valores obtidos nas várias análises para as várias amostras.

Amostra	Teor de Humidade (%)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Voláteis (%)	PCI (kcal/kg)	PCS (kcal/kg)
Videira	6.10	85	7.78	7.14	6 848	6 885
Poda Kiwi	7.48	86	8.37	6.09	6 921	6 966
Sobro	3.85	86	6.67	7.63	6 943	6 966
Pinho	7.53	94	1.28	4.70	7 569	7 614
Acácia	1.75	98	0.8	1.28	7 928	7 938
Azinhó	4.11	84	6.22	10.07	6 779	6 804

Numa primeira análise podemos realçar que os resultados obtidos para o carvão de vide e de poda de kiwi, ambos resíduos agrícolas, apresentam valores próximos. O teor de humidade em ambos apresenta uma diferença de apenas 1.38%. Ao nível do carbono a diferença é de apenas um ponto percentual, e o mesmo se passa com o teor de cinzas e de voláteis.

Nas restantes amostras, biomassa florestal, podemos observar uma coerência nos valores obtidos, para o teor de humidade, com excepção da amostra de pinho. Para a acácia, o sobro e o azinho o teor de humidade é inferior a 5%, no entanto para o pinho toma valores de 7%.

Ao nível do teor de carbono o melhor resultado é o de carvão de acácia, com

um teor de 98%, seguido, com uma pequena diferença, pela amostra de pinho com um valor de 94%. Quer na amostra de carvão de azinho quer de sobro o teor de carbono é inferior a 90%, registando respectivamente 84 e 86%.

No teor de cinzas as amostras de carvão de azinho e sobro apresentam também os piores resultados, com 6.67 e 6.22% respectivamente, sendo que a amostra com melhor resultado é a Acácia com 0.8%. O carvão de pinho apresenta 1.28% de cinzas.

Ao nível dos voláteis o pior resultado é o de carvão de azinho com 10.07%, seguindo pelo sobro com 7.63%.

O carvão de acácia e de pinho apresentam valores positivos de 1.28 e 4.7%.

O poder calorífico pode ser calculado, numa base teórica, através da análise elementar do composto. Para combustíveis sólidos a fórmula aplicada é [9]:

$$PCS = 8100 * C + 34400 \left(1 * \frac{O}{8} \right) + 2500 * S$$

$$PCI = 8100 * C + 34400 \left(1 * \frac{O}{8} \right) + 2500 * S - 600W$$

Onde:

$$C = \text{Teor de Carbono} \left(\frac{kg C}{kg \text{ combustível}} \right)$$

$$O = \text{Teor de Carbono} \left(\frac{kg O}{kg \text{ combustível}} \right)$$

$$S = \text{Teor de Carbono} \left(\frac{kg S}{kg \text{ combustível}} \right)$$

$$W = 9H + \textit{humidade}$$

Conhecendo apenas o teor de carbono e humidade das amostras produzidas, foi assim calculado o PCS e PCI para cada uma das amostras (tabela 14). Como se pode observar a amostra com maior teor de carbono, carvão de acácia, é também a que apresenta um maior poder calorífico inferior e superior.

Da análise geral pode concluir-se que o carvão de acácia é que apresenta melhores resultados, em todos os níveis.

BIBLIOGRAFIA

- [1] – DGEG; ENERGIA EM PORTUGAL - Principais Números; 2014
- [2] - Gavrilescu M., Chisti Y., (2005), Biotechnology- a sustainable alternative for chemical industry, Biotechnology Advances, 23, 471-499
- [3] - McKendry P., (2001), Energy production from biomass (part 1): overview of biomass, Bioresource Technology, 83, 37–46
- [4] – Demirbas A., (2000c), Biomass resources for energy and chemical industry, Energy Edu Sci Technol, 5, 21-45.
- [5] – INETI - Avaliação do potencial de biomassa da região do Algarve. Relatório final. Maio 2006.
- [6] - INE (2009). Recenseamento Geral da Agricultura, 2008. Portugal. Principais Resultados. Instituto Nacional de Estatística, Lisboa
- [7] - Inventário Florestal Nacional, 2006.
- [8] – Mateus T.; 2006; O potencial energético da floresta portuguesa: análise do potencial energético disponível para as centrais termoelétricas a biomassa florestal lançadas a concurso; FEUP – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- [9] – D. M. Mason and K. Gandhi; FORMULAS FOR CALCULATING THE HEATING VALUE OF COAL AND COAL CHAR: DEVELOPMENT, TESTS AND USES; Institute of Gas Technology; 3424 S. State St.Chicago, Illinois 60616