UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROCESSO HIDROTHERMAL DE OBTENÇÃO DE
CARVÃO A PARTIR DE BIOMASSAS DE ALTA
UMIDADE (CAPIM, TURFA E BAGAÇO DE CANA)

Silvio Benedicto Alvarinho

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Valarelli
TESE DE DOUTORAMENTO

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente :	<u>José Vicente Valarelli</u>
Examinadores:	<u>Raphael Hypólito</u>
	<u>Tharcísio Damy de S.Santos</u>
	<u>Artur Pinto Chaves</u>
	<u>Efraim Cekinski</u>

São Paulo
1995

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**PROCESSO HIDROTERMAL DE OBTENÇÃO DE
CARVÃO A PARTIR DE BIOMASSAS DE ALTA
UMIDADE (CAPIM, TURFA E BAGAÇO DE CANA)**

Silvio Benedicto Alvarinho

Orientador: Prof. Dr. José Vicente Valarelli

DEDALUS - Acervo - IGC

309000004464

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

São Paulo
1995

SUMÁRIO

	pág.
Resumo	I
Abstract	II
Agradecimentos	III
1 - Introdução	1
1.1 - Generalidades	1
1.2 - Objetivos	2
1.3 - Justificativas	3
1.4 - Situação das tecnologias de energia renovável	3
1.5 - A matriz energética nacional	5
1.6 - Biomassas de alta produtividade e alta umidade	9
1.7 - Processo de tratamento de biomassas de alta umidade	10
2 - Revisão bibliográfica sobre o processo de carbonização hidrotermal	14
2.1 - Descrição dos processos	17
3 - Métodos e materiais	23
3.1 - Introdução	23
3.2 - Metodologia	23
3.4 - Procedimentos analíticos	28
3.5 - Matérias primas utilizadas	30
3.6 - Caracterização das matérias primas	33
4 - Resultados e discussões	35
4.1 - Caracterização das matérias primas	35
4.2 - Preparação das matérias primas	36
4.3 - Carbonização hidrotermal	39
4.4 - Análise Estatística dos Dados	74
5 - Desenvolvimento de tópicos de projeto de carbonização hidrotermal	76
5.1 - Descrição do processo	76
5.2 - Fluxograma do processo	77
5.3 - Balanço de massas	77
5.4 - Balanço energético	78
5.5 - Tempo de ciclo	85
5.6 - Especificação dos insumos	87
5.7 - Caracterização pormenorizada do carvão de capim	88
6 - Conclusões	93
7 - Bibliografia	95

TABELAS:

1 - Produção de energia primária (em 1.000 toneladas equivalentes de petróleo)	7
2 - Produção de energia primária (%)	8
3 - Quadro comparativo mostrando o desenvolvimento cronológico de carbonização a úmido	16
4 - Determinação dos teores de umidade das matérias primas	33
5 - Resultados da análise imediata das matérias primas	33
6 - Resultados da Análise Elementar	33
7 - Resultados das determinações do poder calorífico superior e teor de Enxofre	33
8 - Análise química das cinzas	34
9 - Resultados da análise qualitativa das cinzas por Espectrometria de Fluorescência de Raio-X e por Espectrografia de Emissão	34
10 - Caracterização dos produtos de esmagamento do capim Guaçu	38
11 - Programação dos ensaios de carbonização hidrotermal de capim	40
12 - Dados obtidos na carbonização hidrotermal do capim	41
13 - Caracterização dos carvões de capim	42
14 - Caracterização das cinzas de carvão de capim	43
15 - Índices e coeficientes obtidos na carbonização hidrotermal do capim	44
16 - Caracterização das frações líquidas da carbonização hidrotermal do capim	45
17 - Programação dos ensaios de carbonização hidrotermal de turfa	46
18 - Dados obtidos na carbonização hidrotermal da turfa	47
19 - Caracterização dos carvões de turfa	48
20 - Caracterização das cinzas dos carvões de turfa	49
21 - Índices e coeficientes obtidos para a turfa	50
22 - Programação dos ensaios de carbonização hidrotermal de bagaço de cana	51
23 - Dados obtidos nos ensaios de carbonização hidrotermal de bagaço de cana	52
24 - Caracterização dos carvões de bagaço de cana	53
25 - Índices e coeficientes obtidos na carbonização hidrotermal de bagaço de cana	54
26 - Análise estatística dos resultados da carbonização hidrotermal	79
27 - Balanço de massas do processo de carbonização hidrotermal de capim	82
28 - Balanço de massa da carbonização do bagaço de capim	82
29 - Balanço energético da carbonização hidrotermal de bagaço de capim	83
30 - Índices do processo de carbonização hidrotermal do bagaço de capim	87
31 - Ensaios de carbonização hidrotermal de capim com recirculação do licor pirolenhoso	89
32 - Densidade real e de empilhamento do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim	90
33 - Análise imediata do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim	91

TABELAS:

34 - Análise química do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim	91
34 - Análise granulométrica do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim	92

FIGURAS:

1 - Fluxograma do processo de carbonização hidrotermal de capim	12
2 - Desenho esquemático da prensa de parafusos para extração de suco de capim	25
3 - Desenho esquemático da bomba (autoclave) Parr	26
4 - Planta de isoteores de cinzas na turfeira de Eugênio de Mello (SJ 2/GM)	31
4 - Fluxograma e balanço de massas do esmagamento do capim	37
6 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, desaguado a vácuo	55
7 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, por prensagem do produto	55
8 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carvão	57
9 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de matéria volátil do carvão obtido	57
10 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de cinzas do carvão obtido	59
11 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de carbono fixo do carvão obtido	59
12 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carbono no carvão obtido	60
13 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o aumento do poder calorífico superior no carvão obtido	60
14 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento energético	61
15 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, desaguado a vácuo	61
16 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, por prensagem do produto	62
17 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carvão	62
18 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de matéria volátil do carvão obtido	63

FIGURAS:

19 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de cinzas do carvão obtido	63
20 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de carbono fixo do carvão obtido	64
21 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carbono no carvão obtido	64
22 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o aumento do poder calorífico superior no carvão obtido	66
23 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento energético	66
24 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, desaguado a vácuo	68
25 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, por prensagem do produto	68
26 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carvão	69
27 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de matéria volátil do carvão obtido	69
28 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de cinzas do carvão obtido	70
29 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de carbono fixo do carvão obtido	70
30 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carbono no carvão obtido	72
31 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o aumento do poder calorífico superior no carvão obtido	72
32 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento energético	73
33 - Fluxograma básico do processo de carbonização hidrotermal de capim	79
34 - Fluxograma ampliado processo de carbonização hidrotermal de capim	80
35 - Balanço de massas do processo de carbonização hidrotermal de capim	81
33 - Balanço energético da carbonização hidrotermal de capim	86

RESUMO

O presente estudo propõe um processo hidrotermal para converter biomassa de alta produtividade e alta umidade em carvão. O processo promove a carbonização de biomassa em polpa aquosa, possibilitando que se trate biomassa sem operação previa de secagem.

O estudo é efetuado sobre três tipos de matérias primas, capim elefante, bagaço de cana e turfa. O capim elefante foi escolhido em razão de sua alta produtividade e as duas outras matérias primas foram escolhidas em razão de sua alta umidade, por sua disponibilidade e por carecerem de tecnologia bem estabelecida para seu aproveitamento.

O estudo apresenta os resultados do tratamento hidrotermal dessas três matérias primas e também o desenvolvimento de alguns itens de processo, aplicados ao capim, de modo a melhor visualizar o processo como um todo.

Os ensaios de laboratório de tratamento hidrotermal das três matérias primas, foram realizados em autoclaves de 1 litro de capacidade com controles de temperatura e pressão. As temperaturas de ensaio foram de 180 °C a 300 °C. para o capim e de 200 °C a 300 °C para a turfa e o bagaço de cana. Os tempos de residência na autoclave foram de 5, 15 e 45 minutos.

As condições de tempo de residência de 15 minutos, temperatura de 260 °C para o capim e 250 °C para a turfa e bagaço de cana, apresentaram os seguintes resultados:

	<i>turfa</i>	<i>bagaço de cana</i>	<i>capim</i>
Rendimento em carvão (%)	77,5	43,0	60,0
Rendimento energético (%)	88,0	50,0	80,0
Rendimento em carbono (%)	85,2	50,9	80,0
Aumento do poder calorífico (%)	13,4	16,4	32,0

Os produtos apresentaram as seguintes características :

Análise imediata

	<i>Matéria volátil (%)</i>	<i>Cinzas (%)</i>	<i>Carbono Fixo (%)</i>
Turfa	47,5	7,4	45,1
Bagaço de cana	72,7	3,2	24,1
Capim	58,6	4,9	36,5

Análise elementar

	<i>Carbono (%)</i>	<i>Hidrogênio (%)</i>	<i>Nitrogênio (%)</i>
Turfa	61,4	4,8	1,0
Bagaço de cana	56,1	5,5	0,1
Capim	60,0	5,3	1,0

Poder calorífico superior

	<i>Poder calorífico superior (kcal/Kg)</i>
Turfa	6,266
Bagaço de Cana	5,086
Capim	6.208

O estudo mostra que o processo, por trabalhar em temperaturas moderadas e altas pressões, retém no carvão grande parte das matérias voláteis contidas na matéria prima, possibilitando altos rendimentos energéticos e em massa, gerando um combustível com alto poder calorífico, na faixa de 6.000 kcal/Kg, e reatividade alta.

O produto é um combustível sólido, bastante friável, que necessita de muito pouco trabalho de moagem para ser utilizado em maçarico.

As cinzas da matéria prima são em parte lixiviadas durante o processo, resultando num carvão com teores de cinza muito menores do que seria esperado numa carbonização seca.

O carvão produzido é facilmente desaguado por meios mecânicos, como filtragem, com baixo dispêndio de energia.

ABSTRACT

To convert biomass of high productivity and high moisture to coal, the author proposes a hydrothermal process. This way, the carbonization proceeds under wet conditions and drying before processing is not needed.

Three raw materials have been tested: *Pennisetum Purpureum Shum* (elephant grass), peat and sugar cane bagasse. The first material has high productivity, the latter two show high moisture, they are easily available and up to now, a good coalification technology has not been developed.

This study gives results of the hydrothermal process applied and characterizes some steps of this process in more detail to enhance understanding of process.

Tests have been conducted in autoclaves of 1 L capacity with external pressure and temperature control. The range of temperatures used is 180 to 300 °C and the coalification time has been 5, 15 and 45 minutes.

At the test time of 15 minutes and 260 °C for the elephant grass and 250 °C for sugar cane bagasse and peat, the results are as follow:

	<i>peat</i>	<i>sugar cane bagasse</i>	<i>grass</i>
Coalification (%)	77,5	43,0	60,0
Energy efficiency (%)	88,0	50,0	80,0
Amount of carbon (%)	85,2	50,9	80,0
Increase of high calorific power (%)	13,4	16,4	32,0

Concerning the amounts of volatiles, ashes and fixed carbon, the study found:

	<i>Volatiles (%)</i>	<i>Ashes (%)</i>	<i>Fixed Carbon (%)</i>
Peat	47,5	7,4	45,1
Sugar cane bagasse	72,7	3,2	24,1
Grass	58,6	4,9	36,5

Elemental analysis

	<i>Carbon (%)</i>	<i>Hydrogen (%)</i>	<i>Nitrogen (%)</i>
Peat	61,4	4,8	1,0
Sugar cane bagasse	56,1	5,5	0,1
Grass	60,0	5,3	1,0

High calorific power

	<i>High calorific power</i> <i>(kcal/Kg)</i>
Peat	6,266
Sugar cane bagasse	5,086
Grass	6.208

The results of this study show that during the hydrothermal process a high quantity of volatile material is retained in the newly formed coal due to working with low temperature and high pressures. This gives a product of high calorific power (about 6.000 kcal/Kg), of high reactivity and mass.

The resulting product does not need much grinding to be used by burners.

The process partially removes the ashes and the final ash content of the coal is much lower than the one produced by dry coalification.

Dewatering is very easily done by mechanical means, filter pressing for instance, and does not require high amounts of energy.

AGRADECIMENTOS

A realização das diferentes etapas deste trabalho tornou-se possível graças a colaboração de várias pessoas e Instituições. O autor deseja consignar os seus sinceros agradecimentos:

Ao Professor Doutor José Vicente Valarelli, pela orientação, colaboração, dedicação e incentivo permanente.

À Comissão de Pós Graduação do Instituto de Geociências da U.S.P. pelo acolhimento do tema deste trabalho.

Ao Professor Doutor Raphael Hipolito e sua equipe, pelas discussões, apoio, comentários e sugestões.

À CAPES pela concessão de Bolsa de Doutorado.

Ao I.P.T. - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. - que possibilitou a realização de inúmeros ensaios e análises e levantamento de dados. Meus agradecimentos a Diretoria, colegas e pesquisadores desse Instituto pelo apoio, colaboração e incentivo recebido.

A ACESITA - Cia de Aços Especiais Itabira - por permitir a divulgação de resultados de ensaios e análises de estudo de carbonização de bagaço de cana.

A SCTDE - Secretaria da Ciência, Tecnologia e Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo, por permitir a utilização de dados de projeto de carbonização de capim.

Ao Dr. Oscar de Nucci, pelas discussões e comentários e apoio na realização de inúmeros ensaios.

Ao Eng. Hiran Rodrigues de Souza pela imensa colaboração e apoio.

Ao Professor Doutor Tarcísio Damy de S. Santos pelas discussões, comentários e orientações.

Ao Eng. Antônio Martins pela imensa colaboração.

Aos Professores do Curso de Pós-Graduação do Instituto de Geociências pelos conhecimentos transmitidos em suas aulas ou fora delas.

A equipe de P&D da Fundação Salim Farah Maluf, na pessoa do Prof. Riuiti Yoshida, pelo apoio e incentivo recebidos.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente me apoiaram durante a execução deste trabalho.

A minha esposa Sônia e minhas filhas Fernanda, Silvia e Flávia que com muita paciência sempre me incentivaram a levar esta tese até seu final. A elas dedico a mesma.

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Generalidades

O desenvolvimento de fontes alternativas de energia tem sido objeto de muita atenção nas últimas décadas, principalmente nos países em desenvolvimento.

Essa busca de fontes alternativas de energia foi intensificada a partir da primeira crise do petróleo em 1973, decorrente da elevação rápida dos preços básicos desse produto. A justificativa apresentada na época pelos produtores foi de uma ameaça ao esgotamento das reservas em médio prazo em razão do consumo mundial exagerado.

A consequência principal dessa crise de 1973 e que se repetiu em 1978 foi de tornar altamente vulnerável, a economia de diversos países importadores de petróleo e entre eles o Brasil.

Procurando atenuar os efeitos de uma alta dependência do petróleo importado, buscou-se no país, o desenvolvimento de programas de aproveitamento de fontes energéticas não tradicionais, como a turfa, o xisto e as biomassas, tendo então surgido o Programa Nacional do Alcool, com a finalidade de produzir etanol para fins carburante, a partir da sacarose extraída da cana de açúcar.

Os reflexos da crise do petróleo apresentam-se bastante atenuados no presente, em virtude de um reequilíbrio das economias mundiais em níveis condizentes com o preço do petróleo. Permanece entretanto o interesse de desenvolvimento de fontes alternativas de energia, no sentido de se buscar aquelas mais económicas do que as oferecidas pelos energéticos convencionais, especialmente os combustíveis fósseis, e também fontes de energia renovável e que se apresentem mais benignas ao meio ambiente do que as fontes tradicionais.

Essas fontes alternativas de energia poderiam também serem atrativas para áreas que por várias razões não estejam interligadas com a rede de energia convencional, ou ainda quando essas fontes se mostrarem adequadas ao uso em segmentos industriais específicos.

Uma outra conotação que poderia ser associada a fontes alternativas de energia, é que o seu gerenciamento poderia ser efetuado pelo setor privado, podendo assim, as empresas assumirem o controle de parte de seus insumos energéticos.

Dentro do campo de produção de energia alternativa em larga escala, em particular de fontes renováveis de energia a partir de biomassas, apresenta-se a proposição de produção

de carvão a partir de biomassas de alta produtividade e alta umidade com possibilidade de aproveitamento dos valores nutricionais (proteínas) presentes nessas biomassas.

A possibilidade de recuperar proteínas das biomassas é particularmente importante pois poderia contornar as críticas, sempre colocadas, ao Proalcool de utilização de grandes áreas agrícolas na produção de combustíveis e energéticos em detrimento da produção de alimentos.

Este estudo propõe um processo hidrotermal para converter biomassas de alta produtividade e alta umidade em carvão . Inclui-se também a turfa e bagaço de cana, que são materiais de alta umidade , abundantes, e sem uma prática de utilização consolidada.

O tema proposto procura atender dois aspectos fundamentais da nossa realidade: a disponibilidade de energia para alavancar o desenvolvimento e a problemática da desnutrição e fome.

1.2 - Objetivos

O presente estudo de tratamento hidrotermal de biomassas de alta umidade e alta produtividade, visa levantar, em laboratório, os dados básicos desse processo, quando aplicado a turfa, bagaço de capim e bagaço de cana de açúcar. O objetivo "strictu sensu" contempla a realização de um estudo fundamental em escala de laboratório do processo hidrotermal aplicado a amostras desses materiais.

Procurou-se obter neste estudo os parâmetros de qualidade dos produtos, ligados às condições de processamento. Os principais indicadores da qualidade do produto são: poder calorífico, análise elementar, análise imediata e composição mineral das cinzas. Os principais parâmetros de processo são: temperatura e pressão e tempo de tratamento .

São avaliadas também as operações de desagumamento do carvão produzido, determinando-se o teor de umidade do carvão, produzido pelo desagumamento em filtro a vácuo e filtro prensa.

1.3 - Justificativas

A vocação nacional de buscar alternativas energéticas na biomassa decorre da própria situação histórica de seu uso intensivo e de um programa bem sucedido: o Programa Nacional do Alcool-Proalcool. Decorre ainda das condições climáticas propícias ao crescimento das espécies vegetais. Essa vocação tem motivado pesquisadores e pessoas ligadas a área de energia, à uma busca e análise de soluções aplicáveis a utilização da biomassa como fonte alternativa de energia.

Como consequência de uma dessas análises realizada no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT - dentro do Programa de Siderurgia, em 1992, detectou-se a possibilidade de uso de algumas espécies vegetais que apresentavam alta produtividade agrícola, como matéria prima para a produção de carvão vegetal. Entre essas espécies, apresentam-se como promissoras, algumas variedades de gramíneas forrageiras, como o capim *Pennisetum Purpureum Schum* (capim elefante) e o *Panicum Maximum Jacq.* (capim colonião), que podem apresentar uma produtividade em biomassa seca superior a 60 t/ha.ano, bem superior a produtividade do eucalipto, que é a espécie vegetal mais utilizada em florestas plantadas, com média ao redor de 7 t/ha.ano.

Essas biomassas de alta produtividade possuem normalmente alta umidade e sua utilização está condicionada, principalmente, à eliminação dessa umidade de forma a não comprometer o balanço energético do processo de sua preparação. Possuem também um teor significativo de proteínas, podendo atingir cerca de 12% do peso da biomassa seca. A recuperação dessa proteína como um alimento de baixo custo é uma possibilidade muito interessante, em razão da mesma ser subproduto do material energético que poderá ser produzido em larga escala.

Propõe-se um processo de tratamento de biomassas de alta umidade e sua avaliação, através de ensaios em escala de laboratório, utilizando-se uma espécie de gramínea, o bagaço de cana de açúcar e uma amostra de turfa. Inclui-se os dois últimos materiais no presente estudo em razão de suas características de alta umidade, de serem abundantes em muitas regiões e de carecerem de processo plenamente definido para o seu aproveitamento.

1.4 - Situação das tecnologias de energia renovável

Em estudo recente sobre energia renovável, realizado pela Agência Internacional de Energia, conclui-se que embora em progresso constante, as aplicações das fontes de energia renovável são ainda bastante limitadas e que serão necessárias várias décadas de desenvolvimento tecnológico, com substancial apoio financeiro, para que elas tenham um impacto maior sobre o balanço energético total

As formas de energia descentralizadas mais comuns incluem a energia elétrica em pequena escala, sistema eólicos, sistemas solares diretos, sistemas solares fotovoltaicos e biomassas.

A situação das energias renováveis pode ser sintetizada no seguinte quadro:

Situação das tecnologias de energia renovável

Econômicas (1) (em certas localidades)

Aquecedores de água solar (substituindo eletricidade)
Calefação solar industrial, com coletores planos ou parabólicos
Projeto de calefação solar passiva, para residências
Secador solar de cereais
Sistemas fotovoltaicos ("PV") pequenos e medianos
Digestão anaeróbica (de algumas matérias primas)
Tecnologia geotérmica convencional
Sistema de marés

Comerciais com incentivos (2)

Aquecedores solares de água e ambiente (substituindo gás ou petróleo)
Geração de eletricidade com coletores parabólicos
Calefação e iluminação não residencial, de dia
Combustíveis líquidos de biomassas (etanol)

Em desenvolvimento (3)

Refrigeração solar de ambiente.
Sistemas solares de energia térmica diferentes de coletores parabólicos
Sistemas de energia fotovoltaica ("PV")
Sistemas eólicos em grande escala
Gaseificação de biomassas
Energia geotérmica, a base de rocha quente
Ativadores principais por fluxo geotérmico total
Sistemas de energia por ondas do mar

Tecnologias futuras (4)

Conversão fotoquímica e termoquímica
Pirólise rápida ou liquefação direta de biomassas.
Sistemas bioquímicos de conversão de biomassas
Sistemas de conversão de energia térmica oceânica.
Magma geotérmico

(1) Econômicas em algumas regiões: tecnologia bem desenvolvida e possível economicamente ao menos em algumas localidades e aplicações; maior penetração no mercado exigirá refinamento tecnológico; produção em massa e/ou economia de escala.

(2) Comerciais com incentivos: disponíveis em alguns mercados, porém competitivos somente com tratamento preferencial; necessitam de desenvolvimento para serem competitivas economicamente.

(3) Em desenvolvimento: para serem competitivas necessitam de mais pesquisas e desenvolvimento com o fim de melhorar a eficiência, confiabilidade ou custo.

(4) Futuras: não provadas tecnicamente, ainda que cientificamente possíveis.

Fonte: Agência Internacional de Energia (1987)

Dentro do quadro geral de energia renovável, o presente trabalho pode ser enquadrado como Tecnologias futuras, ao lado da pirólise rápida ou liquefação direta de biomassas.

1.5 - A matriz energética nacional

A situação brasileira é particularmente interessante frente ao quadro da situação das energias renováveis, em função das suas próprias particularidades. Sua condição climática, experiência bem sucedida na produção em larga escala de combustível líquido a partir de biomassa, o etanol, e de vocação histórica na utilização de biomassa, se traduzem no balanço energético global, no qual a biomassa apresenta um papel destacado, como pode ser visualizado nas tabelas 1 e 2 sobre a produção de energia primária.

O exame do balanço energético nacional, mostra que a lenha é responsável por cerca de 21% da produção de energia primária e os produtos da cana de açúcar por outros 12%. Verifica-se também que a produção de lenha tem se mantido constante em quantidade durante as duas últimas décadas, apesar da maior oferta de petróleo e energia elétrica.

O primeiro produto derivado da lenha é o carvão vegetal, cujo uso é consagrado na siderurgia a carvão vegetal e no setor de ferro ligas.

Os dados de 1989 mostram um consumo total de lenha de 105 milhões de toneladas, do qual cerca da metade foi destinada a produção de 12 milhões de toneladas de carvão vegetal. Esse carvão foi utilizado na produção de 35% do ferro gusa e 98% dos ferro ligas produzidos no país.

A expressividade desses números colocam o Brasil como o maior produtor de carvão vegetal do mundo e conseqüentemente, com uma série de problemas para o meio ambiente e uma incerteza quanto ao abastecimento futuro, o que constitui ameaça a médio prazo para as indústrias consumidoras.

Na simples catalogação dos problemas ligados ao carvão vegetal, o de maior destaque seja talvez, o de fornecimento da lenha para a sua produção.

Dados divulgados pela Acesita (1993) apontam que cerca de 72% do carvão produzido é oriundo de matas nativas e somente 28% de reflorestamento. A expansão das fronteiras agrícolas e o desenvolvimento da agro-pecuária tem distanciado as fontes de produção das fontes de consumo, chegando esse distanciamento a superar 1.000 Km. O custo de transporte em consequência onera o preço do carvão.

A situação atual não tem entretanto só o aspecto económico, pois a não reposição da mata aponta para um quadro de escassez futura, face aos significativos e irreversíveis prejuízos trazidos ao meio ambiente pela destruição rápida das matas naturais. Por outro lado nossa caminhada no sentido de maior desenvolvimento implicará numa demanda crescente

de energia uma vez que, nossa oferta de energia atual de cerca de 50 GJ/hab. está muito defasada se comparada aos países desenvolvidos, como por exemplo o Canadá, Estados Unidos, ou mesmo a Austrália, que apresentam ofertas superiores a 200 GJ/hab. Esse desenvolvimento causará uma pressão de consumo sobre todas as fontes energéticas, incluindo as biomassas, agravando para essas, o quadro de escassez futura.

O caminho do reflorestamento e o tratamento racional das biomassas, com aproveitamento dos subprodutos, poderá mudar essa situação futura para uma condição de abastecimento sustentado.

Os desenvolvimentos que ocorrem no setor siderúrgico, em particular a injeção de finos de carvão pelas ventaneiras e os processos denominados de fusão-redução, poderão abrir novo mercado para os carvões não coqueificáveis, incluindo o carvão vegetal. O processo de injeção de finos, já utilizado por muitas usinas siderúrgicas, consiste da injeção pelas ventaneiras do alto forno de carvão fino, numa quantidade média de 100 Kg por tonelada de gusa produzida. Essa injeção, substitui proporcionalmente as necessidades de carvão ou coque graúdo carregado pelo topo do forno. Desse modo, a tendência é de aumento das necessidades de carvão fino e de diminuição das necessidades de carvão graúdo. Finos de carvão vegetal tem se mostrado adequados para essa aplicação.

Os processos em desenvolvimento de fusão-redução objetivam substituir o coque por carvão como fonte de carbono. De um modo geral, nesses processos, o carvão é injetado num banho líquido de ferro-carbono, coberto por uma escória que contem óxido de ferro. Num primeiro estágio ocorre a eliminação dos voláteis do carvão e em seguida a dissolução do carbono no banho metálico. Esse carbono dissolvido no banho será responsável pela redução do óxido de ferro contido na escória. É possível que se possa utilizar nesses processos, os mais variados tipos de carvões em granulometria fina, inclusive finos de carvão vegetal, o que pode abrir um novo mercado para o mesmo.

Tabela 1 - Produção de energia primária (em 1.000 toneladas equivalentes de petróleo)

<i>Fontes</i>	<i>1980</i>	<i>1981</i>	<i>1982</i>	<i>1983</i>	<i>1984</i>	<i>1985</i>	<i>1986</i>	<i>1987</i>	<i>1988</i>	<i>1989</i>
Energia primária não renovável	13530	15529	21464	25569	32487	36930	37611	37823	36790	38193
Petróleo	9083	10675	12984	16595	23216	27493	28784	26463	27853	29845
Gás natural	2011	2257	2763	3660	4471	4986	5186	5272	5541	5555
Carvão vapor	1463	1684	2153	2308	2605	2572	2443	2333	2442	2130
Carvão metalúrgico	973	713	718	737	821	887	838	625	775	663
Urânio (U 308)	0	0	2846	2269	1374	992	360	1130	179	0
Energia primária renovável	78064	78762	83047	89876	98708	103954	103217	107918	109805	114235
Energia hidráulica	37383	37922	40928	43928	48312	51729	52902	53824	57737	62129
Lenha	30607	29809	29127	29727	32677	32138	31772	32120	31771	32278
Produtos da cana de açúcar	9081	9955	11844	15056	16342	18589	16796	20220	18512	17949
Outras fontes	993	1076	1148	1165	1377	1498	1747	1754	1785	1879
TOTAL	91594	94291	104511	115445	131195	140884	140828	145711	146595	152428

FONTE : MINFRA (1990)

Tabela 2 - Produção de energia primária (%)

Fontes	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989
Energia primária não renovável	14,8	16,5	20,5	22,1	24,8	26,2	26,7	26,0	25,1	25,1
Petróleo	9,9	11,3	12,4	14,4	17,7	19,5	20,4	19,5	19,0	19,6
Gás natural	2,2	2,4	2,6	3,2	3,4	3,5	3,7	3,6	3,8	3,6
Carvão vapor	1,6	2,0	2,1	2,0	2,0	1,8	1,7	1,6	1,7	1,4
Carvão metalúrgico	1,1	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6	0,4	0,5	0,4
Urânio (U 308)	0,0	0,0	2,7	2,0	1,0	0,7	0,3	0,8	0,1	0,0
Energia primária renovável	85,2	83,5	79,5	77,9	75,2	73,8	73,3	74,0	74,9	74,9
Energia hidráulica	40,8	40,2	39,2	38,1	36,8	36,7	37,6	36,9	39,4	40,6
Lenha	33,4	31,6	27,9	25,7	24,9	22,8	22,6	22,0	21,7	21,2
Produtos da cana de açúcar	9,9	10,6	11,3	13,0	12,5	13,2	11,9	13,9	12,6	11,8
Outras fontes	1,1	1,1	1,1	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2
TOTAL	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: MINFRA (1990)

1.6 - Biomassa de alta produtividade e alta umidade

O principal objetivo da presente Tese é verificar a possibilidade de se converter biomassas de alta umidade, com inclusão da turfa, em carvão, por meio de um processo hidrotermal.

Biomassa de alta umidade tem sido definida de modo a incluir espécies vegetais terrestres e aquáticas, bem como materiais derivados da biomassa, como bagaço de cana de açúcar, resíduos da indústria de alimentos e turfa. Algumas dessas biomassas são muito atrativas como fonte potencial de energia, pois podem exibir altas velocidades de crescimento e facilidades de plantio e colheita, ou ainda devido à alguma característica benéfica, como por exemplo as gramíneas forrageiras que tem alto teor de proteínas recuperáveis e o aguapé que pode absorver metais pesados da água.

Para a maioria das biomassas de alta umidade, o principal incentivo à sua utilização é alta produtividade em termos de matéria seca por hectare por ano. Deve-se ressaltar que nem toda biomassa de alta umidade exibe alta produtividade, mas normalmente a toda biomassa de alta produtividade está associada alta umidade durante seu estágio de crescimento. Esse alto teor de água é biologicamente importante, pois a água é o meio de transporte para os nutrientes da planta. Desse modo, geralmente plantas que crescem rapidamente necessitam de um eficiente sistema de transporte para que os nutrientes do solo estejam disponíveis para novos crescimentos. Essa condição exige alto teor de água na planta.

Embora muito abundantes, muitas biomassas de alta umidade não são extensamente utilizadas. Uma das razões dessa pouca utilização está associada com a dificuldade de se converte-las em uma forma utilizável de energia. Embora muitas dessas biomassas possam ser convertidas com sucesso em metano em digestores anaeróbicos ou para etanol via hidrólise/fermentação, os ganhos totais de energia desses processos biológicos são baixos se comparados à gaseificação termo-química ou a combustão.

As baixas conversões dos processos biológicos são devidos principalmente a presença de lignina e outros componentes inertes da biomassa. Por exemplo os rendimentos energéticos na produção de etanol por hidrólise/fermentação em gramíneas forrageiras tropicais situam-se ao redor de 25% em média (Usberti *et al.*, 1988).

A gaseificação convencional em altas temperatura é influenciada pelos altos teores de umidade. Normalmente essa umidade é limitada a menos de 50% e em alguns casos de 15 a 30%. A alta umidade reduz a eficiência de conversão, em função principalmente da alta

parcela de energia que é destinada ao calor latente de vaporização; adicionalmente, reduz a temperatura de gaseificação, diminuindo a eficiência de conversão e a velocidade de reação e produzem um gás de baixa qualidade.

Além da umidade, altos teores de cinza podem dificultar a gaseificação de biomassas pois, essas podem escorificar em altas temperaturas, ocasionando problemas em sua remoção dos reatores que trabalham acima sua da temperatura de amolecimento ou fusão.

A combustão direta ou a carbonização de biomassas de alta umidade também são afetadas de maneira similar.

A secagem natural de algumas biomassas de alta umidade é possível em condições climáticas favoráveis, porém as condições de manuseio e a alta susceptibilidade de muitas espécies herbáceas apresentarem rápida deterioração impedem o uso generalizado desse método.

Apesar de todos os problemas associados a biomassa de alta umidade, a alta produtividade agrícola apresentada por algumas espécies as tornam atraentes para uso em sistemas capazes de recuperar eficientemente a energia armazenada. O sistema aqui apresentado, de carbonização em processo hidrotermal, apresenta-se potencialmente promissor para atender a essa necessidade.

1.7 - Processo de tratamento de biomassas de alta umidade

Os dados apresentados nos capítulos anteriores podem ser sumariados, mostrando o seguinte panorama:

- O desenvolvimento é alavancado por disponibilidade de energia, existindo uma correlação entre o Produto Interno Bruto (PIB) e a demanda energética total.
- A oferta de energia no país está em equilíbrio com nosso estágio atual de desenvolvimento e num patamar baixo dentro do quadro mundial, similar a outros países do terceiro mundo ou em desenvolvimento. O desenvolvimento do país será acompanhada por um aumento paralelo da demanda energética.
- Há uma vocação nacional de se buscar alternativas energéticas na biomassa. O consumo de lenha tem permanecido constante nos últimos decênios, causando uma pressão crescente sobre o meio ambiente em função de suas características predominantemente extrativistas.

- As condições climáticas e de solo no país favorecem o desenvolvimento rápido de espécies vegetais e um programa bem sucedido de energia alternativa a partir de biomassa (Proalcool) acentuam a vocação de se buscar alternativas energéticas na biomassa.
- O carvão vegetal, primeiro produto derivado da lenha, consolidou seu uso em aplicações siderúrgicas e metalúrgicas, criando uma demanda de tal ordem que coloca o país como o maior produtor mundial.
- O desenvolvimento de novas técnicas siderúrgica, como a injeção de finos de carvão pelas ventaneiras e os novos processos de Fusão Redução, poderão a vir eleger o carvão vegetal como tecno e ecologicamente adequado, aumentando a pressão de demanda sobre o mesmo.
- É sempre presente o questionamento do uso de terras agriculturáveis para produção de energéticos e combustíveis no lugar de alimentos.

O quadro acima enseja a proposição de Processo de geração de energia alternativa a partir de biomassa de alta umidade, que procure harmonizar as questões ecológicas e produção concomitante de energia e alimentos. Um programa desta natureza deve basear se em biomassa plantada, atenuando os efeitos extrativistas que precionam as matas naturais .

Propõe-se Processo para aproveitamento de biomassas de alta produtividade e alta umidade para produção de combustível energético e de alimentos. Este objetiva tratar certas gramíneas forrageiras extraíndo-se inicialmente as proteínas contidas e transformando o resíduo dessa extração em carvão por processo hidrotermal. Como biomassa de alta produtividade selecionou se certos tipos de gramíneas forrageiras que paralelamente apresentam altos teores de proteínas.

O Processo proposto encontra-se ilustrado no fluxograma seguinte (Figura 1). Este compreende uma etapa inicial de extração da seiva da biomassa por meio de esmagamento e prensagem. Nessa operação é adicionado pequeno percentual de água, num procedimento similar ao efetuado para esmagamento da cana de açúcar.

O resultado dessa etapa é um líquido rico em proteínas e bagaço. O líquido segue para a etapa de precipitação de proteínas e o bagaço para a segunda etapa do Processo.

A segunda etapa do Processo envolve o tratamento do bagaço por meio de carbonização hidrotermal. O bagaço é misturado com água e líquido de retorno para constituir uma polpa e assim tratado durante todo o Processo. Essa polpa é bombeada para a autoclave de carbonização onde é mantida durante certo tempo sob pressão e alta temperatura. Nessas condições ocorre a carbonização.

Figura 1 - Fluxograma do processo de carbonização hidrotermal de capim

A polpa carbonizada é desaguada mecanicamente resultando num licor e num produto sólido. Esse licor contém vários produtos formados durante a pirólise e sais lixiviados dos constituintes minerais contidos na biomassa. A parte sólida, constituída da biomassa carbonizada, pode ser classificado como um carvão vegetal de alto teor de voláteis.

O licor deve ser tratado para recuperação dos produtos contidos, principalmente ácidos acético e fórmico e sais solubilizados da biomassa, como sais de potássio e compostos de fósforo. Esse líquido deve necessariamente ser tratado pois seu descarte direto tem um efeito poluidor muito grande ao meio ambiente.

Uma outra alternativa possível para tratamento do licor de carbonização hidrotermal, consiste na aplicação do Processo de gaseificação catalítica a baixa temperatura. Nesse Processo o licor é autoclavado em temperaturas variando de 300 °C a 500 °C em presença de catalisadores .A parte orgânica do licor se transforma em CO₂ e CH₄. Os gases podem ser utilizados como combustível no Processo, ficando no líquido somente a parte mineral.

A parte líquida obtida na prensagem inicial (esmagamento e prensagem) é submetida a precipitação das proteínas. Após a separação das destas, ficam em solução sais dissolvidos da biomassa, como sais de potássio e sódio e fosfatos. Esses compostos podem ser recuperados, ou todo o líquido usado para irrigação, devolvendo ao solo os nutrientes contidos.

Do Processo exposto, é objeto do presente trabalho a verificação experimental em laboratório, da etapa de carbonização hidrotermal, ficando as demais etapas com indicações de literatura e trabalhos de outros pesquisadores. Inclui-se também a verificação do comportamento da turfa e do bagaço de cana, quando submetidos ao processo hidrotermal.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE PROCESSO DE CARBONIZAÇÃO HIDROTHERMAL

O processo de carbonização hidrotermal foi apresentado pela primeira vez por C.B. Vignoles em 1850, que solicitou uma patente para o mesmo, aplicado à turfa (Mensingher, 1980). O principal objetivo deste processo é de facilitar a eliminação do alto teor de água da turfa de um modo econômico.

A problemática do desaguamento da turfa é abordado por Hakulin (1979), Kopstein (1979) e Tsaros (1980), que mostraram ter a turfa alta afinidade por água, manifestada pela dificuldade em sua remoção por meios mecânicos, como filtragem a vácuo ou sob pressão. A secagem térmica pode ser empregada para remover apenas pequena fração da umidade total contida, em razão do alto consumo energético que afeta adversamente a eficiência térmica e em consequência a economia do processo.

Segundo os autores acima, o teor de água da turfa natural apresenta-se ao nível de 85 a 95%. O limite econômico para qualquer aplicação da turfa situa-se ao redor de 50% de umidade. É necessário o desenvolvimento de uma tecnologia para reduzir o teor de água de 90% para 50%. Essa tecnologia deve ser ambientalmente aceitável e economicamente possível. Deve-se enfatizar que o desaguamento da turfa é o maior obstáculo técnico a sua utilização como fonte de energia em aplicações como gaseificação, liquefação, combustão direta, briquetagem ou pelletização.

Procedimentos comerciais de desaguamento da turfa foram desenvolvidos e são empregados correntemente. Na Europa (Irlanda, Suécia, Finlândia, Alemanha e Rússia) o mecanismo de secagem é a convecção forçada e radiação solar. Esse último exige áreas extensas para secagem de grandes volumes, necessários por exemplo na gaseificação. Esse procedimento é muito dependente do clima e exige trabalho pesado de segurança contra incêndio e de manuseio da turfa durante a secagem.

Além dos métodos de secagem no campo, existem muitas pesquisas e atividades de desenvolvimento nos Estados Unidos, Finlândia e Suécia, a respeito dos aspectos fundamentais da atração turfa-água e também de processos tecnológicos. Kopstein (1979) comenta os processo e as pesquisas relativas a eliminação de água da turfa e classifica os trabalhos de desenvolvimento nos seguintes campos:

- Carbonização a úmido: processo de pré-tratamento para remover CO_2 e água ligados quimicamente.
- Extração por solvente: a água é retirada da turfa pelo uso de solventes orgânicos à temperaturas e pressões elevadas.

- Biogaseificação: procedimento de gaseificação, que elimina a necessidade de desaguamento.
- Pré tratamento mecânico: procedimento para remover matéria coloidal.

Para Kopstein (1979), a resistência que a turfa apresenta à eliminação de água depende dos seguintes fatores:

- Teor de colóides: colóides no interior da turfa, ou a turfa em si mesma não permitem que a água seja liberada.
- Ligações de hidrogênio: se a polpa da turfa é aquecida poderá haver suficiente energia para superar as ligações de hidrogênio.
- Água quimicamente ligada.
- Alto grau de decomposição: a remoção da água é mais difícil quando existe grande quantidade de turfa decomposta.

Os processos de desaguamento são tratados também por Hakulin (1979), Meninger (1980), Knowlton (1980), Lindstron (1980), Ruckstuhl (1980), e Harrissom (1980).

Como neste trabalho, a atenção está voltada especificamente para a carbonização hidrotermal (carbonização a úmido) aplicada à turfa e biomassas de alta umidade, no sentido de obter-se um carvão que possa ser separado da água (desaguamento) com baixo dispêndio de energia, aborda-se em maior detalhe o processo de carbonização a úmido.

Conceitualmente a carbonização a úmido é um procedimento onde a turfa é lavrada, misturada com água formando uma polpa. Essa polpa é aquecida em reator entre 150 °C e 500 °C e pressões de 2 a 13 MPa (20 a 130 atm) com tempos de residência de até uma hora. Durante esse processo ocorrem reações de descarboxilação e desidratação rompendo a estrutura coloidal da turfa. Esse tratamento não só permite a remoção da água da turfa mecanicamente ao redor de 50% de umidade como também eleva o seu poder calorífico. O poder calorífico da turfa seca, na faixa de 20 a 22 MJ/kg (4700 a 5300 kcal/kg) pode ser aumentada para cerca de 23 a 32 MJ/kg (5500 a 7700 kcal/kg) dependendo das condições operacionais usadas. A turfa assim beneficiada pode ser usada como combustível de baixos teores de cinza e de enxofre, se comparada a maioria dos carvões minerais e também usada como matéria prima para outros processos como gaseificação e liquefação.

Uma revisão do estado da arte da carbonização a úmido foi efetuada por Mensinger (1980), na qual os principais estudos e processos propostos são descritos. Uma listagem desses processo e suas características é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Quadro comparativo mostrando o desenvolvimento cronológico do processo de carbonização a úmido

<i>Processos</i>	<i>Umidade da matéria prima (%)</i>	<i>Tempera- tura (°C)</i>	<i>Pressão (Kg/cm²)</i>	<i>Tempo de residên- cia (min)</i>	<i>Poder calorífico da matéria prima (kcal/Kg)</i>	<i>Poder calorífico do produto (kcal/Kg)</i>	<i>Umidade após desagua- mento (%)</i>	<i>Estágio de desenvolvimento</i>
Ekenberg (1904-1927)	94	204	15-20	18	N.D.	N.D.	70	comercial
De Laval (1915-1919)	95	207	14-17	15-20	N.D.	N.D.	50	piloto
Berlin (1934-1943)	93	210	N.D.	5	N.D.	N.D.	60-65	laboratório
URSS (1938-1976)	70-74	170-190	11-12	20-30	4.400	5.080	37-40	comercial
Suecia (1951-1964)	93	218-224	24	20-30	4700-5400	5900-6300	40-50	piloto
Terres (1952)	90	280-300	62-86	60	4800-5500	6700-7800	25	laboratório
Myreen (1977)	90	200	24	30	5000	6100	50	piloto
Koppelman (1978.....)	95-98	400	100	N.D.	4800	7100-8000	10	piloto
I.G.T. (1979)	94	190-320	20-150	0-80	4800	5200-6400	27-46	laboratório

Fonte: Mensinger (1980), pg 278.

2.1 - Descrição dos processos

Os estudos e processos de carbonização a úmido podem ser subdivididos em duas fases, a primeira que se inicia com Vignoles em 1850 e se estende até a década de 60, e a segunda a partir de primeira crise do petróleo (1973).

Nesta última, o processo de carbonização a úmido começou a ser reavaliado, tendo surgido então algumas proposições novas, das quais duas estão sendo testadas em escala piloto: o processo Myreen ou PT (Peat Fuel) na Finlândia e o processo Koppelman nos Estados Unidos. Além desses, a IGT, também dos Estados Unidos, tem estudado o processo em escala de laboratório e a partir da carbonização a úmido evoluído para um processo de gaseificação catalítica.

Os principais processos de carbonização hidrotermal relativos a primeira fase são: Eckenberg, De Laval, Bokstogorki, Swedish Peat Co. e Terres. Os processos relativos a segunda fase são: Peat Fuel, Koppelman e IGT.

2.1.1 - Processo Eckenberg

No início do século XX, o engenheiro sueco M. Eckenberg trabalhando na Inglaterra, após estudos de laboratório sobre o processo de carbonização a úmido conseguiu desaguar o material tratado até um teor de 30 % de umidade. Empregando o processo desenvolvido foram construídas plantas piloto em Stausjona (Suécia), que operou de 1904 a 1906, e em Dumfries (Escócia), que funcionou até 1911. Nenhum resultado comercial foi conseguido durante essas operações (Haanel, 1925 e Swedish Peat Co, 1960 *in*: Mensinger, 1980).

Em 1917 o Ministério da Guerra Britânico construiu em Dumfries, nova usina para produzir 60.000 t/ano de briquetes de turfa carbonizada a úmido. Os briquetes, que queimavam sem fumaça eram destinados a serem usados pelos soldados nas trincheiras durante a guerra. A usina ficou pronta após a guerra e em 1919 produzia 40.000 t/ano de briquetes. Os principais problemas observados nesta instalação foram :

- A turfa só podia ser desaguada mecanicamente até 70 % de umidade .
- O licor ácido produzido durante a carbonização atacava os tubos dos trocadores de calor limitando sua vida entre 3 e 6 meses.
- O nível de incrustações era muito alto.
- O teor de cinza nos briquetes era alto.

A usina foi desativada em 1921 e desmontada em 1927.

2.1.2 - Processo De Laval

Neste processo, a turfa sob forma de polpa com 95% de umidade sofre previamente carbonização á umido, pré-aquecimento indireto. O produto final continha 50% de umidade (Swedish Peat Co., 1960 *in*: Mensinger, 1980).

Uma usina piloto foi construída na Suécia, operando de 1915 a 1919. Nenhuma estimativa de utilidades ou dados econômicos encontra-se disponível.

2.1.3 - Processo Boksitogorski

Neste processo, a turfa lavrada, contendo cerca de 67 % a 72 % de umidade, era moída em moinhos de martelos até granulometria de 4 mm e transportada para a planta em vagões. A usina tinha 5 autoclaves, cada uma com 3 metros de diâmetro e 11 metros de comprimento, com capacidade de 13 a 17 t de turfa bruta. A turfa era disposta em prateleiras no interior das vagonetas que entravam diretamente nas autoclaves. O processo se iniciava com a evacuação das autoclaves até cerca de 20 kPa (150 mm de Hg) e eram em seguida aquecidas a cerca de 170 a 190 °C com vapor super aquecido, cuja pressão variava de 1,2 a 1,3 MPa (12 a 13 atm), por cerca de 20 a 30 minutos.

Após o tratamento na autoclave, a turfa era resfriada e desaguada em filtros prensa que conseguiam reduzir a umidade para cerca de 37 a 40%. O produto apresentava poder calorífico de cerca de 12 a 20% maior que a turfa original, isto é aumentando o poder calorífico de 15,7 MJ/Kg (3760 kcal/kg) para cerca de 17,4 MJ/kg (4150 kcal/kg) em base seca.

A usina foi construída em 1938, próximo a Leningrado, atualmente São Petesburgo, na Rússia. Esta usina operou em escala comercial produzindo 50.000 t/ano de briquetes de turfa contendo cerca de 37 a 40% de umidade. Adicionalmente, a planta produzia sub-produtos químicos como álcool etílico, álcool metílico e furfural, que representavam cerca de 75% do valor dos produtos. Suas atividades foram encerradas em 1976, desconhecendo-se os motivos.

2.1.4 - Processo Swedish Peat Co.

Em 1951 a Swedish Peat Co. iniciou a construção de uma planta piloto em Lund (Suécia) com capacidade de processamento de 12.500 t/ano de turfa, que entrou em operação em 1954 e encerrou suas atividades em 1964.

A turfa recolhida por uma draga era transportada por ferrovia até a instalação, onde era misturada com água quente do processo até formar uma polpa com cerca de 93 % de umidade. Em seguida era aquecida até a temperatura de reação em três estágios: no primeiro era feita a troca indireta de calor com água quente a cerca de 100 °C proveniente das prensas de desaguamento, no segundo era efetuada por troca direta de calor com a polpa de turfa carbonizada a 220 °C num condensador evaporador de múltiplo efeito e no último estágio pela injeção direta de vapor no reator de carbonização, cuja temperatura variava de 218 a 224 °C e pressões de cerca de 2,5 MPa (25 atm) e tempo de residência de 20 a 30 minutos. Após a carbonização a turfa era desaguada em filtros prensas.

O produto final tinha 45 % de umidade e poder calorífico com cerca de 16 a 25 % maior do que a turfa original.

Em 1960 a Swedish Co e a Borsig A.G. da Alemanha elaboraram um estudo técnico-econômico para a instalação de uma unidade que produzisse 125.000 t/ano de material com 45% de umidade. As inversões e o custo operacional, respectivamente de 3,2 milhões de dólares e US\$ 5,10 /t, revelaram-se economicamente inviáveis face aos baixos preços do petróleo naquela época.

Os problemas operacionais ocorridos na instalação piloto foram:

- Baixo rendimento energético. Cerca de 1/3 da turfa original eram usados para fornecer energia ao processo.
- Problemas com materiais de construção. Os problemas de corrosão e erosão só são avaliados corretamente quando se opera a instalação de razoável porte por tempo longo.
- Problemas de incrustações. Devido ao alto teor de cálcio da turfa em questão, os problemas de incrustações foram apreciáveis.
- Tratamento de água. Em razão da grande quantidade de água envolvida no processo e conteúdo em ácidos orgânicos, aldeídos, matéria orgânica em suspensão etc., o sistema de tratamento dessa água se tornou muito oneroso.

2.1.5 - Estudo Experimental de Terres

Em 1952, E. Terres publicou o resultado de estudo em escala de laboratório de carbonização a úmido de turfa e lignito alemão. Os resultados mostraram que a turfa carbonizada a úmido entre 265 e 270 °C com tempo de residência de 1 hora, poderia ser desaguada com cerca de 25 % de umidade. O aumento do poder calorífico da turfa carbonizada situava-se entre 39% a 53% maior do que a turfa original.

A turfa bruta era misturada com água e cominuida ate atingir a condição de uma polpa bombeável. Cerca de 1.000 g de mistura eram carregadas na autoclave e aquecida a temperatura de operação. Após transcorrido o tempo de residência a mistura era resfriada e deixada decantar. O desaguamento era efetuado por decantação, filtração e centrifugação. A turfa centrifugada continha 25 % de umidade. A eficiência térmica do processo variava de 88 % a 91 % de acordo com os cálculos de Terres.

Não se tem nenhuma informação a respeito da continuidade dos trabalhos de Terres.

2.1.6 - Processo Peat Fuel (PF)

O processo PF desenvolvido por Myreen (1979) na Turku Academy (Finlândia) e vem sendo testado em uma planta piloto com capacidade de 25.000 t/ano. O processo produz um briquete denso, repelente a água, com teor de umidade de cerca de 10 % e poder calorífico 21 % superior ao da turfa original (Rohrer, 1980)

A turfa contendo 90% de umidade é extraída da turfeira por raspagem e transportada para a usina em correia transportadora ou caminhão. Na usina, a turfa é misturada com água quente de processo e transformada numa polpa, da qual as impurezas como areia, galhos e raízes são separadas. A polpa é aquecida até a temperatura de processo em quatro etapas: na primeira, o aquecimento é efetuado por água quente proveniente das prensas de desaguamento, na segunda, o aquecimento é efetuado pelo vapor das turbinas de contra pressão, na terceira, o aquecimento é efetuado pela troca direta de calor com a lama quente que sai do reator de carbonização, numa torre de condensação-evaporação de múltiplo efeito, e na última etapa, o aquecimento é efetuado pela injeção direta de vapor a alta pressão no reator, que opera a 200 °C e 2,5 MPa (25 atmosferas) de pressão, com tempo de residencia de 30 minutos.

Nas duas primeiras etapas de pré aquecimento, a polpa de turfa é aquecida num trocador de calor de feixes de tubos especialmente projetados. A troca de calor é efetuada por convecção forçada por meio da rotação do feixe de tubos no interior de uma cuba que constitui a carcaça do trocador de calor.

Na primeira etapa, a polpa é aquecida a cerca de 40 °C. pela passagem de água quente nos tubos e na segunda etapa a temperatura é elevada a 65 °C pela passagem de vapor. A temperatura é mantida nesse limite no segundo estagio para evitar problemas de incrustações.

Na terceira etapa, o pré aquecimento é efetuado numa torre de condensação-evaporação de múltiplo efeito, constituída de 10 seções idênticas. A troca de calor se dá entre a polpa alimentada e a polpa de turfa carbonizada, proveniente do reator de carbonização, sem contato entre os sólidos das duas corrente de materiais.

A polpa de turfa é desaguada a 50% de umidade num filtro prensa. O bolo de filtragem é então pulverizado e posteriormente secado para 10 % de umidade em um flash dryer. A turfa seca é então peletizada ou briquetada.

2.1.7 - Processo Koppelman

O processo Koppelman, descrito por Phillips (1979) e Mensinger (1980), está em desenvolvimento pela SRI Int. da California . É um processo de beneficiamento em dois estágios a alta temperatura e pressão, aplicável a turfa, linhito e madeira, produzindo um combustível sólido com poder calorífico cerca de 47 a 66% superior que a matéria prima original, dependendo das condições de operação. O primeiro estágio do processo é uma carbonização em via úmida e o segundo estágio essencialmente uma extrusão em pellets ou briquetes denominados K fuel, os quais tem um teor de umidade inferior a 10 %.

Neste processo, a turfa é colhida por meio de dragagem a vácuo e bombeada para a usina de benificiamento como uma polpa diluída com 95 a 98% de umidade. Na usina, a polpa é aquecida com água quente proveniente de uma unidade de oxidação úmida com ar . A polpa é então bombeada para o primeiro estagio do reator, onde as reações de carbonização úmida ocorrem. Esta é efetuada entre as temperaturas de 95 e 205 °C, dependendo do grau de decomposição da turfa. Grande parte da água contida na lama é removida nesse ponto por filtração, sendo a umidade do produto de cerca de 70 % nesse estgio. Quanto maior é a temperatura e o tempo de residência, mais fácil é o desaguamento subsequente.

A turfa assim desaguada (70 % de umidade) é transportada por um alimentador de duplo parafuso para o segundo estagio, onde é tratada com vapor de água superaquecido, gerado na unidade de oxidação a úmido, a temperatura de 400 °C e 10 MPa (100 atmosferas) de pressão por alguns minutos. A pressão determinada pela temperatura do vapor da unidade de oxidação úmida é um item importante na economia global do processo.

A unidade de oxidação a úmido consiste num processo de tratamento do licor pirolenhoso produzido na carbonização. Esse licor contém compostos orgânicos ácidos, que impossibilitam seu simples descarte. A unidade de oxidação, alem de oxidar esses compostos a água e CO₂ recupera o seu conteúdo energético.

A troca de calor no primeiro estágio é de forma indireta e no segundo estágio de forma direta.

Após o segundo estágio, a turfa é extrudada e resfriada, e o produto final, o k fuel, contém menos de 10 % de umidade, com densidade aproximada de 800 Kg/m³, sendo que o rendimento e a qualidade do K fuel dependem da matéria prima e das condições de operação. O rendimento em massa varia de 45 a 55% em relação a matéria seca original e o rendimento energético é da ordem de 70 a 85%.

Atualmente encontra-se em operação pequena planta piloto (34 Kg de produto por hora) utilizando vários tipos de turfa. Nenhuma usina comercial foi ainda anunciada.

2.1.8 - Processo IGT

O IGT (Institute of Gas Technology) de Chicago, vem, conduzindo experiências em escala de laboratório sobre o processo de carbonização em via úmida, com vistas a obtenção de matéria prima para gaseificação (Mensing, 1980).

Essas experiências foram conduzidas em autoclave de laboratório com cerca de 2 litros de capacidade, utilizando algumas turfas americanas. Efetuaram-se alguns ensaios fundamentais, variando-se a temperatura e o tempo de residência dentro dos seguintes limites: Temperatura - de 190 a 320 °C, tempo de residência de 0 a 80 minutos, pressões de 2 MPa a 15 MPa.

Nessas experiências foram avaliadas as facilidades de desaguamento e as propriedades da turfa carbonizada.

3- MÉTODOS E MATERIAIS

3.1 - Introdução

Os estudos experimentais foram realizados com amostras de três matérias primas: turfa, capim e bagaço de cana. A seleção dessas matérias primas de alto teor de umidade, foi baseada na alta produtividade agrícola, para o caso do capim, na disponibilidade para o bagaço de cana e turfa e no potencial dessas três matérias primas para uso em larga escala.

O estudo procura levantar o comportamento dessas matérias primas quando submetidas ao processo hidrotermal, correlacionando condições de processo com parâmetros de qualidade dos produtos obtidos.

3.2- Metodologia

A metodologia adotada para o presente estudo compreende os seguintes itens:

- 1 - Descrição dos procedimentos experimentais e equipamentos utilizados
- 2 - Apresentação dos procedimentos analíticos
- 3 - Descrição das matérias primas utilizadas
- 4 - Caracterização das matérias primas
- 5 - Preparação das matérias primas
- 6 - Ensaios de carbonização hidrotermal
- 7 - Desenvolvimento de alguns tópicos de projeto
- 8 - Análise dos resultados
- 9 - Conclusões

Os tópicos acima encontram-se descritos na sequência deste capítulo, excetuando o de desenvolvimento de alguns tópicos de projeto, a análise dos resultados e conclusões apresentadas em capítulos próprios.

3.3 - Procedimentos experimentais e equipamentos utilizados

Os procedimentos experimentais e equipamentos utilizados para realização dos ensaios laboratoriais, efetuados nas etapas de: caracterização das matérias primas, preparação destas, ensaios de carbonização, em polpas aquosas, em autoclave e caracterização dos produtos obtidos: caldo de capim, carvões de capim, de turfa e de bagaço de cana e soluções obtidas na operação de carbonização são descritos a seguir.

3.3.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

As matérias primas foram submetidas a um pré tratamento de modo a possibilitar sua homogeneização.

A amostra de turfa foi homogeneizada em pilhas e retiradas sub-amostras para a realização das análises e dos ensaios. As sub-amostras foram lacradas em sacos plásticos.

A amostra de capim foi toda ela cortada e picada em moinho de facas provido de peneira de furos circulares de 9,5 mm de diâmetro. O material picado foi homogeneizado em pilha de onde foram retiradas sub-amostras para as análises. As sub-amostras foram lacradas em sacos plásticos. Para os ensaios de carbonização, o capim foi submetido a uma preparação especial conforme descrito adiante.

A amostra de bagaço de cana apresentou-se contaminada com argila. Para eliminar essa contaminação, a amostra foi lavada diversas vezes com água sobre peneira fina. A amostra lavada foi homogeneizada em pilhas e retiradas sub-amostras para as análises e os ensaios. As sub-amostras foram lacradas em sacos plásticos.

Para efeito de caracterização foram feitas as seguintes análises e ensaios para as três matérias primas:

- 1- Determinação do teor de umidade
- 2 - Análise imediata
- 3 - Análise elementar
- 4 - Determinação do poder calorífico superior.

Nas cinzas foram efetuadas análises qualitativas para determinação dos elementos presentes e análise química quantitativa dos principais elementos.

3.3.2 - PREPARAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS CARBONIZAÇÃO

Das matérias primas, apenas o capim foi submetido a tratamento visando adequá-lo ao ensaio de carbonização. A turfa e o bagaço de cana por apresentarem tamanho de partículas adequadas à realização dos ensaios não necessitaram de preparação prévia.

O tratamento empregado no capim objetivou liberar e separar parte da seiva do capim, que contém proteínas e compostos inorgânicos. Justifica-se esta separação em virtude da possibilidade de recuperação das proteínas, em processo paralelo, e dos compostos inorgânicos do capim, resultando num bagaço com menor teor de cinza. O suco constitui

matéria prima para a recuperação de proteínas e o bagaço a matéria prima para a carbonização.

O tratamento consistiu de desintegração do capim em moinho de facas, seguido de prensagem em prensa de parafuso, em dois ciclos, nos quais separam-se duas frações: uma sólida (bagaço) e outra líquida (suco). À fração sólida do primeiro ciclo foi adicionada água, em massa equivalente ao seu peso bruto e com temperatura inferior a 40 °C, e em seguida novamente esmagada na prensa, obtendo-se, assim, um segundo bagaço e um segundo suco, dos quais determinou-se as respectivas massas.

Dos bagaços e dos caldos obtidos foram retiradas amostras para os ensaios de caracterização. O fluxograma das operações e o balanço de massas são apresentados na Figura 5, e a caracterização dos produtos do esmagamento é mostrado nas Tabela 10, no capítulo Resultados.

A picagem foi efetuada em moinho de facas da marca Tigre, modelo R-20 E, acionado por motor elétrico de 20 CV e 3.531 rpm, tendo dimensões de boca 30x17 cm e rotor com 32 facas.

A prensagem foi efetuada em prensa de parafuso, construída no IPT, sendo acionada por motor de 50 CV, cujo esquema construtivo encontra-se ilustrado Figura 2.

Figura 2 - Desenho esquemático de prensa de parafuso para extração de suco de capim

3.3.3 - ENSAIOS DE CARBONIZAÇÃO EM MEIO AQUOSO

Os ensaios de carbonização da turfa, do capim e do bagaço de cana, em polpa aquosa, foram realizados em autoclave Parr. Na Figura 3 é apresentado desenho esquemático da autoclave utilizada e a seguir suas principais características:

- capacidade da autoclave: 1 litro
- aquecimento externo resistivo
- sistema de agitação composto de eixo, hélice, polias, correia e motor
- velocidade de agitação variável
- indicação e controle da temperatura interna da autoclave por meio de termopar e controlados do forno
- indicação de pressão por manômetro
- válvulas de amostragem e de purga disponíveis com acionamento manual
- válvulas de segurança existentes

Figura 3 - Desenho esquemático da bomba (autoclave) Parr

Estes ensaios programados segundo a sistemática de análise fatorial, definindo-se um campo de variação delimitados pelo tempo e temperatura. Além destes, foram realizados ensaios variando-se o teor de sólidos na polpa e qualidade do meio de carbonização e algumas avaliações para estimar o nível de compatibilidade dos dados levantados, ou seja, uma determinada condição foi repetida sete vezes, sendo os dados tratados estatisticamente para determinação da variabilidade nas medições dos parâmetros de processo e características dos produtos.

Os ensaios foram executados de acordo com a sequência apresentada abaixo:

1. Carregamento da autoclave com a matéria prima e água (as amostras já pesadas, conservadas dentro de envelopes plásticos, foram colocados na autoclave e adicionada quantidade constante de água; em alguns ensaios de carbonização do capim, foi feita a recirculação da solução obtida na carbonização anterior, com a finalidade de se verificar sua influência sobre os resultados dos ensaios)
2. Fechamento da autoclave e aquecimento do sistema a razão de 4,0 °C/min e permanência na temperatura durante o tempo previamente estabelecido com o agitador desligado
3. Desligamento do forno
4. Resfriamento e abertura da autoclave
5. Desaguamento em filtro a vácuo
6. Determinação do pH do filtrado
7. Pesagem e determinação da umidade do produto sólido desaguado
8. Complementação do desaguamento, submetendo-se o material à prensagem em matriz cilíndrica de simples efeito com êmbolo de 5 cm de diâmetro, sob pressão de 3600 kPa, para a obtenção de produto sólido prensado
9. Determinação da umidade do produto sólido prensado
10. Encaminhamento de amostras de material sólido e líquido para análise

O suco constitui matéria prima para a recuperação de proteínas e o bagaço, a matéria prima para a carbonização.

As condições utilizadas nos ensaios com capim, turfa e bagaço de cana, são apresentadas, respectivamente, nas Tabelas 11, 17 e 22, e resumidas quadro seguinte:

<i>Matéria prima</i>	<i>Ensaio e análises</i>	<i>Condições</i>
Capim	Temperatura (°C)	180, 220, 260, 300
	Tempo (min)	5, 15, 45
	% de sólidos em meio aquoso	10, 15, 20
	Recirculação do meio (vezes)	até 3
Turfa e Bagaço de Cana	Temperatura (°C)	200, 250, 300
	Tempo (min)	5, 15, 45
	% de sólidos em meio aquoso	10
	Recirculação do meio (vezes)	0

Os resultados relativos ao capim encontram-se nas Tabelas 12 a 16, a turfa nas Tabelas 18 a 21 e os do bagaço de cana nas Tabelas 23 a 25.

Nas Figuras 6 a 29 encontram-se representados graficamente os dados e resultados relativos as três matérias primas em função das variáveis estudadas (tempo de residência, temperatura, umidade do produto sólido desaguado em filtro a vácuo, umidade do produto sólido prensado, aumento do poder calorífico superior, recuperação do carbono, recuperação energética, teor de cinza, teor de carbono fixo e teor de matéria volátil).

3.3.4 - CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS OBTIDOS

Os produtos obtidos nos ensaios foram: suco de capim obtido na operação de esmagamento, os carvões de turfa, de capim e de bagaço de cana, obtidos em várias condições de tempo e temperatura e as frações líquidas das carbonizações (licores pirolenhosos).

No suco de capim e nas frações líquidas das carbonizações (licor pirolenhoso) foram determinados o volume e a massa do resíduo de evaporação. Neste resíduo e nos carvões foram efetuadas análise imediata, análise elementar e análise química das cinzas e poder calorífico superior.

3.4 - Procedimentos analíticos

Foi necessário suporte analítico diversificado para caracterizar as matérias primas e os produtos das operações de carbonização. Estes são detalhados a seguir:

- **Análise Elementar** - Foi utilizado o analisador LECO CHN 600 para a análise de carbono, hidrogênio e nitrogênio. Este aparelho determina carbono, hidrogênio e nitrogênio pela detecção e medida dos produtos de combustão (CO_2 , H_2O e N_2). A combustão ocorre com oxigênio puro em condições estáticas à temperatura de 950 °C em tubo de quartzo. O Hélio é usado como gás de arraste dos produtos de combustão. O carbono e o

hidrogênio são determinados por infravermelho e o nitrogênio é determinado por condutividade térmica. Em todos os casos, o aparelho faz uma leitura em milivolts, que é usada para calcular a composição baseada em compostos de referência.

- **Análise Imediata** - Compreende a determinação de carbono fixo, matéria volátil e cinzas na amostra seca. O ensaio é realizado em mufla à temperatura de 950 °C durante 4 minutos. Uma amostra de 1 a 2 gramas do material, seco preliminarmente em estufa, é colocado em cadinho de porcelana com tampa, de modo a proteger a amostra da oxidação. Findo o tempo de exposição a 950 °C, o cadinho é colocado em dissecador e deixado esfriar e a seguir pesado. A diferença entre o peso inicial e final, tomado em porcentagem, constitui o teor de matéria volátil. O teor de cinza é determinado, calcinando-se uma amostra do material em cadinho aberto à temperatura de 700 a 800 °C. O material calcinado é esfriado em dissecador e pesado. O peso final em porcentagem constitui o teor de cinza. O teor de carbono fixo é calculado pela diferença para 100 da soma dos teores de matéria volátil e de cinza. Essa análise foi realizada de acordo com o método ABNT-NBR 8112-86.
- **Poder Calorífico Superior** - Foi determinado pela queima da amostra seca em uma bomba calorimétrica, conforme descrito no método ABNT-MB 454/68. O Poder Calorífico Superior é calculado pelo aumento de temperatura do sistema (bomba, recipiente e certa quantidade de água) causada pela combustão da amostra no interior da bomba. O sistema adiabático é mantido através de uma camisa com água em temperatura controlada.
- **Análise Qualitativa nas Cinzas** - A análise qualitativa dos elementos inorgânicos contidos nas cinzas foi realizada por fluorescência de raio-X (XRF) em equipamento Rigako, modelo IKF4. A amostra foi calcinada cuidadosamente em cápsula de porcelana e as cinzas resultantes foram homogeneizadas e compactadas, sob a forma de pastilha, numa prensa de 20 t. Usou ácido bórico PA como aglutinante. Na amostra prensada foi efetuada uma varredura geral, usando-se como fonte de excitação um tubo de cromo e novamente analisada com tubo de tungstênio para detecção de cromo e manganês.
- **Análise Quantitativa das Cinzas** - A análise quantitativa dos principais elementos presentes nas cinzas foi realizada por Absorção Atômica (AA). Utilizou-se o aparelho Shimadzu AA 670. A solubilização dos elementos contidos na amostra foi efetuada com ácido perclórico, ácido fluorídrico e ácido clorídrico. Após a solubilização, a solução foi levada a secar e retomada com ácido clorídrico e sob essa forma, na diluição apropriada, foi passada pelo equipamento de absorção atômica para a quantificação dos elementos de interesse, contidos na amostra.
- **Análise do Fósforo** - O teor de fósforo foi determinado por espectrofotometria, utilizando-se como reativos o molibdato de amônio e metavanadato de amônio. A leitura é dada em absorbância e a quantificação é efetuada por comparação com padrão de fósforo.

- **Análise do Enxofre** - O enxofre foi quantificado pela técnica de combustão direta e quantificação dos produtos de combustão por infravermelho. O equipamento utilizado foi o LECO IR 32, modelo 762-100.
- **Análise do Silício** - O silício foi determinado por gravimetria, segundo a técnica de volatilização sob a forma de tetrafluoreto.

3.5 - Matérias primas utilizadas

Os estudos experimentais foram realizados com três matérias primas: turfa, capim e bagaço de cana, descritas a seguir:

3.5.1 - TURFA

O estudo foi realizado com uma amostra proveniente da jazida da Eucatex Mineral Ltda. (antiga jazida da CESP), localizada nos municípios de Eugênio de Melo e São José dos Campos, no Vale do Paraíba, Estado de São Paulo, e referida na literatura como SJ II (IPT, 1979).

Nesta região, os jazimentos de turfa ocorrem numa ampla faixa com cerca de 12 Km de comprimento e largura média de 2 Km, que ocupa a várzea da margem direita do rio Paraíba do Sul, estendendo-se desde as proximidades de São José dos Campos, até o Ribeirão da Divisa, limite deste Município. O acesso a várzea se faz por Eugênio de Mello. Esses jazimentos englobam as turfeiras de Engenheiro Martins Guimarães e Eugênio de Mello mencionadas por Borges (1945).

Em alguns locais, como o situado atrás da fábrica da General Motors, a turfa ocorre sem nenhum capeamento, podendo se observar no terreno placas de turfa seca, com áreas superficiais variáveis. Nos demais locais, a turfa é observada nas valetas de irrigação, achando-se coberta por uma camada de solo orgânico argiloso.

A medida que se aproxima do rio Paraíba do Sul, a turfa cede lugar a sedimentos argilosos, passando a arenosos na margem do rio. Aparentemente ao longo desse, numa faixa de cerca de 500 a 1000 m de largura, não ocorre turfa. Essa faixa compreende o domínio do curso do rio, englobando seus meandros atuais e abandonados.

Durante a pesquisa geológica realizada pela CESP na turfeira SJ II/GM foi levantada para o primeiro metro de espessura, a curva de isoteores, apresentada na Figura 4. A partir desse levantamento foi delimitada uma porção da jazida com teores de cinza inferiores a 30%. Nesta determinou-se um Poder Calorífico Superior médio de 4.900 kcal/Kg (PCI base seca), correspondendo a um teor de cinza médio de 11% (base seca) (CESP, 1984).

Figura 4 - Planta de isoteores de cinzas na turfeira de Eugenio de Mello (SJ 2 /GM)

Considerando-se o teor de cinzas e o Poder Calorífico Superior indicados acima selecionou-se uma área de 50 ha com uma espessura média de 3,9 m, para implantação do projeto de exploração. Operacionalmente, esta área foi subdividida em três módulos caracterizados por:

Módulos	Área (ha)	Espessura máxima de lavra (m)
A	20	3,0
B	15	4,0
C	15	5,0

Nestes módulos, a turfa contém em média 10% de material sólido, portanto, cerca de 3.900 t de material sólido poderá ser extraído por hectare. A um teor de umidade de 40%, isto representa cerca de 6.500 t de turfa por hectare, ou uma reserva total de 808.000 m³ de turfa com 40% de umidade.

As amostras ensaiadas foram cedidas pelo IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo e integrava um lote destinado a realização de estudos de veículo para inoculação agrícola.

3.5.2 - CAPIM

Para este programa de trabalho foi escolhida a gramínea *Pannisetum purpureum* cv. *Guaçu* (IZ.29) popularmente conhecida como Capim Elefante, em razão de sua alta produtividade, que varia de 25 a 79 toneladas de matéria seca por hectare/ano dependendo das condições climáticas e das características do solo. Apresenta teor de proteína bruta entre 5,5 a 13,0%, em relação à matéria seca, função do estágio de desenvolvimento da planta.

A planta é de porte alto, com colmos grossos e grandes, bem adocicados, folhagem verde escura, distribuída em forma de leque muito enfolhado. Tem bom perfilamento com a vantagem de dificilmente florescer; quase não tem joçal. É resistente à geada e à seca, com boa rebrota e boa estacionalidade.

Devido a sua alta produção é economicamente viável a reposição anual de nutrientes.

A amostra de capim de primeiro corte, recém cortado e com peso bruto de 108 Kg foi fornecida pelo Instituto de Zootecnia de Nova Odessa. O capim foi plantado em 03/11/92 e corte em 19/04/93, tinha altura de aproximadamente 3,70 m, colmos grossos e grandes.

3.5.3 - BAGAÇO DE CANA

A amostra de bagaço de cana, pesando cerca de 500 kg, foi fornecida pela Usina Iracema, de Iracemópolis, Estado de São Paulo.

3.6 - Caracterização das matérias primas

Os resultados das análises de caracterização estão apresentados a seguir nas Tabelas de 4 a 9.

Tabela 4 - Determinação dos teores de umidade

<i>Amostra</i>	<i>Teor de umidade (%)</i>
Turfa	65,20
Capim	75,28
Bagaço de Cana	62,00

Tabela 5 - Resultados da análise imediata

<i>Amostra</i>	<i>Matéria Volátil (%)</i>	<i>Cinzas (%)</i>	<i>Carbono Fixo (%)</i>
Turfa	55,80	7,12	37,08
Capim	76,00	7,30	16,70
Bagaço de Cana	86,12	2,53	11,35

Tabela 6 - Resultado da análise elementar

<i>Amostra</i>	<i>Carbono (%)</i>	<i>Hidrogênio (%)</i>	<i>Nitrogênio (%)</i>
Turfa	55,9	5,0	0,6
Capim	43,8	5,6	0,8
Bagaço de Cana	47,4	5,4	0,3

Tabela 7- Resultados das determinações de poder calorífico superior e de enxofre

<i>Amostra</i>	<i>Enxofre (%) (1)</i>	<i>P.C.S (MJ/kg)(2)</i>	<i>P.C.S (kcal/kg)(3)</i>
Turfa	1,00	23,14	5.526
Capim	0,15	19,48	4.652
Bagaço de Cana	0,10	18,30	4.371

(1) ABNT MB 106/65 (2) P.C.S. - poder calorífico superior, ABNT MB 434/68

Tabela 8 - Análise química das cinzas

<i>Elementos</i>	<i>Turfa</i>	<i>Capim</i>	<i>Bagaço de Cana</i>
Alumínio	13,58	0,38	6,56
Cálcio	1,32	4,34	5,81
Ferro	1,73	2,38	17,61
Potássio	0,81	26,88	0,12
Magnésio	0,20	3,00	1,02
Sódio	0,28	1,29	0,19
Fósforo	nd	1,02	0,59
Enxofre	nd	1,44	0,97
Silício	nd	15,82	44,23
Manganês	0,03	0,12	0,41
Cloro	nd	5,48	0,10

Tabela 9 - Resultados da análise qualitativa das cinzas por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e por Espectrografia de Emissão.

<i>Elementos</i>	<i>Turfa</i>	<i>Capim</i>	<i>Bagaço de Cana</i>
Preponderantes	Silício	Silício Potássio Cloro	Silício
Pequenas Proporções	Alumínio Ferro Cálcio Potássio Magnésio Sódio	Fósforo Ferro Enxofre Cálcio Magnésio Manganês	Ferro Alumínio Cálcio Potássio Magnésio Manganês Titânio
Traços	Cobre Zinco Chumbo Cloro Fósforo Cromo Vanádio Estanho Níquel Zircônio	Alumínio Zinco Rubídio Titânio Bário Estrôncio Bromo Cromo Cobre Níquel	Zinco Enxofre Cobre Bário Estanho Estrôncio Chumbo Níquel Cromo

4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresenta-se neste capítulo os principais aspectos, resultados e comentários relativos aos ensaios executados.

4.1 - Caracterização das matérias primas

O teor de umidade das três matérias primas situaram-se entre 60 e 75%, o que pode ser considerado elevado, para aplicações em queima direta e gaseificação (Tabela 4).

A análise imediata revelou um teor de cinza de 7,30% para o capim, 7,12% para a turfa e 2,53% para o bagaço de cana (Tabela 5). As cinzas das matérias primas guardam um traço comum que é a predominância do Si. As cinzas do capim apresentam ainda como elementos preponderantes o K e o Cl (Tabelas 8 e 9).

Os teores de cinza na turfa e no capim são considerados altos, quando comparados a outras biomassas, como por exemplo o eucalipto (inferior a 2%, em média). Quando se submete uma biomassa à carbonização a seco, toda cinza se incorpora no carvão, e desse modo se considerarmos um rendimento em carvão de 30% sobre a biomassa seca, é de se esperar que um carvão de capim e de turfa, confeccionados por via seca, apresentem teores de cinza de 24,3% e 23,7% respectivamente.

As cinzas do carvão são prejudiciais por diminuírem o seu poder calorífico e dificultarem o processo de queima e gaseificação, nos quais as cinzas podem amolecer ou mesmo fundir aderindo às grelhas, causando obstruções e dificultando sua remoção.

Com relação a matéria volátil, a turfa apresenta teor de 55% substancialmente menor do que o bagaço de cana e do capim, decorrente seu processo de incarbonização, no qual os voláteis são liberados (Tabela 5). Assim quanto maior a incarbonização de biomassas menor o teor de voláteis. O carbono fixo apresenta relação inversa a aquela da matéria volátil.

A incarbonização também se traduz em menor teor de oxigênio, que é dado pela diferença entre 100 e a soma dos valores de Carbono, Hidrogênio e Nitrogênio (Tabela 6). A carbonização promove a diminuição dos teores de oxigênio da matéria prima e com esta, o aumento o poder calorífico. Deste modo, quanto maior o teor de oxigênio na matéria prima maior será o incremento do poder calorífico no carvão.

Essas diferenças entre as matérias primas levará a resultados diferentes no processo de carbonização hidrotermal como será mostrado adiante.

Os teores de nitrogênio podem ser correlacionados com o teor de proteínas existentes na matéria prima. O capim apresenta um teor de proteína maior do que as outras matérias primas, justificando a preparação diferenciada a que foi submetido, buscando recuperar esta proteína. O bagaço de cana apresenta baixos teores devido ao tratamento prévio empregado para extração de caldo para produção de açúcar e álcool.

O poder calorífico superior da turfa é de 23,14 MJ/Kg e superior ao do capim (19,48 MJ/kg) devido ao processo de incarbonização, já que os teores de cinza são semelhantes (Tabelas 5 e 7).

4.2 - Preparação das matérias primas

Como mencionado anteriormente apenas o capim foi submetido a preparação específica.

Este tratamento objetivou liberar e separar parte da seiva do capim, que contém proteínas e compostos inorgânicos. A importância deste tratamento, decorre da possibilidade de recuperação de proteínas contidas na seiva e da extração, junto com a seiva, de compostos inorgânicos, que viriam a se constituir componentes de cinza no carvão. Esta separação possibilita a obtenção de um bagaço com menor teor de cinzas que, por conseguinte resulta, após a carbonização, em carvão com teores de cinzas menores que os obtidos sem o tratamento.

A preparação consistiu numa desintegração do capim em moinho de facas, seguido de prensagem em prensa de parafuso, em dois ciclos, nos quais separam-se duas frações: uma sólida (bagaço) e outra líquida (suco). À fração sólida do primeiro ciclo foi adicionada água, em massa equivalente ao seu peso bruto e com temperatura inferior a 40 °C, e em seguida novamente esmagada na prensa, obtendo-se, assim, um segundo bagaço e um segundo suco.

O fluxograma das operações e o balanço de massas desta preparação são apresentados na Figura 5. A caracterização dos produtos do esmagamento (bagaços e caldos) encontra-se na Tabela 10.

Os elementos inorgânicos solubilizados na seiva, acompanham a mesma na operação de esmagamento, provocando a diminuição dos teores de cinza do bagaço. A preparação permitiu uma diminuição do teor de cinzas do capim. De um teor de 7,3% inicialmente contidos no capim, atingiu-se, no bagaço, na primeira e segunda operações de prensagem teores de 5,82% e 4,06%, respectivamente.

A maioria dos elementos analisados foi arrastada pela seiva, excetuando-se o silício e o ferro que permaneceram no bagaço (Tabela 10). Verifica-se diminuição acentuada dos teores de

Cl, K e P. O potássio, elemento de maior abundância, apresentou uma redução de 26,88% de K na cinza do capim bruto para 21,44% e 12,50% de K, respectivamente, nas cinzas do primeiro e segundo bagaços resultantes das etapas de prensagem. A quantidade de potássio contida no bagaço final representa cerca de 25,8% do contido originalmente no capim.

Uma parte apreciável dos nutrientes contidos no capim acompanham a seiva, que após a remoção das proteínas por precipitação, poderá ser aplicada na plantação pois encontra-se rica em nutrientes. Os valores obtidos indicam que aproximadamente 68% das proteínas existentes no capim se concentram no caldo dos dois esmagamentos efetuados (Tabela 10). Pode-se atingir valores ainda maiores com uma lavagem suplementar. Essa proteína fica disponível no caldo para recuperação.

A primeira operação de esmagamento fornece um bagaço, que representa cerca de 94,5% da massa original do capim, em base seca. A segunda operação de esmagamento proporciona cerca de 83,5 % de massa original do capim, em base seca.

Figura 5 - Fluxograma e balanço de massa do esmagamento de capim

Tabela 10 - Caracterização dos produtos de esmagamento do Capim Guaçu

Produto Nº(1)	Análise Imediata			Análise Elementar			S (%)
	MV (%)	CF (%)	Cz (%)	C (%)	H (%)	N (%)	
I	76,00	16,70	7,30	43,8	5,6	0,8 ± 0,1	
II(2)	63,07	14,07	22,86	37,2	4,4	2,9 ± 0,1	
III	78,52	15,66	5,82	45,7	5,8	0,4 ± 0,1	
IV(2)	63,60	15,70	20,70	38,2	4,5	1,7 ± 0,1	
V	80,84	15,10	4,06	44,60	5,8	0,3 ± 0,1	

Produto Nº(1)	Poder calorífico superior		Análise das cinzas										
	MJ/kg	kcal/Kg	Cl (%)	Mg (%)	Al (%)	Ca (%)	Fe (%)	K (%)	Na (%)	Mn (%)	P (%)	Si (%)	S (%)
I	19,48	4.652	5,48	3,00	0,38	4,34	2,38	26,88	1,29	0,12	1,02	16,16	1,44
II(2)	14,98	3.577	15,91	2,80	0,49	2,35	3,07	38,39	0,61	0,10	1,05	4,13	1,49
III	18,52	4.423	4,29	2,32	0,37	4,58	6,56	21,44	0,67	0,13	0,78	19,37	0,85
IV(2)	15,92	3.802	14,87	2,78	0,40	2,75	4,70	36,22	1,07	0,11	1,03	6,91	1,52
V	18,96	4.528	0,28	2,37	0,68	5,50	4,38	12,50	0,93	0,13	0,59	27,67	1,01
R(3)			2,84	38,38	99,52	70,48	100,00	25,80	40,10	60,25	32,17	95,23	39,01

Notas: (1) Vide identificação dos produtos na Figura 4

(2) No resíduo sólido resultante da evaporação a 110 °C; Amostra 11: resíduo sólido = 7% ; Amostra IV: resíduo sólido = 4,18%.

(3) Massa do elemento contido no bagaço V x 100 / massa do elemento contido no capim.

4.3 - Carbonização hidrotermal

Na autoclave, a cada ensaio, o material é submetido a uma determinada condição de temperatura que resulta numa pressão de equilíbrio, e permanece nesta condição de temperatura e pressão durante um período.

As condições de operação encontram-se descritas na Tabela 11 para o capim, Tabela 17 para turfa e Tabela 22 para o bagaço de cana.

Ao final do ensaio a autoclave é aberta e o seu conteúdo, carvão e licor pirolenhoso, é submetido a um processo de separação sólido-líquido por filtração a vácuo. A massa do líquido de filtração e do carvão filtrado são anotados.

O carvão filtrado é submetido a uma prensagem, separando-se uma fração líquida denominada líquido de prensagem, sendo suas massas anotadas.

Uma vez prensado, o carvão é seco, sendo determinado a umidade e sua massa, e encaminhado para caracterização (análise imediata, análise elementar, poder calorífico superior e análise química das cinzas), cujos resultados constam das Tabelas 13 e 14 para o capim, Tabelas 19 e 20 para turfa e Tabela 24 para o bagaço de cana.

O líquido de filtração e de prensagem são misturados e enviados para caracterização, cujos resultados para o capim são apresentados na Tabela 16.

A partir dos dados levantados são calculados os índices de avaliação de processo, tais como rendimento em carvão, energético, e em carbono e a aumento do poder calorífico. Esses índices são apresentados nas Tabelas 15, 21 e 25, respectivamente para o capim, a turfa e o bagaço de cana.

As tabelas citadas e os resultados são apresentados e discutidos a seguir para cada matéria prima individualmente e analisadas suas diferenças.

4.3.1 - CAPIM

Verificou-se que a separação sólido líquido é favorecida pelo aumento de temperatura e pouco influenciada pelo tempo, independentemente se esta for efetuada a vácuo ou por prensagem (Figuras 6 e 7). Comparativamente, a prensagem mostrou-se mais eficiente que o vácuo. Na prensagem atingiu-se valores de 22% de umidade no carvão produzido na temperatura de 300 °C com 15 minutos de carbonização, enquanto o melhor resultado a vácuo, de 36% de umidade, foi obtido nas mesmas condições de tempo e temperatura.

Tabela 11 - Programação dos ensaios de carbonização hidrotermal de capim

Ensaio nº	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Massa de bagaço de capim com umidade de 54,94% (g)	Água adicionada (mL)	Teor de sólidos (%)
1	180	5	155	543,4	10
2	180	15	155	543,4	10
3	180	45	155	543,4	10
4	220	5	155	543,4	10
5	220	15	155	543,4	10
6	220	45	155	543,4	10
7	260	5	155	543,4	10
8	260	15	155	543,4	10
9	260	45	155	543,4	10
10	300	5	155	543,4	10
11	300	15	155	543,4	10
12	300	45	155	543,4	10
13	300	45	155	312,89	15
14	300	45	155	196,5	20
15	260	15	155	543,4	10
16	260	15	155	543,4	10
17	260	15	155	543,4	10
18	260	15	155	543,4	10
19	260	15	155	543,4	10
20	260	15	155	543,4	10
21	260	15	155	Recircular*	10
22	260	15	155	Recircular*	10
23	260	15	155	Recircular*	10
24	260	15	155	Recircular*	10

* Recircular o líquido do experimento anterior até 543,4 ml, se insuficiente complementar com água nova.

Tabela 12 - Dados obtidos nos ensaios de carbonização hidrotermal de capim

Ensaio nº	Pressão (MPa)	Massa de líquido de filtração (g)	Massa de carvão filtrado (g)	Umidade de carvão filtrado (%)	Massa de líquido de prensagem (g)	Massa de carvão prensado (g)	Umidade do carvão prensado (%)	Massa total de líquido (g)	Massa de carvão seco (g)
1	1,70	387,6	273,03	78,85	145,83	127,20	54,60	533,4	57,75
2	1,55	427,7	231,24	75,63	120,08	111,16	49,31	547,8	56,35
3	1,55	494,9	170,1	73,74	59,00	105,30	57,58	553,9	44,67
4	2,97	523,3	134,5	62,51	42,02	87,39	42,29	565,3	50,43
5	2,83	522,3	148,5	69,80	47,31	96,67	53,62	575,9	44,84
6	2,76	533,1	129,5	68,66	8,45	108,84	62,71	541,5	40,59
7	5,59	571,7	102,8	66,30	1,60	92,22	62,44	573,3	34,64
8	5,66	578,6	87,04	64,58	5,86	78,84	60,90	584,5	30,83
9	5,66	603,9	66,0	59,30	0,98	61,73	56,49	604,9	26,86
10	9,90	608,3	37,6	42,58	6,29	29,19	26,04	614,6	21,59
11	9,90	613,4	36,9	36,77	3,98	29,92	22,03	617,4	23,33
12	9,90	612,2	42,41	46,00	9,26	38,41	40,38	621,5	22,90
13	8,13	386,7	49,50	51,39	12,16	33,84	28,90	398,9	24,06
14	8,48	277,5	42,40	41,51	5,87	33,39	25,73	283,4	24,80
15	5,66	571,7	94,20	65,25	5,14	84,79	61,40	576,8	32,73
16	5,66	576,7	93,20	63,52	1,55	87,28	61,04	578,3	34,00
17	4,95	566,4	95,10	66,41	4,04	87,92	63,67	570,0	31,94
18	5,66	567,9	97,70	66,04	3,16	90,47	63,32	571,1	33,18
19	5,66	580,5	88,00	63,93	4,71	81,27	60,94	585,2	31,74
20	5,66	572,4	93,40	63,64	4,89	83,88	59,51	577,3	33,96
21	5,80	591,9	76,00	61,76	4,59	69,10	57,94	596,5	29,06
22	5,66	585,6	89,10	57,86	1,90	85,40	56,05	587,5	37,55
23	5,66	586,1	88,80	53,75	1,90	83,55	50,84	588,0	41,07
24	5,66	586,3	90,30	51,10	1,38	86,96	49,24	587,7	44,15

Tabela 13 - Caracterização dos carvões de capim

Ensaio nº	Análise imediata			Análise elementar			Poder calorífico superior	
	CF (%)	Cz (%)	MV (%)	C (%)	H (%)	N (%)	(MJ/Kg)	(kcal/Kg)
1	16,89	4,69	78,42	48,0	6,0	0,5	18,93	4.520
2	14,40	3,26	82,84	47,5	6,0	0,4	18,48	4.413
3	16,13	3,65	80,22	48,1	6,1	0,4	20,12	4.805
4	18,09	3,45	78,46	51,2	5,9	0,6	20,21	4.826
5	19,39	3,43	77,18	51,4	6,0	0,7	17,53	4.186
6	23,04	3,50	73,46	53,2	5,9	0,4	21,06	5.029
7	26,92	3,82	67,26	56,8	5,8	0,7	22,15	5.289
8	31,07	3,81	65,12	60,5	5,9	0,6	23,46	5.605
9	34,62	3,82	61,56	62,5	5,7	1,1	25,05	6.089
10	38,79	4,19	57,02	68,5	5,6	0,8	27,92	6.667
11	39,73	3,55	56,72	69,5	5,9	0,9	28,53	6.813
12	41,89	3,91	54,20	70,9	5,3	0,9	28,36	6.772
13	40,98	4,70	54,32	69,9	5,1	0,8	27,57	6.584
14	41,74	4,99	53,27	69,5	5,1	1,1	27,43	6.550
15	29,37	3,63	67,00	58,7	5,7	0,8	23,28	5.559
16	28,84	3,67	67,49	58,1	5,9	0,6	34,00	5.731
17	29,94	3,86	66,20	57,1	5,6	0,6	24,00	5.731
18	28,24	3,72	68,04	57,4	5,9	0,6	24,02	5.736
19	31,19	3,79	65,02	59,6	5,9	0,8	25,01	5.994
20	28,53	4,00	65,47	57,7	5,0	0,7	23,77	5.676
21	31,70	3,80	64,50	60,0	5,5	1,1	24,63	5.882
22	33,42	5,48	61,10	59,9	5,4	1,0	24,72	5.903
23	33,26	5,80	60,94	60,5	5,3	1,3	25,13	6.001
24	33,56	5,92	60,52	60,0	5,3	1,0	24,46	5.841

Tabela 14 - Caracterização das cinzas do carvão de capim

Ensaio nº	Análise da cinza do carvão de capim							
	Al (%)	Ca (%)	Fe (%)	K (%)	Mg (%)	Na (%)	P (%)	Mn (%)
1	-	-	-	-	-	-	-	-
2	0,89	7,67	8,12	5,78	1,67	0,80	0,34	0,14
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0,74	7,9	6,06	4,37	0,89	0,63	0,35	0,11
5	0,71	8,17	5,24	5,39	0,82	0,46	0,28	0,10
6	0,75	6,74	5,22	7,09	0,91	0,28	0,31	0,09
7	0,79	6,37	5,10	6,46	0,87	0,42	0,38	0,11
8	0,96	4,83	5,79	5,73	0,78	0,42	0,49	0,10
9	0,92	3,77	7,06	5,04	0,80	0,38	0,64	0,10
10	3,09	3,57	4,72	7,04	0,51	1,30	0,51	0,08
11	1,18	4,95	8,27	2,23	0,78	0,43	0,89	0,12
12	1,74	2,15	9,11	2,04	1,43	0,23	0,98	0,12
13	0,95	2,22	8,72	1,80	1,33	0,94	0,75	0,09
14	1,00	2,21	6,96	2,05	1,37	0,33	1,10	0,10
15	1,33	5,41	5,31	5,71	0,80	0,73	0,54	0,11
16	1,36	5,96	5,24	6,14	0,85	0,62	-	0,10
17	1,21	4,91	7,40	6,77	0,84	0,53	0,59	0,11
18	1,34	5,22	4,90	7,01	0,79	0,32	0,44	0,10
19	1,22	5,17	6,44	5,98	0,85	0,64	0,50	0,10
20	1,20	5,35	8,96	5,76	0,82	0,26	0,64	0,13
21	1,35	5,65	5,96	4,02	0,77	0,94	0,59	0,12
22	0,88	1,84	2,58	6,78	0,80	0,33	0,54	0,06
23	0,80	9,27	2,44	8,34	1,49	0,72	-	0,07
24	0,68	2,41	2,67	9,47	1,16	0,44	0,54	0,07

Tabela 15 - Índices e coeficientes obtidos na carbonização hidrotermal do capim

Ensaio nº	Rendimento em carvão (%)	Rendimento Energético (%)	Rendimento em carbono (%)	Aumento do poder calorífico superior (%)
1	82,69	84,52	88,06	2,21
2	80,68	80,51	85,03	- 0,22
3	63,96	69,49	68,26	8,63
4	72,91	78,80	82,03	9,13
5	64,20	60,77	73,22	- 5,35
6	58,12	66,09	68,60	13,71
7	49,60	59,32	61,72	19,60
8	44,14	55,94	59,25	26,73
9	38,46	52,02	53,33	35,26
10	30,91	46,60	46,98	50,76
11	33,40	51,46	51,51	54,05
12	32,79	50,21	51,58	53,13
13	34,45	51,28	53,43	48,87
14	35,51	52,59	54,76	48,11
15	46,86	58,90	61,04	25,70
16	48,68	63,09	62,76	29,59
17	45,73	59,26	57,94	29,59
18	47,51	61,62	60,50	29,70
19	45,45	61,37	60,10	35,04
20	48,63	62,41	62,25	28,35
21	41,61	55,34	55,39	32,99
22	53,77	71,76	71,45	33,48
23	58,80	79,79	78,94	35,69
24	63,22	83,49	84,16	32,07

Tabela 16 - Caracterização das frações líquidas da carbonização hidrotermal do capim

Ensaio nº	Resíduo (%)(1)	Análise elementar(2)			Análise qualitativa Elementos	Poder calorífico superior	
		C (%)	H (%)	N (%)		Mj/kg	kcal/kg
1					Si K Fe P Cl Ca S Mg Mn Al Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu N Sr Na B		
2					K Si Fe P Cl Mg Ca S Mn Al Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu N Sr Na B		
3	2,89	45,6	4,5	0,9	Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Ti Ba Cr Cu Ni Sr Na B	18,45	4.408
4					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Sr Na		
5					K Si Fe P Ca Mg Cl Mn Al S Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Sr Na		
6	1,74	41,1	3,9	1,2	Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Br Ti Ba Cr Cu Ni Na	16,79	4.011
7					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Br Ti Ba Cr Na		
8					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Sr Na		
9	1,80	43,6	4,3	0,8	Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Ti Ba Cr Cu Ni Na	16,94	4.047
10					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Br Ti Ba Cr Cu Ni Na		
11					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Br Ti Ba Cr Cu Na		
12	1,47	40,3	4,1	0,8	Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Br Ti Ba Cr Cu Ni Na	15,70	3.751
13					Si K Fe Cl Ca Mg P Mn Al S Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Sr Na		
14					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Br Ti Ba Cr Cu Na		
15					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Sr Na B		
16					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Sr Na		
17					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Br Ti Ba Cr Cu Na		
18					Si K Fe P Cl Ca Mg S Mn Al Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Sr Na		
19					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Ni Sr Na		
20					Si K Fe P Cl Ca Mg Mn Al S Zn Rb Sr Ti Ba Cr Cu Na		
21							
22							
23							
24					K Si Fe Cl Ca Mg P S Mn Al Zn Rb Br Ti Ba Cr Cu Sr Na		

Notas : (1) Resíduo sólido resultante da evaporação a 110 °C

(2) No resíduo sólido resultante da evaporação a 110 °C

Tabela 17 - Programação dos ensaios de carbonização hidrotermal de turfa

Ensaio nº	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Massa inicial de turfa (g)	Água adicionada (ml)	Teor de sólidos (%)
25	200	5	201	499	10
26	200	15	201	499	10
27	200	45	201	499	10
28	250	5	301	499	10
29	250	15	201	499	10
30	250	45	201	499	10
31	300	5	201	499	10
32	300	15	201	499	10
33	300	45	201	499	10

Tabela 18 - Dados obtidos nos ensaios de carbonização hidrotermal de turfa

Ensaio nº	Pressão (MPa)	Massa de líquido de filtragem (g)	Massa de carvão filtrado (g)	Umidade do carvão filtrado (%)	Massa de líquido de prensagem (g)	Massa de carvão prensado (g)	Umidade do carvão prensado (%)	Massa total de líquido (g)	Massa de carvão seco (g)
25	1,7	471,9	210,8	72,17	63,51	141,63	58,57	535,4	58,67
26	1,7	472,3	207,5	71,89	67,99	134,68	56,66	540,3	58,32
27	1,4	481,5	196,2	70,34	52,43	138,51	57,99	533,9	58,19
28	4,5	511,8	174,3	69,35	42,28	127,0	57,93	554,1	58,43
29	4,5	485,0	169,8	68,04	40,13	124,07	56,27	525,1	54,26
30	4,8	515,3	162,4	67,33	32,61	126,14	57,94	547,9	53,06
31	9,7	544,0	134,1	64,74	25,44	105,18	55,04	569,4	47,29
32	9,0	556,4	127,9	64,27	21,54	102,29	55,32	577,9	45,70
33	9,0	553,0	125,1	63,05	21,0	99,46	53,53	574,0	46,22

Tabela 19 - Caracterização dos carvões de turfa

Ensaio nº	Análise Imediata			Análise elementar			Poder calorífico superior	
	CF (%)	Cz (%)	MV (%)	C (%)	H (%)	N (%)	MJ/Kg	kcal/Kg
25	41,15	7,21	51,64	62,06	4,6	0,8	24,29	5800,4
26	42,56	6,68	50,76	59,7	4,8	0,9	24,47	5826
27	42,01	7,01	50,98	59,9	4,8	0,9	24,84	5932
28	43,97	7,70	48,33	61,2	4,7	0,9	25,80	6161
29	45,15	7,39	47,46	61,4	4,8	1,0	26,24	6266
30	46,22	8,49	45,29	62,6	4,4	0,8	27,87	6655
31	48,24	8,24	43,52	64,8	4,8	1,0	28,28	6753
32	48,04	8,90	43,06	64,5	4,7	1,0	28,90	6901
33	49,34	8,85	41,81	66,1	4,9	0,7	28,53	6813
Original	37,08	7,12	55,80	55,9	5,0	0,6	23,14	5526

Tabela 20 - Caracterização das cinzas do carvão de turfa

Ensaio nº	Análise da cinza do carvão									
	Al (%)	Ca (%)	Fe (%)	K (%)	Mg (%)	Na (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Mn (%)
25										
26	14,12	0,98	1,96	0,59	0,16	0,22	NA	NA	NA	0,03
27										
28										
29	15,04	0,64	1,74	0,50	0,10	0,20	NA	NA	NA	0,03
30										
31										
32	14,05	1,22	1,86	0,47	0,16	0,13	NA	NA	NA	0,03
33										
Original	13,58	1,32	1,73	0,81	0,20	0,28	NA	NA	NA	0,03

Tabela 21 - Índice e coeficientes obtidos na carbonização hidrotermal de turfa

Ensaio nº	Rendimento em carvão (%)	Rendimento energético (%)	Rendimento em carbono (%)	Aumento do poder calorífico superior (%)
25	83,81	87,98	93,05	4,97
26	83,31	88,10	88,04	5,75
27	83,13	89,23	89,08	7,35
28	76,33	85,10	83,56	11,49
29	77,51	87,90	85,14	13,40
30	75,80	91,29	84,88	20,44
31	67,56	82,56	78,31	22,21
32	65,29	81,54	75,33	24,89
33	66,03	81,41	78,07	23,29

Tabela 22 - Programação dos ensaios de carbonização hidrotermal de bagaço de cana

Ensaio nº	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Massa inicial de bagaço com 62% de umidade (g)	Água adicionada (ml)	Teor de sólidos (%)
34	200	5	71,0	656,0	3,7
35	200	15	71,0	656,0	3,7
36	200	45	71,0	656,0	3,7
37	250	5	71,0	656,0	3,7
38	250	15	71,0	656,0	3,7
39	250	45	71,0	656,0	3,7
40	300	5	71,0	656,0	3,7
41	300	15	71,0	656,0	3,7
42	300	45	71,0	656,0	3,7

Tabela 23 - Dados obtidos nos ensaios de carbonização hidrotermal de bagaço de cana

Ensaio nº	Pressão (MPa)	Massa de líquido de filtragem (g)	Massa de carvão filtrado (g)	Umidade do carvão filtrado (%)	Massa de líquido de prensagem (g)	Massa de carvão prensado (g)	Umidade do carvão prensado (%)	Massa total de líquido (g)	Massa de carvão seco (g)
34	1,94	625	71,4	74,3	23,0	44,65	59,0	648,0	18,32
35	2,00	635	69,2	73,6	23,0	45,25	59,6	658,0	18,29
36	2,08	635	68,4	73,6	22,5	45,46	60,3	657,5	18,03
37	4,44	660	45,4	69,0	7,66	37,74	62,7	667,7	14,09
38	4,37	660	38,7	70,1	4,15	34,55	66,5	664,1	11,57
39	4,37	680	26,1	65,2	9,83	16,27	44,1	689,8	9,09
40	8,66	660	21,5	56,9	8,20	13,30	30,3	668,2	9,27
41	8,59	685	21,8	59,8	9,20	12,60	30,4	694,2	8,77
42	8,59	660	20,0	57,7	0,52	19,48	56,62	660,5	8,45

Tabela 24 - Caracterização dos carvões de bagaço de cana

Ensaio nº	Análise Imediata			Análise elementar			Poder calorífico superior	
	CF (%)	Cz (%)	MV (%)	C (%)	H (%)	N (%)	MJ/Kg	kcal/Kg
34	12,41	2,58	85,01	49,4	5,7	0,1	18,3	4.370
35	11,95	2,57	85,48	58,5	5,7	0,1	18,4	4.394
36	13,15	2,46	84,39	49,7	5,8	0,1	18,8	4.489
37	19,41	3,00	77,59	53,9	5,8	0,1	20,5	4.895
38	24,11	3,20	72,69	56,1	5,5	0,1	21,3	5.086
39	36,26	4,16	59,58	63,7	4,9	0,1	24,5	5.850
40	42,02	4,04	53,94	67,2	4,7	0,2	26,1	6.232
41	40,92	3,91	55,17	67,4	4,6	0,2	25,7	6.137
42	43,88	4,59	51,53	67,3	4,5	0,2	26,2	6.256
Original	11,35	2,53	86,12	47,4	5,4	0,3	18,3	4.370

Tabela 25 - Índices e coeficientes obtidos na carbonização hidrotermal de bagaço de cana

Ensaio nº	Rendimento em carvão (%)	Rendimento energético (%)	Rendimento em carbono (%)	Aumento do poder calorífico superior (%)
34	68	68,0	70,87	0
35	68	68,4	69,58	0,5
36	67	68,8	70,25	2,7
37	52	58,3	59,13	12,0
38	43	50,0	50,89	16,4
39	34	45,5	45,69	33,9
40	34	48,5	48,20	42,6
41	32	47,7	45,50	40,4
42	31	44,4	44,01	43,2

Figura 6 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, desaguado a vácuo.

Figura 7 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, por prensagem do produto.

O rendimento em carvão, definido pela relação entre a massa seca de carvão obtido e a massa seca de capim, apresentou valores decrescentes com aumento do período e da temperatura de carbonização. Este comportamento, visualizado na Figura 8, é devido a eliminação crescente de voláteis associada à correspondente aumento de temperatura e do tempo residência. O rendimento em carvão para uma dada temperatura tende a valores constantes com o aumento do período de carbonização. A temperaturas mais baixas, a influência do período de residência é maior do que em temperaturas mais elevadas, devido ao aumento da velocidade de reação com a temperatura. O rendimento variou de 32 a 83%.

Ensaio com recirculação de licor pirolenhoso mostraram aumento do rendimento em carvão (ensaio 21 a 24 da Tabela 11). O rendimento elevou-se de 47% na experiência sem recirculação, para 53,7% com uma recirculação e 58,8% e 63,2%, respectivamente, nas segunda e terceira recirculações. Esses resultados mostraram que pode ter ocorrido incorporação no carvão de parte do carbono que deveria estar em solução.

O teor de matéria volátil no carvão também apresentou valores decrescentes com aumento do período e da temperatura de carbonização. A influência do período de residência sobre o conteúdo de matéria volátil foi pequena, havendo variação inferior a 10% nos valores do teor de matéria volátil, entre o período de 5 e de 45 minutos, independentemente da temperatura (Figura 9). Observou-se inversão de valores para os período de residência de 5 minutos nas temperaturas de 180 e 220 °C em relação ao período de residência de 15 e 45 minutos, devido a aumento de pressão na autoclave durante a realização do ensaio; a 180 °C a pressão de elevou de 1,55 MPa originalmente previstos para 1,69 MPa, e a 220 °C de 2,83 MPa para 2,97 MPa (Figura 9).

O teor de cinzas permanece praticamente constante em relação a temperatura e ao período de residência da carbonização (Figura 10). Observa-se lixiviação parcial das cinzas, considerando-se que os teores de cinzas permanecem praticamente constantes nos carvões produzidos em diferentes temperaturas e que estes apresentam rendimentos decrescentes em relação a elevação da temperatura de carbonização (Figura 8). Desse modo, se não ocorresse uma lixiviação das cinzas, seu teor deveria subir com o aumento de temperatura (menor rendimento em carvão).

A maioria dos elementos das cinzas são lixiviados em valor superior a 70% do seu conteúdo. Preferencialmente são lixiviados Potássio, Magnésio e Fósforo, e em menor quantidade o Alumínio. Tomando como exemplo o ensaio de número 10 (Tabela 11), verifica-se que o teor de cinzas na matéria prima é de 5,82%, o rendimento em carbonização de 30,91% e o teor de cinzas no carvão é de 4,19%; a lixiviação total das cinzas neste exemplo é de 78%. Essa lixiviação intensa ocorre em razão do pH ácido (cerca de 3) do meio líquido, constituído de ácidos orgânicos, principalmente ácido acético, e outros componentes, e das pressões e temperaturas da carbonização.

Figura 8 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carvão.

Figura 9 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de matéria volátil do carvão obtido.

O teor de carbono fixo aumenta linearmente com a temperatura e que a influência do tempo é pouco significativa. A Figura 11 ilustra este comportamento; nota-se que a 180 °C houve inversão de valores para o período de residência de 5 minutos em relação aos períodos de 15 e 45 minutos. Como comentado anteriormente, isto se deve a aumento da pressão da autoclave durante a realização desse ensaio.

O rendimento em carbono, entendido como recuperação do carbono originalmente contido no capim no carvão, diminui quase linearmente com o aumento da temperatura (Figura 12). A influência do período de carbonização é pequena e diminui com o aumento da temperatura. Tal fato encontra explicação no aumento da velocidade de reação, favorecida pelo aumento da temperatura. A altas temperaturas de carbonização, como 300 °C, a reação se processa rapidamente.

O percentual de aumento do poder calorífico superior do carvão em relação ao poder calorífico superior do capim, cresce com a elevação da temperatura de carbonização, e influência do período de residência não é significativa (Figura 13). A recirculação do licor pirolenhoso propiciou aumento do poder calorífico superior em relação a experimentos sem recirculação. Observou-se aumento de 3%, aproximadamente (Tabela 15).

O rendimento energético, definido como a recuperação no carvão da energia contida no capim, diminui com o aumento da temperatura; a influência do período de residência não é significativa (Figura 14). O valor do rendimento energético é superior a 50%, atingindo valor máximo 84% (Tabela 15)

O aumento do teor de sólidos na polpa levada à autoclave para a carbonização hidrotermal conduziu a um aumento no teor de cinzas. O aumento do teor de sólidos na polpa de 10% para 15 e 20% resultou em aumento do teor de cinzas de cerca de 1%. O rendimento em carbono subiu levemente e o poder calorífico foi pouco menor.

4.3.2. - TURFA

Verificou-se que a separação sólido líquido é favorecida pelo aumento de temperatura e pouco influenciada pelo tempo, independentemente se esta for efetuada a vácuo ou por prensagem (Figuras 15 e 16). Comparativamente, a prensagem mostrou-se mais eficiente que o vácuo. Na prensagem atingiu-se valores de 53% de umidade no carvão produzido na temperatura de 300 °C com 45 minutos de carbonização, enquanto o melhor resultado a vácuo, de 63% de umidade, foi obtido nas mesmas condições de tempo e temperatura.

O rendimento em carvão, definido pela relação entre a massa seca de carvão obtido e a massa seca de turfa, apresentou valores decrescentes com aumento do período e da temperatura de carbonização. Este comportamento, visualizado na Figura 17, é devido a

Figura 10 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de cinzas do carvão obtido.

Figura 11 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de carbono fixo do carvão obtido.

Figura 12 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carbono no carvão obtido.

Figura 13 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o aumento do poder calorífico superior no carvão obtido.

Figura 14 - Pirólise hidrotermal do capim elefante - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento energético.

Figura 15 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, desaguado a vácuo.

Figura 16 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, por prensagem do produto.

Figura 17 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carvão.

Figura 18 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de matéria volátil do carvão obtido.

Figura 19 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de cinzas do carvão obtido.

Figura 20 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de carbono fixo do carvão obtido.

Figura 21 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carbono no carvão obtido.

de voláteis associada à correspondente aumento de temperatura e do tempo residência. O rendimento em carvão para uma dada temperatura tende a valores constantes com o aumento do período de carbonização. A temperaturas mais baixas, a influência do período de residência é maior do que em temperaturas mais elevadas, devido ao aumento da velocidade de reação com a temperatura.

O rendimento variou de 66 a 83%.

O teor de matéria volátil no carvão também apresentou valores decrescentes com aumento do período e da temperatura de carbonização. A influência do período de residência sobre o conteúdo de matéria volátil foi pequena, havendo variação inferior a 10% nos valores do teor de matéria volátil, entre o período de 5 e de 45 minutos, independentemente da temperatura (Figura 18).

O teor de cinzas permanece praticamente constante em relação a temperatura e ao período de residência da carbonização (Figura 19). Observa-se lixiviação parcial das cinzas, considerando-se que os teores de cinzas permanecem praticamente constantes nos carvões produzidos em diferentes temperaturas e que estes apresentam rendimentos decrescentes em relação a elevação da temperatura de carbonização (Figura 17). Desse modo, se não ocorresse uma lixiviação das cinzas, seu teor deveria subir com o aumento de temperatura (menor rendimento em carvão).

A maioria dos elementos das cinzas são lixiviados. Tomando como exemplo o ensaio de número 32 (Tabela 17), verifica-se que o teor de cinzas na matéria prima é de 7,12%, o rendimento em carbonização de 65,29% e o teor de cinzas no carvão é de 8,9%; a lixiviação total das cinzas neste exemplo é de 19%. Essa lixiviação intensa ocorre em razão do pH ácido (cerca de 3) do meio líquido, constituído de ácidos orgânicos, principalmente ácido acético, e outros componentes, e das pressões e temperaturas da carbonização.

O teor de carbono fixo aumenta linearmente com a temperatura e que a influência do tempo é pouco significativa. A Figura 20 ilustra este comportamento.

O rendimento em carbono, entendido como recuperação no carvão do carbono originalmente contido na turfa, diminui quase linearmente com o aumento da temperatura (Figura 21). A influência do período de carbonização é pequena. O rendimento em carbono variou de 78 a 93%.

O percentual de aumento do poder calorífico superior do carvão em relação ao poder calorífico superior da turfa, cresce com a elevação da temperatura de carbonização, e influência do período de residência não é significativa (Figura 22). O aumento máximo do poder calorífico foi de cerca de 25 % e ocorreu no experimento nº 32 realizado a 300 °C e 45 minutos de período de residência.

Figura 22 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o aumento do poder calorífico superior no carvão obtido.

Figura 23 - Pirólise hidrotermal da turfa - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento energético.

O rendimento energético, definido como a recuperação no carvão da energia contida na turfa, diminui com o aumento da temperatura; a influência do período de residência não é significativa (Figura 23). O valor do rendimento energético é superior a 80%, atingindo valor máximo 91% (Tabela 21).

4.3.3 - BAGAÇO DE CANA

Verificou-se que a separação sólido líquido, da mesma forma que para o capim Elefante e a turfa, é favorecida pelo aumento de temperatura e pouco influenciada pelo tempo, independentemente se esta for efetuada a vácuo ou por prensagem (Figuras 24 e 25). Comparativamente, a prensagem mostrou-se mais eficiente que o vácuo. Na prensagem atingiu-se valores de 30% de umidade no carvão produzido na temperatura de 300 °C com 15 minutos de carbonização, enquanto o melhor resultado a vácuo, de 57% de umidade, foi obtido nas mesmas condições de temperatura e tempo de 45 minutos (Tabela 23).

O rendimento em carvão, definido pela relação entre a massa seca de carvão obtido e a massa seca do bagaço de cana, apresentou valores decrescentes com aumento do período e da temperatura de carbonização. Este comportamento, visualizado na Figura 26, é devido a eliminação crescente de voláteis associada à correspondente aumento de temperatura e do tempo residência. O rendimento em carvão para uma dada temperatura tende a valores constantes com o aumento do período de carbonização. A temperaturas mais baixas, a influência do período de residência é maior do que em temperaturas mais elevadas, devido ao aumento da velocidade de reação com a temperatura.

O rendimento variou de 31 a 68%.

O teor de matéria volátil no carvão também apresentou valores decrescentes com aumento do período e da temperatura de carbonização. A influência do período de residência sobre o conteúdo de matéria volátil foi pequena, havendo variação inferior a 10% nos valores do teor de matéria volátil, entre o período de 5 e de 45 minutos, nas temperaturas de 200 e 300 °C e uma variação maior de 20% a 250°C. Esse comportamento sugere que a 200 °C a velocidade da reação de carbonização é tão lenta que a influência dos períodos de tempo ensaiados é pequena e que a 300 °C a velocidade da reação de carbonização é tão rápida que a influência do tempo de residência se torna pequena (Figura 27).

Observou-se inversão de valores para os período de residência de 15 minutos na temperatura 300 °C em relação ao período de residência de 5 e 45 minutos, devido a variação de pressão na autoclave durante a realização dos ensaio; a 300 °C (Tabela 23).

O teor de cinzas aumenta levemente com o aumento do período e temperatura de carbonização (Figura 28). Observa-se lixiviação parcial das cinzas, considerando-se que os teores de cinzas permanecem praticamente constantes nos carvões produzidos em diferentes

Figura 24 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, desaguado a vácuo.

Figura 25 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre a umidade do carvão obtido, por prensagem do produto.

Figura 26 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carvão.

Figura 27 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de matéria volátil do carvão obtido.

Figura 28 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de cinzas do carvão obtido.

Figura 29 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o teor de carbono fixo do carvão obtido.

temperaturas e que estes apresentam rendimentos decrescentes em relação a elevação da temperatura de carbonização (Figura 26). Desse modo, se não ocorresse uma lixiviação das cinzas, seu teor deveria subir com o aumento de temperatura (menor rendimento em carvão).

A maioria dos elementos das cinzas são lixiviados. Tomando como exemplo o ensaio de número 41 (Tabela 24), verifica-se que o teor de cinzas na matéria prima é de 2,53%, o rendimento em carbonização de 32% e o teor de cinzas no carvão é de 3,91%; a lixiviação total das cinzas neste exemplo é de 50%. Essa lixiviação intensa ocorre em razão do pH ácido (cerca de 3) do meio líquido, constituído de ácidos orgânicos, principalmente ácido acético, e outros componentes, e das pressões e temperaturas da carbonização.

O teor de carbono fixo aumenta quase linearmente com a temperatura e que a influência do tempo é pouco significativa nas temperaturas de 200 e 300 °C e tem uma amplitude maior na temperatura de 250 °C. A Figura 29 ilustra este comportamento, que pode ser atribuída à cinética de reação, ou seja, a 200 °C a velocidade de reação é baixa, de modo a tornar a minimizar a influência do período de carbonização e a 300 °C a velocidade de reação é suficientemente alta para provocar comportamento similar. Nota-se que a 300 °C houve inversão de valores para o período de residência de 5 minutos em relação aos períodos de 15 minutos. Como comentado anteriormente, isto se deve a aumento da pressão da autoclave durante a realização desse ensaio.

O rendimento em carbono, entendido como recuperação no carvão, do carbono originalmente contido no bagaço de cana, diminui quase linearmente com o aumento da temperatura (Figura 30). A influência do período de carbonização é pequena a 200 °C e 300 °C e significativa a 250 °C. Esse comportamento pode ser atribuído a cinética de reação.

O percentual de aumento do poder calorífico superior do carvão em relação ao poder calorífico superior do bagaço de cana, cresce com a elevação da temperatura de carbonização, e influência do período de residência não é significativa nas temperaturas de 200°C e 300 °C (Figura 31). A razão desse comportamento, como no caso anterior pode ser atribuída à cinética de reação.

O rendimento energético, definido como a recuperação no carvão da energia contida no bagaço de cana, diminui com o aumento da temperatura; a influência do período de residência não é significativa para as temperaturas de 200 °C e 300 °C (Figura 32). O valor do rendimento energético é superior a 40%, atingindo valor máximo 68% (Tabela 25).

4.3.4. ANÁLISE COMPARATIVA DAS MATÉRIAS PRIMAS

Os dados apresentados nas tabelas e figuras citados anteriormente, mostram que na carbonização hidrotermal o comportamento das três matérias primas é similar, apresentado variações na intensidade dos parâmetros analisados (separação sólido líquido, rendimento em

Figura 30 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento em carbono no carvão obtido.

Figura 31 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o aumento do poder calorífico superior no carvão obtido.

Figura 32 - Pirólise hidrotermal do bagaço de cana - influência da temperatura e da duração do ensaio sobre o rendimento energético.

carvão, matéria volátil, cinzas, carbono fixo, rendimento em carbono, poder calorífico superior e rendimento energético).

O capim e o bagaço de cana apresentaram resultados bastante semelhantes nos parâmetros levantados em razão de constituírem biomassas com composição próximas, enquanto a turfa constitui material em processo de decomposição, onde a incarbonização provocou modificações na biomassa original, tais como na estrutura física do vegetal, eliminação de voláteis, aumento do teor de carbono e aumento do teor de cinzas, pelas condições hidrológicas no sítio deposicional.

4.4 - Análise estatística dos resultados

Procurando-se determinar a variabilidade dos atributos nos ensaios de carbonização via úmida efetuou-se para o capim sete repetições adicionais de determinado ensaio, mantendo-se as mesmas condições. Procurou-se desse modo, obter-se dados suficientes para levantar os parâmetros estatísticos para uma dada condição das variáveis. Esses parâmetros podem então serem estendidos para as condições restantes. Esse procedimento representa uma simplificação do tratamento estatístico total dos dados e deve ser tomado como a avaliação possível dentro das limitações de tempo e custo.

Para os dados levantados foram calculados as médias, os desvios padrões e variabilidade da média, considerando-se a distribuição de Student: $t = (x - \mu)/(S / n)$ para a probabilidade de 95% e grau de liberdade 7.

Para um outro valor qualquer desse mesmo atributo foi admitido que o mesmo obedece uma distribuição normal, onde $Z = (x - \mu)/\sigma$, sendo σ tomado como S ou seja, como o desvio padrão do atributo para os oito ensaios repetidos. O valor de Z foi, também, tomado para uma probabilidade de 95%.

Os experimentos utilizados para análise estatística foram os de número 8, 15, 16, 17, 18, 19, 20 e 21. As variáveis fixadas para esses ensaios foram: temperatura - 260 °C, tempo - 15 minutos, teor de sólidos na polpa - 10%, massa de capim - 155 g, massa de água - 543,4 g.

Os atributos de interesse foram: umidade do carvão filtrado, umidade do carvão prensado, massa seca do carvão, teor de cinza do carvão, teor de carbono fixo do carvão, teor de carbono total do carvão, poder calorífico superior do carvão, rendimento em carvão, rendimento energético, rendimento em carbono e aumento do poder calorífico superior.

O resultado do tratamento estatístico dos dados é apresentado na Tabela 26.

Os experimentos repetidos, de números 8, 15, 16, 17, 18, 19, 20, e 21 efetuados com o capim mostraram que os atributos de interesse apresentaram uma variabilidade com 95% de

probabilidade de estarem abaixo de 5 % . Essa variabilidade compreende aquela decorrente dos ensaios de carbonização , bem como aquela devida as análises laboratoriais efetuadas sobre o produto dos ensaios. Essa variabilidade estendida para um valor qualquer situa-se em sua grande maioria abaixo de 10 % , mostrando, o alto nível de confiabilidade nos resultados obtidos.

Os atributos de interesse foram também apresentados em forma de graficos. Esses gráficos traçados por regressão linear para os experimentos realizados com o capim, mostraram um alto valor de correlação, indicando que a variação dos atributos de interesse em função do tempo e da temperatura dos ensaios pode ser tomada como linear dentro dos intervalos considerados.

Tabela 26 - Análise estatística dos resultados da carbonização hidrotermal

Atributos	Valor Médio x	Desvio Padrão S	Variabilidade 95% Probabilidade			
			Student		Normal	
			Valor Numérico	Valor Porcentual	Valor Numérico	Valor Pocentual
unidade de carvão filtrado	64,39	1,51	64,39 ± 1,26	± 1,96	64,29 ± 2,96	± 4,60
umidade do carvão prensado	61,09	1,86	61,09 ± 1,56	± 2,55	61,09 ± 3,65	± 5,97
massa seca do carvão	32,18	1,67	32,18 ± 1,40	± 4,34	32,18 ± 3,27	± 10,16
teor de cinza do carvão	3,76	0,13	3,76 ± 0,11	± 2,89	3,76 ± 0,25	± 6,65
teor de carbono fixo do carvão	29,86	1,33	29,86 ± 1,11	± 3,72	29,86 ± 2,61	± 8,74
teor de carbono total do carvão	58,64	1,27	58,64 ± 1,06	± 1,81	58,64 ± 2,49	± 4,25
poder calorífico superior	24,02	0,57	24,02 ± 0,48	± 1,98	24,02 ± 1,12	± 4,66
rendimento em carvão	46,08	2,40	46,08 ± 2,00	± 4,35	46,08 ± 4,70	± 10,20
rendimento energético	59,74	2,91	59,74 ± 2,43	± 4,07	59,74 ± 5,70	± 9,55
rendimento em carbono	59,90	2,39	59,90 ± 2,00	± 3,34	59,90 ± 4,68	± 7,81
aumento do poder calorífico	29,71	3,07	29,71 ± 2,57	± 8,64	29,71 ± 6,02	± 20,26

5 - DESENVOLVIMENTO DE TÓPICOS DE PROJETO DE CARBONIZAÇÃO HIDROTHERMAL

Abordar-se-á neste capítulo, tópicos relacionados ao projeto de carbonização hidrotermal aplicado ao bagaço de capim. Os itens enfocados foram desenvolvidos a partir dos resultados do estudo experimental, relatado nos capítulos anteriores.

Este desenvolvimento foi aplicado ao capim, podendo ser estendido de forma análoga ao ao bagaço de cana e a turfa.

Os tópicos de projeto desenvolvidos são enumerados e descritos a seguir:

- Descrição do processo
- Fluxograma do processo
- Balanço de massas
- Balanço energético
- Tempo de ciclo
- Especificação dos Insumos

5.1 - Descrição do processo

O processo se inicia com o corte e enfardamento do capim, que é enviado imediatamente para processamento. O período entre o corte e o envio para o processamento deve ser o menor possível pois o capim sofre desidratação e decomposição dificultando o seu subsequente aproveitamento.

No processamento, o capim é submetido a etapa de moagem. A moagem é realizada em prensas de rolos, semelhantes às utilizadas na moagem de cana de açúcar. Nesta é introduzida certa quantidade de água visando maior extração do suco, que contém grande parte das proteínas.

Após a moagem, obtém-se dois produtos: suco e bagaço.

O suco contém teores apreciáveis de proteínas e sais minerais, constituindo assim, matéria prima para o processo de recuperação de proteínas. Nesse processo, a proteína é precipitada e separada da fração líquida que contém os sais minerais, e posteriormente comercializada. A fração líquida é aplicada na área de plantio, devido ao seu conteúdo de nutrientes, principalmente potássio.

O bagaço é submetido à carbonização hidrotermal. Inicialmente, o bagaço é misturado com certa quantidade de líquido para formar uma polpa com 10% de bagaço em base seca. O líquido é proveniente da operação de carbonização (desaguamento do carvão), ao qual é incorporado água nova na relação em peso de 6,4 daquele para uma desta.

Essa polpa é carregada na autoclave e submetida a uma temperatura de 260 °C e pressão correspondente, de 56 atmosferas, durante período de residência, nestas condições, de cerca de 5 minutos. Após a carbonização essa polpa passa por trocadores de calor, para ceder calor sensível, e desaguada em filtros prensa.

O desaguamento do carvão gera dois produtos: um bolo do filtro prensa, com cerca de 40% de umidade, que é estocada para a comercialização, e um licor, do qual 3/4 do volume é recirculado e 1/4 do volume é enviado à etapa de recuperação de subprodutos.

5.2 - Fluxograma do processo

O fluxograma simplificado do processo, apresentando o escopo deste trabalho, encontra-se ilustrado na Figura 33 e o fluxograma completo na Figura 34.

5.3 - Balanço de massas

O balanço de massas apresentado na Figura 35 e Tabelas 27 e 28 foi elaborado a partir do resultado médio de 17 ensaios de carbonização hidrotermal realizados em idênticas condições (Tabela 31). O capim utilizado na elaboração do balanço de massas tem suas características apresentadas nas Tabelas 4 a 9. Foi considerado desprezível a variação de umidade entre o momento do corte e o recebimento para processamento.

No esmagamento utilizou-se uma quantidade de água equivalente a 50% da massa de capim verde. Deste, obtém-se um bagaço com aproximadamente 50% de umidade, correspondendo a cerca de 88% da massa seca original, e um suco contendo cerca de 65% da proteína existente no capim.

Para uma quantidade inicial de 100 Kg de capim verde, com 75,28% de umidade tem-se:

- água adicionada na moagem - 50,00 Kg
- quantidade de bagaço - 43,50 Kg
- teor de umidade do bagaço - 50,00 Kg
- quantidade de caldo obtida - 106,50 Kg

O caldo obtido deverá ser submetido ao processo de recuperação de proteína e devolvido ao campo.

Foram assumidos os seguintes dados para compor o balanço:

- teor médio de proteína sobre a massa seca de capim - 8,28%

- rendimento de extração - 65%

O bagaço (43,50 Kg com 50 % de umidade) submetido a carbonização hidrotermal proporciona os seguintes parâmetros:

- líquido adicionado ao bagaço -174,01 Kg
- rendimento de carbonização-60,00%
- quantidade de carvão, base seca -13,05 Kg
- umidade do carvão -40,00%
- quantidade de carvão, base úmida - 21,75 Kg
- quantidade de líquido obtido no desaguamento -195,75 Kg
- quantidade de líquido recirculado -146,81 Kg
- quantidade de líquido enviado à etapa de:
 - recuperação de recuperação de subprodutos 48,94 Kg
- composição do líquido adicionado ao bagaço:
 - líquido recirculado-146,81 Kg
 - água nova -27,20 Kg

5.4 - Balanço energético

A elaboração do balanço energético foi elaborado com base no balanço de massas da carbonização do bagaço apresentado acima, para uma quantidade de 100 Kg de capim. Foram admitidos os seguintes dados iniciais:

1. Poder calorífico superior (valores medidos):

- bagaço de capim seco - 4.423,00 kcal/Kg (18,52 MJ/Kg)
- carvão de capim - 5.900,00 kcal/Kg (24,72 MJ/Kg)

2 -Temperatura dos materiais envolvidos

- temperatura de entrada do bagaço de capim - 25 °C
- temperatura de saída do carvão com 40% de umidade - 50 °C
- temperatura de saída do licor para recuperação - 50 °C
- temperatura de entrada da água - 25 °C
- temperatura de entrada do licor de recirculação - 50 °C

Figura 33 - Fluxograma básico do processo de carbonização hidrotermal de capim

Figura 34 - Fluxograma ampliado do processo de carbonização hidrotermal de capim

Figura 35 - Balanço de massa do processo de carbonização hidrotermal de capim

Tabela 27 - Balanço de massa do processo de carbonização hidrotermal de capim

	<i>massa total</i>	<i>água contida</i>	<i>matéria seca</i>
Entradas:			
capim verde	100,00	75,28	24,72
água de processo:			
- moagem	50,00		
- carbonização	27,20		
Saídas:			
carvão	21,75	8,70	13,05
- licor pirolenhoso para recuperação	48,94	-	-
água:			
- retorno à cultura	87,50		
- vapor de secagem	17,67		
- proteína (estimada)	1,33		

Tabela 28 - Balanço de massas da carbonização do bagaço de capim

	<i>massa total</i>	<i>água contida</i>	<i>matéria seca</i>
Entradas:			
bagaço de capim	43,50	21,75	21,75
água de diluição	27,20	27,20	0
licor de recirculação	146,81	144,17	2,64
Saídas:			
carvão	21,75	8,70	13,05
licor pirolenhoso	195,75	192,23	3,52

O balanço de energia específico da carbonização do bagaço, envolvendo as operações de mistura, troca de calor, carbonização e filtragem, é descrito na Tabela 29.

Tabela 29 - Balanço energético da carbonização hidrotermal de bagaço de capim

Entradas:	massa (Kg)	tempera- tura (°C)	calor específico (kcal/Kg°C)	PCS (kcal/Kg)	quantidade de calor (kcal)
1. Bagaço de capim (matéria seca)					
- conteúdo energético	21,75	-		4.430	96.200
- calor sensível	21,75	25	0,3		0
2. Água contida					
- conteúdo energético	21,75			0	0
- calor sensível	21,75	25	1,0		0
3. Água de diluição					
- conteúdo energético	27,20			0	0
- calor sensível	27,20	25	1,0		0
4. Licor de recirculação					
- matéria seca					
- conteúdo energético	2,64			4.925	13.002
- calor sensível	2,64	50	0,3		20
5. Água contida					
- conteúdo energético	144,17			0	0
- calor sensível	144,17	50	1,0		3.604
Sub total					112.826

Energia contida nos materiais de entrada.....112.826 kcal

Energia externa fornecida ao sistema :

energia térmica7.000 kcal

energia elétrica700 kcal

Energia total de entrada no sistema120.526 kcal

Tabela 29 - Balanço energético da carbonização hidrotermal de bagaço de capim
(continuação)

Saídas:	massa (Kg)	tempera- tura (°C)	calor específico (kcal/Kg°C)	PCS (kcal/Kg)	quantidade de calor (kcal)
1. Carvão					
1.1. Matéria seca					
- conteúdo energético	13,05	-		5900	76.995
- calor sensível	13,05	50	0,3		98
1. 2. Água contida					
- conteúdo energético	8,7			0	0
- calor sensível	8,7	50	1,0	-	218
2. Licor pirolenhoso					
2.1. Matéria seca					
- conteúdo energético	3,52			4.295	17.336
- calor sensível	3,52	50	0,3		26
2.2. Água contida					
- conteúdo energético	192,23			0*	
- calor sensível	192,23	50	1,0		4.806
Sub total					99.479
Energia contida nos materiais de saída:.....					99.479 kcal
Perdas por radiação admitida:.....					6.000 kcal
Outras perdas , inclusive produtos voláteis presentes na fração					
líquida do licor pirolenhoso, por diferença:.....					15.047 kcal
Energia total de saída do sistema					120.526 kcal
*Não está sendo considerado o conteúdo energético dos produtos voláteis presentes na fração líquida do licor, o qual foi relacionado como outras perdas.					

5.4.1 - CONSIDERAÇÕES SOBRE AS PERDAS ENERGÉTICAS

A quantidade de calor envolvido no sistema é composta de aquecimento da água, da fração sólida e do licor de recirculação. Os parâmetros referentes a cada um desses encontra-se abaixo.

1. AQUECIMENTO DA ÁGUA Temp. inicial = 25 °C Temp. final = 260 °C $m = 27,20 + 21,75 = 48,95$ Kg $H1 \text{ (a } 25 \text{ °C)} = 25 \text{ kcal/Kg}$ $H2 \text{ (260 °C)} = 271,10 \text{ kcal/Kg}$ $H2 - H1 = 246,1 \text{ kcal /Kg}$ $Q = 12.046,6 \text{ kcal}$	2. AQUECIMENTO DA FRAÇÃO SÓLIDA DO BAGAÇO DE CAPIM Temp. inicial = 25 °C. Temp. final = 260 °C. $m = 21,75 \text{ Kg}$ $c = 0,30 \text{ kcal/Kg.°C}$ $Q = 1.533,40 \text{ kcal}$	3. AQUECIMENTO DO LICOR DE RECIRCULAÇÃO Temp.inicial = 50 °C Temp. final = 260 °C $m = 146,81 \text{ Kg}$ $H3 \text{ (a } 50 \text{ °C)} = 49,9 \text{ kcal/Kg}$ $H2 \text{ (a } 260 \text{ °C)} = 271,1 \text{ kcal/Kg}$ $H2-H3 = 221,2 \text{ kcal/Kg}$ $Q = 32.474,4 \text{ kcal}$
--	---	--

$$\text{Total} = 12.046,6 + 1.533,4 + 32.474,4 = 46.054,4 \text{ kcal}$$

O tempo de tratamento na temperatura de 260 °C é de 5 minutos. As perdas de calor admitidas são cerca de 13% do calor sensível envolvido, ou aproximadamente 6.000 kcal. Na Figura 36 encontra-se representado o balanço de energia da carbonização do bagaço de capim por via úmida.

5.5 - Tempo de ciclo

A análise dos experimentos laboratoriais mostra que a variável tempo se torna menos sensível à medida em que se aumenta a temperatura de processamento. Fixando-se a temperatura de processamento em 260 °C, tem-se os seguintes valores para o carvão produzido:

Figura 36 - Balanço energético da carbonização hidrotermal do capim

Tabela 30 - Índices do processo de carbonização hidrotermal do bagaço de capim

Índices					
tempo de residência (min)	rendimento em carvão (%)	rendimento em carbono (%)	aumento do poder calorífico superior (%)	rendimento energético (%)	PCS do carvão (kcal/kg)
5	51,06	62,76	28,30	60,85	5.674,7
15	47,87	61,70	32,76	58,30	5.872,0
45	42,55	57,45	35,74	55,74	6.003,8

obs: valores calculados sem recirculação do licor pirolenhoso

Os carvões produzidos em qualquer dos tempos de residência são adequados para uso como fonte de energia. Tecnicamente, não há grandes diferenças entre os três carvões, no entanto sob critério econômico, o tempo de 5 minutos apresenta menor custo de produção em função do maior rendimento em carvão, em carbono e energético.

O tamanho da instalação para determinada capacidade é função do tempo de tratamento, de modo que tempos menores possibilitarão instalações de menor porte e, portanto, menor investimento.

O tempo de residência do capim a 260 °C pode ser tomado como 5 minutos, sendo que o tempo de residência total na planta é dependente sua concepção, principalmente, das etapas de troca de calor e aquecimento da polpa.

5.6 - Especificação dos insumos

Os insumos principais do processo de carbonização por via úmida se restringem a bagaço de capim, água de processo, energia elétrica e energia térmica.

As quantidades para a produção de 1 tonelada de carvão, em base seca, são:

- bagaço de capim base seca1.666,66 Kg
- água de processo.....5.916,00 litros
- energia térmica536,39 kcal
- energia elétrica62,40 kWh

A energia elétrica foi avaliada a partir dos dados do processo PDF da JP Energyoy e Jaakko Poyry Engenharia Ltda, publicado em Rohrer (1980). A energia térmica para o sistema poderá ser fornecida pela queima de parte do carvão obtido ou dos gases recuperados do licor pirolenhoso.

As quantidades de capim necessárias, computando a perda na moagem são:

- capim (base seca)1.894,25 Kg
- capim com 75,28 % de umidade7.662,83 Kg

5.7- Caracterização pormenorizada de carvão do capim

Os carvões obtidos nos ensaios de carbonização hidrotermal foram caracterizados anteriormente através da análise imediata, análise elementar, poder calorífico superior e análise química da cinza. Essas análises revelaram que diferentes condições operacionais podem resultar em produtos adequados para a utilização como material energético.

As diferenças entre as propriedades do carvão de capim e aquelas obtidas no processamento à temperatura média de 260 °C, são pequenas. Desse modo, tomou-se para efeito de caracterização, um carvão obtido com recirculação do licor pirolenhoso e nas seguintes condições operacionais:

- temperatura260 °C
- tempo de residência a 260°C.....15 minutos
- recirculação do licor pirolenhoso.....3/4 do volume gerado

Os ensaios foram efetuados somente com capim objetivando mostrar o efeito da recirculação do licor pirolenhoso e aferir os parâmetros de qualidade, em uma amostra maior de carvão ainda que produzida em laboratório, e os rendimentos em massa do carvão produzido. Julgou-se desnecessário a aplicação deste procedimento para a turfa e bagaço de cana uma vez que apresentariam comportamento análogo ao capim.

Para tanto foram efetuados 17 ensaios, identificados na Tabela 31, sendo que os de número 1 a 5 permitiram produzir um licor pirolenhoso típico de recirculação e, os 6 ao 17 proporcionaram amostra para determinação da análise imediata, granulométrica, poder calorífico superior, análise química da cinza e densidade.

Os ensaios de caracterização são listados e comentados a seguir.

Tabela 31- Ensaios de carbonização hidrotermal de capim com recirculação do licor pirolenhoso

Ensaio no	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Pressão (MPa)	massa de capim (g)	massa de liquido de recirculação (g)	massa de agua adicionada (g)	massa do carvão após filtragem (g)	massa do carvão apos secagem (g)	umidade do carvão (%)	rendimento em carvão (%)
01	15	260	5,30	155	-	543,4	124,35	40,10	67,65	57,42
02	15	260	5,30	155	543,4		122,00	43,69	64,19	62,56
03	15	260	5,30	155	543,4		122,30	41,23	63,83	63,33
04	15	260	5,30	155	407,6	135,8	113,70	43,08	62,11	61,68
05	15	260	5,30	155	407,6	135,8	117,40	44,66	61,96	63,94
06	15	260	5,30	155	407,6	135,8	117,90	46,90	60,22	67,15
07	15	260	5,30	155	407,6	135,8	116,20	41,96	63,89	60,08
08	15	260	5,65	155	407,6	135,8	99,00	40,14	59,45	57,47
09	15	260	5,30	155	407,6	135,8	119,10	45,51	61,79	65,16
10	15	260	6,00	155	407,6	135,8	88,10	38,00	56,87	54,41
11	15	260	5,30	155	407,6	135,8	93,30	38,21	59,05	54,71
12	15	260	5,83	155	407,6	135,8	85,10	38,70	54,52	55,41
13	15	260	5,30	155	407,6	135,8	112,80	42,87	61,99	61,38
14	15	260	5,30	155	407,6	135,8	101,90	41,44	59,33	59,33
15	15	260	5,65	155	407,6	135,8	106,00	41,84	60,53	59,90
16	15	260	5,65	155	407,6	135,8	95,30	40,06	57,96	57,36
17	15	260	5,30	155	407,6	135,8	106,40	42,11	60,42	60,29
media	15	260	5,46	155	407,6	135,8	103,42	41,48	59,67	59,39

5.7.1 - RESISTÊNCIA FÍSICA

O carvão obtido pelo processo de carbonização em via aquosa é pulverulento, de modo que medidas da resistência à compressão ou à tração não apresentam significado prático.

Eventualmente, o índice de trabalho na moagem (WI) poderá apresentar valores que tenham correspondência de aplicação na prática. Este índice não foi determinado em razão de não se dispor de massa de material suficiente. Qualitativamente estima-se que a resistência física do produto obtido seja baixa.

5.7.2 - REATIVIDADE

O ensaio de reatividade objetiva-se medir a velocidade de reação dos gases oxidantes com o carbono. São utilizados normalmente oxigênio ou gás carbônico ou misturas de ambos, em temperaturas normalmente altas (acima de 600 °C).

No caso do capim, tem-se um carvão produzido a baixa temperatura com alto teor de matérias voláteis, que quando submetido ao ensaio de reatividade apresenta eliminação intensa destes voláteis em temperaturas inferiores às da realização do ensaio (durante a fase de aquecimento), com conseqüente modificação de suas características. Deste modo, os ensaios de reatividade, padronizados para carvões e coques, não se aplicam a este carvão.

5.7.3 - DENSIDADE

Os ensaios de determinação de densidade compreenderam determinação de densidade de empilhamento e de densidade real. A densidade aparente deixou de ser determinada em razão das características granulométricas apresentadas pelo carvão. Os resultados são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Densidade real e de empilhamento do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim

<i>Densidade</i>	<i>g/cm³</i>
de empilhamento (1)	0,64
real (2)	1,40

(1) Ensaio efetuado com utilização de proveta graduada e material submetido a 5 batidas para acomodação.

(2) Ensaio efetuado segundo NBR 8112-86

6.7.4 - ANÁLISE IMEDIATA

Os resultados da análise imediata são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Análise imediata do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim

<i>Determinações</i>	<i>%</i>
- matéria volátil (1)	58,62
- cinza (2)	4,92
- carbono fixo (3)	36,46

(1) ABNT-NBR 8290-83 (2)ABNT-NBR 8289-83

(3) ABNT-NBR 8299-83

6.7.5 - ANÁLISE DA CINZA

Os resultados da análise da cinza do carvão são apresentados na Tabela 33.

Tabela 34 - Análise química da cinza do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim

<i>Elemento</i>	<i>Teor (%)</i>
K (1)	5,22
P (2)	0,37
Mg (1)	1,08
Fe (1)	2,62
Na (1)	0,26
Mn (1)	0,08
Ca (1)	2,58
Al (1)	0,65
Si (3)	37,35

(1) Espectrofotometria de absorção atômica

(2) Espectrocolorimetria

(3) Gravimetria

5.7.6 - PODER CALORÍFICO SUPERIOR

O poder calorífico superior do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim foi de 26,00 MJ/Kg (6.208,80 kcal/Kg).

5.7.7 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica do carvão de capim encontra-se na Tabela 35.

Tabela 35 - Análise granulométrica do carvão resultante da carbonização hidrotermal do capim

<i>Peneiras</i>		<i>Porcentagem retida</i>	
<i>ASTM</i>	<i>ABNT</i>	<i>Por</i>	<i>Acumulad</i>
<i>(mesh)</i>	<i>(mm)</i>	<i>peneira</i>	<i>a</i>
		<i>(%)</i>	<i>(%)</i>
16	1,2	0,00	0,00
20	0,840	0,14	0,14
30	0,600	3,82	3,96
40	0,420	8,12	12,08
50	0,300	10,26	22,34
70	0,210	15,12	37,46
100	0,150	12,86	50,28
140	0,105	12,01	62,29
200	0,075	10,33	72,62
270	0,053	7,77	80,39
400	0,037	6,72	87,11
Fundo	0,000	12,89	100,00

7. CONCLUSÕES

O desenvolvimento das sociedades modernas pressupõe elevada disponibilidade de energia, existindo uma correlação entre o Produto Interno Bruto (PIB) e a demanda energética total. Os países em desenvolvimento apresentam PIB e Consumo Energético Per Capita cerca de 15% dos valores apresentados pelos países desenvolvidos.

No caso brasileiro a oferta interna de energia nos classifica como país em desenvolvimento, que deve implementar sua disponibilidade energética interna em nível intenso visando alavancar o seu desenvolvimento. É tão intensa a necessidade de aumentarmos a disponibilidade energética que todas as formas de geração de energia devem ser consideradas.

Considerando-se o exposto acima e condições ambientais propícias ao rápido crescimento de espécies vegetais existentes no País, permitem concluir que a vocação nacional de buscar na biomassa alternativas energéticas deve ser estimulada. Dentre as várias espécies vegetais passíveis de serem consideradas como fonte de matéria prima destacam-se algumas gramíneas forrageiras, tais como o *Pennisetum Purpureum Shum* (capim elefante) e o *Panicum Maximum Jacq.* (capim colônia), que tem como característica alta produtividade agrícola. Essas biomassas possuem normalmente alta umidade e sua utilização está condicionada principalmente à eliminação da umidade de forma a não comprometer o balanço energético de seu processamento em fonte energética.

Além destas biomassas, a turfa e o bagaço de cana constituem-se em alternativas energéticas, em razão de grande disponibilidade. Esses materiais, assim como os capins, caracterizam-se por possuírem alto teor de umidade e não disporem de processo plenamente definido para seu aproveitamento.

Para o aproveitamento de matérias primas de origem vegetal com altos teores de umidade foi proposto e avaliado o processo de carbonização hidrotermal, o qual já havia sido utilizado para promover desaguamento de turfa.

A carbonização hidrotermal consiste basicamente no aquecimento da matéria prima em meio aquoso em temperatura entre 180 e 300 °C, pressões de 1,55 a 9,90 MPa e tempo de residência inferior a 45 minutos. Durante a carbonização ocorrem reações hidrolíticas e pirolíticas, onde a estrutura da biomassa é completamente destruída e uma suspensão de partículas muito finas de carvão e um licor pirolenhoso são produzidos. As características do carvão e do licor pirolenhoso dependem da matéria prima e das condições da carbonização (temperatura, pressão e tempo de carbonização).

O capim possui elevado percentual de cinzas, 7,3% em base seca, que poderiam ser incorporadas ao carvão prejudicando sua qualidade. Por este motivo existe a necessidade da redução deste percentual previamente à carbonização. Verificou-se que submetendo-se o

capim a esmagamento prévio obtém-se um suco e um bagaço, e que neste suco concentram-se os elementos minerais, diminuindo em cerca de 45% o teor de cinzas no bagaço. Adicionalmente, o esmagamento possibilita a recuperação no suco de cerca de 68% das proteínas originalmente contidas no capim, que podem ser recuperadas como um concentrado proteico, possivelmente de custo.

A carbonização hidrotermal promove uma lixiviação adicional das cinzas durante o processo, resultando em carvão com teores de cinza menor do que seria esperado num processo de carbonização seca (processo tradicional), com isto melhorando a qualidade do carvão. Esta redução pode atingir valores de até 78%.

Além do menor teor de cinzas, a carbonização permite que se obtenha um carvão com baixo teores de umidade através de desaguamento mecânico, com baixo dispêndio de energia. A facilidade de desaguamento aumenta com o aumento de temperatura de carbonização, podendo-se atingir valores de 22% de umidade; o tempo de carbonização apresenta pouca influência nos resultados finais.

O rendimento em carvão é decrescente com o aumento da temperatura, sendo pouco influenciado pelo período de carbonização. O rendimento em carvão variou de 66 a 84% para a turfa, de 31 a 68% para o bagaço de cana e de 33 a 82% para o capim.

Em termos energéticos, o carvão contém grande parte da energia contida na matéria prima. Dependendo das condições de carbonização, o rendimento energético atinge valores de 80% e de forma concentrada já que, o poder calorífico superior do carvão aumenta cerca de 35%, 40% e 45% em relação à matéria prima, respectivamente, para a turfa, bagaço de cana e capim.

O carvão gerado na carbonização hidrotermal é um sólido friável que, quando produzido em temperatura superior a 260 °C apresenta-se sob a forma de suspensão de finas partículas. Neste estado poderá ser utilizado diretamente em maçarico ou usado como redutor, injetado nas ventaneiras dos alto-fornos.

Em relação ao meio ambiente, o processo hidrotermal pode ser considerado não agressivo, pois não apresenta emissões poluentes existentes nos processos de carbonização tradicionais. As emissões concentram-se no licor pirolenhoso. Este, contém alcatrões e outras substâncias, das quais o ácido acético é predominante. Pode ser recirculado no processo em cerca de 75%, sendo que o restante - 25% - deve ser tratado visando a recuperação de produtos químicos ou adequa-lo ao descarte.

O período de carbonização, nas condições de pressão e temperatura estudadas, é relativamente curto se comparado a horas dos processos tradicionais; são cerca de 15 minutos contra algumas horas.

O processo de carbonização consome cerca de 20% da energia contida na matéria prima.

Em função do exposto a carbonização hidrotermal constitui-se em processo tecnicamente viável para o aproveitamento de matérias primas de origem orgânica e altos teores de umidade, como a turfa, o bagaço de cana e o capim elefante, gerando como principal produto, carvão, e como subproduto licor pirolenhoso.

8 - Bibliografia

- ANDRADE, J.B. Produtividade Comparada de Capins Tropicais. Nova Odessa: Instituto de Tecnologia de Nova Odessa,
- BORGES, J. Turfa no ramal de São Paulo da Estrada de Ferro Central do Brasil. Rio de Janeiro, DNPM/DFPM. (Generalidades sobre a Turfa, Avulso nº 70).
- CAMARGO, R.B.A. Suco de Capim na Alimentação Humana. *Coleção Natureza*, São Paulo, 10, 1991.
- CAIELLI, E. Extração de Proteína Vegetal de Gramíneas. Inédito.
- CESP - Cia Energética de São Paulo. Estudo de viabilidade para Implantação de uma lavra de turfa em escala comercial - Vale do Paraíba, SP. São Paulo: Jaakko Poyry Engenharia, 1984. Relatório Jaakko Poyry Engenharia nº 9511-Ejpe-02, OS 0002, 1984
- GONÇALEZ, D.A. & MENEZES, G.M. de. O Capim Elefante (*Elephant grass*). *Zootecnia*, Nova Odessa (SP), 20 (4): 229-259, out./dez., 1982.
- HAANEL, B.F. Peat: Its Manufacture and Uses. In: FINAL REPORT BY THE MINES BRANCH, 1925, Ontario. Report ... Ontario: Department of Mines of Ontario, Canada, 1925.
- HAKULIN, B. Mechanical Dewatering of Peat. In: Conference on Management Assessment of Peat as an Energy Resource, 1979, Arlington, Va. Anais ... Arlington, Va.: 22-24 de julho de 1979.
- HARRISON, R.C. Mechanical Dewatering of Peat. In: Conference on Management Assessment of Peat as an Energy Resource, 1979, Arlington, Va. Anais ... Arlington, Va.: 22-24 de julho de 1979.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Estudo das possibilidades de aproveitamento da turfa no Estado de São Paulo. São Paulo: IPT, 1979. Relatórios IPT nºs 12.761/79, 1979.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Projeto de otimização de biomassas como energético e redutor. São Paulo: IPT, 1993. 20 p. Relatórios IPT nºs 31.391/93 e 31.612/93, 1993.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Projeto Estudo sobre obtenção de carvão vegetal aglomerado a partir de capim colônio. São Paulo: IPT, 1993. 20 p. Relatório IPT nº 30 346, 1993.
- ISAIAS, C.N. - Potencial de Biomassa de Cana como Matéria Prima em São Paulo. Publicação especial do Centro de Tecnologia Copersucar, 1991.

- JOHSON, B.V. et al. An Environmentally Sound Peat Harvesting Technique. In: Conference on Management Assessment of Peat as an Energy Resource, 1979, Arlington, Va. Anais ... Arlington, Va.: 22-24 de julho de 1979.
- KARCHINOV, V.S. et al. The Production of Peat Semi Coke and Its Utilization for Manufacturing Activated Charcoal an in Electrothermal Process. In: 5th International Peat Congress, 1976, Paznan, Poland. Anais ... Paznan, Poland: 21-24 de setembro de 1976.
- KNOWLTON, T.M. et al. Solvent Extraction of Peat. In: Symposium of Peat as an Energy Alternative. Anais ... Arlington, Va.: 1-3 de dezembro de 1980.
- KOPSTEIN, M.J. Peat Dewatering: Management Assessment of Peat as Energy Resource. In: Conference on Management Assessment of Peat as an Energy Resource, 1979, Arlington, Va. Anais ... Arlington, Va.: 22-24 de julho de 1979.
- LAUKANNEN, T. Peat Coking and Fluidized Bed Combustion of Peat. In: Finn Energy Conference, 1979, Chicago. Anais ... Chicago: jan. 1979.
- LINDSTRON, R.O. et al. Dewatering of Peat Using Decanter Centrifuges in Hydraulic Schemes. In: Symposium of Peat as an Energy Alternative. Anais ... Arlington, Va.: 1-3 de dezembro de 1980.
- MENSINGER, M.C. (IGT-CHICAGO,IL.). Wet Carbonizatio of Peat: State of Art Review. In: Symposium of Peat as an Energy Alternative, 1980, Arlington, Va. Anais ... Arlington: 1-3 de dezembro de 1980. p. 250-279.
- MIDWEST REASEARCH INSTITUTE. European Peat Tecnology. Minneapolis, 1976.
- MINFRA - Mistério da Infraestrutura. Balanço Energético Nacional 1990 - Ano Base 1989. Brasília, MINFRA, 1990. (Publicação especial).
- MURDOCH, D.K. Peat Dewatering. In: Conference on Management Assessment of Peat as an Energy Resource, 1979, Arlington, Va. Anais ... Arlington, Va.: 22-24 de julho de 1979.
- MYREEN, B. "The Peat Fuel Process "- Finn Energy 79 - Chicago , II. 25 de janeiro de 1979.
- PEDREIRA, J.V.S. - Crescimento Estacional do Capim Pangola e Colônia na região de Barretos. *Zootecnia*, Nova Odessa (SP), 17 (4): 215-233, out./dez. 1979.
- PEDREIRA, J.V.S. Crescimento Estacional de Vinte e Cinco Espécies ou Variedades de Capins. *B. Industr. anim*, Nova Odessa (SP), 38 (2): 117-143, jul./dez. 1979.
- PEDREIRA, J.V.S. Crescimento Estacional dos Capins Colônia, Gordura, etc. *Ins. Anim.*, Nova Odessa (SP): 30(i); 59-145, jan./jul. 1973.
- PHILLIPS, R.C. Peat Dewatering an Upgrading by the Koppelman Process. In: Conference on Management Assessment of Peat as an Energy Resource, 1979, Arlington, Va. Anais ... Arlington, Va.: 22-24 de julho de 1979.

- PUNWANI, D.V. & SCHORA, F.C. Peat, A Energy Alternative. In: Third World Conference (Section Energy), Arlington, Va., 1980. Anais ... Arlington: 28.07.1980.
- ROHRER, J.W. et al. Wet Carbonized Peat - Fuel and Feedstock. In: Symposium of Peat as an Energy Alternative, 1980, Arlington, Va. Anais ... Arlington: 1980. p. 281-302.
- RUCKSTUHL, K. Drying and Densification of Peat In: Conference on Management Assessment of Peat as an Energy Resource, 1979, Arlington, Va. Anais ... Arlington, Va.: 22-24 de julho de 1979.
- SWEDISH PEAT CO. Wet Carbonization of Peat. Sasdala, Sweden: 1960.
- TSAROS, C.L. - Peat Dewatering an Overview. In: Symposium of Peat as an Energy Alternative, 1980, Arlington, Va. Anais ... Arlington: 1980. p. 281-302.
- TERRES,E. Dehydration and Upgrading of Peat and Lignite. *Brenstoff Chemie*, 33: 1-12, 1952.
- UDDGREN, O. The Swedish Peat Industry - Yesteday, Today and Tomorrow. In: International Symposium on the Peat Industry, 1978, Espoo, Finland. Anais ... Espoo, Finland: ago. 1978.
- USBERTI, FILHO, J.A. et al. Produção de Etanol de Gramíneas Forrageiras Tropicais. *Pesq. Agr. Pec. Bras.*, Brasília, 23 (2): 175-187, fev. 1988.
- SEALOCK JR,L.I. et al. Low Temperature Conversion of High Moisture Biomass. Pacific Northwest Laboratory, Richland (Washington), 99352, 1988.