



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
INDUSTRIAL**

JOSÉ AIRTON DE MATTOS CARNEIRO JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM
REATOR EM BATELADA PARA TORREFAÇÃO DE
BIOMASSA**

Orientador:

Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres

Co-orientador:

Profa. Dra. Carine Tondo Alves

Salvador - Bahia
2015

JOSÉ AIRTON DE MATTOS CARNEIRO JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM REATOR EM
BATELADA PARA TORREFAÇÃO DE BIOMASSA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como requisito para a obtenção de título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador:

Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres

Co-orientador:

Profa. Dra. Carine Tondo Alves

Salvador - Bahia
2015

C289 Carneiro Junior, José Airton de Mattos

Desenvolvimento experimental de um reator em batelada para torrefação de biomassa / José Airton de Mattos Carneiro Junior. – Salvador, 2015

74f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Ednildo Andrade Torres;

Co-orientador: Profa. Dra. Carine Tondo Alves

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica, 2015.

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Energia da biomassa. 3. Biomassa. 4. Combustíveis. 5. Desenvolvimento sustentável. I. Torres, Ednildo Andrade. II. Alves, Carine Tondo. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

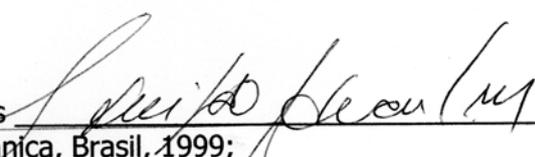
CDD: 333.79

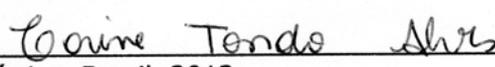
**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE UM REATOR EM BATELADA
PARA TORREFAÇÃO DE BIOMASSA**

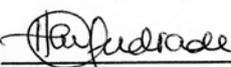
JOSÉ AIRTON DE MATTOS CARNEIRO JÚNIOR

Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Ednildo Andrade Torres 
Doutor em Engenharia Mecânica, Brasil, 1999;

Prof^a. Carine Tondo Alves 
Doutora em Engenharia Química, Brasil, 2012;

Prof^a. Heloysa Martins Carvalho Andrade 
Doutora em Química, Brasil, 1983;

Prof. Alex Álisson Bandeira Santos 
Doutor em Energia e Meio Ambiente, Brasil, 2010;

Salvador, BA - BRASIL
Agosto/2015

Conforme resolução do Programa, o conjunto de orientadores teve a representação de 1 (um) único voto no parecer final da banca examinadora.

Dedico este trabalho à Deus, por sempre mostrar-me a beleza da vida.

Aos meus pais, pelos ensinamentos, apoio e estímulo.

A minha esposa, pelo amor, carinho e companheirismo, pois sem ela não teria forças para encarar essa jornada.

Ao grande Josito (*in memoriam*), pela amizade, alegria e aos valores que nunca esquecerei.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sua plenitude em minha vida.

Aos meus pais, irmãos, minha esposa Mailena Dourado, meu filho Théo e a toda minha família que, com muito carinho, não mediram esforços para que eu concluísse esta etapa da minha vida.

Ao prof. Ednildo Andrade Torres pela orientação e ensinamentos, paciência, estímulo e confiança no desenvolvimento deste trabalho, obrigado pela inspiração.

À profa. Carine Tondo Alves pela amizade, incentivo, apoio e orientações, obrigado por apresentar-me a vida acadêmica.

Aos amigos Marcelo Silva, Juliano Lopes e Ângela Lima por nossas conversas profissionais, pessoais e filosóficas regadas com o cafezinho da tarde, pelas orientações e com quem dividi minhas angústias e alegrias.

Aos amigos e colegas do Laboratório de Energia e Gás - LEN, pelo incentivo e apoio constantes, em especial, Verinha, Gilson Fernandes, Ane Borges, Maria Cândida, Eduardo Teles, Eduardo Barata, Vitor (Dr. Water), Fernando Carneiro, Luiza Trigo, Bob, Josenildes Gomes, Marcos Fábio, José Alexandre, Pieter Jong e Seu Edvaldo.

À profa. Heloysa Andrade e ao Raimundo Medeiros pelo apoio e suporte nos ensaios de caracterização das biomassas.

Ao IFBA *Campus* Irecê e aos meus alunos, pelo apoio e compreensão.

À todos os amigos e colegas que direta ou indiretamente contribuíram com este trabalho.

“... Em cada passo que eu der, cada estrada que eu trilhar, todo caminho que eu escolher, a Tua mão me guiará...”.

(Mensagem Bíblica)

RESUMO

A constante busca por combustíveis e tecnologias mais limpas vem tomando a cada dia mais espaço nas discussões científicas e econômicas, com isso as energias renováveis e o desenvolvimento tecnológico do uso da biomassa avançam como soluções viáveis para suprir essa demanda desejada. O processo de torrefação é uma tecnologia que vem sendo estudada para o tratamento térmico da biomassa com fins energéticos já que a biomassa *in natura* apresenta algumas características indesejáveis, tais como a baixa densidade energética, alto teor de umidade e natureza higroscópica, o que dificulta o seu uso direto. O processo de torrefação é uma alternativa para converter a biomassa em um combustível de maior valor energético, melhorando as propriedades físico-químicas e energéticas da biomassa. Neste contexto, este trabalho foi desenvolvido a partir das seguintes etapas: 1) levantamento bibliográfico a partir de pesquisas e análises científicas; 2) concepção e desenvolvimento do reator laboratorial de torrefação; 3) ensaios de torrefação, e; 4) caracterização e análise das biomassas *in natura* e torrefeita a partir da análise imediata, análise elementar e poder calorífico. As biomassas residuais utilizadas foram o *Eucalyptus grandis* e a *Prosopis juliflora*. Assim, para a definição do reator de torrefação foram realizadas considerações baseadas nos principais fatores que influenciam o processo de torrefação, no tipo de aquecimento e no volume de biomassa a ser utilizado, utilizando o processo em batelada. Nos testes de validação do sistema, composto pelo reator de leito convectivo e equipamentos auxiliares, foi utilizado a insuflação de ar comprimido e temperaturas de 150°C, 250°C e 350°C, com vazão de 10 litros/minuto, durante 150 minutos, obtendo variação nas temperaturas de *setup* em torno de ± 10 °C e taxa de aquecimento médio de 5°C por minuto. Para a padronização dos ensaios físico-químicos e de termoconversão, todas as amostras foram inicialmente secas a 105°C durante 24 horas, conforme norma ASTM E 871-82. A partir disso, os ensaios de torrefação foram conduzidos nas temperaturas de 190°C, 230°C, 270°C e 310°C, em ambiente inerte, tempo de reação 30 minutos, utilizando cerca de 50 gramas de eucalipto ou algaroba, na forma de cavacos ou chips. Foi verificada a melhoria das propriedades físico-químicas e energéticas do eucalipto e algaroba, sendo que o teor de voláteis diminuiu gradativamente com o aumento da temperatura e o teor de cinzas foi comparativamente baixo, o carbono fixo residual tendeu a aumentar no produto torreficado em comparação com a madeira *in natura*. O poder calorífico superior após a torrefação apresentou incrementos de 40,5% e 64,4% para o eucalipto e a algaroba, respectivamente, variando de 18,13 MJ.kg⁻¹ a 25,48 MJ.kg⁻¹ para o eucalipto e de 16,30 MJ.kg⁻¹ a 26,85 MJ.kg⁻¹ para a algaroba. No entanto, vale lembrar que o produto final é também influenciado por efeitos de diferentes tipos e diâmetros dos reatores, diferentes temperaturas e tempos de residência utilizados, assim como a sua qualidade depende das propriedades físicas da biomassa utilizada, como o tamanho, forma, densidade e orientação das fibras.

Palavras-chave: Biomassa. Termoconversão. Protótipo.

ABSTRACT

The constant search for fuels and cleaner technologies has been taking every day more space in scientific and economic discussions, with that renewable energy and technological development advancing the use of biomass as viable solutions to meet this demand desired. The torrefaction process is a technology that has been studied for the thermal treatment of biomass for energy purposes as biomass in nature presents some undesirable characteristics, such as low energy density, high moisture and hygroscopic, which hampers their direct use. The torrefaction process is an alternative for converting biomass into a higher heat value fuel to improve the physicochemical properties and biomass energy. In this context, this work was developed from the following steps: 1) literature from research and scientific analysis; 2) design and development of laboratory roasting reactor; 3) torrefaction tests, and; 4) characterization and analysis of *in nature* and torrefied biomass from the proximate analysis, elemental analysis and calorific value. Residual biomass used were *Eucalyptus grandis* and *Prosopis juliflora*. Thus, for the torrefaction reactor defining considerations were made based on key factors that influence the torrefaction process, the type of heating and the volume of biomass to be used, using the batch process. System validation tests at, comprises the convective bed reactor and auxiliary equipment was used compressed air and temperatures of 150 °C, 250 °C and 350 °C, with a flow rate of 10 liters/min for 150 minutes obtaining setup variation in temperatures around ± 10 °C and average heating rate of 5 °C per minute. To standardize the physicochemical tests and thermoconversion, all samples were initially dried at 105 °C for 24 hours, according to ASTM E 871-82. From this, the torrefaction tests were conducted at temperatures of 190 °C, 230 °C, 270 °C and 310 °C, under inert atmosphere, reaction time 30 minutes, using about 50 grams of *Eucalyptus grandis* or *Prosopis juliflora*, in form of chips. It has been found to improve the physicochemical properties and energy of eucalyptus and prosopis, and the volatile content gradually decreased with increasing temperature, and the ash content was comparatively low, fixed carbon it was increased in the product compared with in nature biomass. The high heat value after torrefaction showed increases of 40,5% and 64,4% for *Eucalyptus g.* and *Prosopis j.*, respectively, from 18,13 MJ.kg⁻¹ to 25,48 MJ.kg⁻¹ for *Eucalyptus g.* and 16,30 MJ.kg⁻¹ to 26.85 MJ.kg⁻¹ for *Prosopis j.*. However, it is worth noting that the final product is also influenced by the effects of different types and diameters of the reactors, different temperatures and reaction times used and the quality depends on the physical properties of the biomass used, such as size, shape, density and fiber orientation.

Keywords: Biomass. Thermoconversion. Process Reactor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Gráfico da oferta mundial de energia por fonte	15
Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte	16
Figura 3 – Distribuição de usinas termelétricas a base de biomassa no Brasil	17
Figura 4 – Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa e principais produtos	22
Figura 5 – Parede celular vegetal e composição lignocelulósica da biomassa	24
Figura 6 – Alterações químicas e estruturais da biomassa a diferentes temperaturas	25
Figura 7 – Estágios da etapa de aquecimento da biomassa até temperaturas de torrefação seguido do resfriamento à temperatura ambiente	27
Figura 8 – Produtos e subprodutos obtidos após a torrefação da biomassa	29
Figura 9 – Fenômenos de transporte ocorridos na biomassa cilíndrica torrefeita	33
Figura 10 – Conceito básico de torrefação com aquecimento direto	35
Figura 11 – Conceito básico de torrefação com aquecimento indireto	36
Figura 12 – Sistema de torrefação em bancada com reator de leito fixo	36
Figura 13 – Sistema de torrefação laboratorial com aquecimento indireto	37
Figura 14 – Sistema de torrefação com reator de leito fixo e combustão de <i>looping</i> químico	38
Figura 15 – Sistema de torrefação em batelada sem fluxo contínuo de gás inerte	38
Figura 16 – Sistema de torrefação em batelada com acompanhamento da perda de massa da biomassa	39
Figura 17 – Sistema de torrefação com aquecimento por microondas	39
Figura 18 – Distribuição da área de plantios de Eucalyptus e Pinus por estado, 2012	41
Figura 19 – Árvore de algaroba, vagem e sementes	43
Figura 20 – Detalhamento do planejamento das atividades realizadas	45
Figura 21 – Materiais da metalurgia e montagem do sistema de torrefação	47
Figura 22 – Cavacos <i>in natura</i> de eucalipto (a) e algaroba (b)	48
Figura 23 – Tríade de considerações para definição do reator de torrefação	53
Figura 24 – Diagrama do sistema de torrefação	54
Figura 25 – Concepção do reator laboratorial de torrefação	54
Figura 26 – Metalurgia, montagem do reator de torrefação e testes	55

laboratoriais

Figura 27 – Gráfico dos testes de validação do sistema de aquecimento à temperaturas de 150°C, 250°C e 350°C	55
Figura 28 – Metalurgia e montagem da estrutura de sustentação do sistema de torrefação	56
Figura 29 – Biomassas torrefeitas à diferentes temperaturas	57
Figura 30 – Relação entre as frações H/C e O/C do eucalipto e algaroba	61
Figura 31 – Influência da temperatura no comportamento do teor de voláteis e carbono fixo na torrefação do eucalipto	62
Figura 32 – Influência da temperatura no comportamento do teor de voláteis e carbono fixo na torrefação da algaroba	62
Figura 33 – Influência da temperatura no poder calorífico e umidade do eucalipto e algaroba	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características físico-químicas de diferentes combustíveis sólidos	28
Tabela 2 – Modelos de reatores para torrefação em escala de bancada	40
Tabela 3 – Características energéticas de espécies de <i>Eucalyptus</i>	42
Tabela 4 – Características energéticas da madeira e da casca de diferentes espécies de <i>Prosopis</i>	44
Tabela 5 – Considerações iniciais do reator e sistema de torrefação	53
Tabela 6 – Análise imediata e análise elementar das biomassas cruas de eucalipto e algaroba	58
Tabela 7 – Poder calorífico superior e inferior das biomassas cruas de eucalipto e algaroba.	59
Tabela 8 – Análise imediata e análise elementar das biomassas torrefeitas de eucalipto e algaroba	60
Tabela 9 – Poder calorífico superior e inferior das biomassas torrefeitas de eucalipto e algaroba	62

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	19
2.1 OBJETIVO GERAL	19
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE	20
3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS	20
3.2 COMPONENTES DA BIOMASSA	23
3.3 PROCESSO DE TORREFAÇÃO	26
3.3.1 Definições	26
3.3.2 Principais Fatores de Influência na Torrefação	30
3.3.2.1 <i>Temperatura</i>	30
3.3.2.2 <i>Tempo de residência</i>	31
3.3.2.3 <i>Taxa de aquecimento</i>	32
3.3.2.4 <i>Tamanho da partícula</i>	32
3.3.2.5 <i>Composição da atmosfera de trabalho</i>	34
3.3.2.6 <i>Composição da biomassa</i>	34
3.3.3 Sistemas Laboratoriais de Torrefação	34
3.4 O EUCALIPTO E A ALGAROBA	41
3.4.1 O Eucalipto	41
3.4.2 A Algaroba	42
4 MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 CONCEPÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO REATOR	45
4.1.1 Concepção do Reator e Layout do Sistema	45
4.1.2 Metalurgia e Montagem	46
4.1.3 Testes de Validação	48
4.2 ENSAIOS DE TORREFAÇÃO	48
4.3 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS BIOMASSAS <i>IN NATURA</i> E TORREFEITA	49
4.3.1 Análise Imediata	49
4.3.1.1 <i>Umidade</i>	49

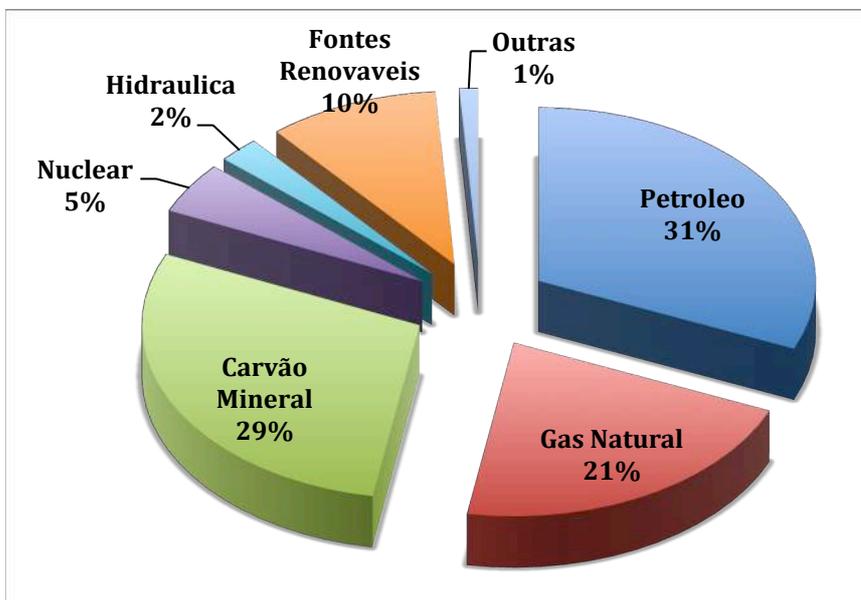
4.3.1.2 Teor de cinzas e carbono fixo	50
4.3.1.3 Teor de materiais voláteis	50
4.3.2 Análise Elementar	51
4.3.3 Poder Calorífico	51
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
5.1 CONCEPÇÃO, METALURGIA, MONTAGEM E TESTES DO SISTEMA	53
5.2 ENSAIOS DE TORREFAÇÃO	57
5.3 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS BIOMASSAS	58
5.3.1 Caracterização das Biomassas <i>In Natura</i>	58
5.3.2 Caracterização das Biomassas Torrefeitas	59
6 CONCLUSÃO	64
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A - Dados dos testes de validação do sistema de aquecimento	72

1 INTRODUÇÃO

A independência e autossuficiência no setor de energia é um indicador do desenvolvimento socioeconômico de qualquer país. Temos visto que nos últimos anos as pesquisas e prospecções tecnológicas têm-se voltado ao uso de fontes de energia não convencionais. A utilização da biomassa, de forma regulada e eficiente, tem sido bastante impulsionada por ser um recurso renovável e de grande abundância no Brasil. A vantagem sobre as demais fontes de energia limpa é que a biomassa pode ser utilizada para gerar calor e energia de acordo com a exigência industrial ou doméstica, sendo assim um pilar de grande importância no fornecimento de energia atual e futuro (BASU et al., 2014), além dos aspectos positivos causados ao meio ambiente pela redução da utilização de derivados fósseis.

Conforme dados da Agência Internacional de Energia a oferta mundial de energia por fonte possui um correspondente total em cerca de $13.113 (\times 10^6)$ tep¹ (Figura 1).

Figura 1 – Gráfico da oferta mundial de energia por fonte



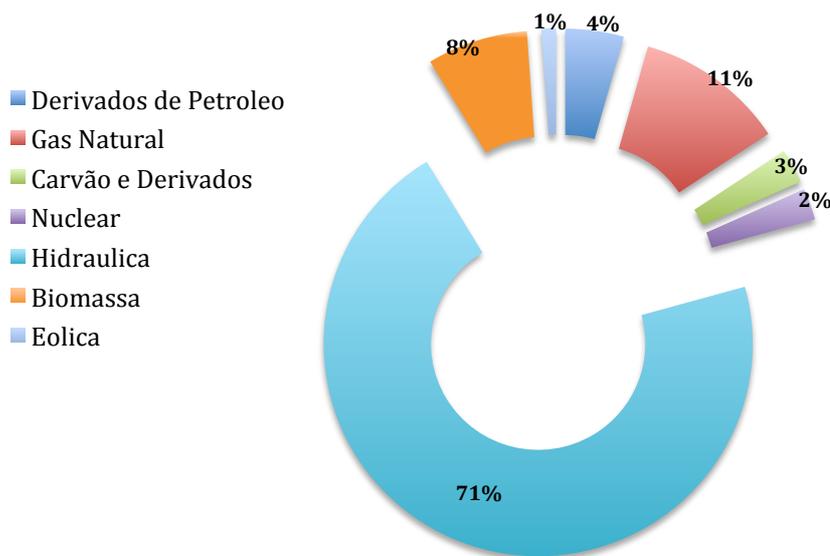
Fonte: Adaptado de Agência Internacional de Energia (2014)

Quando observado em nível nacional, o Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que corresponde a

¹ Tep : Tonelada Equivalente de Petróleo

71% da oferta interna de energia elétrica. As fontes renováveis representam 80% da oferta interna de eletricidade no Brasil, que é a resultante da soma dos montantes referentes à produção nacional mais as importações, que são essencialmente de origem renovável (Figura 2).

Figura 2 – Oferta interna de energia elétrica por fonte



Fonte: Balanço Energético Nacional (2014)

De acordo com dados do Ministério de Minas e Energia (2014) em 2013 a participação da biomassa na geração de energia elétrica no Brasil representou cerca de 8,0%. Além do bagaço da cana-de-açúcar, o licor negro e os resíduos florestais são as principais biomassas utilizadas para a geração de energia elétrica no Brasil. A biomassa de base florestal representa cerca de 15,8% da geração de energia elétrica a partir de biomassa (Figura 3).

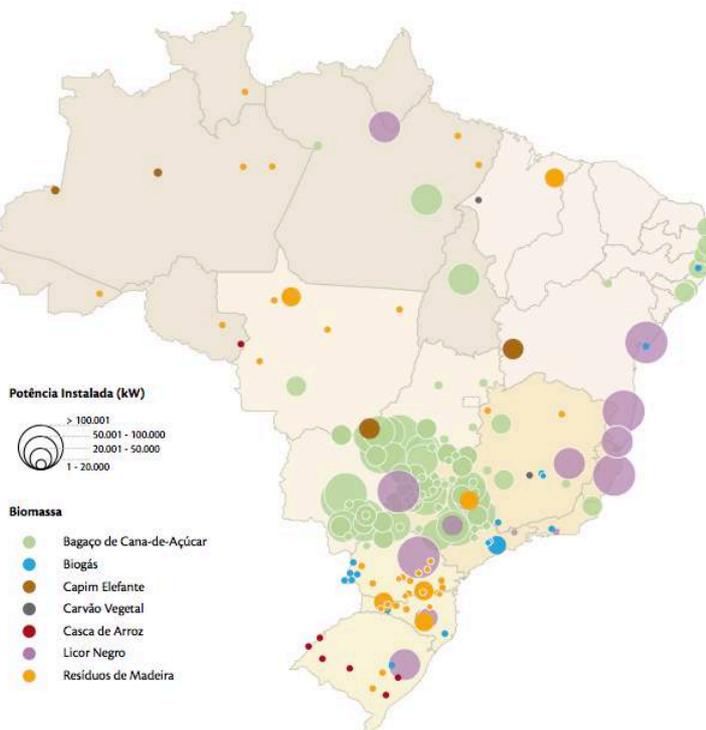
Segundo a ABRAF² (2013) são gerados anualmente cerca de 41 milhões de toneladas de resíduos madeireiros provindos da indústria de processamento de madeira e da colheita florestal capaz de gerar energia equivalente a 1,7 GW/ano.

Através do projeto de lei 3.529/2012, como ação à diversificação da matriz energética nacional, o governo brasileiro instituiu a política nacional de geração de energia elétrica a partir da biomassa, estabelecendo a obrigatoriedade da contratação da bioenergia na composição da geração elétrica nacional. Com a sanção desta lei, a geração de energia elétrica

² Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas.

a partir da biomassa é inevitável e a participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira torna-se ainda maior (ABRAF, 2013).

Figura 3 – Distribuição de usinas termelétricas a base de biomassa no Brasil



Fonte: ANEEL (2012)

O manejo florestal visando a produção de biomassa para energia, com menor ciclo de corte e menor espaçamento entre árvores, caracteriza o conceito de florestas energéticas. Entre as florestas plantadas no Brasil, o eucalipto recebe destaque por ser o gênero *Eucalyptus* o mais implantado e estudado (OLIVEIRA, 2007). De acordo com a ABRAF (2013) a área plantada com o gênero totalizou 5.102.030 hectares, com grande importância nos setores comercial, industrial e residencial. No entanto, nas regiões semiáridas do nordeste brasileiro, a algaroba é considerada uma árvore de uso múltiplo, seja na alimentação humana e animal quanto na fertilidade do solo e uso de sua madeira na forma de mourões, tábuas, dormentes, estacas, lenha e carvão (EMBRAPA, 2009). Em especial a algaroba da espécie *juliflora* apresenta importante papel econômico em áreas isoladas do semiárido nordestino, fornecendo lenha para diversos setores, como curtumes, cerâmicas, padarias, pizzarias, dentre outros.

Neste contexto, a biomassa pode ser energeticamente convertida em biocombustíveis, em geral, pelas seguintes vias tecnológicas: a via termoquímica, a via bioquímica e a via

físico-química. A via termoquímica utiliza-se do aporte de calor para geração direta de energia ou para produção de combustíveis secundários com maior densidade energética. A via bioquímica converte a biomassa através de processos anaeróbicos, aeróbicos e enzimáticos e, a via físico-química, através da extração ou compressão, seguido de tecnologias como a transesterificação para produção de outros biocombustíveis.

Quanto à biomassa crua verifica-se o seu baixo teor de carbono e elevados teores de oxigênio, que tornam o valor calorífico muito menor quando comparado ao do carvão, e também requer uma quantidade significativa de energia para reduzir a sua dimensão (na forma de chips ou cavacos), a qual é necessária na maior parte dos processos de obtenção de energia a partir da biomassa.

Assim, as propriedades inerentes da biomassa crua como, por exemplo, o alto teor de umidade, baixa densidade energética, degradação biológica e alteração de propriedades físico-químicas durante o armazenamento e dificuldade de moagem, limitam sua ampla utilização na indústria. Para superar estas limitações, a torrefação tem sido proposta como um processo de tratamento térmico da biomassa (ARIAS et al., 2008). Pode-se considerar que a torrefação objetiva eliminar o oxigênio sob a forma de gases sem valor calórico como, por exemplo, CO_2 , água e alguns ácidos orgânicos, por exposição da biomassa a temperaturas de 200 - 300°C (PIMCHUAI et al., 2010; MEDIC et al., 2012).

Os tipos mais comuns de reatores de pequena escala utilizados na torrefação são o de aquecimento por convecção, de leito fluidizado, de tambor rotativo e o reator de microondas. Os reatores do tipo leito convectivo e fluidizado utilizam na maioria das vezes o aquecimento direto, enquanto que o tambor rotativo é um reator de aquecimento indireto e o de microondas é um reator de aquecimento volumétrico. O reator de aquecimento direto tem uma melhor e mais uniforme transferência de calor, enquanto que no aquecimento indireto, os voláteis não são diluídos pelo fluido de aquecimento e podem ser facilmente reutilizados na combustão.

Dessa forma, este trabalho objetiva o desenvolvimento e validação de um sistema laboratorial para pré-tratamento da biomassa através do processo de torrefação, utilizando como biomassas o eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e a algaroba (*Prosopis juliflora*), comparando as suas propriedades *in natura* e após torrefação, no intuito de apresentar a algaroba como biomassa alternativa para uso no setor energético e com grande potencial a ser explorado no semiárido nordestino.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver sistema piloto laboratorial para torrefação de biomassas visando à melhoria das propriedades físico-químicas e energéticas do *Eucalyptus grandis* e *Prosopis juliflora*.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver, montar, testar e validar sistema laboratorial para torrefação de biomassa.
- Realizar ensaios de torrefação com biomassas residuais de *Eucalyptus grandis* e *Prosopis juliflora*.
- Caracterizar e avaliar as propriedades físico-químicas e energéticas do *Eucalyptus grandis* e *Prosopis juliflora in natura* e torrefeitos.

3 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

3.1 ASPECTOS GERAIS SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS

Nos últimos anos têm-se observado um grande crescimento na produção e consumo de biocombustíveis para uso em motores de combustão do setor de transportes. E esta tendência está prevista para, pelo menos, duplicar na próxima década (VERTES *et al.*, 2010). Atualmente, os biocombustíveis mais utilizados são o etanol, com base em cereais (por exemplo, milho) e culturas de açúcar (por exemplo, de cana-de-açúcar ou de beterraba) e o biodiesel com base em óleos vegetais tais como a soja, canola e palma. Enquanto o etanol e o biodiesel têm se expandido em mercados e infraestruturas da gasolina e diesel já existentes, outros combustíveis renováveis começaram a surgir como alternativas potencialmente viáveis em especial, bio-butanol, DME e o bio-hidrogênio. Além disso, existem grandes expectativas sobre biocombustíveis de base celulósica usando madeira, gramíneas ou resíduos orgânicos.

As preocupações sobre o aquecimento global estimulam ainda mais a busca de alternativas energéticas de baixo carbono em substituição dos combustíveis fósseis, já que a implementação em escala global ajudaria a cumprir as metas de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), conforme estabelecido no Protocolo de Quioto e seus acordos (WORLDWATCH INSTITUTE, 2007). Assim, os biocombustíveis são apresentados como sendo carbono-neutro pois os hidratos de carbono utilizados na produção destes combustíveis são originários do carbono atmosférico fixado pelas plantas na fotossíntese. No entanto, vale ressaltar que as economias de GEE variam significativamente entre os biocombustíveis.

Segundo Vertes e colaboradores (2010), por exemplo, ao longo de todo o ciclo bioindustrial o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar pode reduzir as emissões de GEE em cerca de 80% ou mais em relação às emissões provenientes de combustíveis fósseis. Por outro lado, os biocombustíveis produzidos a partir de trigo, óleos vegetais ou de açúcar de beterraba raramente fornecem redução de emissões de gases de efeito estufa superiores a 30-60%, enquanto que o etanol a partir de milho geralmente permite uma economia de menos do que 30%.

Pode-se observar que tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento existe um potencial significativo para a produção de culturas energéticas e o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para converter eficientemente biomassa em energia, incluindo o aquecimento, a geração de eletricidade e combustíveis para transporte. Além disso, a utilização eficaz dos resíduos orgânicos provenientes da agricultura, municípios e indústria

desempenha um papel importante no desencadeamento da transição para usos mais amplos de bioenergia (VERTES *et al.*, 2010).

Segundo dados da EPE (2007) o total de energia solar incidente sobre a terra é da ordem de $1,5 \times 10^{18}$ kWh/ano, dos quais 0,02% ou $3,04 \times 10^{14}$ kWh/ano são armazenados nas plantas por meio da fotossíntese. Esta quantidade de energia é equivalente a quase 10 vezes mais do que o atual consumo de energia (cerca de $0,35 \times 10^{14}$ kWh/ano). Dentre os principais compostos orgânicos sintetizados nas plantas tem-se, essencialmente, os glucídios ($C_6H_{12}O_6$) – cujo poder calorífico é da ordem de 3.600 kcal/kg (matéria seca) – armazenados basicamente na forma de polímeros naturais, como a celulose, a hemicelulose e a lignina. Tendo assim no processo de fotossíntese por meio da clorofila a energia solar armazenada nos tecidos vegetais (celulose, glucídio, lipídio, proteína, lignina, etc.), que afinal vêm a constituir a energia química potencial das biomassas (EPE, 2007).

Segundo Tumuluru e colaboradores (2011c) a utilização da biomassa para geração de energia pode trazer uma série de benefícios ambientais. No entanto, as restrições do uso de biomassa podem incluir elevados investimentos em logística e incerteza na segurança do fornecimento de matéria-prima, devido às variações sazonais e, na maioria dos países, limitada infraestrutura de abastecimento de biomassa.

Visando a diferenciação da matéria-prima baseando-se na sua origem o CEN – Comitê Europeu de Normalização, publicou 27 especificações técnicas para os biocombustíveis sólidos, rotulados como normas EN. As duas principais especificações técnicas desenvolvidas são para a classificação e especificação (EN 14961:1-2010³) e garantia de qualidade para os biocombustíveis sólidos (EN 15234-1⁴). Estas classificações de biocombustíveis sólidos baseiam-se na origem e fonte da matéria-prima, facilitando assim no rastreamento da cadeia de produção do combustível.

O CEN propõe a seguinte divisão para combustíveis sólidos:

- a) Biomassa lenhosa
- b) Biomassa herbácea
- c) Biomassa frutífera
- d) *Blends*/Misturas

³ EN 14961-1:2010, *Solid biofuels – Fuel specification and classes – Part 1: General requirements.*

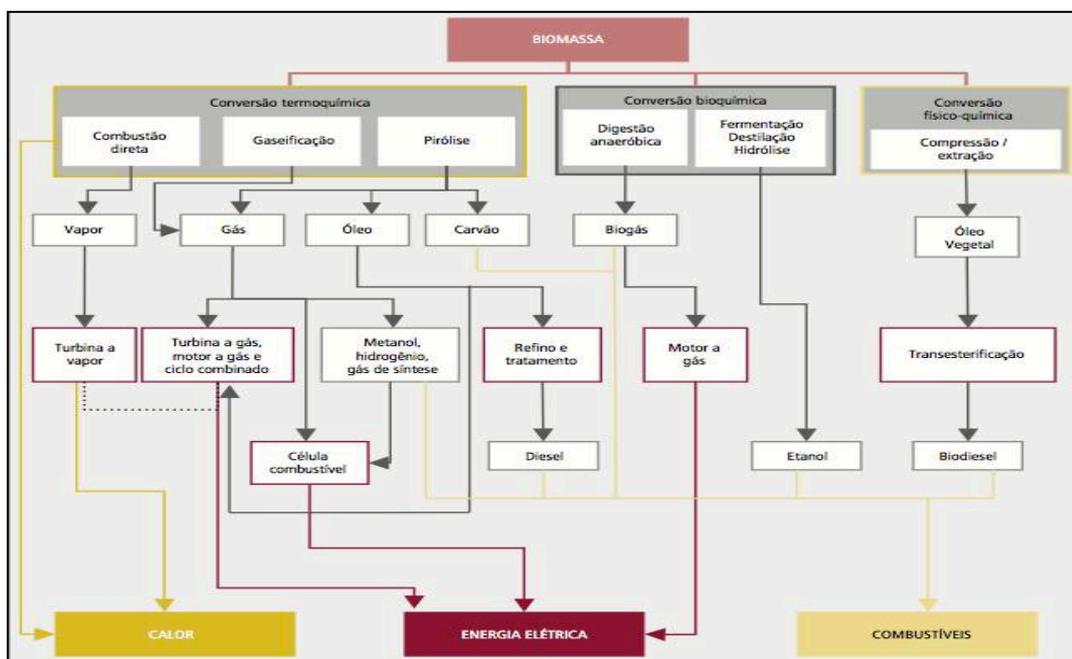
⁴ EN 15234-1:2010, *Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 1: General requirements.*

De acordo com as normas EN (2010) a biomassa lenhosa inclui árvores e arbustos, enquanto que biomassa herbácea inclui plantas que tem caule não lenhoso e que morrem ao final da estação de crescimento. A biomassa herbácea inclui grãos e seus produtos tais como cereais. A biomassa frutífera é definida por conter partes de uma planta ou as sementes da mesma e os *blends*/misturas referem-se a biomassa mista, de origem diversa, podendo ser de forma intencional ou não.

A utilização da biomassa para fins energéticos depende de diversos aspectos como sua natureza, origem, tecnologia de conversão e produtos energéticos derivados. A sua relevância para utilização na matriz energética, deriva não só da qualidade da sua origem natural, mas sobretudo das tecnologias convencionais utilizadas.

As rotas tecnológicas de conversão da biomassa em energéticos ou matéria prima podem ser agrupadas em três rotas principais (Figura 4), classificadas segundo a natureza do processamento primário aplicado à biomassa (MME; EPE, 2007).

Figura 4 – Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa e principais produtos



Fonte: MME; EPE (2007)

Assim, na conversão termoquímica tem-se a combustão direta, a pirólise e gaseificação, sendo caracterizada quando a energia “quimicamente armazenada” na biomassa é convertida em calor, energia e/ou combustíveis. Na conversão bioquímica tem-se processos biológicos e

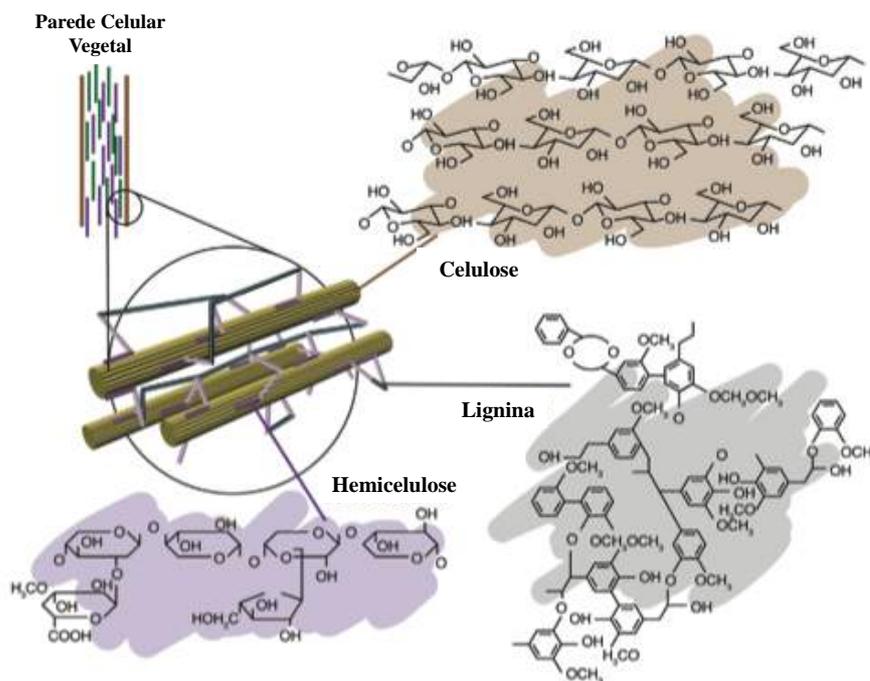
químicos, que incluem a digestão anaeróbica, a fermentação seguida da destilação e a hidrólise. Quanto à conversão físico-química, utiliza-se técnicas para disponibilização de lipídios através da compressão e esmagamento de materiais vegetais diversos e extração dos óleos vegetais que, posteriormente, sofrerão transformações químicas, tendo a transesterificação, esterificação e craqueamento como principais tecnologias de conversão.

3.2 COMPONENTES DA BIOMASSA

A biomassa engloba a matéria vegetal gerada através da fotossíntese e os seus derivados. Estes materiais contêm energia química provinda da transformação energética da radiação solar. Essa energia química pode ser liberada diretamente por combustão, ou convertida através de algum processo em outras fontes energéticas mais adequadas, para um fim qualquer desejado, tal como o biodiesel, o álcool ou o carvão vegetal (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A parede celular da planta é a camada resistente, geralmente flexível, mas, por vezes, bastante rígida que fornece suporte estrutural e proteção contra tensões mecânicas e térmicas. A Figura 5 mostra a parede celular da planta e a composição típica da biomassa lignocelulósica. Os principais componentes da parede celular primária são a celulose, hemiceluloses e pectina. As paredes celulares secundárias contêm uma vasta gama de compostos adicionais que modificam as suas propriedades mecânicas e permeabilidade. Os polímeros que formam a parede celular secundária incluem a celulose, xilano (um tipo de hemicelulose), a lignina, um polímero fenólico complexo que penetra nos espaços entre a parede celular da celulose, hemicelulose e componentes de pectina que conduzem a água para fora e fortalecem a parede, e proteínas estruturais (aproximadamente 1-5%), que são encontradas nas paredes celulares das plantas (TUMULURU et al., 2011c).

Figura 5 – Parede celular vegetal e composição lignocelulósica da biomassa

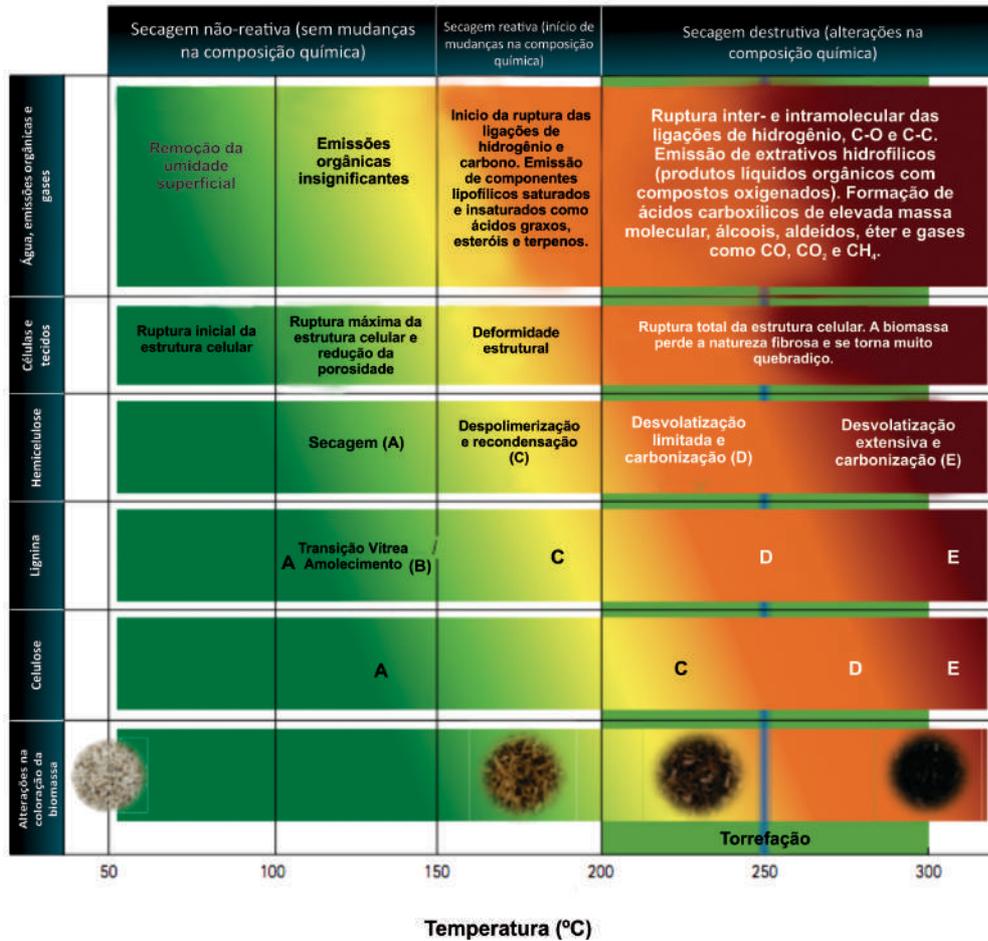


Fonte: Sierra et. al. (2008)

Segundo Stamm (1956) a compreensão dos componentes de uma planta e sua composição auxilia o entendimento das reações de degradação da biomassa durante o processo de pré-tratamento térmico. Assim, a exposição da biomassa a temperaturas elevadas resulta na degradação térmica da sua estrutura, o que muitas vezes é acompanhada por perda de massa. Os vários componentes da biomassa executam funções únicas dentro da sua estrutura e interagem de forma diferente, dependendo do tempo de tratamento térmico e temperatura (BORREGA; KÄRENLAMPI, 2008).

Durante o processo de aquecimento as variáveis de processo, que podem influenciar as alterações estruturais e de composição química, incluem a composição da biomassa, o tamanho das partículas, a temperatura e o tempo de processo, a taxa de aquecimento, a composição do gás inerte, pressão e taxa de fluxo (LIPINSKY; ARCATE; REED, 2002). A Figura 6 descreve as mudanças estruturais, as etapas de secagem e emissões, as etapas de degradação da biomassa e as alterações de cor em diferentes regimes de temperatura variando de 50 °C a 300 °C (STAMM, 1956; LIPINSKY; ARCATE; REED, 2002; BORREGA; KÄRENLAMPI, 2008).

Figura 6 – Alterações químicas e estruturais da biomassa a diferentes temperaturas



Fonte: Adaptado de Tumuluru et al. (2011c) apud Bergman et al. (2005a)

Segundo Tumuluru e colaboradores (2011c), com base na Figura 6, à temperaturas de secagem de 50-150 °C (A) a biomassa perde umidade e tende a se contrair resultando na redução da porosidade, embora ainda possui a capacidade de manter a sua estrutura se reumedecendo. Esta região é conhecida como a zona de secagem não reativa, onde a maioria dos constituintes químicos da biomassa permanecem intactos. Na extremidade superior destas temperaturas, isto é, a 120-150 °C (B), a lignina amolece e torna o material mais adequado para a densificação. No regime C de temperatura (150-200 °C), também chamada de zona de secagem reativa, inicia a quebra de ligações de carbono e hidrogênio resultando na emissão de compostos e extrativos lipofílicos devido a degradação térmica da biomassa. Esta temperatura também resulta na deformidade estrutural, perdendo a sua capacidade de recuperar a sua estrutura original, mesmo quando re-umedecidas. Com o aumento da temperatura, como mostrado no regime D, chamado de zona de secagem destrutiva (200-300 °C), resulta em carbonização e desvolatilização da biomassa. Nesta faixa de temperaturas, a estrutura celular

é completamente destruída e a biomassa perde a sua natureza fibrosa e se torna quebradiça, além da elevada desvolatilização e carbonização dos polímeros (BERGMAN et al., 2005a). A linha azul indica que em temperaturas inferiores a 250 °C, a perda de massa é mínima. Em temperaturas superiores a 250 °C, a hemicelulose se decompõe extensivamente em voláteis e como resultado têm-se um produto sólido carbonizado. A lignina e celulose mostra limitação na desvolatilização e carbonização. Lam e colaboradores (2011) quantificaram a severidade do tratamento térmico baseando-se em coordenadas de cores e desenvolveram modelos de regressão múltipla para descrever mudanças na composição química baseado nas alterações de cor de *pellets* de madeira.

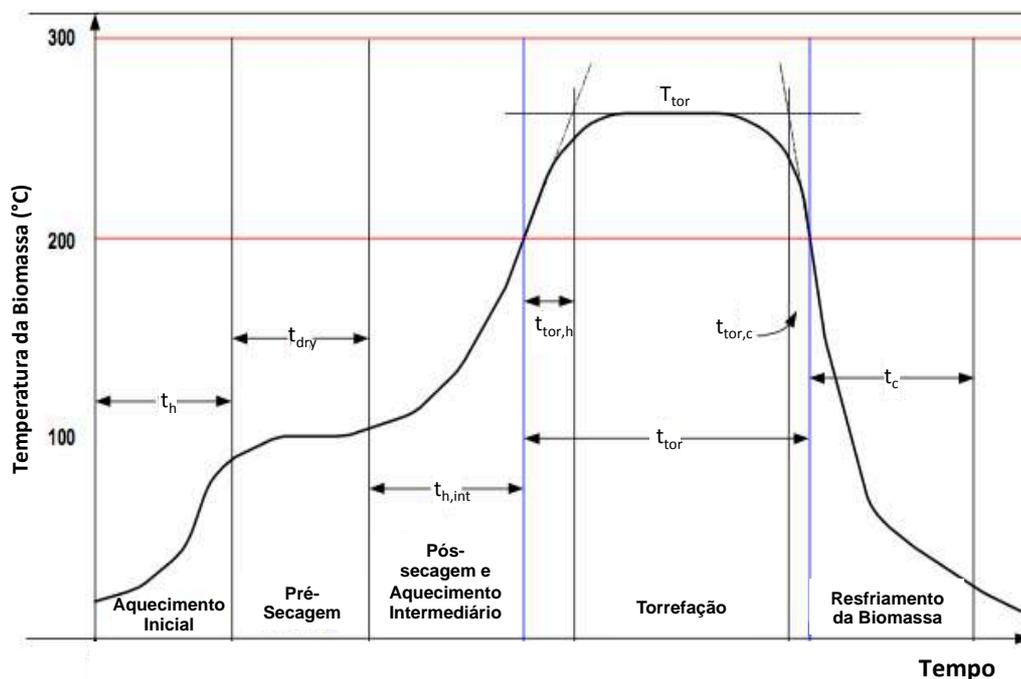
3.3 PROCESSO DE TORREFAÇÃO

3.3.1 Definições

Um sinônimo para a torrefação é pirólise suave, já que é simplesmente a primeira etapa desta conversão termoquímica, sendo realizada de diferentes formas a depender do tipo de sistema de aquecimento (SCHORR et al., 2012). Ainda, apesar dos parâmetros de processo variarem bastante de acordo com a biomassa e o sistema de aquecimento utilizados, de forma geral, a temperatura utilizada é de 200°C a 320°C, sendo o tempo de residência significativamente mais elevado do que na pirólise, resultando em baixas taxas de aquecimento.

Bergman e colaboradores (2005c) discutiram a importância da definição do tempo de reação da torrefação ao invés do tempo de residência no reator. Já que a biomassa precisa ser aquecida passando por várias etapas antes do regime real de torrefação ser alcançado. Essas definições são utilizadas como base para melhor definição das fases de temperatura-tempo de torrefação. Dessa forma, quando se tratar do processo de torrefação a expressão do tempo de residência é abandonado, sendo introduzida a expressão tempo de reação. A Figura 7 ilustra estas fases de temperatura-tempo em um reator de torrefação operado em batelada, no entanto, estas etapas são basicamente as mesmas para a operação contínua.

Figura 7 – Estágios da etapa de aquecimento da biomassa até temperaturas de torrefação seguido do resfriamento à temperatura ambiente



Fonte: Adaptado de Bergman et al. (2005c)

Em referência às linhas vermelhas na Figura 7, representa a faixa de temperatura considerada onde geralmente ocorrem as reações de decomposição térmica da torrefação, variando em cerca de 200 °C a 300 °C. Nesta faixa são observadas três fases de tempo e temperatura. Em primeiro lugar a biomassa é aquecida de 200 °C até a temperatura de torrefação desejada (T_{tor}) no período $t_{tor,h}$. Em seguida, a temperatura de torrefação permanece estável pelo período t_{tor} , até o início do período $t_{tor,c}$ referente ao resfriamento da biomassa (BERGMAN et al., 2005c).

Ainda em referência a figura 7, Bergman e colaboradores (2005c) definiram o tempo de reação como a soma do $t_{tor,h}+t_{tor}$ excluindo desse modo o $t_{tor,c}$, ou seja, o tempo de arrefecimento da biomassa, visto que o período de arrefecimento dificilmente contribui para a decomposição da biomassa.

Segundo Bergman e colaboradores (2005c) os valores para os tempos de residência são ótimos na faixa de 30 a 90 minutos, numa atmosfera inerte, devido aos riscos de ignição e de explosão do material. Ainda assim, alguns números de experimentos foram realizados com tempos de residência curtos de apenas alguns minutos e temperaturas mais elevadas.

Como vantagens técnicas do processo de torrefação da biomassa, por exemplo, podemos observar na Tabela 1 algumas características e especificações desejáveis para combustíveis sólidos, comparando informações do carvão mineral e de combustíveis renováveis obtidos a partir da biomassa.

Tabela 1 – Características físico-químicas de diferentes combustíveis sólidos

	Madeira	Pellets de Madeira	Pellets de Torrefação	Carvão Vegetal	Carvão Mineral
Teor de Umidade (%peso)	30-45	7-10	1-5	1-5	10-15
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	9-12	15-18	20-24	30-32	23-28
Voláteis (%biom seca)	70-75	70-75	55-65	10-12	15-30
Carbono Fixo (%biom seca)	20-25	20-25	28-35	85-87	50-55
Densidade Mássica (kg/l)	0,2-0,25	0,55-0,75	0,75-0,85	≈0,20	0,8-0,85
Densidade Energética (GJ/m ³)	2,0-3,0	7,5-10,4	15,0-18,7	6-6,4	18,4-23,8
Cinzas	Médio	Limitado	Limitado	Alto	Limitado
Propriedades Hidroscópicas	Hidrofílico	Hidrofílico	Hidrofóbico	Hidrofóbico	Hidrofóbico
Degradação Biológica	Sim	Sim	Não	Não	Não
Moabilidade	Baixa	Baixa	Bom	Bom	Bom
Manuseio	Especial	Especial	Bom	Bom	Bom

Fonte: Adaptado de Kema (2010)

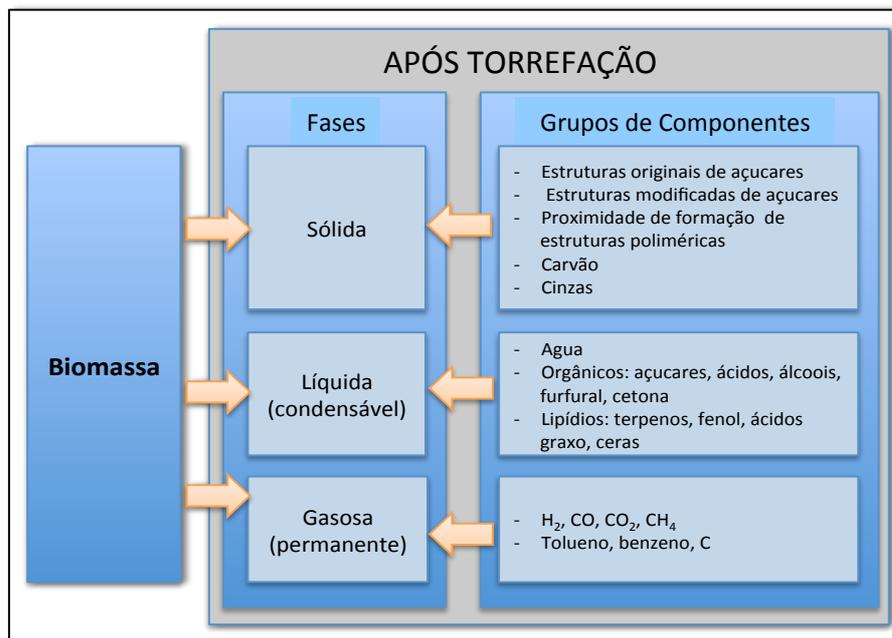
Como visto na Tabela 1, a torrefação visa transformar a biomassa crua em um combustível sólido melhorado, incluindo melhorias no manuseio e propriedades combustíveis quando comparado ao carvão fóssil, levando à diminuição dos custos em armazenamento e transporte. Neste contexto, o aumento da densidade energética da biomassa requer um aumento da razão entre massa e energia, ou seja, melhoria do poder calorífico na biomassa torrificada (SCHORR et al., 2012).

Durante a torrefação da biomassa, três produtos primários são produzidos: a) produto sólido de coloração escura; b) líquido condensável contendo principalmente água, ácido acético e outros compostos oxigenados; e c) gases - principalmente não condensáveis como CO₂, CO e pequenas quantidades de metano. Os dois últimos produtos podem ser representados por compostos voláteis. Dessa forma, a matéria-prima perde a maior parte da

sua umidade e outros voláteis com baixo valor calorífico (TUMULURU et al., 2011). O tipo e a quantidade do gás que vem como efluente gasoso durante a torrefação depende do tipo de material e das condições do processo de torrefação, incluindo a temperatura e tempo de residência.

Segundo Bergman e colaboradores (2005a) a fase sólida é constituída por uma estrutura caótica com estruturas cristalinas originais e produtos de reação. A fase gasosa inclui os gases que são considerados gases permanentes, mas também acendem de componentes aromáticos, tais como benzeno e tolueno. Os condensáveis, ou líquidos, podem ser divididos em três subgrupos, que incluem água, orgânicos e lipídios (Figura 8). O subgrupo de compostos orgânicos (em forma líquida) consiste em compostos que são produzidos principalmente durante a desvolatilização e carbonização. Quanto aos lipídios, são um grupo de compostos que estão presentes na biomassa original. Este subgrupo contém compostos tais como terpenos, fenóis, ceras e ácidos graxos.

Figura 8 – Produtos e subprodutos obtidos após a torrefação da biomassa



Fonte: Adaptado de Bergman et al. (2005a)

Segundo Koppejan e colaboradores (2012) a torrefação mostra-se como uma tecnologia de pré-tratamento bastante interessante para gaseificação devido ao teor de umidade relativamente baixo, boa moabilidade e atraentes taxas C/O/H da biomassa torrefeita, podendo assim se obter um aumento dos níveis de H₂ e CO no gás de síntese resultante e melhorar a eficiência global do processo de gaseificação.

Para isto, diferentes processos de torrefação têm sido propostos para melhor tratamento da biomassa, tais como a torrefação à seco, torrefação úmida e torrefação via líquido iônico. A torrefação a seco consiste no aquecimento lento da biomassa numa atmosfera inerte, a partir de 200 °C a 300 °C, no qual temperaturas superiores não são recomendadas devido à grande liberação de alcatrão e tendência de perda da densidade energética. O uso de líquidos iônicos através da impregnação da biomassa visa elevar a taxa de torrefação da celulose a temperaturas inferiores a 300 °C (SARVARAMINI; GRAVEL; LARACHI, 2013b). A torrefação úmida ou pré-tratamento hidrotérmico através de água pressurizada produz sólidos com densidade energética maior que a torrefação à seco, no entanto, o gasto energético e custos operacionais tendem a ser mais elevados que as demais técnicas.

Couhert e colaboradores (2009) observaram que a torrefação diminui a razão O/C quando utilizadas condições mais severas (300°C) e menor tempo no pré-tratamento da biomassa, favorecendo a quantidade e qualidade do gás de síntese produzido na gaseificação. Além disso, como a torrefação introduz mudanças na estrutura do material e reduz o seu teor de componentes voláteis, os rendimentos dos produtos da pirólise são também modificados à medida que se aumenta o grau de aquecimento do pré-tratamento (BROSTRÖM et al., 2012).

Conforme Batidzirai e colaboradores (2013) a maioria das atuais tecnologias de torrefação em desenvolvimento são baseadas em conceitos de reatores já existentes destinados para outros fins como a secagem ou pirólise e que, portanto, só exigem melhoramentos técnicos para aplicações de torrefação. Assim, não se tem uma tecnologia superior à outra, exige apenas que sejam observadas as suas vantagens e desvantagens de acordo com a biomassa a ser utilizada. A seleção adequada do reator é importante, pois, cada sistema possui características únicas, devendo ser observado os tipos específicos de biomassa a serem utilizadas e suas aplicações (CIOLKOSZ; WALLACE, 2011).

3.3.2 Principais Fatores de Influência na Torrefação

3.3.2.1 Temperatura

Tran e colaboradores (2013) demonstraram que as propriedades do combustível sólido, incluindo os valores de aquecimento e moabilidade das biomassas investigados foram melhorados por torrefação, utilizando um reator de leito fixo de bancada. Tanto a temperatura quanto o tempo de reação apresentaram um forte efeito sobre a biomassa torrefeita, sendo os efeitos da temperatura mais fortes do que os efeitos do tempo de reação. Os autores

verificaram que à mesma temperatura de torrefação, com tempo de reação mais longo, foi obtido melhor qualidade no produto final. No entanto, os tempos de reação muito longos e/ou muito maiores que os usuais diminuiria o rendimento do produto sólido.

Zheng e colaboradores (2012) realizaram a avaliação do efeito da temperatura à 240°C, 260°C, 280°C, 300°C e 320°C sobre o rendimento da torrefação, verificando que o rendimento de líquido e sólido são inversamente proporcionais, ou seja, com o aumento da temperatura a composição de sólidos diminui e de líquidos aumenta significativamente. Um padrão similar foi observado por Samaniego e colaboradores (2014), referente à ocorrência na diminuição do teor de carbono na biomassa devido à eliminação progressiva dos componentes ricos em carbono (hemicelulose, celulose amorfa) com o aumento da temperatura de torrefação. A temperatura mostra uma influência dominante sobre a qualidade do produto de torrefação.

3.3.2.2 Tempo de residência

O tempo de residência no processo de torrefação está relacionado com o tempo total que a biomassa permanece à uma dada temperatura no interior do reator. É considerado um parâmetro importante na concepção de reatores. Em comparação com outros processos de conversão termoquímica como a combustão, gaseificação ou pirólise, o tempo de reação ou tempo de residência para a torrefação é muito maior (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014), tendo assim influência direta no tamanho do reator.

Strandberg e colaboradores (2015), através de um reator de tambor rotativo contínuo, obtiveram um controle preciso e homogêneo da temperatura, utilizando como matéria-prima da torrefação o abeto da Noruega, combinando temperaturas entre 260°C e 310°C a tempos de residência entre 8 e 25 minutos. Verificaram também que o teor de carbono e teores de carbono fixo aumentaram, enquanto o conteúdo de hidrogênio e oxigênio diminuiu com a intensidade da temperatura e tempo de residência na torrefação que demonstra igualmente o efeito de interação entre temperatura e tempo de residência.

Embora o efeito do tempo de residência não seja tão intenso como da temperatura, ainda apresenta influência no produto torreficado quanto maior for tempo de residência (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014). É verificado que a perda de massa aumenta com o aumento do tempo de residência, resultando em um menor rendimento do produto sólido (CHEN; KUO, 2011). Isto é devido a um aumento no grau de desvolatilização (PRINS; PTASINSKI; JANSSEN, 2006). Já que os produtos condensáveis contribuem

significativamente para a perda de massa sólida a um tempo de residência mais elevado. Por outro lado, produtos não condensáveis, tais como CO₂ e CO, atingem o valor máximo a um tempo de residência de 10 minutos, e, em seguida, começam a diminuir (BATES; GHONIEM, 2012). Quanto a quantidade de metanol e ácido láctico, que são produzidos durante a decomposição dos grupos acetoxi e metoxi-, aumentam até 10 minutos e, em seguida, mantêm-se inalteradas (BATES; GHONIEM, 2012).

3.3.2.3 Taxa de aquecimento

Na torrefação geralmente é utilizado aquecimento lento até a temperatura desejada, dessa forma é obtido um alto rendimento energético (DHUNGANA, 2011). Apesar da literatura sempre apresentar baixas taxas de aquecimento, não foi verificado efeitos quantitativos sobre este parâmetro.

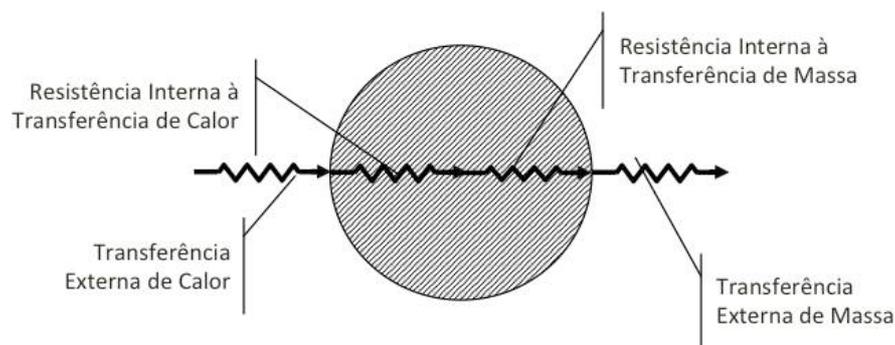
3.3.2.4 Tamanho da partícula

O tamanho das partículas é raramente uniforme numa unidade de torrefação comercial. Assim, para assegurar uma boa concepção, é necessário conhecer o efeito do tamanho de partícula (DHUNGANA, 2011). Segundo Nhuchhen, Basu e Acharya (2014) um tamanho de partícula maior pode enfrentar dificuldades com a difusão volátil devido a elevada resistência à transferência de massa. Destarte, a qualidade do processo de torrefação pode não ser idêntico para todos os tamanhos de partículas. Neste contexto, o efeito do tamanho da partícula pode ser analisada através da estimativa do número de Biot e das reações de pirólise ocorridas.

Os fenômenos observados nos tipos de reatores e sistemas de torrefação dizem respeito, de alguma forma, a transferência de massa e calor. Pode-se considerar que o calor do ambiente atinge a superfície das partículas da biomassa, superando a resistência térmica em torno delas. Então, o calor entra no interior da partícula, vencendo a resistência interna. Ocorre do mesmo modo, quando os voláteis da torrefação migram de dentro para fora da biomassa, ultrapassando a resistência à transferência de massa (figura 9).

Assim, tem-se que no processo de torrefação da biomassa a transferência de massa e calor é afetada por processos condutivos e convectivos dentre estes: transferência externa de calor, resistência interna à transferência de calor, resistência interna à transferência de massa e transferência externa de massa.

Figura 9 – Fenômenos de transporte ocorridos numa biomassa cilíndrica



Fonte: Adaptado de Dhungana (2011)

Segundo Dhungana (2011), referente à Figura 9, a resistência à transferência externa de calor é dependente das propriedades das imediações da biomassa e é fortemente influenciada pelo tipo de reator e o seu modo de operação. A resistência de calor do interior da biomassa é função do tamanho e tipo da biomassa. Quanto a resistência interna à transferência de massa, esta propriedade consiste ao fluxo de voláteis, gerados no interior da biomassa, que migram de dentro para a sua superfície; quanto maior for este percurso de deslocamento, maior é a resistência interna, permitindo uma maior permanência dos voláteis no interior da biomassa, ocasionando em reações exotérmicas. Tais reações aumentam a temperatura interna, que por sua vez aumentam a taxa de evaporação destes voláteis. Este processo continua até quando o equilíbrio dinâmico da perda de calor é atingida. Já a resistência externa de transferência de massa é função do tipo de reator, onde se o meio que circunda a biomassa não permitir a fácil dissipação de voláteis, essa concentração ao redor da biomassa elevaria, dificultando a saída destes produtos, aumentando, novamente, a temperatura da biomassa.

3.3.2.5 Composição da atmosfera de trabalho

Conforme relatado por Nhuchhen, Basu e Acharya (2014), a presença de oxigênio nos sistemas de torrefação eleva a intensidade das reações de combustão, que convertem o carbono em um gás de combustão em vez de deixá-lo na forma sólida. Além disso, a combustão no reator pode elevar a temperatura do produto pondo em risco a segurança do equipamento. Portanto, o oxigênio não é desejável para a operação segura e eficiente do processo de torrefação. Para o processo de torrefação comercial são propostos a utilização de aquecimento indireto, demandando um enorme gasto energético, ou um fornecimento contínuo de gás

inerte quente obtido da combustão de biomassas residuais.

A presença do oxigênio na torrefação aumenta as reações de desvolatilização que tem a capacidade maior para remover o oxigênio quando comparados com meios reacionais inertes. Apesar de Rousset e colaboradores (2012) observarem apenas uma pequena redução nos valores de O/C e H/C para a biomassa de eucalipto com o aumento da quantidade de oxigênio da atmosfera interna do reator, quando comparado aos meios com atmosfera inerte utilizando o nitrogênio.

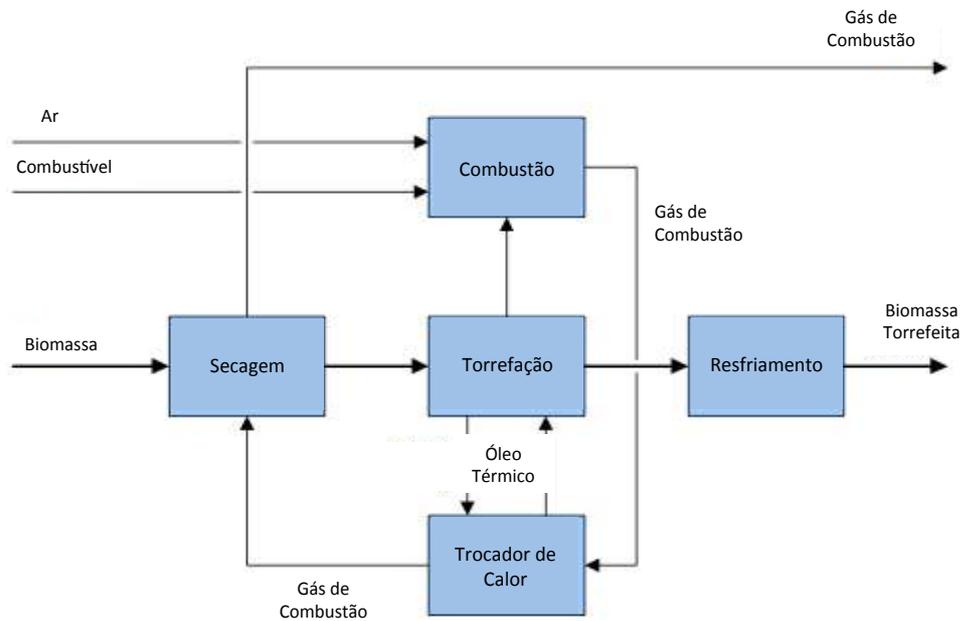
3.3.2.6 Composição da biomassa

Segundo Strandberg e colaboradores (2015) a volatilização relativamente fácil do oxigênio da biomassa *in natura*, que possui massa, mas nenhum poder calorífico, é uma das principais causas para o aumento no poder calorífico da biomassa torreficada em comparação com a madeira não tratada. Assim, o conteúdo total de hemicelulose no produto torreficado diminui com o aumento da temperatura e do tempo de residência, por exemplo, a 260°C e 310°C durante 8 minutos, o teor de hemicelulose diminuiu em 12% e 80%, respectivamente.

3.3.3 Sistemas Laboratoriais de Torrefação

Segundo Bergman e colaboradores (2005a) os reatores de torrefação precisam combinar duas tarefas básicas: o aquecimento da biomassa à temperatura desejada e manter esta temperatura por período de tempo específico, podendo ser classificados como de aquecimento direto ou indireto. Conforme Figura 10 no sistema de aquecimento direto o meio de aquecimento (fluido) entra em contato direto com a biomassa. O gás quente cede calor no interior da unidade de torrefação e durante a sua passagem é misturado aos gases de torrefação produzidos, tendo parte dos gases de saída sendo re-pressurizados (etapa DP na Figura 10), aquecido e retornado para a torrefação. A maior parte de tecnologias de secagem são baseadas neste conceito, tais como secadores de leito fluidizado, tambor rotativo e secadores de túnel.

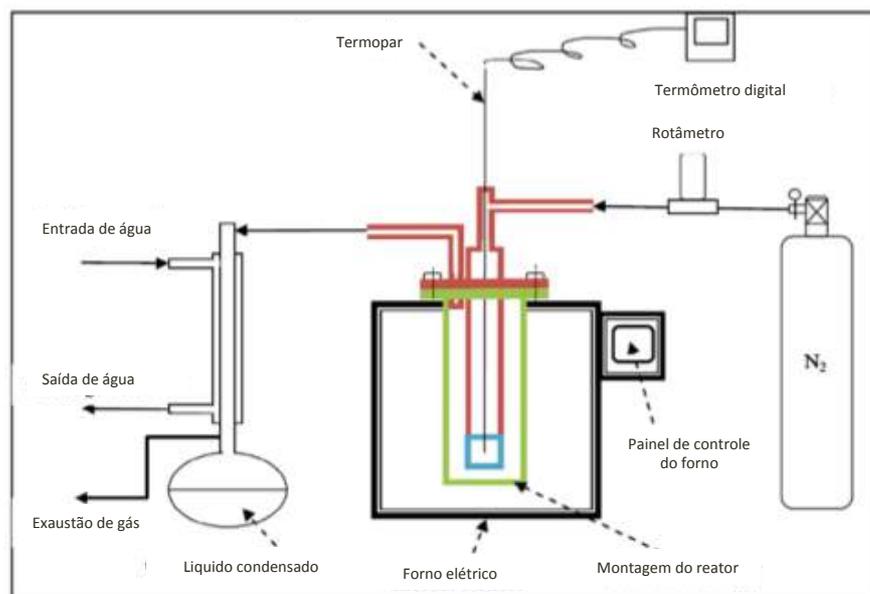
Figura 11 – Conceito básico de torrefação com aquecimento indireto



Fonte: Adaptado de Bergman et al. (2005a)

No experimento de Tran e colaboradores (2013) o sistema experimental constituiu, basicamente, de um reator tubular colocado num forno elétrico, anexado com sistema de gás inerte com aquecimento e sistema de condensação de voláteis na saída do reator (Figura 12).

Figura 12 – Sistema de torrefação em bancada com reator de leito fixo

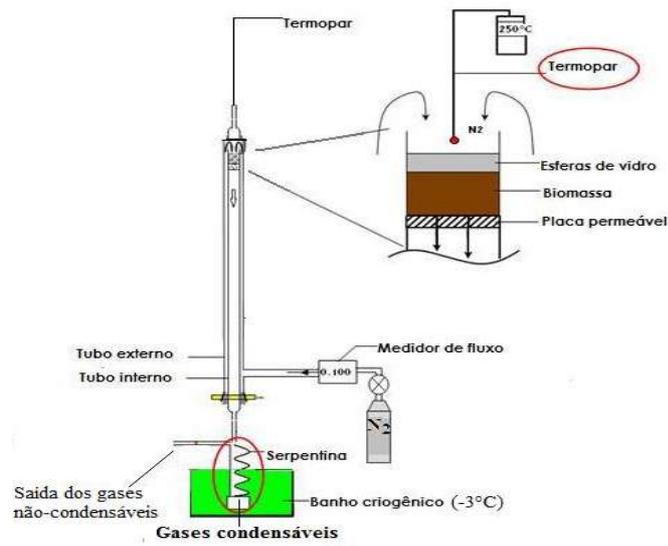


Fonte: Tran et al. (2013)

Batidzirai e colaboradores (2013) utilizaram um reator de leito fluidizado na identificação das características de desempenho do processo, tais como a eficiência térmica e produção de massa, e na discussão dos fatores determinantes da torrefação através da análise dos balanços de massa e energia.

Macedo (2012) conduziu seus experimentos num equipamento que consiste de um reator tubular de aço aquecido por resistências elétricas, por aquecimento indireto da biomassa, provido de um sistema de condensação de gases (Figura 13). O equipamento é composto de dois tubos de aço, sendo que o externo é fechado na parte superior, possuindo apenas uma abertura para entrada do termopar de controle. O tubo interno possui um compartimento para acomodar a biomassa em sua porção superior, que consiste de uma placa micro perfurada, permitindo a circulação de gases.

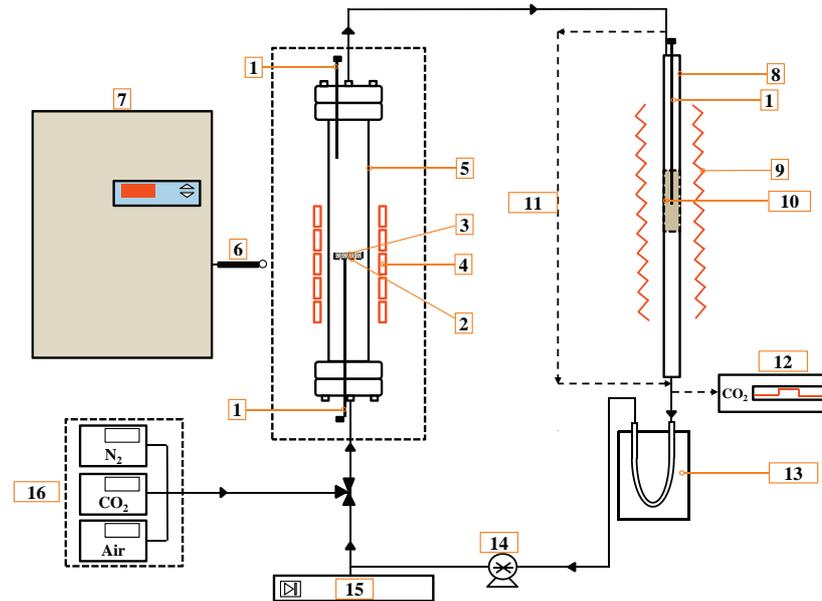
Figura 13 – Sistema de torrefação laboratorial com aquecimento indireto



Fonte: Macedo (2012)

Sarvaramini & Larachi (2014) apresentaram experimentalmente o conceito de combustão com *looping* químico como método de recuperação da energia com os voláteis da torrefação. O método consiste na queima dos voláteis da torrefação usando óxido de ferro como sólido suporte de oxigênio, no qual o CO₂ e vapor não diluído são recirculados no reator de torrefação para integração energética. O diagrama esquemático da Figura 14 apresenta a configuração dos sistemas de torrefação e *looping* químico de combustão conectados.

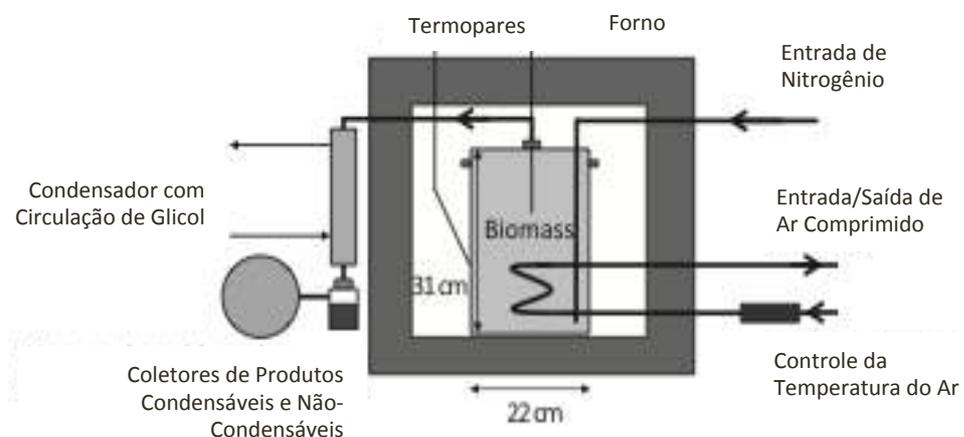
Figura 14 – Sistema de torrefação com reator de leito fixo e combustão de *looping* químico



Fonte: Sarvaramini; Larachi (2014)

A figura 15 apresenta o sistema de torrefação utilizado por Keipi e colaboradores (2014) constituído de um forno aquecido eletricamente, uma cuba reacional e uma unidade de separação de gás de produto, onde é verificado o efeito da torrefação na redução do teor de cloro da biomassa, dentre outras propriedades. Diferentemente dos sistemas usuais de torrefação, os autores não utilizaram um fluxo contínuo de gás inerte, injetaram apenas um volume inicial conhecido para garantir a condição inerte.

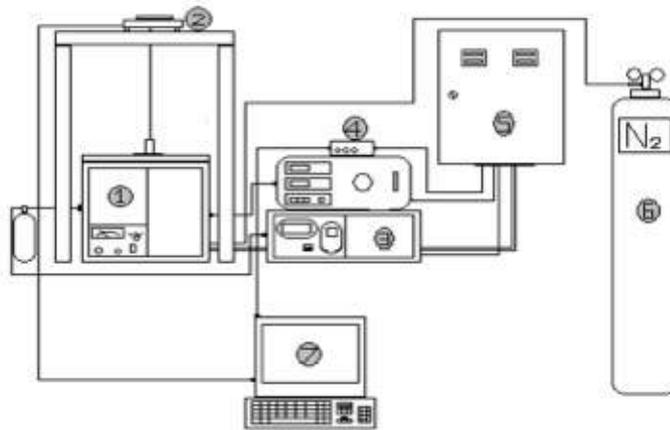
Figura 15 – Sistema de torrefação em batelada sem fluxo contínuo de gás inerte



Fonte: Keipi et al. (2014)

Rodrigues (2009), conforme Figura 16, utilizou um sistema composto de um forno elétrico com resistências e um ventilador com ajuste de rotação para facilitar o controle da temperatura do reator. Há uma entrada na parte superior do reator, por onde passa um cabo que está conectado à balança e na outra extremidade do cabo encontra-se a amostra a ser torrificada, no intuito de acompanhar a perda de massa durante o processo térmico. Também está conectado ao reator um analisador de gás oxigênio para verificação da quantidade de oxigênio presente dentro do forno, permitindo a injeção de nitrogênio para garantir uma atmosfera inerte ao processo.

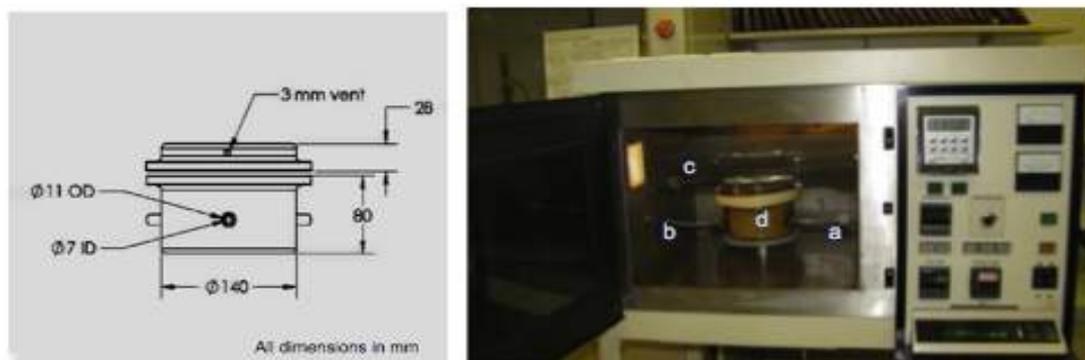
Figura 16 – Sistema de torrefação em batelada com acompanhamento da perda de massa da biomassa. Seus componentes são: 1) reator de torrefação; 2) balança eletrônica; 3) Analisador de gás; 4) Conversor; 5) quadro de controle; 6) cilindro de N₂; 7) computador



Fonte: Macedo (2009)

Satpathy e colaboradores (2014) verificaram os efeitos da torrefação em reator de microondas (Figura 17) variando a energia de microondas entre 200-300W, tempo de reação de 10 e 20 minutos e teor de umidade da amostra entre 5 e 15%. A biomassa foi inserida num recipiente cilíndrico de quartzo, hermeticamente fechado, com entradas e saídas do nitrogênio e termopar.

Figura 17 – Sistema de torrefação com aquecimento por microondas



Fonte: Satpathy et al. (2014)

Na Tabela 3 foram selecionados alguns dos principais modelos de reatores utilizados na torrefação de biomassa, apresentando suas principais vantagens, desvantagens e características. Dentre eles: aquecimento convectivo, tambor rotativo, leito fluidizado e microondas.

Tabela 2 – Modelos de reatores para torrefação em escala de bancada

Tipo de Reator	Vantagem	Limitações
Aquecimento convectivo	- Maior ocorrência de reações exotérmicas, elevando a temperatura do núcleo da biomassa.	- Possível ocorrência de variações de temperaturas ao longo do reator.
	Características: Os gases inertes aquecidos passam através de um leito empacotado ou fixo; reatores do tipo vertical ou grelha horizontal; transferência de calor de forma indireta, ocasionando um maior gasto energético.	
Tambor rotativo	- Possibilidade de aquecimentos direto e indireto da biomassa.	- Dificuldade no controle homogêneo da temperatura; - Ocorrência de calor radiativo na superfície do tambor.
	Características: Aquecimento direto ou indireto da biomassa, podendo ainda um modelo híbrido; constante mistura da biomassa.	
Leito fluidizado	- Elevada taxa de transferência de calor.	- Dificuldade na separação de material do leito; - Arraste de partículas finas.
	Características: Elevado coeficiente de transferência de calor e uniformidade da temperatura no leito; alta qualidade da biomassa torrefeita.	

Microondas	- Menor tempo de aquecimento e uniformidade da temperatura; - Design compacto.	- Sistema conceitual, com avaliações apenas qualitativas.
Características: Aquecimento através da vibração e atrito das moléculas entre 300 MHz e 300 GHz; reator do tipo aquecimento volumétrico.		

Fonte: Adaptado de WPCA (2011)

Deve-se atentar que o produto final será também determinado pelos efeitos de diferentes diâmetros dos reatores, diferentes temperaturas e tempos de residência utilizados, assim como a qualidade do produto final depende das propriedades físicas da biomassa utilizada, tais como: tamanho, forma, densidade e orientação das fibras.

3.4 O EUCALIPTO E A ALGAROBA

3.4.1 O Eucalipto

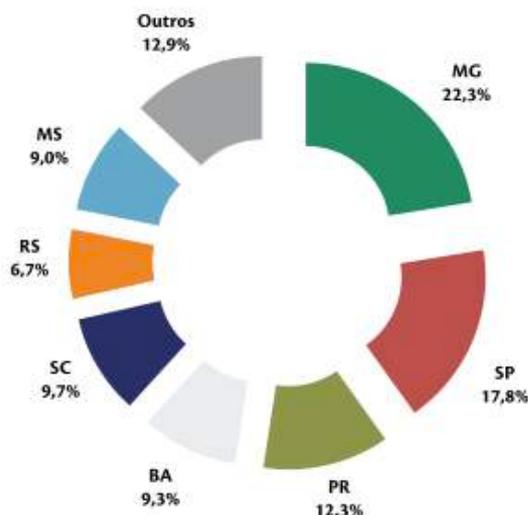
Originário da Austrália e da Indonésia, o eucalipto possui grande aplicação na indústria de papel e celulose. É pertencente ao gênero *Eucalyptus*, que reúne mais de 600 diferentes espécies. No Brasil, o eucalipto encontrou ótimas condições de clima e solo para seu desenvolvimento, e muitas vezes, apresentando crescimento mais rápido que nos demais países e alto índice de produtividade (ABAF, 2014).

O eucalipto tem uso múltiplo. Além da produção de celulose, também é fonte de carvão vegetal para gerar energia e de madeira sólida usada em móveis, pisos, revestimentos e outras aplicações na construção civil (BRACELPA, 2013).

Segundo ABRAF (2013) os estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Bahia, Santa Catarina, Mato Grosso do Sul e Rio Grande do Sul se destacaram no cenário nacional como detentores de 87,1% da área total de plantios florestais (Figura 18).

As florestas plantadas de eucalipto cobrem 5,1 milhões de hectares no Brasil, segundo dados da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2013). Desse total, 1,8 milhão é cultivado pela indústria de celulose e papel, o que corresponde a 81,2% das florestas plantadas desse setor. A Bahia possui hoje 617 mil hectares de florestas plantadas, equivalentes a cerca de 10% do total brasileiro e 1% do território baiano (ABAF, 2014).

Figura 18 – Distribuição da área de plantios de Eucalyptus e Pinus por estado, 2012



Fonte: ABRAF (2013)

A Tabela 3 apresenta as características energéticas de nove espécies de eucalipto implantadas pela Companhia Suzano de Papel e Celulose (BRITO; BARRICHELO; SEIXAS, 1983).

Tabela 3 – Características energéticas de espécies de Eucalyptus

Espécies	Densidade básica (g/cm³)	Poder calorífico (Kcal/kg)
<i>E. pilularis</i>	0,482	4989
<i>E. triantha</i>	0,565	4949
<i>E. microcorys</i>	0,583	4940
<i>E. gummifera</i>	0,466	4935
<i>E. pellita</i>	0,553	5023
<i>E. globulus</i>	0,474	4733
<i>E. saligna</i>	0,476	4889
<i>E. grandis</i>	0,391	4790
<i>E. saligna - M</i>	0,469	4799

Fonte: Brito; Barrichelo; Seixas (1983)

As espécies *Eucalyptus grandis* e *urophyla* são normalmente preferidas para a fabricação de celulose devido à sua densidade média (400-600 kg/m³) e por sua cor clara. Já as espécies *saligna*, *camaldulensis* e *citriodora* são preferidas para a fabricação de carvão vegetal, produção de postes, mourões, lenha e processamento mecânico.

3.4.2 A Algaroba

A algarobeira, ou simplesmente algaroba, é uma árvore da família das leguminosas (*Leguminosae*, subfamília *Mimosoideae*) pertencente ao gênero *Prosopis*, do qual são conhecidas mais de 40 espécies, distribuídas em três continentes: América, Ásia e África (EMBRAPA, 2009). No continente americano estão as maiores concentrações dessas espécies, ocorrendo nas regiões ocidentais mais secas, desde o sudeste dos Estados Unidos até a Patagônia. Na América do Sul, são encontradas aproximadamente 70% das espécies do gênero e, dessas, 93% são nativas da Argentina (NASCIMENTO, 2008).

No Brasil, a algaroba é cultivada, principalmente, na região Nordeste, sendo que a sua introdução ocorreu a partir de 1942, em Serra Talhada - PE, com sementes procedentes de Piura, no Peru. Existem também registros de duas outras introduções que foram realizadas em Angicos - RN, em 1946, por meio de sementes oriundas do Peru e, em 1948, com sementes do Sudão (NASCIMENTO, 2008). A partir daí, sua expansão para os demais estados ocorreu através da regeneração natural e plantios.

Segundo Nascimento (2008 apud AZEVEDO, 1982) *Prosopis* são árvores de uso múltiplo e de muita importância nas regiões semiáridas. A *Prosopis juliflora* é cultivada em sistema puro ou consorciada, para fins de produção de lenha, estaca e carvão, podendo ser utilizada tanto na alimentação humana como na alimentação animal (Figura 19).

Figura 19 – Árvore de algaroba, vagem e sementes



Fonte: EMBRAPA FLORESTA (2009)

A madeira de *P. juliflora* é dura, de fácil manuseio na carpintaria e marcenaria e possui elevada resistência ao ataque de cupim e à podridão, podendo ser utilizada na fabricação de móveis, esquadrias, tacos, linhas, caibros, ripas, dormentes, mourões, postes, estacas para cerca, lenha e carvão vegetal (MENDES, 1989).

Pereira e Lima (2002) realizaram estudo com seis espécies de algarobeira obtendo maiores valores de poder calorífico, de 5.132 kcal/kg e 5040 kcal/kg, respectivamente, para *P. juliflora* e *P. pallida* (Tabela 4).

Tabela 4 – Características energéticas da madeira e da casca de diferentes espécies de *Prosopis*

Espécies	Densidade básica (g/cm ³)		Poder calorífico (Kcal/kg)	
	Madeira	Casca	Madeira	Casca
<i>P. alba</i>	0,644 a*	0,568 b*	4908	4439
<i>P. chilensis</i>	0,700 b	0,614 c	4816	4687
<i>P. glandulosa</i>	0,755 c	0,569 b	4625	4573
<i>P. juliflora</i>	0,836 d	0,494 a	5132	4739
<i>P. pallida</i>	0,854 d	0,503 a	5040	4433
<i>P. velutina</i>	0,744 c	0,574 b	4998	4431
Médias	0,756	0,551	4935	4531
Cve (%)	4,7	5,7	8,3	7,6
F	70,551	24,593	1,660	1,335
p <	0,0001	0,0001	0,1612	0,266

* Médias seguidas por letras distintas diferenciam-se, pelo teste de Tukey, ao nível de significância de 5%.

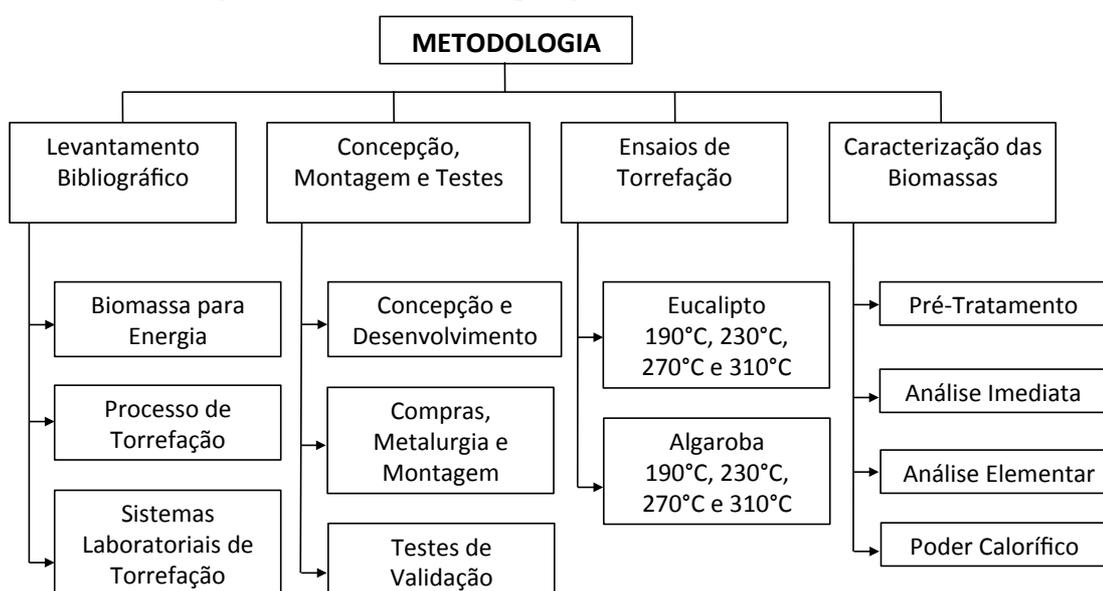
Fonte: Pereira; Lima (2002)

Ainda segundo Pereira e Lima (2002) a madeira das algarobeiras são de boa qualidade para produção de energia, quando comparadas às propriedades de madeiras de várias espécies de eucalipto.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A figura 20 apresenta o esboço da metodologia utilizada a serem detalhadas a seguir, representada pelas seguintes etapas: 1) Levantamento bibliográfico a partir de pesquisas e análises científicas; 2) Concepção e desenvolvimento do sistema; 3) Ensaios de torrefação; e 4) Caracterização e análise das biomassas crua e torrefeita a partir da análise imediata, análise elementar e poder calorífico.

Figura 20 – Detalhamento do planejamento das atividades realizadas



4.1 CONCEPÇÃO, MONTAGEM E TESTES DO REATOR

4.1.1 Concepção e Desenvolvimento do Reator e Sistema de Torrefação

A partir de recursos financeiros do LEN/UFBA⁵, a concepção do escopo do reator e o sistema de torrefação desenvolvido foram definidos levando em consideração a:

- Avaliação dos reatores de bancada e seus componentes acessórios já existentes na literatura (BERGMAN et al., 2005A; MACEDO, 2009; MACEDO, 2012; TRAN et al., 2013; SARVARAMINI&LARACHI, 2014; KEIPI et al., 2014; SATPATHY et al., 2014);

- Análise dos principais fatores que influenciam a torrefação: temperatura (200-350°C), tempo de reação (30-90 minutos), tamanho da partícula (quanto aos fenômenos de transporte envolvidos), composição da biomassa (análise elementar, PCS/PCI, origem e forma), taxa de

⁵ Laboratório de Energia e Gás, da Universidade Federal da Bahia.

aquecimento (baixa, moderada ou elevada) e atmosfera de trabalho (tipo composição e percentual do componente inerte utilizado);

- Tamanho do reator desejado: a depender da escala de trabalho desejada podendo ser de bancada, laboratorial ou comercial/industrial;

- Forma de aquecimento: direto ou indireto.

O dimensionamento do sistema de aquecimento foi realizado a partir da equação 01 na qual visa atender a necessidade do cálculo da resistência elétrica necessária para aquecimento da biomassa. Visando compensar quaisquer perdas térmicas, foi acrescentado cerca de 15% no valor final da potência encontrada.

$$P = \frac{m \times C_p \times (T_2 - T_1)}{860 \times t} \quad (01)$$

No qual temos:

P = Potência em kW/h

m = Massa a ser aquecida em Kg

C_p = Calor específico em Kcal/Kg.°C

T₂ = Temperatura final a ser atingida em °C

T₁ = Temperatura inicial do produto em °C

860 = Unidade para conversão de unidades (=1kW)

Assim, a potência final obtida para o sistema de aquecimento desejado foi de 2.000 W, considerando os limites máximos de operação, a partir do volume do reator em 2.500 ml, massa do reator de 10,8 kg, tempo de aquecimento (reator + biomassa) de 20min, temperatura inicial de 25 °C, temperatura final de 400 °C e massa de biomassa de 200 g.

O *layout* do sistema foi desenvolvido empregando uma ferramenta computacional utilizada para o desenho dos equipamentos e *layout* de sistemas denominada *SolidWorks*, um *software* de *CAD* (*computer-aided design*). O *software* baseia-se em computação paramétrica, criando formas tridimensionais a partir de formas geométricas elementares (SOLIDWORKS, 2011). Desse modo, o ambiente do programa, a criação dos sólidos e superfícies iniciaram com a definição da topologia do esboço 2D.

4.1.2 Metalurgia e Montagem

A etapa de metalurgia foi realizada nas instalações do galpão da unidade de gaseificação do LEN/UFBA, a partir da concepção e *layout* do sistema definido na etapa anterior, conforme observado na Figura 21.

Figura 21 – Materiais da metalurgia e montagem do sistema de torrefação



Para fabricação do reator de torrefação foram utilizados um tubo em aço carbono de 114x390 mm, tampos tipo flanges, isolamento térmico em lã de rocha, porta amostra em aço inox, junta grafitada, parafusos inox e chapa de zinco. A estrutura da plataforma de sustentação em aço carbono de 3/16 x 1”, painel elétrico composto por botoeiras on/off, chave contactora, botoeira de emergência, termopar tipo J e controlador-indicador de temperatura digital N1100 com 02 relés da marca Novus. Como componentes auxiliares um rotâmetro da marca OMEL ½” NPTF vidro em polipropileno (0-60 L/min), *tubing* de aço inox diâmetro externo 9,52mm (3/8"OD) x esp. 0,89 mm (0,035") tipo 316/316L, banho ultratermostático microprocessado com circulador (-20 °C a 120 °C) da marca Quimis e sistema de condensação composto por três condensadores conectados entre si e a dois erlenmeyers para coleta de voláteis condensáveis, seguido de um erlenmeyer borbulhador de gases.

Os materiais utilizados para metalurgia do reator e plataforma de sustentação, à exceção dos parafusos, foram reciclados e/ou reutilizados de equipamentos depreciados e sucatas.

4.1.3 Testes de Validação

Os testes de validação do sistema visaram a realização da simulação da torrefação buscando identificar possíveis pontos de melhorias e detalhamentos operacionais, auxiliando na definição de falhas não previstas na concepção do sistema.

Assim, foram realizados sem a presença de biomassa, utilizando ar comprimido por não haver necessidade de atmosfera inerte, a temperatura mínima de 150°C, intermediária de 250°C e superior de 350°C, evidenciando a faixa de temperatura da torrefação, durante 150 minutos. Estes testes auxiliaram na verificação da taxa de aquecimento e a variação da temperatura em torno do *setup* desejado.

4.2 ENSAIOS DE TORREFAÇÃO

As biomassas utilizadas nos testes de torrefação foram a madeira residual de eucalipto (*Eucalyptus grandis*) e de algaroba (*Prosopis juliflora*) obtidas por doação do Laboratório de Energia e Gás – LEN/UFBA e do IFBA Campus Irecê, respectivamente, na forma de cavacos com tamanho médio de 2x10x12 mm (Figura 22).

Figura 22 – Cavacos *in natura* de eucalipto (a) e algaroba (b)



Para padronização e referência dos ensaios de termoconversão e físico-químicos, todas as amostras foram inicialmente secas a 105°C durante 24 horas, conforme norma ASTM E 871-82⁶.

⁶ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. United States, 1998.

De acordo com o volume do reator, foi definido para cada ensaio a utilização de cerca de 50 gramas de biomassa de eucalipto ou algaroba para evitar a sua sobreposição e acúmulo desnecessários.

O processo de torrefação ocorreu a taxa de aquecimento em cerca de 5-10°C/min⁷, vazão de 18 L/min de nitrogênio, temperaturas de 190, 230, 270 e 310 °C (± 10 °C) visando atender toda a faixa de temperaturas da torrefação (SCHORR et al., 2012; BERGMAN et al., 2005a), e tempo de reação de 30 minutos.

Ao final de cada ensaio as amostras foram retiradas do reator quando a temperatura atingia o patamar de 120°C, sendo em seguida deixada para resfriamento final à temperatura ambiente.

4.3 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS BIOMASSAS *IN NATURA* E TORREFEITA

Conforme citado anteriormente, foram utilizados cavacos de resíduos de madeira de eucalipto e algaroba, cujas características serão analisadas tanto da biomassa *in natura* (em base seca) quanto torrefeita. Após cada ensaio de torrefação, as biomassas foram trituradas em moinho multiuso, da marca MarqLabor, sendo em seguida passado em peneira de análise granulométrica, marca Bertel, com abertura de 1mm (*mesh* 16), visando uma melhor homogeneização das amostras antes de serem realizados os ensaios de análise imediata, análise elementar e poder calorífico.

4.3.1 Análise Imediata

4.3.1.1 Umidade

A umidade é um componente presente e variável em qualquer amostra de biomassa, não sendo considerado um componente estrutural, e que pode alterar de acordo com o armazenamento e manuseio das amostras. O teor de umidade é utilizado para ajustar a massa da biomassa, de modo que todos os resultados analíticos possam ser relatados em uma base livre de umidade.

⁷ Este valor é padronizado a partir dos dados obtidos para o sistema de aquecimento nos testes de validação, a serem demonstrados nos resultados e discussão.

Os ensaios para determinação do teor de umidade foram baseados na norma ASTM E1756-08⁸, consistindo na medição da massa úmida de 1,0 - 1,5 gramas de amostra e da posterior medição da massa seca, secos em estufa a 105°C ± 3°C por, pelo menos, 60 minutos. Esse procedimento foi repetido até não observar nenhuma variação das massas obtidas após a secagem na estufa microprocessada, marca Marconi. Todas as amostras foram realizadas em triplicata.

4.3.1.2 Teor de cinzas e carbono fixo

O teor de cinzas de uma amostra é o resíduo inorgânico que permanece após uma amostra ser submetida a oxidação completa. O método utilizado para a determinação do teor de cinzas foi de acordo com a norma ASTM E1755-01⁹.

O teor de cinzas foi determinado a partir de 1,0 – 1,5 gramas de amostra colocada em um cadinho com massa pré-determinada. Em seguida, o cadinho foi inserido em forno mufla, da marca Novatécnica, pré-aquecido à 575°C, por 120 minutos, até a queima completa da biomassa. Após a amostra e o cadinho são colocados para resfriar à temperatura ambiente em dessecador, quando tem sua massa novamente determinada. A análise foi realizada em triplicata.

O teor de carbono fixo foi obtido a partir da subtração do teor de voláteis e de cinzas, como sendo a fração mássica da biomassa que foi queimada, conforme a equação 03:

$$\text{Carbono Fixo} = 100 - (\text{Voláteis} + \text{Cinzas}) \quad (03)$$

4.3.1.3 Teor de Materiais Voláteis

O teor de voláteis consiste de frações condensáveis e não-condensáveis que aumentam de acordo com a temperatura de processo utilizada, podendo indicar os rendimentos reacionais. Para isto, foi empregado o método ASTM D5832-98¹⁰, que estabelece o teor de materiais voláteis a partir da perda de massa resultante do aquecimento da amostra. Assim, o

⁸ American Society For Testing And Materials. ASTM E1756-08: Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. United States, 2008.

⁹ American Society For Testing And Materials. ASTM E1755-01: Standard Test Method for Ash in Biomass. United States, 2007.

¹⁰ American Society For Testing And Materials. ASTM D 5832-98: Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples. United States, 2008.

teor de materiais voláteis foi obtido a partir de 1,0 – 1,5 gramas de amostra colocada em forno mufla, da marca Novatécnica, a $950^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ por 07 minutos (± 10 segundos). Após este período, a amostra foi retirada e colocada em um dessecador para resfriamento e pesagem. O ensaio foi realizado em triplicata.

4.3.2 Análise Elementar

O conhecimento da composição química da biomassa visa entender o equilíbrio das equações químicas relacionadas e auxilia na previsão de produtos resultantes das reações químicas ocorridas.

A análise elementar apresenta as características importantes da biomassa através dos elementos atômicos que compõe uma amostra. Esta composição elementar pode variar de diversas formas, dependendo do tipo e a região a partir da qual a biomassa foi adquirida. A composição elementar típica da biomassa apresenta, pelo menos, quatro elementos: carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio.

Por ainda não existir um método específico para análise elementar em biomassas, foi empregado o método ASTM D 5291¹¹, que determina o carbono, hidrogênio e nitrogênio em produtos de petróleo e lubrificantes, realizado na Central Analítica do Instituto de Química, na Universidade de São Paulo.

O ensaio consistiu na aplicação da técnica para determinação das porcentagens de carbono, hidrogênio e nitrogênio em cerca de $1,1000 \pm 0,1000$ mg, pesadas em microbalança acoplada ao aparelho, de amostra de eucalipto ou algaroba, baseando-se no método de *Pregl-Dumas*, no qual as amostras foram sujeitas à combustão em uma atmosfera de oxigênio puro, e os gases resultantes dessa combustão foram quantificados em um detector TCD (detector de condutividade térmica) do analisador elementar - Perkin Elmer 2400 series ii.

4.3.3 Poder Calorífico

Segundo Friedl e colaboradores (2005) o poder calorífico da biomassa é um importante parâmetro para o planejamento e controle de usinas que utilizam este tipo de combustível. O poder calorífico superior (PCS) é a entalpia de combustão completa do combustível e inclui a

¹¹ American Society For Testing And Materials. ASTM D 5291: Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants. United States, 2010.

entalpia de condensação da água presente nos produtos da combustão tendo, por exemplo, a totalidade do carbono convertido em CO₂ e todo o hidrogênio convertido em H₂O. A informação do PCS da biomassa *in natura* e torrefeita permite avaliar e comparar o potencial energético de fontes de biomassa distintas (Silva, 2013). Outra definição utilizada é do poder calorífico inferior (PCI), obtido quando a entalpia de condensação da água não está incluída, reduzindo do poder calorífico superior o calor latente liberado pela condensação da água presente nos produtos da combustão.

Conforme norma ASTM D-2015¹², o ensaio consistiu na pesagem de 0,500 ± 0,100 g da biomassa em cadinho metálico, seguido do seu acoplamento no suporte de amostragem, inserção do fio de ignição, encaixe no vaso inox de amostras e condução à bomba calorimétrica, da marca IKA C2000 *basic*. Assim, é realizada a medição da energia térmica gerada pela combustão da amostra dentro da câmara calorimétrica sob pressão constante. Nesta câmara é injetado oxigênio de forma a garantir a combustão completa das amostras. A partir da inserção da massa da amostra, o sistema realiza a combustão e calcula o poder calorífico em joules por grama ou megajoules por quilograma (MJ/kg). Os ensaios para o eucalipto foram realizados em triplicata e para a algaroba em duplicata, considerando que os desvios padrão ficaram abaixo de 0,2%.

O poder calorífico inferior foi calculado pela equação 02 (Rezende, 1997).

$$PCI = \left\{ PCS * \left(1 - \frac{U}{100} \right) \right\} - \left\{ \left(\frac{U}{100} \right) * Lv \right\} \quad (02)$$

Sendo:

PCI = poder calorífico inferior, MJ.kg⁻¹

U = umidade, %

Lv = calor latente de vaporização da água, 540 cal.g⁻¹

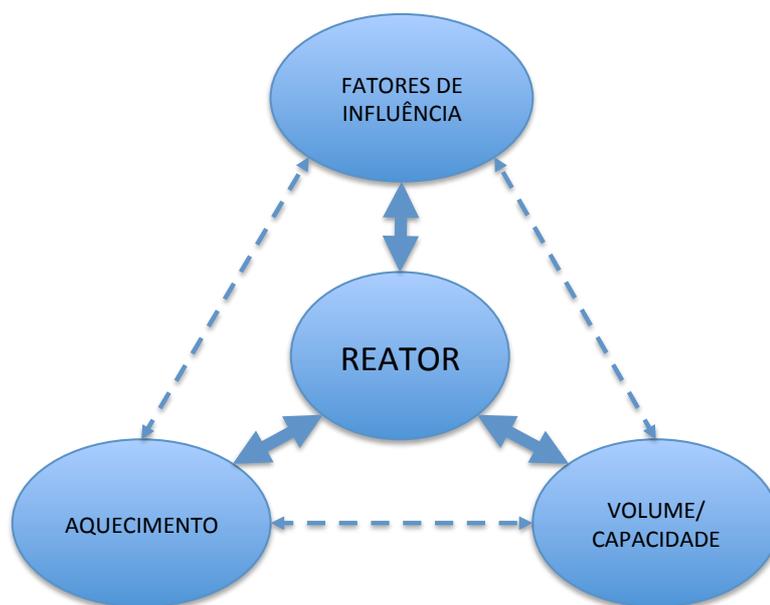
¹² American Society For Testing And Materials. ASTM D-2015: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. United State, 2000.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CONCEPÇÃO, METALURGIA, MONTAGEM E TESTES DO SISTEMA

Para a melhor definição do reator de torrefação foram realizadas considerações baseadas nos principais fatores que influenciam a torrefação, o tipo de aquecimento e o volume de biomassa a ser utilizado no processo em batelada (Figura 23).

Figura 23 – Considerações para definição do reator de torrefação



A tabela 5 apresenta os dados do escopo considerado para os principais parâmetros utilizados na concepção e montagem do reator de torrefação e seus sistemas complementares.

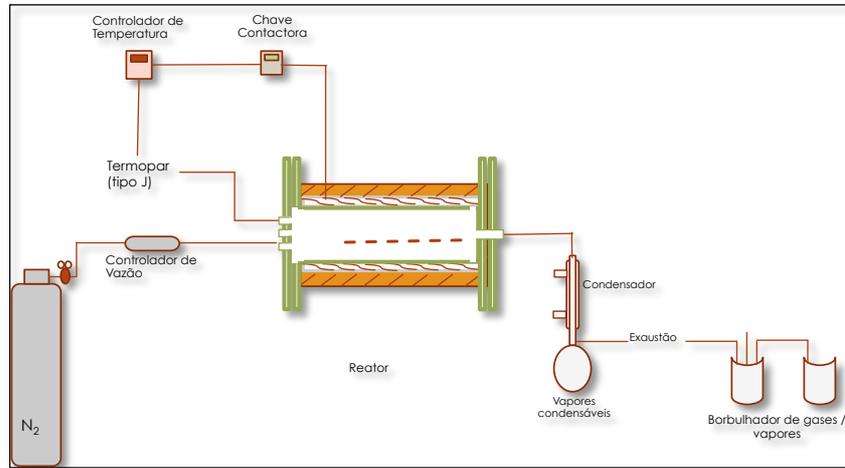
Tabela 5 – Considerações iniciais do reator e sistema de torrefação

- Faixa de Temperatura:	190, 230, 270 e 310°C	- Atmosfera de Trabalho:	Nitrogênio
- Tempo de Residência:	30-90 minutos	- Tipo de Aquecimento:	Indireto
- Tamanho da Partícula:	Cavacos ou <i>Chips</i>	- Escala:	Laboratorial
- Taxa de Aquecimento:	5 – 10°C/minuto	- Operação:	Batelada

A partir disso, foi elaborado diagrama de processo conforme Figura 24 composto pelos principais componentes que compõe o sistema de torrefação desejado, dos quais o reator de leito convectivo, batelada, sistema de condensação de gases, borbulhadores de gases,

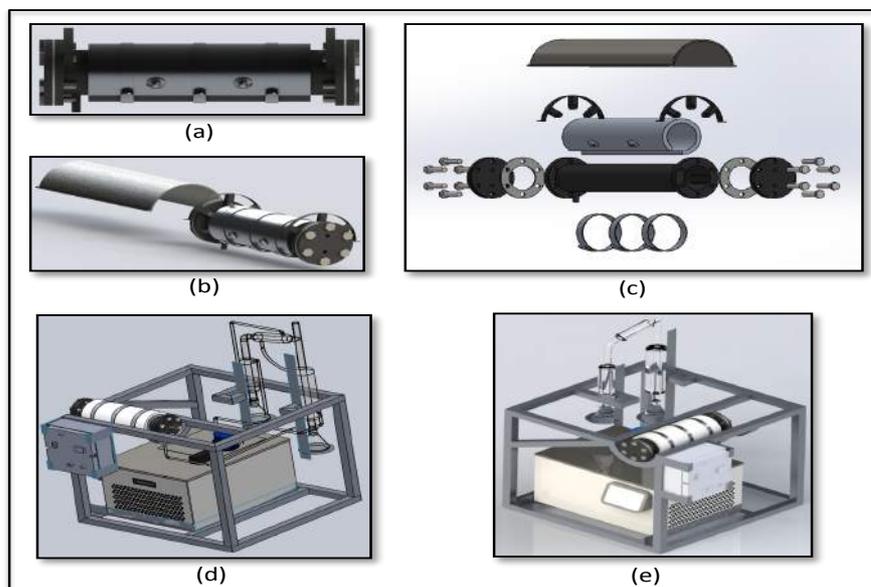
controlador de vazão de gás inerte, indicador-controlador de temperatura, chave contactora, termopar e o cilindro de nitrogênio.

Figura 24 – Diagrama do sistema de torrefação



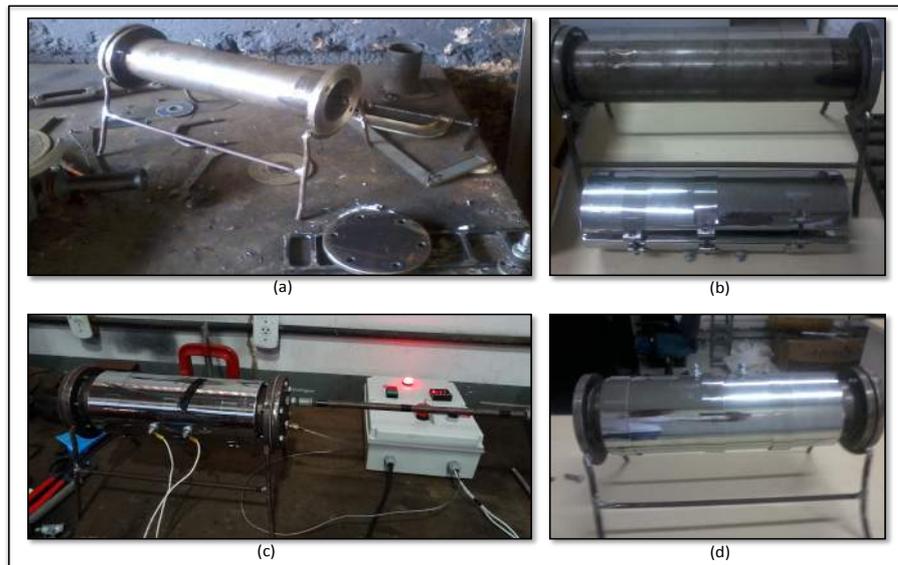
Assim, o sistema laboratorial de torrefação foi desenhado no software *Solid Works*, a partir das considerações definidas inicialmente (figura 25). O reator central é composto de tubo 4" em aço carbono, isolamento térmico em lã de rocha, porta amostra em aço inox, flanges, junta grafitada, tampos flangeados, parafusos inox, camisa de aquecimento tipo coleira de 2.000 watts e chapa de zinco.

Figura 25 – Concepção do reator laboratorial de torrefação: (a) vista lateral do reator de torrefação; (b) vista perspectiva do reator com o isolamento térmico em lã de rocha; (c) vista explodida do reator com todos os itens que o compõe; (d) sistema de torrefação composto de reator, condensadores, banho ultratermostático e quadro elétrico; (e) sistema de torrefação após renderização



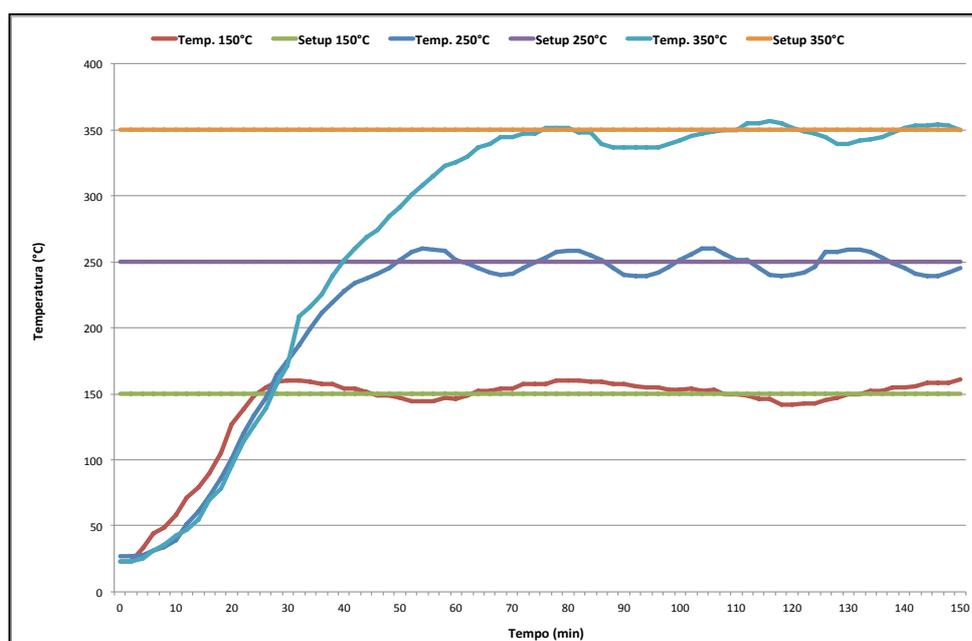
As etapas de metalurgia, testes de validação e ajustes no sistema de torrefação podem ser observados na figura 26.

Figura 26 – Metalurgia, montagem do reator de torrefação e testes laboratoriais: (a) metalurgia do reator de torrefação e componentes; (b) reator e camisa de aquecimento elétrico; (c) testes de validação e ajustes do sistema de aquecimento; (d) reator com camisa de aquecimento



Os testes de validação do sistema de aquecimento foram conduzidos a temperatura de 150°C, 250°C e 350°C. A Figura 27 apresenta as curvas obtidas a cada temperatura de setup, onde todos os dados obtidos podem ser observados no Apêndice A.

Figura 27. Gráfico dos testes de validação do sistema de aquecimento à temperaturas de 150°C, 250°C e 350°C



Os testes de validação foram conduzidos com insuflamento de ar comprimido, vazão de 10 L/minuto, durante 150 minutos, nos quais foram obtidos a variação na temperatura de *setup* em torno de ± 10 °C e taxa de aquecimento médio de 5-10°C/minuto. Apesar da variação e picos de temperatura indesejáveis, esses valores favoreceram o conhecimento do sistema, reduzindo assim o desvio padrão nas temperaturas desejadas. Para alcançar a temperatura de 350°C foram necessários cerca de 76 minutos, verificando-se que esta temperatura é o limite máximo para operação do reator devido a dificuldade de se manter estável devido às perdas térmicas, ocasionada também pela vazão de gás que reduz a temperatura interna.

O sistema de condensação foi devidamente interligado à saída do reator de torrefação e ao banho ultratermostático, sendo eliminado quaisquer vazamentos de gases e água.

A etapa seguinte foi a fabricação e montagem da estrutura ou *skid* de sustentação dos equipamentos e acessórios, visando a produção de plataforma que facilite a operação dos sistemas, de fácil movimentação e transporte do sistema (Figura 28).

Figura 28 – Metalurgia e montagem da estrutura de sustentação do sistema de torrefação: a) soldagem do *skid* de sustentação; b) sistema de condensação; c) montagem dos equipamentos; d) sistema de torrefação laboratorial montado e testado



5.2 ENSAIOS DE TORREFAÇÃO

Os ensaios de torrefação foram conduzidos a temperaturas de 190°C, 230°C, 270°C e 310°C, em ambiente inerte, permanecendo 30 minutos na temperatura desejada, utilizando cerca de 50 gramas de eucalipto ou algaroba, na forma de cavacos ou chips, anteriormente secos em estufa a 105°C por 24 horas visando a homogeneidade das amostras.

Como características dos reatores de leito convectivo, o aquecimento indireto demanda maior tempo de aquecimento e pequena limitação na quantidade de biomassa a ser utilizada, pois, quando colocadas muito próximas uma das outras ou amontoadas há possibilidade de ocasionar o surgimento de áreas com maior transferência de calor e de massa, produzindo biomassas não uniformes. A grelha inicial em chapa de inox perfurada foi substituída por tela em inox devido à elevada radiação térmica observada no interior do reator ocasionada pela chapa, influenciando assim negativamente na biomassa torrefeita. Assim, a área de contato da tela com a biomassa foi reduzida, não influenciando assim na taxa de aquecimento do reator e biomassa.

O resultado das biomassas torrefeitas experimentalmente pode ser visualizado na figura 29, podendo ser observado a coloração característica e seu escurecimento gradual com o aumento da temperatura.

Figura 29 – Biomassas torrefeitas à diferentes temperaturas, tendo na parte superior o eucalipto e na parte inferior a algaroba



As mudanças de coloração das biomassas podem estar relacionadas às perdas da umidade livre superficial, umidade interna e voláteis gerados a diferentes fases da torrefação (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014), a depender das condições de processo. Segundo Torres e colaboradores (2010) as alterações na cor da madeira sob o tratamento térmico são principalmente devido à reações de hidrólise e oxidação, devendo-se levar em consideração os princípios dos fenômenos de transporte envolvidos. A cor da biomassa torrificada também depende do tipo da biomassa bruta e as suas densidades (AYDEMIR et al. 2010). As mudanças e a transformação da hemicelulose e lignina sob a degradação térmica, o nível de pH, o teor de umidade, o meio de aquecimento, tempo de exposição e o tipo de espécies utilizadas também produzem uma cor escura ao produto (WHITE; DIETENBERGER, 2001 apud TORRES et al. 2010). A cor da superfície da madeira é também afetada pela concentração de açúcares de baixo peso molecular, álcoois de açúcar e compostos nitrogenados (NHUCHHEN; BASU; ACHARYA, 2014).

5.3 CARACTERIZAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS BIOMASSAS

5.3.1 Caracterização da Biomassa *In Natura*

Após secagem a 105°C por 24 horas, as biomassas passaram pela etapa de pré-tratamento através da trituração e peneiramento em malha de abertura de 1 mm (16 *mesh*), visando dessa maneira a homogeneização das amostras.

As tabelas 06 e 07 apresentam as principais características físico-químicas e energéticas das biomassas de eucalipto e algaroba, quanto a análise imediata, análise elementar e poder calorífico. Em geral, estes resíduos apresentam baixo poder calorífico, elevada relação oxigênio/carbono, baixa densidade energética, sendo combustíveis muito oxigenados e reativos. Estas características dificultam muitas vezes a sua utilização direta como energético, assim como quando a utilização dessas biomassas são em locais distantes de sua origem ou precisam de armazenagem por longos períodos, ocorrem processos de fermentação alterando ainda mais as suas características.

Tabela 6 – Análise imediata e análise elementar das biomassas *in natura* de eucalipto e algaroba

Análise Imediata (%base seca)						
	Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)		
Eucalipto	0,33	0,23	96,80	2,96		
Algaroba	0,21	1,87	96,48	1,65		
Análise Elementar (%base seca)						
	C	H	N	O	H/C	O/C
Eucalipto	46,81	6,11	0,12	46,96	0,13	1,00
Algaroba	46,11	6,49	0,06	47,36	0,14	1,03

Tabela 7 – Poder calorífico superior e inferior das biomassas *in natura* de eucalipto e algaroba

	Poder Calorífico Superior - PCS (MJ.Kg⁻¹)	Umidade (%) In Natura	Poder Calorífico Inferior - PCI (MJ.Kg⁻¹)
Eucalipto	18,13	0,41	18,06
Algaroba	16,33	0,32	16,24

Neste sentido o tratamento dessas biomassas através da torrefação, além de diminuir a umidade e aumentar a hidrofobicidade, visa melhorar sua densidade energética e propriedades físico-químicas favorecendo a sua armazenagem por longos períodos.

5.3.2 Caracterização das Biomassas Torrefeitas

Na tabela 8 é apresentada a caracterização das biomassas após torrefação à diferentes temperaturas.

Podemos verificar que o comportamento das propriedades do eucalipto e algaroba são modificadas com o aumento da temperatura do processo, tendo influência direta durante a torrefação. A medida que a temperatura de torrefação é aumentada, a concentração de carbono aumenta, provocando a redução das relações H/C e O/C. O elevado teor de oxigênio da algaroba *in natura* ocasiona a baixa fração H/C observada na figura 30, geralmente relacionada à composição química característica da lignina de espécies folhosas. Assim, o produto sólido a partir de uma biomassa torreficada com maior conteúdo de lignina torna-se com maior densidade energética em comparação com de menor teor de lignina. Desse modo, uma eliminação completa de ambos os conteúdos de celulose e hemicelulose da madeira

produz um produto que pode ter densidade energética semelhante à do carvão (NHUCHHEN, BASU e ACHARYA, 2014).

Tabela 8 – Análise imediata e análise elementar das biomassas torrefeitas de eucalipto e algaroba

Análise Imediata (%base seca)							
		Umidade (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Voláteis (%)	Carbono Fixo (%)		
Eucalipto	190°C	0,17	0,34	93,10	6,56		
	230°C	0,06	0,39	90,75	8,86		
	270°C	0,04	0,43	83,20	16,36		
	310°C	0,03	0,55	71,40	28,05		
Algaroba	190°C	0,01	2,13	93,86	4,01		
	230°C	0,01	2,25	84,92	12,83		
	270°C	0,00	2,97	72,65	24,38		
	310°C	0,00	4,41	62,94	32,65		
Análise Elementar (%base seca)							
		C	H	N	O	H/C	O/C
Eucalipto	190°C	48,84	6,18	0,18	44,81	0,13	0,92
	230°C	49,65	5,89	0,08	44,39	0,12	0,89
	270°C	54,49	5,68	0,06	39,79	0,10	0,73
	310°C	56,90	4,78	0,20	38,13	0,08	0,67
Algaroba	190°C	47,28	6,10	0,20	46,43	0,13	0,98
	230°C	49,73	5,95	0,24	44,08	0,12	0,89
	270°C	61,16	5,64	0,02	33,19	0,09	0,54
	310°C	66,62	4,95	0,00	28,44	0,07	0,43

As figuras 31 e 32 apresentam o comportamento do teor de voláteis e carbono fixo do eucalipto e algaroba, respectivamente. Como o teor de voláteis diminui gradativamente e o teor de cinzas é comparativamente baixo, o carbono fixo residual tende a aumentar no produto torreficado em comparação com a madeira *in natura*. Em ambas as biomassas, o teor de voláteis é caracterizado por uma maior redução à temperaturas acima de 270°C, conforme esperado. Quanto ao carbono fixo, obtido do teor de cinzas e voláteis, sofre um incremento positivo com o aumento da temperatura.

Figura 30 - Relação entre as frações H/C e O/C do eucalipto e algaroba

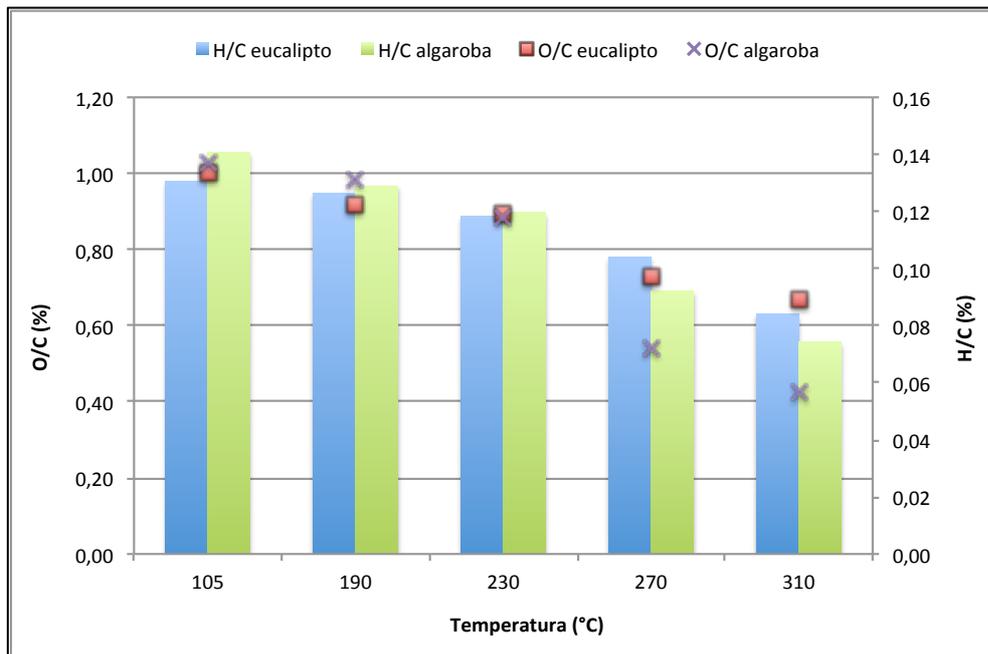


Figura 31– Influência da temperatura no comportamento do teor de voláteis e carbono fixo na torrefação do eucalipto

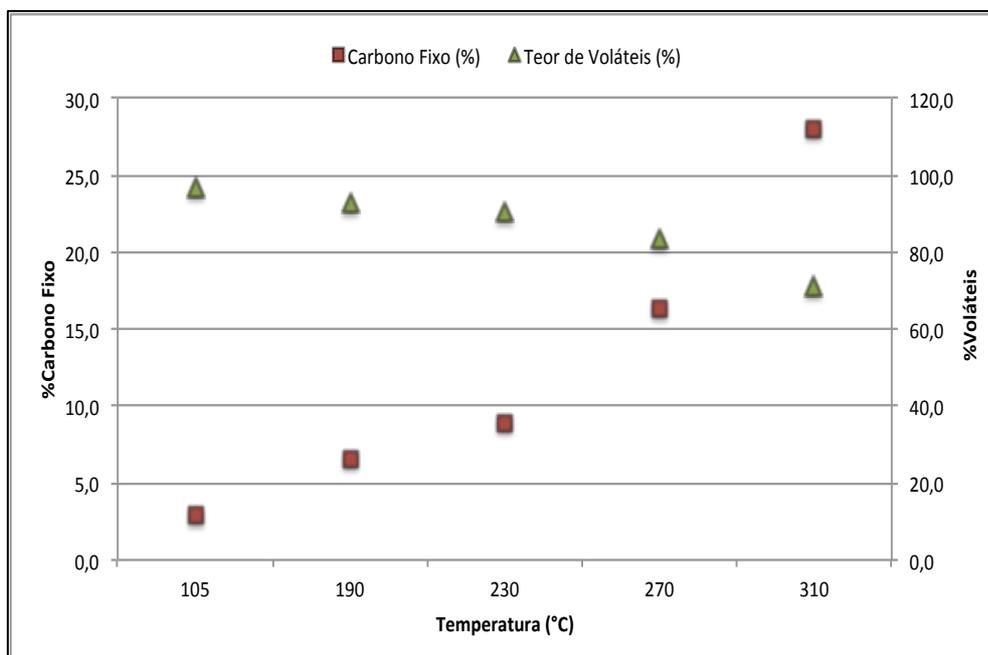
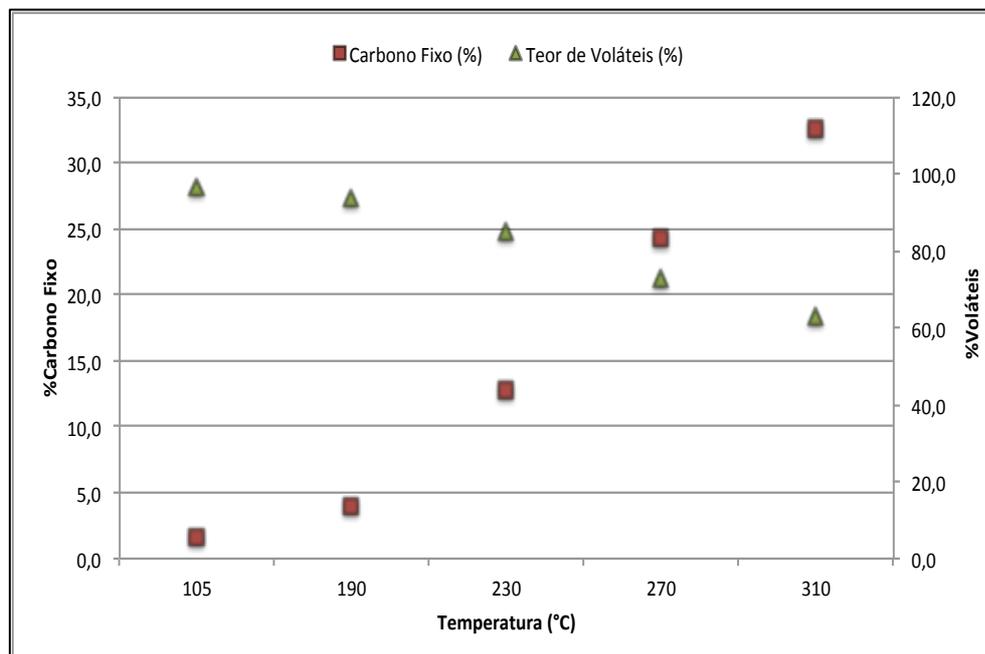


Figura 32 – Influência da temperatura no comportamento do teor de voláteis e carbono fixo na torrefação da algaroba



Os resultados do poder calorífico superior das amostras após a torrefação estão apresentados na tabela 9, variando entre 19,05 e 25,48 MJ.kg⁻¹ para o eucalipto e de 18,74 a 26,85 MJ.kg⁻¹ para a algaroba. Além do carbono fixo, nota-se que o aumento da temperatura de torrefação tem influência no aumento direto do PCS e, conseqüentemente, do PCI. No entanto, o aumento da temperatura de torrefação, acima de 250°C, causa a redução exponencial no rendimento de sólidos (BERGMAN et al., 2005a).

Tabela 9 – Poder calorífico superior e inferior das biomassas torrefeitas de eucalipto e algaroba

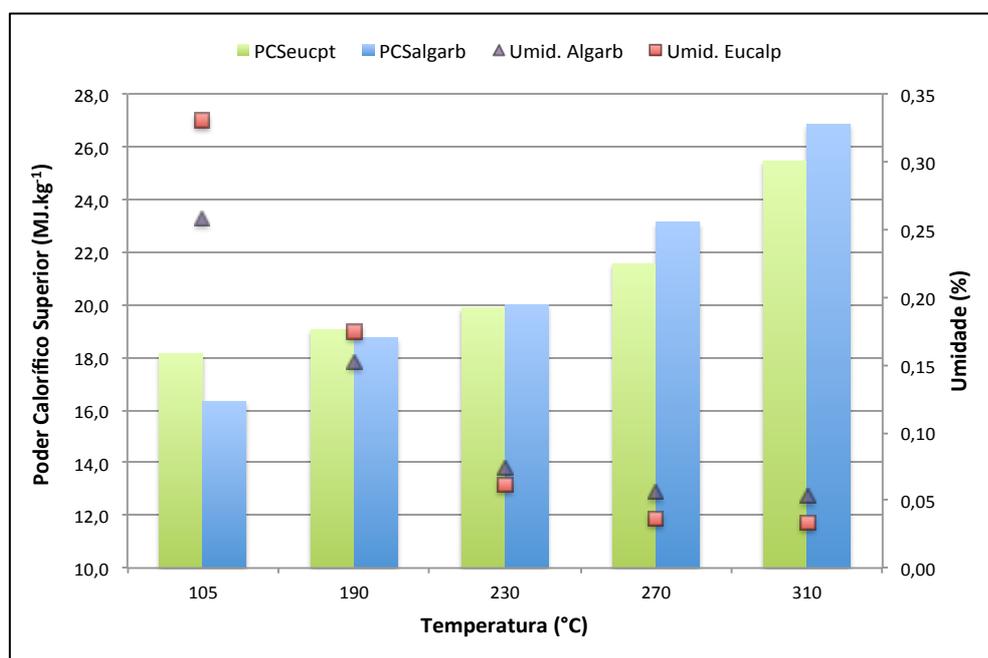
		Poder Calorífico Superior - PCS (MJ.Kg ⁻¹)	Umidade (%)	Poder Calorífico Inferior - PCI (MJ.Kg ⁻¹)
Eucalipto	190°C	19,05	0,17	19,01
	230°C	19,90	0,06	19,88
	270°C	21,57	0,04	21,56
	310°C	25,48	0,03	25,47
Algaroba	190°C	18,74	0,01	18,74
	230°C	20,02	0,01	20,02
	270°C	23,14	0,00	23,14
	310°C	26,85	0,00	26,85

Na figura 33 é apresentado o comportamento do poder calorífico superior e da umidade em função da temperatura de torrefação. Quando utilizada em fornos industriais, a biomassa com excesso de umidade prejudica o rendimento e pode causar danos físicos nos equipamentos. Assim como, quanto menor o teor de umidade da biomassa menor será o seu consumo por volume de energia desejado. O baixo teor de umidade e caráter hidrófobo são características desejáveis, pois favorece o transporte da biomassa, já que o custo do transporte é menor porque a quantidade de energia potencial por volume transportado é muito maior (FELFLI, 1999).

Dessa forma, a torrefação mostrou-se como um processo de melhoria das propriedades energéticas das biomassas, já que ao consideramos as biomassas crua (base seca) em relação às biomassas após a torrefação, observa-se um incremento de, pelo menos, 70% e 60% no PCS para o eucalipto e algaroba, respectivamente.

Quanto ao poder calorífico inferior, o seu valor final sofre influência direta do teor de umidade. Na prática, o PCI apresenta um valor mais exato do calor liberado pelo combustível.

Figura 33 – Influência da temperatura no poder calorífico e umidade do eucalipto e algaroba



6 CONCLUSÃO

As matérias-primas utilizadas neste trabalho foram escolhidas no intuito de dar continuidade às atividades de desenvolvimento de tecnologias de conversão da biomassa em energia, no Laboratório de Energia e Gás – LEN da Universidade Federal da Bahia, tendo como inovação o uso da algaroba (*Prosopis juliflora*), biomassa bastante utilizada no semiárido nordestino como fonte energética para curtumes, cerâmicas, padarias, pizzarias e fornos, dentre outras aplicações. Devido à grande utilização do eucalipto (*Eucalyptus grandis*) em trabalhos científicos, seu papel foi fundamental na validação dos dados e informações geradas na torrefação, além de que esta biomassa representa cerca de 1% do território baiano, com cerca de 617 mil hectares de florestas plantadas, equivalentes a aproximadamente 10% do total brasileiro.

O processo de torrefação como tecnologia de pré-tratamento de biomassas se mostrou como uma excelente alternativa para melhoria das propriedades físico-químicas e energéticas do eucalipto e da algaroba, realizado no reator e sistema desenvolvido. Dessa forma, o reator de torrefação atendeu ao desejado e encontra-se pronto para utilização em estudos mais detalhados do tratamento termoquímico de biomassas. No entanto, deve ser verificada a sua associação com processos sequenciais de compactação ou densificação da biomassa para assim, obter-se melhor aproveitamento energético final. Deve-se ainda, realizar estudos para melhorar a eficiência energética global do processo, por exemplo, através da reutilização dos produtos e co-produtos gerados.

Como sugestão para trabalhos futuros, a partir deste reator laboratorial, é importante a realização de estudos aprofundados sobre a torrefação com diferentes biomassas regionais, a densificação de biomassas torrefeitas, a modelagem matemática e computacional do sistema de torrefação, caracterização e proposição para reutilização da fase líquida gerada, aplicação do *looping* químico ao sistema e a interseção com outras áreas do conhecimento, tais: eficiência energética, dendroenergia, química verde, *waste to energy*, *Biomass To Liquid*, associativismo e cooperativismo, dentre outros.

REFERÊNCIAS

- ABAF – Relatório da Associação Baiana das Empresas de Base Florestal. Ano 2014.
- ABRAF. Anuário estatístico ABRAF 2013. Ano base 2012 – Brasília: 2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E 871-82: Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels. United States, 1998.
- _____. ASTM E1756-08: Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. United States, 2008.
- _____. ASTM E1755-01: Standard Test Method for Ash in Biomass. United States, 2007.
- _____. ASTM D 5832-98: Standard Test Method for Volatile Matter Content of Activated Carbon Samples. United States, 2008.
- _____. ASTM D 5291: Standard Test Methods for Instrumental Determination of Carbon, Hydrogen and Nitrogen in Petroleum Products and Lubricants. United States, 2010.
- _____. ASTM D-2015: Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke by the Adiabatic Bomb Calorimeter. United State, 2000.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica - Atlas de energia elétrica do Brasil. Brasília: 2012.
- ACHARYA, B.; SULE, I.; DUTTA, A. A review on advances of torrefaction technologies for biomass processing. *Biomass Conv. Bioref.*, 2:349–369, 2012.
- ARIAS, B., PEVIDA, C., FERMOSE, J., PLAZA, M.G., RUBIERA, F., PIS, J.J. Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass. *Fuel Process. Technol.*, v. 89, p. 169-75, 2008.
- AYDEMIR, D., GUNDUZ, G., OZDEN, S. The Influence of Thermal Treatment on Color Response of Wood Materials. *Color Research and Application*, Wiley Periodicals Inc., 148-153, 2010.
- AZEVEDO, C.F. Como e Porque a Algarobeira foi Introduzida no Nordeste. In: *Simpósio Brasileiro Sobre Algaroba*. Natal: EMPARN, p.300-306, 1982.
- BASU, P.; SADHUKHAN, A. K.; GUPTA, P.; RAO, S.; DHUNGANA, A.; ACHARYA, B. An Experimental and Theoretical Investigation on Torrefaction of a Large Wet Wood Particle. *Biores. Techn.*, 2014.
- BATES, R. B., GHONIEM, A. F. Biomass Torrefaction: Modeling of Reaction Thermochemistry. *Bioresource Technology*, 134 331-340, 2013.
- BATIDZIRAI, B.; MIGNOT, A.P.R; SCHAKEL, W.B.; JUNGINGER, H.M.; FAAIJ, A.P.C. Biomass torrefaction technology: Techno-economic status and future prospects. *Energy*, v. 62, p. 196 – 214, 2013.

BEN - Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013. Empresa de Pesquisa Energética – Rio de Janeiro, 2014.

BERGMAN, P.C.A., A.R. BOERSMA, R.W.H. ZWART, J.H.A. KIEL. Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations. Energy Research Centre of the Netherlands. Report ECN C 05-013, Petten, 2005a.

BERGMAN, P.C.A. Torrefaction in combination with pelletisation – the TOP process, Energy Research Centre of the Netherlands, Report ECN C 05-073, Petten, 2005b.

BERGMAN, P.C.A., BOERSMA, A.R., KIEL, J.H.A., PRINS, M.J., PTASINSKI, K.J., JANSSEN, F.G.G.J. Torrefied biomass for entrained-flow gasification of biomass. Energy Research Centre of the Netherlands, Report ECN C 05-026, ECN, Petten, 2005c.

BORREGA, M., KÄRENLAMPI, P.P. Effect of relative humidity on thermal degradation of Norway spruce (*Picea abies*) wood. *Journal of Wood Science*, vol.54, p.323-328, 2008.

BRACELPA - Associação Brasileira de Celulose e Papel. Ano 2013.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa). Brasília, 2004. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/>>. Acesso em: 03/01/2015.

BRITO, J.O., BARRICHELO, L.E.G., SEIXAS, F. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, n.23, p. 53-56, Piracicaba-SP, 1983.

BROSTRÖM, M.; NORDIN, A.; POMMER, L.; BRANCA, C.; BLASI, C.D. Influence of torrefaction on the devolatilization and oxidation kinetics of wood. *J. Anal. Appl. Pyrol*, v. 96, p. 100–109, 2012.

CHEN, W., KUO, P. Torrefaction and Co-Torrefaction Characterization of Hemicellulose, Cellulose and Lignin as Well as Torrefaction of Some Basic Constituents in Biomass. *Energy*, 36, 803-811, 2011.

CIOLKOSZ, D.; WALLACE, R. A review of torrefaction for bioenergy feedstock production. *Biofuel Bioprod. Bior.*, 2011.

CMI, Group. Torrefaction Process, 2013.

COUHERT, C.; SALVADOR, S.; COMMANDRÉ, J.M. Impact of torrefaction on syngas production from wood. *Fuel*, v. 88, p. 2286-2290, 2009.

DAMARTZIS, T., ZABANIOTOU, A. Thermochemical conversion of biomass to second generation biofuels through integrated process design - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, p. 366–378, 2011.

DHUNGANA, A. Torrefaction of biomass. Thesys of Master of Applied Science. Department of Mechanical Engineering, Dalhousie University Halifax, Nova Scotia, August 2011.

EMBRAPA FLORESTAS: Comunicado Técnico - 240: Algaroba (*Prosopis juliflora*): Árvore de Uso Múltiplo para a Região Semiárida Brasileira, 2009. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasil.

EN 14961-1:2010, Solid biofuels – Fuel specification and classes – Part 1: General requirements.

EN 15234-1, Solid biofuels – Fuel quality assurance – Part 1: General requirements.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Estudos EPE: Potencial de Redução de Emissões de CO₂ em Projetos de Produção e Uso de Biocombustíveis, 2007.

FELFLI, F. E. F. Melhoramento das Características Energéticas de Resíduos de Biomassa através da Torrefação. Dissertação de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Estadual de Campinas – Campinas, SP - 1999.

FELFLI, F. E. F.; LUENGO, C. A.; SOLER, P.B. Torrefação de Biomassa: Características, Aplicações e Perspectivas. Encontro de Energia no Meio Rural, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético -- NIPE/UNICAMP, 2003.

FRIEDL, A., PADOUVAS, E., ROTTER, H., VARMUZA, K. Prediction of heating values of biomass fuel from elemental composition. *Analytica Chimica Acta*, vol. 544, p. 191–198, 2005.

HAMAGUCHI, M., CARDOSO, M., VAKKILAINEN, E.; Alternative Technologies for Biofuels Production in Kraft Pulp Mills—Potential and Prospects, *Energies* 2012, 5, page 2288-2309.

INTERNATIONAL AGENCY ENERGY – IEA; Sustainable Production of Second-Generation Biofuels, 2010.

KEMA. Statusoverzicht en Impactanalyse van Torrefaction in Nederland, in opdracht van Agentschap NL, rapportnummer 30920555-Consulting 10-0508, 2010.

KIEL, J.H.A., VERHOEFF, F., GERHAUSER, H., MEULEMAN, B. BO₂ -Technology For Biomass Upgrading Into Solid Fuel – Pilot-Scale Testing And Market Implementation. Paper presented at 16th European Biomass Conference & Exhibition, 2-6 June 2008, Valencia, Spain.

KEIPI, T., TOLVANEN, H., KOKKO, L., RAIKO, R. The Effect of Torrefaction on the Chlorine Content and Heating Value of Eight Woody Biomass Samples. *Biomass and Bioenergy* XXX, I-8, 2014.

KOPPEJAN, J., SOKHANSANJ, S., MELIN, S., MADRALI, S.. Status overview of torrefaction technologies; FINAL REPORT - IEA Bioenergy Task 32 report. Enschede, December 2012.

LAM, P.K., SOKHANSANJ, S., BI, T., LIM, C.J, MELIN, S. Energy Input and Quality of Pellets Made from Steam-Exploded Douglas Fir (*Pseudotsuga menziesii*). *Energy & Fuels*, ed.25 vol.4, p.1521-1528, 2011.

LIPINSKY, E.S., ARCATE, J.R., REED, T.B. Enhanced wood fuels via torrefaction. Fuel Chemistry Division Preprints, vol. 47(1), p.408–410, 2002.

MACEDO, L. A. Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis do processo de torrefação. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 49p, 2012.

MEDIC, D.; DARR, M.; SHAH, A.; POTTER, B.; ZIMMERMAN, J. Effects of torrefaction process parameters on biomass feedstock upgrading. Fuel, v. 91, p.147–154, 2012.

MENDES, B. V. Potencialidades de Utilização da Algarobeira (*Prosopis juliflora* (SW) DC) no semi-árido Brasileiro. 2. ed. Mossoró: ESAM, 1989. 44 p.

Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2030. Brasília:MME:EPE, 2007.

NACHENIUS, R.W., RONSSE, F., VENDERBOSCH, R.H., PRINS, W. Book Advances In Chemical Engineering, Volume 42, Chapter 2. Elsevier's Science & Technology, 2013. ISBN: 978-0-12-386505-2, ISSN: 0065-2377.

NASCIMENTO, C.E.S.; Comportamento invasor da algarobeira *Prosopis juliflora* (Sw) DC. nas planícies aluviais da caatinga. 2008. 150f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

NHUCHHEN, D.,R., BASU, P., ACHARYA, B. A Comprehensive Review on Biomass Torrefaction. International Journal of Renewable Energy & Biofuels, ID 506376, DOI: 10.5171/2014.506376, 2014.

NOGUEIRA, L.A.H., LORA, E.E.S. Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações. - 2a edição – ISBN 8571930775. Rio de Janeiro-RJ. Editora Interciência, 2003.

OLIVEIRA, M. L. R. Mensuração e modelagem do crescimento e da produção de povoamentos não-desbastados de clones de eucalipto. 103f. Tese de doutorado em Ciência Florestal – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

PEREIRA, J.C.D.; LIMA, P.C.F.; Comparação da Qualidade da Madeira de Seis Espécies de Algarobeira para a Produção de Energia. Bol. Pesq. Fl., Colombo, n° 45, jul./dez. 2002 p. 99-107.

PIMCHUAI, A.; DUTTA, A.; BASU, A. Torrefaction of agriculture residue to enhance combustible properties. Energy Fuels, v. 24, p. 4638–4645, 2010.

PRINS, M. J., PTASINSKI, K. J., JANSSEN, F. J. J. G. Torrefaction of Wood Part 2. Analysis of Products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, vol 77, 35-40, 2006.

REZENDE, M. A. Uma abordagem não convencional sobre as principais características físicas da madeira, com ênfase para retratibilidade, massa específica e técnica de atenuação da radiação gama. Tese (Livre-docência) - Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1997.

RODRIGUES, T. O. (2009). Efeitos da Torrefação no Condicionamento de Biomassa para Fins Energéticos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Publicação

PPGEFL.DM-109/2009, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 71 p.

ROUSSET, P., MACEDO, L., COMMANDRE, J.,M., MOREIRA, A. Biomass Torrefaction under Different Oxygen Concentrations and Its Effect on the Composition of the Solid By-Products. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol 96, 86-91, 2012.

SAMANIEGO, M. R. P., YADAMA V., PEREZ, M. G., LOWELL, E., MCDONALD A. G. Effect of temperature during wood torrefaction on the formation of lignin liquid intermediates. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 109, p. 222–233, 2014.

SATPATHY, S. K., TABIL, L. G., MEDA, V., NAIK, S. N., PRASAD, R. Torrefaction of wheat and barley straw after microwave heating. *Fuel* 124, p. 269–278, 2014.

SARVARAMINI, A.; ASSIMA, G.P.; LARACHI, F. Dry torrefaction of biomass – Torrefied products and torrefaction kinetics using the distributed activation energy model. *Chem. Eng. J.*, p. 498-507, 2013a.

SARVARAMINI, A.; GRAVEL, O.; LARACHI, F A. Torrefaction of ionic-liquid impregnated lignocellulosic biomass and its comparison to dry torrefaction. *Fuel*, v. 103 , p. 814–826, 2013b.

SARVARAMINI, A.; ASSIMA, G. P., BEAUDOIN, G.; LARACHI, F. Biomass torrefaction and CO₂ capture using mining wastes – A new approach for reducing greenhouse gas emissions of co-firing plants. *Fuel*, v. 115, p. 749–757, 2014a.

SARVARAMINI, A.; LARACHI, F. Integrated biomass torrefaction – Chemical looping combustion as a method to recover torrefaction volatiles energy. *Fuel*, v. 116 , p. 158–167, 2014b.

SCHORR, C.; MUINONEN, M.; NURMINEN, F. Torrefaction of biomass. Mikkeli, Finland: Miktech Ltd/Centre of Expertise-programme; p. 55, 2012.

SIERRA R., SMITH A., GRANDA C., HOLTZAPPLE M.T. Producing fuels and chemicals from lignocellulosic biomass. *Chemical Engineering Process, Society of Biological Engineering Special Section: Biofuels*, vol.104, S10–S18, 2008.

SILVA, A. G. Condicionamento de resíduo de *Eucalyptus grandis* para produção de biocombustível sólido. Tese de doutorado - Universidade Federal da Bahia. Instituto de Química, 2013.

SOLIDWORKS. *Conceitos Básicos do SolidWorks –Training*. Alge Tecnologia, Salvador - Bahia: 2011.

STAMM, A.J. Thermal Degradation of Wood and Cellulose. *Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 48, p. 413–417, 1956.

STRANDBERG, M., OLOFSSON, I., POMMER, L., WIKLUND-LINDSTRÖM, S., ÅBERG, K., NORDIN, A. Effects of temperature and residence time on continuous torrefaction of spruce wood. *Fuel Processing Technology*, 134, 387–398, 2015.

TORRES, S. S., JOMAA, W., MARC, F., PUIGGALI, J-R. Causes of Color Changes in Wood During Drying. *Forestry Studies China*, vol. 12, n°4: p. 167-175, 2010.

TORFTECH, Group. *Process Reactor Technologies*. United Kingdom, 2006.

TRAN, K.Q.; LUO, X.; SEISENBAEVA, G.; JIRJIS, R.; Stump torrefaction for bioenergy application. *Appl. En.*, v. 112, p. 539–546, 2013.

TUMULURU, J.S., SOKHANSANJ, S., WRIGHT, C.T., BOARDMAN, R.D., HESS, J.R.. Review on Biomass Torrefaction Process and Product properties and Design of Moving Bed Torrefaction System Model Development; 2011 ASABE Annual International Meeting, Louisville, Kentucky August 7 – 10, 2011a.

TUMULURU, J.S., SOKHANSANJ, S., WRIGHT, C.T., BOARDMAN, R.D., YANCEY, N.A.. A Review on Biomass Classification and Composition, Co-firing Issues and Pretreatment Methods; 2011b.

TUMULURU, J.S., SOKHANSANJ, S., RICHARD, H.J., WRIGHT, C.T., and BOARDMAN, R.D. A review on biomass torrefaction process and product properties for energy applications. *Industrial Biotechnology*, vol.7, ed.5: p.384-401, October 2011c.

VERTES, A.A., QURESHI, N., BLASCHEK, H.P., YUKAWA, H. Biomass to biofuels: strategies for global industries. Chap. 02, p. 27-50, John Wiley & Sons, Ltd. 2010.

WHITE, R. H., DIETENBERGER, M. A. Wood Products: Thermal Degradation and Fire, In Torres, S. S., JOMAA, W., MARC, F., PUIGGALI, J. R. (2010). Causes of Color Changes in Wood during Drying. *Forestry Studies in China*, vol 12, 167-175, 2001.

WORLDWATCH INSTITUTE. *Biofuels for Transport. Global Potential and Implications for Sustainable Agriculture and Energy*. London: Earthscan, 2007.

WPAC - Wood Pellet Association of Canada. *Torrefied wood: A new emerging energy carrier (presentation)*, 2011.

ZHENG, A., ZHAO, Z., HUANG, Z., ZHAO, K., WEI, G., WANG, X., HE, F., LI, H. Catalytic Fast Pyrolysis of Biomass Pretreated by Torrefaction with Varying Severity. *Energy&Fuels*, 28, 5804–5811, 2014.

APÊNDICE A - Dados dos testes de validação do sistema de aquecimento

TEMPERATURA DE 150°C

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	23	68	154	136	152
2	23	70	154	138	155
4	33	72	157	140	155
6	44	74	157	142	156
8	49	76	157	144	158
10	58	78	160	146	158
12	71	80	160	148	158
14	79	82	160	150	161
16	90	84	159		
18	105	86	159		
20	127	88	157		
22	138	90	157		
24	149	92	156		
26	155	94	155		
28	159	96	155		
30	160	98	153		
32	160	100	153		
34	159	102	154		
36	157	104	152		
38	157	106	153		
40	154	108	150		
42	154	110	150		
44	151	112	149		
46	149	114	146		
48	149	116	146		
50	147	118	142		
52	144	120	142		
54	144	122	143		
56	144	124	143		
58	147	126	145		
60	146	128	147		
62	149	130	150		
64	152	132	150		
66	152	134	152		

TEMPERATURA DE 250°C

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	27	68	240	136	253
2	27	70	241	138	249
4	28	72	245	140	245
6	31	74	250	142	241
8	34	76	253	144	239
10	39	78	257	146	239
12	51	80	258	148	242
14	61	82	258	150	245
16	72	84	255		
18	86	86	251		
20	101	88	245		
22	120	90	240		
24	134	92	239		
26	147	94	239		
28	164	96	242		
30	175	98	246		
32	187	100	251		
34	199	102	256		
36	211	104	260		
38	219	106	260		
40	228	108	256		
42	234	110	251		
44	237	112	251		
46	241	114	245		
48	245	116	240		
50	251	118	239		
52	257	120	240		
54	260	122	242		
56	259	124	246		
58	258	126	257		
60	251	128	257		
62	249	130	259		
64	245	132	259		
66	242	134	257		

TEMPERATURA DE 350°C

Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Tempo (min)	Temperatura (°C)
0	23	68	344	136	344
2	23	70	344	138	348
4	25	72	347	140	351
6	31	74	347	142	353
8	36	76	351	144	353
10	43	78	351	146	354
12	47	80	351	148	353
14	55	82	348	150	350
16	70	84	348		
18	78	86	339		
20	96	88	337		
22	114	90	337		
24	126	92	337		
26	139	94	337		
28	157	96	337		
30	171	98	339		
32	209	100	342		
34	216	102	345		
36	225	104	347		
38	239	106	349		
40	251	108	350		
42	260	110	350		
44	269	112	355		
46	274	114	355		
48	284	116	357		
50	291	118	355		
52	301	120	351		
54	308	122	349		
56	315	124	347		
58	323	126	344		
60	325	128	339		
62	330	130	339		
64	337	132	342		
66	339	134	343		