

AVALIAÇÃO DO CICLO DA VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA
TORREFADA PARA A GASEIFICAÇÃO

GABRIELA CRISTIANA DAS CHAGAS CAMPOS DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA
TORREFADA PARA A GASEIFICAÇÃO

GABRIELA CRISTIANA DAS CHAGAS CAMPOS DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: PROF. DR. ARMANDO CALDEIRA PIRES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

PUBLICAÇÃO: ENM.DM-202A/ 2013

BRASÍLIA-DF: SETEMBRO/2013

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DE BIOMASSA
TORREFADA PARA A GASEIFICAÇÃO

GABRIELA CRISTIANA DAS CHAGAS CAMPOS DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE.

APROVADO POR:

Prof. Dr. Armando Caldeira Pires (Departamento de Engenharia Mecânica/UnB)
(Orientador)

Prof. Dr. Taygoara Felamingo de Oliveira (Departamento de Engenharia Mecânica/UnB)
(Examinador interno)

Prof. Dr. Patrick Louis Albert Rousset (Centre de Cooperation Intern. En Recherche Agron.
pour le Développement, Departement Des Forêts, Upr 42 Biomass Energie)
(Examinador externo)

Brasília-DF, 05 de setembro de 2013.

FICHA CATALOGRÁFICA

OLIVEIRA, GABRIELA CRISTIANA DAS CHAGAS CAMPOS

Avaliação do Ciclo de Vida da Produção de Biomassa Torrefada Para a Gaseificação [Distrito Federal] 2013. xviii, 78 p., 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Ciências Mecânicas, 2013).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia

Departamento de Engenharia Mecânica

1. Biomassa

2. Torrefação

3. ACV

4. Impacto Ambiental

I. ENM/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

OLIVEIRA, GABRIELA CRISTIANA DAS CHAGAS CAMPOS (2013). Avaliação do Ciclo de Vida da Produção de Biomassa Torrefada Para a Gaseificação. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 101 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriela Cristiana das Chagas Campos de Oliveira

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Avaliação do Ciclo de Vida da Produção de Biomassa Torrefada Para a Gaseificação.

GRAU: Mestre

ANO: 2013.

É concedido à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Gabriela Cristiana das Chagas Campos de Oliveira
Quadra 06, conjunto H, casa 19, setor sul.
CEP: 72415308 Gama - DF Brasil
gabirona@gmail.com

Dedico este trabalho a Deus, razão suprema da minha existência e à minha mãe Francisca, pelo amor incondicional, companheirismo e suporte emocional, além dos sacrifícios e concessões.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo seu amor e por colocar pessoas maravilhosas no meu caminho, pois nos momentos mais difíceis quando pensei que nada daria certo, o Senhor me fez sentir como os montes de Sião que não se abalam, mas permanecem para sempre.

Ao meu querido orientador Dr. Armando Caldeira Pires que acreditou no meu potencial, pela disponibilidade, acompanhamento exercido durante a execução deste trabalho e pela sua força positiva acreditando que tudo sempre daria certo.

Aos professores Patrick Rousset, Valdir Quirino e todas as pessoas do LPF que contribuíram de forma significativa para a realização deste estudo. Ao técnico do laboratório do bloco G Filipe de Carvalho, pela paciência e incentivo. A Subsecretária de Educação da Regional do Novo Gama Maria da Guia Nóbrega, pela compreensão e apoio. Em especial, agradeço a Elisabeth Barbosa que muito mais do que uma gerente, foi uma amiga compreensiva e generosa.

A minha mãe Francisca e minha irmã pelas brincadeiras, apoio e conversas que muito me motivaram a concluir esse projeto. Aos bispos Farley e Marilene, pelas orações e compreensão pelas minhas ausências, e a Maria José Barbosa dos Santos, pela ajuda e noites mal dormidas.

Aos amigos Jenny, Rose, Ângela, Luciana, Sumaya, Silvia, Frederico e Tiago, sempre gentis e dispostos a estudar, festejar ou me consolar.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro que tornou viável a realização deste trabalho.

RESUMO

Atualmente, a preocupação com o meio ambiente aliada à necessidade de crescimento econômico torna inadiável o desenvolvimento sustentável de novas tecnologias. Nesse sentido, a biomassa apresenta-se como alternativa aos combustíveis fósseis enquanto fonte de energia, embora, enquanto combustível sólido, suas características de polidispersão e baixa densidade dificultem seu uso direto com eficiência, requerendo tratamentos prévios. Um destes tratamentos é a torrefação, um tratamento térmico suave em temperaturas na faixa de 225-300°C, produzindo um combustível com melhores características energéticas e mecânicas. Porém o emprego deste processo para pré-tratamento da biomassa destinada ao uso energético está em desenvolvimento e os impactos ambientais dessa tecnologia não são totalmente conhecidos. Este estudo avaliou os aspectos ambientais de impacto de emissões de gases de efeito estufa associados ao ciclo de vida do processo de torrefação da biomassa como pré-tratamento, anterior à gaseificação, comparando a gaseificação da biomassa sem a torrefação, através do balanço de dióxido de carbono e energético. Usando o método de Avaliação Ciclo de Vida (ACV), nesse sistema (torrefação) a ACV é uma técnica que analisa entradas e saídas relacionadas ao ciclo de vida abordadas pelo estudo. Elaborou-se o sistema com auxílio da ferramenta *GaBi Education 4.4*, incluindo a fonte de biomassa úmida e colhida, a combustão, a secagem, a torrefação, o transporte e a gaseificação. Os resultados mostraram-se favoráveis e renováveis dentro da fronteira analisada, comparando-se o ciclo de vida da biomassa torrefada gaseificada com o da biomassa gaseificada. Obteve-se uma redução na emissão de dióxido de carbono equivalente no processo, o qual, utiliza torrefação como pré-tratamento na ordem de 98,2% menor que no processo o qual não passa pela torrefação. A biomassa torrefada e gaseificada apresentou emissão de (0,00023) Kg de CO₂ equivalente, e a biomassa gaseificada (0,012513) Kg de CO₂ equivalente. Prevê-se que a biomassa desempenhe um papel importante na redução das emissões de CO₂ e na introdução de fontes renováveis. Desse modo, o uso da torrefação como pré-tratamento é primordial para que esta tecnologia avance.

PALAVRAS CHAVES: ACV, Biomassa, torrefação e impactos ambientais .

ABSTRACT

Currently, the concern about environmental issues in relation to the necessity of economic growth has made the development of new technologies for sustainable development something that cannot be postponed. In this sense, the biomass is presented as the alternative to fossil fuels as a power plant, although, as a solid fuel, its characteristics of polydispersion and low density make its direct use with efficiency harder, requiring previous treatments. One of these treatments is called roasting, a soft thermal treatment in temperatures in the average of 225-300°C, producing a fuel with better energy and mechanical characteristics. However, the use of this process for pre-treatment of biomass destined to the energy use is in development and the environmental impacts of this technology are not totally known. This study evaluated the environmental aspects of the impact from the greenhouse gases effects in the lifecycle of the process of biomass roasting as pre-treatment, before the gasification, comparing the gasification of the biomass without the roasting through the balance of carbon dioxide and energetic. This research also used the method of lifecycle assessment (LCA), which, for the roasting system, is a technique that analyzes inputs and outputs related to the lifecycle covered by the study. The system was developed assisted by the tool *GaBi Education 4,4*, including the source of moist and harvested biomass, combustion, drying, roasting, transport and gasification. The results were favorable and renewable within the boundary analyzed, comparing the lifecycle of the gasified and roasted biomass. As a result, it was obtained the reduction in the emission of carbon dioxide equivalent in the process of roasting, on the order of 98.2%. The biomass, roasted and gasified, presented an emission of (0.00023) kg of equivalent CO₂, and the gasified biomass, (0.012513) kg of equivalent CO₂. It is expected that biomass plays an important role in the reduction of CO₂ emissions and in the insertion of renewable energy sources. Thus, the use of roasting as pre-treatment is essential for this technology advancement.

KEYWORDS: LCA, Biomass, roasting and environmental impacts

SUMÁRIO

RESUMO	07
ABSTRACT	08
LISTA DE TABELAS	
TABELAS	11
LISTA DE FIGURAS	
FIGURAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	
SIMBOLOS	14
1 INTRODUÇÃO	15
1.1.1 - OBJETIVOS DESTA DISSERTAÇÃO	17
1.2 - ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 - CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA	18
2.1.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA BIOMASSA.	18
2.1.3 - PROPRIEDADES FÍSICAS DA BIOMASSA	20
2.1.4 - PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA BIOMASSA	20
2.1.5 - FONTES DE BIOMASSA	21
2.2 - CARACTERIZAÇÃO DAS TECNOLOGIAS EXISTENTES..	23
2.2.2 - COMBUSTÃO	24
2.2.3 - PIRÓLISE	25
2.2.4 - GASEIFICAÇÃO	28
2.3 - TORREFAÇÃO	31
2.3.1 - A QUÍMICA DA TORREFAÇÃO	32
2.3.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA TORREFAÇÃO	34
2.3.3- BALANÇO DE MASSA E ENERGÉTICO DA TORREFAÇÃO	34
2.3.4 - APLICAÇÕES DA BIOMASSA TORREFEITA	37
2.3.5 - VANTAGENS DA BIOMASSA TORREFEITA	38
2.3.6 - EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA	38
3.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA	44
3.2. OBJETIVO E ESCOPO	46

3.3 METODOLOGIA	49
3.4 INVENTÁRIO	50
4.0 ANÁLISE DO INVENTÁRIO	56
4.1 CENÁRIO DA BIOMASSA TORREFADA E RESULTADOS	59
4.2 CENÁRIO DA BIOMASSA GASEIFICADA E RESULTADOS	64
4.3 BALANÇO ENERGETICO	69
4.4 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	70
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 – Composição elementar da biomassa.	19
Tabela. 2.2 – Reações químicas da combustão	24
Tabela 2.3 – Reações química da gaseificação.	28
Tabela 2.4 – Fases dos Produtos da degradação térmica da madeira	33
Tabela 3.1 – Origem dos dados secundários processos elementares	51
Tabela 3.2 – Simulações de valores referentes a ACV da torrefação	51
Tabela 3.3 – Simulações de valores referentes a ACV da gaseificação	51
Tabela 4.1 – Categoria de impacto selecionada	56
Tabela 4.2 – Especificação da categoria CML	58
Tabela 4.3 – Potencial de Aquecimento Global	59
Tabela 4.4 - Emissões do transporte	61
Tabela 4.5 - Conversões dos gases emitidos kg CO ₂ equivalente	61
Tabela 4.6 - Balanço de CO ₂ equi da gaseificação da biomassa torrefada	62
Tabela 4.7 - Balanço de CO ₂ equi da gaseificação da biomassa sem torrefação	66
Tabela 4.8 - Emissões do transporte conforme a distância percorrida	67
Tabela 4.9 - Análise dos cenários para o gasto de combustível	67

Tabela4.10 - Emissões dos processos que contribuíram para o impacto	68
Tabela 4.11 - Balanço energético da biomassa torrefada	68
Tabela 4.12 - Balanço energético da biomassa gaseificada	69

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.0 – Tecnologias	22
Figura 2.1 – Balanço de massa e de energia da torrefação	34
Figura 2.2 – Fluxo de massa correspondente a torrefação realizada a 280°C	35
Figura 2.3 – Balanço de massa e energético para a torrefação de <i>Salix sp</i>	37
Figura 2.4 – Planta torrefação de Pechiney	39
Figura 2.5 – Sistema Airless Drying	40
Figura 2.6 – Forno de torrefação de biomassa no GCA	41
Figura 2.7 – Esquema da torrefação que antecede a compactação – TOP	42
Figura 3.1 - Estrutura da ACV	45
Figura 3.2 - Processo de torrefação para produzir 1 MJ	47
Figura 3.3 - Segundo cenário da gaseificação da biomassa sem torrefação	48
Figura 4.1 – Processo que mais contribui para o PAG	60
Figura 4.2 – Emissões dos gases emitidos no processo de gaseificação da biomassa Torrefada.	62
Figura 4.3 –Floxograma da biomassa gaseificada para produzir 1MJ	64

LISTA DE ABREVIACOES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
BIO-SNG	Gás Natural Sinttico
CENBIO	Centro Nacional de Referência em Biomassa
CGEE	Centro de Gestão de Estudos Estratégicos
CML	Center for Environmental Science
ECN	Energy Research Centre of the Netherlands
ELCD	Referência de Banco de Dados de Ciclo de Vida
EUROSTAT	Comissão Europeia de Esttica
FAO	Food and Agriculture Organization
GEE	Gases do Efeito Estufa
ISO	International Organization for Standardization
TOP	Combined Torrefaction and Pelletisation
UnB	Universidade de Brasília
EU	União Europica

1. INTRODUÇÃO

Sabe-se que a biomassa é um recurso alternativo aos combustíveis fósseis, pois a disponibilização generalizada da biomassa tem sido amplamente reconhecida, com o seu potencial para fornecer quantidades muito maiores da energia útil com menos impactos ambientais do que combustíveis fósseis. Entretanto, por ser um combustível heterogêneo, provém de diversas fontes, como a madeira e os resíduos de madeira, as colheitas agrícolas e seus resíduos, em muitos casos polidispersos e de baixa densidade energética, o que dificulta o seu uso eficiente, requerendo tratamentos prévios.

Uma saída para esses problemas é a torrefação da biomassa, pois é um tratamento intermediário, no qual resulta em um produto sólido com maior densidade energética, reduzindo o teor de umidade de 50% para 3% (STELT et al., 2011).

Antes da torrefação ocorre a secagem da madeira. A técnica consiste na redução do seu teor de água, cerca de 15%. Assim, a madeira adquire uma maior resistência mecânica. A secagem pode ser efetuada naturalmente (executada ao ar livre), artificialmente (realizada em estufas próprias), ou pela conjugação destas duas formas.

A torrefação consiste em um processo de pré-carbonização, o qual se desenvolve na fase endotérmica, entre 250° e 300°C. Nestas condições a hemicelulose é degradada, e a umidade é removida, liberando na forma de gases o ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico (CORTEZ, 2008).

A torrefação é um pré-tratamento utilizado antes da gaseificação, pirólise e combustão. Ela executa as funções de remoção da umidade da biomassa, de geração de um material sólido hidrofóbico que reabsorve apenas pequenas quantidades de umidade, e de geração de um material mais friável. Essa redução de higroscopicidade além de produzir um combustível com maior poder calorífico o qual permite melhor desempenho na geração de energia se mostra também muito importante para o seu armazenamento.

A utilização da biomassa torrefada para geração de energia trás benefícios ambientais pois reduz o uso de outras fontes não renováveis, uma vez que homogênis a matéria prima retirando a umidade e aumentando, por sua vez, o poder calorífico. Esse processo contribui para a redução de combustíveis fósseis no transporte da biomassa e diminuindo o espaço e o

custo do armazenamento. Porém, em cada etapa do processo de torrefação, os recursos naturais e energéticos utilizados, geram impactos ambientais. Ainda que em menor potencial, quando comparados aos combustíveis fósseis. Para desenvolvimento desta tecnologia é importante conhecer os impactos ambientais gerados

Para avaliar o impacto ambiental e seu gasto energético no processo de torrefação existem ferramentas de gestão ambiental que utilizam inventários capazes de oferecer dados ambientais que demonstrem as emissões de gases do efeito estufa entre outros, a fim de planejar ações focadas na sustentabilidade, privilegiando assim, o meio ambiente.

Uma dessas ferramentas é Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Trata-se de um método utilizado para avaliar o impacto ambiental de bens, serviços e processos. A análise do ciclo de vida de um produto, processo ou atividade é uma avaliação ordenada que quantifica os fluxos de energia e de materiais no ciclo de vida do produto. O ACV é a história de um produto ou processo, podendo ser a partir da fase de extração das matérias primas, passando pela fase de produção, distribuição, consumo, uso e até sua transformação em resíduo.

A ACV, enquanto ferramenta de gestão ambiental identifica os aspectos ambientais e avalia os seus impactos, associados aos produtos, durante todo o seu ciclo de vida, em outras palavras, mapeia o ciclo do berço ao túmulo. O ciclo de vida inicia-se quando todos os recursos requeridos para manufatura de determinado produto são extraídos da natureza, sejam eles materiais ou energéticos, e finaliza-se após o cumprimento da função pelo produto, retornando ao meio ambiente (SANTIAGO, 2005).

Desse modo, esse estudo propõe analisar e comparar os processos da biomassa torrefada gaseificada e o da biomassa gaseificada, no intuito de conhecer os índices de gasto energético e os impactos ambientais produzidos pela tecnologia da torrefação.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar os aspectos ambientais decorrentes do impacto de emissões de gases de efeito estufa associados ao ciclo de vida do processo de torrefação da biomassa como pré-tratamento do processo de gaseificação, conforme padrão instituído pelas normas ISO 14040 e ISO 14044.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar os impactos ambientais do processo de torrefação.
- Demonstrar as características físicas e químicas do processo de torrefação .
- Analisar, energeticamente, os dois processos: da biomassa torrefada e gaseificada, e da biomassa, somente gaseificada.
- Diferenciar o processo de gaseificação quando utiliza a torrefação como pré-tratamento e quando não utiliza pré tratamento.

1.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está estruturada em 4 capítulos , inclusive neste, introdutório, em que se caracteriza o problema e se descreve os objetivos.

O capítulo dois refere-se a análise bibliográfica da biomassa caracterizando sua estrutura, composição química, fontes da biomassa, características físicas e energéticas. Aborda-se a caracterização das tecnologias existentes tais como: a combustão direta, gaseificação e a pirólise, e também os produtos auxiliares resultantes dos processos já citados como produtos secundários e as emissões dos processos básicos. Descreve-se o processo de torrefação, a química da torrefação, as características físicas e químicas da biomassa torrefada; descreve-se, também, o balanço de massa e o balanço energético da torrefação e faz-se uma breve análise bibliográfica do histórico da torrefação.

No capítulo três consta a avaliação do ciclo de vida, citando a sustentabilidade na dimensão ambiental, e apresenta-se a ACV como uma ferramenta que pode ajudar a identificar os impactos pelo uso de bens e serviços no meio ambiente. O capítulo quatro apresenta os resultados da ACV da torrefação , a conclusão e a recomendações.

CAPÍTULO II

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA

A biomassa expressa um conceito bastante abrangente: busca designar todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica de origem animal ou vegetal (FARFAN, 2004), inclusive os derivados recentes de organismos vivos utilizados como combustíveis. É uma fonte que usa, de forma indireta, a energia solar, na qual a radiação é convertida em energia química através da fotossíntese, não sendo a sua produção limitada no tempo, razão pela qual é considerada como um tipo de energia renovável (CGEE, 2010).

Genovense et al. (2006) compreendem a biomassa como matéria orgânica da terra. O termo biomassa é usado para descrever todas as formas de plantas e derivados que podem ser convertidos em energia utilizável como, por exemplo, a madeira, os resíduos urbanos e florestais, os grãos, talos, óleos vegetais e lodo de tratamento biológico de efluentes. No campo da energia, ela pode ser convertida em outras formas energéticas, tanto diretamente na queima de lenha para geração de calor, como indiretamente na carbonização ou na produção de etanol.

A biomassa possui átomos de oxigênio na sua composição química. A presença desses átomos de oxigênio faz com que ela requeira menos oxigênio do ar e, conseqüentemente, seja menos poluente; disso decorre que a quantidade de energia a ser liberada diminui, reduzindo-se o seu Poder Calorífico Superior – PCS (RENDERO et. al., 2008).

2.1.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA BIOMASSA

A biomassa é uma fonte elementar e renovável de energia química capaz de ser convertida em outras formas energéticas, tanto diretamente a partir da queima da lenha para geração de calor, como indiretamente pela carbonização ou pela produção de etanol (RODRIGUES, 2009).

Rendeiro et al (2008) considera ser muito importante conhecer a fórmula química do combustível. Segundo o autor, com ela é possível quantificar a relação ar-combustível e prever a composição dos gases na saída do processo de combustão ou gaseificação. da análise

elementar da biomassa fornece os percentuais mássicos dos elementos “C”, “H”, “O”, “N”, “S” e “cinzas” contidos na amostra da biomassa combustível. A tabela 2.1 demonstra um resultado típico da análise elementar.

Tabela 2.1: Composição elementar da biomassa. Adaptada de RENDEIRO et al., 2008.

<i>Espécie</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>N</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>CINZAS</i>
Casca de Arroz	38,24	4,40	0,80	0,06	35,50	21
Pinheiro	59	7,2	-	-	32,7	1,1
Caroço de açaí	46	6	0,8	-	46	1,2

A biomassa pode ser dividida em suas frações nobres, que consistem de açúcares (sacarose, frutose e glicose), óleos, lipídeos, e outras frações mais complexas, como os carboidratos (amido, celulose e hemicelulose), lignina e proteínas, que necessitam de rotas químicas mais complexas para sua conversão.

Os carboidratos são componentes da biomassa que podem ser convertidos em açúcares pelo processo de hidrólise, já a lignina e proteínas são estruturas mais variáveis e complexas, comumente usadas na queima direta para geração de energia. No entanto, existe uma série de outras possibilidades para uso desta fração da biomassa: em proporções menores podem ser encontradas também resinas, taninos, ácidos graxos, fenóis, compostos nitrogenados e sais minerais (CGEE, 2010).

Os materiais lignocelulósicos são constituídos por celulose, hemicelulose, lignina e pequenas quantidades de extrativos minerais. De uma maneira geral, as madeiras moles contêm entre 45–50% de celulose, 25–35% de hemicelulose e 25–35% de lignina. Já as madeiras duras possuem entre 40–55% de celulose, 25–40% de hemicelulose e 18–25% de lignina (RENDEIRO et. al., 2008). Rousset (2005), Klock et al.(2005) e Rodrigues (2009) descrevem em detalhes a composição da biomassa e as reações químicas que ocorrem no processo de secagem e torrefação da biomassa.

2.1.3 - PROPRIEDADES FÍSICAS DA BIOMASSA

As propriedades físicas são importantes para a caracterização energética da biomassa, pois facilitam o armazenamento e o transporte, como por exemplo, teor de umidade, massa específica, densidade e porosidade.

O teor de umidade da biomassa depende do seu histórico. Toras de madeira deixadas ao tempo possuem seu teor de umidade maior, enquanto madeira seca por processos térmicos atinge valores menores de umidade. Ao reduzir o teor de umidade para valores inferiores a 8%, começa o processo de decomposição da estrutura molecular da madeira. A umidade da biomassa provém da água, que faz parte da composição da estrutura macro da madeira e está ligada às paredes de celulose. A perda dessa água causa tensão na estrutura molecular e se manifesta macroscopicamente pela mudança da sua coloração para preto (RENDEIRO et al., 2008). O teor de umidade da madeira é fator determinante para outras propriedades como massa, estabilidade dimensional, resistência entre outras (RODRIGUES, 2009).

Já a densidade é outra propriedade física de extrema importância que tem relação direta com o teor de umidade. A densidade ou massa específica reflete a quantidade de madeira por unidade de volume, que é expressa em g/cm^3 ou kg/m^3 (RODRIGUES, 2009).

2.1.4 - PROPRIEDADES ENERGÉTICAS DA BIOMASSA

A biomassa oferece algumas propriedades energéticas importantes que determinarão seu uso direto como combustível, como por exemplo, a densidade energética, a composição química imediata e o poder calorífico.

A densidade energética relaciona a quantidade de energia contida em um volume específico, apresentada em kcal/m^3 . Essa informação é importante, pois permite avaliar e comparar o potencial energético de fontes energéticas distintas.

A composição química refere-se aos principais constituintes da madeira. No caso da análise para uso energético, o teor de carbono é o mais importante. A composição química imediata define o teor de umidade, matérias voláteis, teor de cinzas e de carbono fixo da madeira. As substâncias voláteis são os componentes desprendidos no início da combustão, que são constituídos principalmente por hidrogênio, hidrocarbonetos, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂). O aumento da temperatura elimina os componentes

voláteis da biomassa e o carbono restante, responsável pela formação da massa amorfa, permanece fixo (RODRIGUES, 2009).

A reatividade da biomassa é influenciada pelo teor de carbono determinado. Ela é medida pela porcentagem de CO₂ no gás de saída das reações: quanto menor a porcentagem, mais reativa será a biomassa (RODRIGUES, 2009).

2.1.5 - FONTES DE BIOMASSA

A biomassa pode ser obtida de vegetais lenhosos e não lenhosos, tais como a madeira e seus resíduos orgânicos (agrícolas, urbanos e industriais). Os biofluidos são também fontes de biomassa, como os óleos vegetais (CORTEZ et al., 2008). As fontes de biomassa estão divididas em três grupos principais: vegetais não lenhosos; vegetais lenhosos e resíduos orgânicos, conforme é descrito adiante. As fontes de biomassa se diferenciam de acordo com suas características ou origens. Esta diferenciação deve ser considerada quando se pretende utilizá-la como fonte eficiente para geração de energia. É muito importante para determinar o processo tecnológico a ser empregado para obter e transformar a energia da biomassa (Nogueira e Lora, 2003).

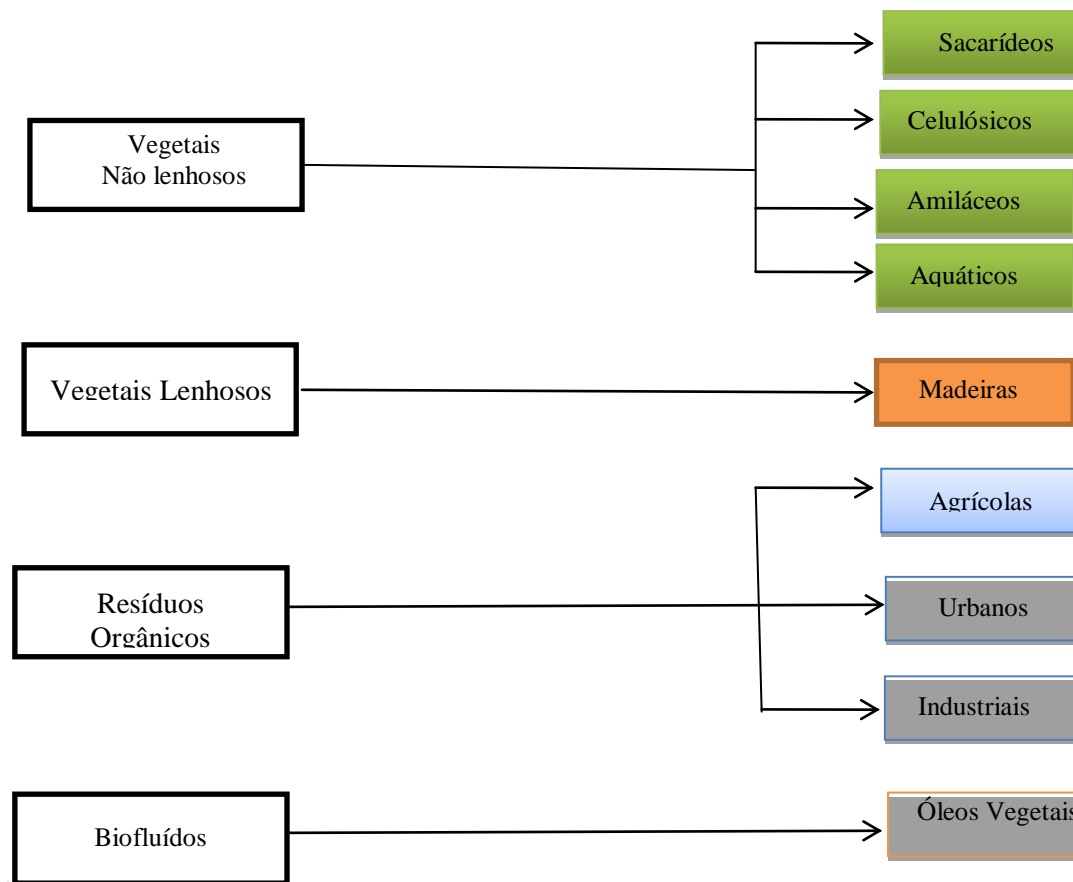


Figura 2.0: Fontes de Biomassa. Adaptado de CORTEZ et al., 2008

A madeira é uma fonte de biomassa constituída por vegetais lenhosos. A obtenção da madeira pode se dar nas florestas nativas ou plantadas. As florestas nativas apresentam uma grande complexidade na sua composição, devido a um grande número de espécies, com as mais diferentes características silvicultoras, ecológicas e tecnológicas. As florestas nativas têm servido de reserva energética por séculos, porém, os métodos de extração dessa biomassa, por muitas vezes, acontecem de maneira não sustentável. As árvores precisam de tempo para crescer e não podem ser consideradas como uma fonte inesgotável de energia. As florestas necessitam ser adequadamente manejadas para que continuem disponíveis no futuro (CENBIO, 2010).

As florestas plantadas são, na maior parte, florestas equiâneas, árvores da mesma idade e formadas por uma única espécie. Em sua maioria, têm como objetivo a produção de

produtos madeireiros, como o eucalipto e o pinus, que garante renda extra para o produtor com balanço positivo na emissão de carbono (CENBIO, 2010).

Em geral, estas florestas são plantadas em grande escala por empresas que irão utilizar os produtos gerados. As florestas também são plantadas por pequenos proprietários de terras, para consumo próprio e venda da madeira, já que a floresta, ao contrário da maior parte das culturas agrícolas, não se perde tão facilmente com secas, chuvas excessivas e outras variações do clima (CENBIO, 2010).

Os vegetais não lenhosos são também uma fonte de bioenergia, e são tipicamente produzidos a partir de cultivos anuais. Está usualmente classificada de acordo com sua substância de armazenamento de energia, podendo ser: sacarídeos, celulósicos, amiláceos e aquáticos (CENBIO, 2010). Esta categoria apresenta maior umidade quando comparada com os vegetais lenhosos e seu uso, em geral, exige primeiramente uma conversão em outro produto energético mais adequado.

O maior representante desta classe é a cana-de-açúcar, cujo valor energético está associado ao conteúdo da celulose, amido, açúcares e lipídeos, que por sua vez determinam o tipo de produto energético que se pode obter. Porém, estão em estudo outros vegetais pouco conhecidos, que podem proporcionar vantagens importantes como resistência a secas, produtividade razoável em terras pobres e facilidade de cultivo (NOGUEIRA; LORA, 2003).

2. 2 - CARACTERIZAÇÕES DAS TECNOLOGIAS

A biomassa sólida pode ser utilizada de diversas formas. Atualmente existem tipos de tecnologias de aproveitamento da biomassa sólida. A tecnologia mais conhecida é a combustão direta, na qual ocorre a queima da matéria prima. A carbonização acontece quando a biomassa é submetida à ação de calor em temperaturas elevadas a partir de 300° C, na ausência de ar. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, como a torrefação, a gaseificação e a pirólise.

2.2.1 - COMBUSTÃO DIRETA DA BIOMASSA

O processo de combustão envolve diversas reações químicas que liberam energia, na forma de calor e luz. As principais reações desse processo ocorrem entre os componentes do combustível e o oxigênio do ar atmosférico. Uma combustão eficiente é aquela em que todos os elementos combustíveis, resultantes do processo de queima, são transformados totalmente em dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e calor. No processo de combustão incompleta resultam em gás carbônico, água e calor (LOPES et al., 2002). As reações químicas a seguir descrevem o processo:

Tabela 2.2: Reações químicas da combustão. Adaptado de CORTEZ, 2008.

<i>Reações Químicas</i>	<i>Tipos de Combustão</i>
$C + O_2 \rightarrow CO_2 + \Delta Q^*_1$	Combustão completa
$C + 1/2 O_2 \rightarrow CO + \Delta Q_2$	Combustão incompleta
$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + \Delta Q_3$	Combustão do hidrogênio
$S + O_2 \rightarrow SO_2 + \Delta Q_4$	Combustão do enxofre

* ΔQ é referente ao calor liberado

Os fenômenos químicos que ocorrem na combustão são chamados de reações de oxirredução e acontecem na queima, nas quais ocorre transferência de elétrons e de um reagente que sofre redução enquanto o outro sofre oxidação. Além destas espécies químicas substâncias, também são produzidas outras espécies químicas, tais como, óxidos nitrosos, hidrocarbonetos, e partículas de aerossóis que são incorporados na atmosfera (NEVES, 2007).

A queima direta da biomassa é uma das formas de utilização para produzir energia térmica e elétrica. Há muitas vantagens na utilização da biomassa como combustível, por exemplo, o conteúdo de enxofre e as emissões de SO₂ são liberados em menor quantidade, na combustão. As emissões de CO₂, liberadas durante a queima de biomassa, podem ser analisadas como praticamente nulas, pois esses gases são reabsorvidos no próximo ciclo de vida da planta, no processo de fotossíntese. Além disso, a madeira, por exemplo, contém pouca cinza, o que reduz a quantidade de material particulado exposto no meio ambiente (GENOVESE, 2006).

Embora seja conveniente, o processo de combustão direta é normalmente muito ineficiente, pois deve ser observado que, em comparação com combustíveis fósseis, a biomassa contém muito menos carbono e mais oxigênio e, como consequência, tem um baixo poder calorífico. Outro problema da combustão direta é a alta umidade (20% ou mais no caso da lenha) e a baixa densidade energética do combustível (lenha, palha, resíduos etc.), o que dificulta o seu armazenamento e transporte.

As tecnologias para isso estão amplamente desenvolvidas e em estado avançado de maturidade comercial, utilizando a combustão direta da biomassa em fornalhas adequadamente projetadas e construídas (LEAL, 2005).

As fornalhas são dispositivos criados para garantir a queima completa do combustível, de modo adequado e contínuo, e assim dirigir o bom emprego de sua energia térmica liberada na combustão, com o máximo de rentabilidade na conversão da energia química do combustível em energia térmica. As fornalhas podem ser classificadas como de fogo direto, em que os gases resultantes da combustão são misturados com o ar ambiente e insuflados por um ventilador, diretamente na massa de grãos, e de fogo indireto, em que os gases provenientes da combustão passam por um trocador de calor que aquece o ar de secagem (MELO et al., 2010).

Atualmente, as fornalhas empregadas não têm flexibilidade na opção para aquecimento do ar e do comburente a ser empregado. Além disso, cada fornalha é projetada para um determinado tipo de biomassa e o emprego de outro tipo de biomassa resultará, normalmente, em mau funcionamento levando o produtor, nesse caso, a adquirir uma fornalha para cada tipo de biomassa a ser queimada (MELO et al., 2010).

2.2.2 - PIRÓLISE

Tanto na pirólise quanto na decomposição térmica da biomassa acontecem alterações físicas e químicas. Na ausência total ou parcial de oxigênio, a biomassa é aquecida entre 300° a 900° C, até a extração do material volátil, dando lugar à formação de um resíduo sólido rico em carbono (carvão); é uma fração volátil composta de gases e vapores orgânicos condensáveis (licor pirolenhoso) (CORTEZ, 2008; ABREU et al., 2010).

Os produtos de pirólise da biomassa incluem o metano, hidrogênio, monóxido de carbono e dióxido de carbono. Dentre os produtos líquidos, o metanol é um dos mais valiosos. A fração líquida dos produtos de pirólise consiste em duas fases: uma fase aquosa contendo uma grande variedade de compostos orgânicos, oxigênio composto de baixo peso molecular, e uma fase aquosa, contendo compostos orgânicos insolúveis (principalmente aromáticos) de alto peso molecular. Esta fase é chamada bio-óleo ou alcatrão, e é o produto de maior interesse (DEMIRBAS, 2007).

Os gases, líquidos e sólidos são originados em volumes diferentes, dependendo dos parâmetros considerados como, por exemplo, a temperatura final do processo, pressão de operação do reator, o tempo de residência das fases sólidas, líquidas e gasosas dentro do reator, o tempo de aquecimento e a taxa de aquecimento das partículas de biomassa, o ambiente gasoso e as propriedades iniciais da biomassa.

O processo de pirólise é muito dependente do teor de umidade da matéria-prima, que deve ser em torno de 10%. A biomassa com alto teor de umidade prejudica o processo de pirólise, os resíduos requerem a secagem antes de submeter à pirólise (SALMAN, 2009).

A pirólise da biomassa é vantajosa porque a biomassa sólida e os resíduos podem ser convertidos em produtos líquidos; esses líquidos, como óleo (bio-óleo), possuem densidade muito maior do que os materiais lenhosos, reduzindo, assim, os custos de armazenamento e transporte. O processo de pirólise traz flexibilidade à cadeia de produção e, além disso, agrega valor comercial às substâncias químicas produzidas, advém de novas possibilidades para utilizar a matéria prima produzida (DEMIRBAS, 2007).

O principal objetivo no processo de pirólise é a obtenção de produtos com densidade energética mais alta e melhores propriedades do que aquelas da biomassa inicial. Os produtos obtidos através da pirólise para a produção de líquido orgânico despertam cada vez mais o interesse, junto às pesquisas e as aplicações comerciais dos diversos produtos obtidos a partir do bio-óleo (GÓMEZ, 2009).

O bio-óleo é uma combinação de compostos orgânicos e oxigenados com uma quantidade significativa de água, originada da umidade da biomassa e das reações ocorridas no processo, podendo conter, ainda, pequenas partículas de carvão e metais alcalinos dissolvidos, oriundos das cinzas.

A composição do bio-óleo depende do tipo de biomassa, das condições do processo, do equipamento e da eficiência na separação do carvão e na condensação. O líquido pirolítico pode ser considerado como uma emulsão na qual a fase contínua é uma solução aquosa dos produtos da fragmentação da celulose e hemicelulose, que estabiliza a fase descontínua que são as macromoléculas de lignina pirolítica (BRIDGWATER, 2003; BRIDGWATER, 2007).

A tecnologia de pirólise mais usada é a carbonização para a produção de carvão vegetal de madeira, para a produção de energia. A pirólise pode se decompor em pirólise lenta ou convencional e pirólise rápida. O processo tradicional de realização da pirólise é conhecido como pirólise lenta, e caracteriza-se por realizar-se a baixa taxa de aquecimento e elevado tempo de residência (dependente do próprio processo). Este processo visa maximizar a rentabilidade de carvão vegetal, à custa de tornar mínimas as quantidades de bio-óleo e gás (ABREU et. al., 2010).

As características básicas do processo de pirólise rápida são: curto tempo de aquecimento das partículas, curto tempo de residência para os vapores que se formam dentro do reator, altas taxas de aquecimento, elevados coeficientes de transferência de calor e massa, e temperaturas moderadas da fonte de aquecimento. Em geral, o tempo de residência dos vapores no reator deve ser inferior a 2-5 segundos (GÓMEZ, 2009).

Na metodologia de pirólise rápida, em temperaturas entre 800°C e 900°C aproximadamente, 60% do material se transforma num gás rico em hidrogênio e monóxido de carbono e apenas 10% em carvão sólido, o que a torna uma tecnologia competitiva com a gaseificação. Entretanto, a pirólise convencional ainda é a tecnologia mais atrativa, devido ao problema do tratamento dos resíduos, que são maiores nos processos com temperatura mais elevada (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY, 2006).

A biomassa passa por várias fases no reator pirolítico: zona de secagem, com a temperatura variando de 100 a 150°C; zona de pirólise, onde irão ocorrer reações químicas como a fusão, evaporação e oxidação. Nessa etapa é que são retirados subprodutos, como alcoóis e alcatrão. Produtos como o bio-óleo são coletados na zona de resfriamento onde se encerra todo o processo. A Figura 2.11 demonstra um exemplo de reator pirolítico, detentor das mais variadas tecnologias (ABREU et al., 2010).

2.2.3 - GASEIFICAÇÃO

A gaseificação é oxidação térmica parcial da biomassa, que resulta em uma alta proporção de produtos gasosos tais como gás carbônico, água, monóxido de carbono, hidrogênio e os hidrocarbonetos, pequenas quantidades de cinzas e carvão, e compostos condensáveis (alcatrão e óleos). É considerada uma das formas mais eficientes de converter a biomassa em energia, e está se tornando uma das melhores alternativas para o reaproveitamento de resíduos agrícolas (PUIG-ARNAVANT et al., 2010).

A gaseificação consiste num processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas. As reações expostas a seguir ocorrem no processo de gaseificação (REZAIYAN et al., 2005). A adição de água ao ar de gaseificação aumenta o conteúdo de hidrogênio e de monóxido de carbono nos gases produzidos, como demonstrado nas equação 5. Durante o processo de gaseificação ocorre principalmente reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução que envolvendo a fase sólida e gasosa. As reações exotérmicas fornecem energia para as reações endotérmica, na forma de calor.

Tabela 2.3: Reações químicas da gaseificação (Adaptado de REZAIYAN et. al., 2005 e FIORILLO,D. 2013).

Reações Químicas da Gaseificação:

- 1) $C + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO -111 \text{ MJ/Kmol RC}$
- 2) $CO + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow CO_2 -283 \text{ MJ/Kmol RC}$
- 3) $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O -242 \text{ MJ/Kmol RC}$
- 4) $C + CO_2 \rightarrow 2CO + 172,6 \text{ MJ/Kmol R.B+}$
- 5) $C + H_2O \rightarrow CO + H_2 + 131 \text{ MJ/Kmol G.A}$
- 6) $C + 2H_2 \rightarrow CH_4 + 75 \text{ MJ/Kmol F.M}$
- 7) $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 + 206 \text{ MJ/Kmol}$

*R.C.- reação de combustão; R.B – reação de Leopoldo Boudouard; G.A-reação gás e água
F.M – reação de formação do metano.

As reações heterogêneas 4,5 e 6 são suficientes para determinar a composição do gás de equilíbrio. As reações 3,4,5 e 6 descrevem os quatro modos de como um combustível composto por carbono pode ser gaseificado. A gaseificação diferencia-se da combustão e da pirólise tanto pela quantidade de oxidante usado, quanto pelos produtos de interesse gerados, pois a pirólise é efetuada sem oxidante, e a combustão, com excesso desse produto. A gaseificação usa quantidades de oxidante abaixo do necessário em razão da quantidade de carbono presente nas reações.

Como produtos de interesse, a pirólise produz um composto líquido, já na combustão realizada para o aproveitamento de calor, gerando subprodutos gasosos, basicamente gás carbônico e vapor de água, enquanto a gaseificação aponta para a obtenção de vetores energeticamente gasosos (CASTRO et al., 2009).

O gás produzido pode ser padronizado, é mais fácil de ser utilizado do que a biomassa original, pois os gases podem ser utilizados para motores de energia a gás, turbinas a gás ou como matéria-prima para a produção de combustíveis líquidos. Gaseificação agrega valor à matéria-prima de baixo valor, convertendo-os em combustíveis comercializáveis.

A metodologia de gaseificação é compreendida em quatro etapas: secagem, pirólise, oxidação e redução. Cada etapa ocorre em zonas relativamente separadas dentro do reator. Na zona de secagem a temperatura é suficientemente baixa para evitar a decomposição da biomassa, porém suficientemente alta para eliminar sua umidade. O processo de gaseificação consiste das seguintes etapas segundo PUIG-ARNAVANT et al. (2010) e ABREU et al. (2010):

- Secagem: O teor de umidade da biomassa é reduzido. A secagem ocorre em cerca de 100 a 200°C.
- Pirólise: A decomposição térmica da biomassa, na ausência de oxigênio ou ar, desenvolve-se a temperaturas próximas de 600° C, os gases voláteis da biomassa são reduzidos. Isso resulta na liberação de gases como hidrocarbonetos a partir da biomassa, a qual é reduzida ao carvão sólido. Os hidrocarbonetos podem condensar a uma temperatura baixa para gerar o alcatrão líquido.
- Oxidação: É uma reação entre biomassa sólida carbonizada e oxigênio do ar, resultando na formação de CO₂. O hidrogênio presente na biomassa também é oxidado para gerar água. Uma grande quantidade de calor é liberada com a oxidação do carbono e do hidrogênio. O método estabelece a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação.

- Redução: Na ausência ou na presença de pequenas quantidades de oxigênio, reações de redução ocorrem na faixa de temperatura de 800-1000°C. Estas reações são, na sua maioria, endotérmicas.

Os equipamentos utilizados para este processo são chamados de gaseificadores. Existem vários tipos de gaseificadores, funcionando com grandes diferenças de temperatura e pressão. Os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. Os gaseificadores de leito fixo são simples e são os mais adequados para pequenas unidades. Podem ser de aquecimento direto ou indireto e utilizar oxigênio puro, vapor ou ar para formação de uma atmosfera redutora. Ao entrar no gaseificador o ar reage com o carvão vegetal formado logo acima, e produz gás carbônico e vapor d'água em altas temperaturas. Esses produtos são empurrados para cima e reagem endotermicamente com o carvão para formar CO e H₂. Esses gases ainda quentes fornecem o calor necessário para a pirólise e a secagem da biomassa que está entrando (ABREU et al., 2010).

A gaseificação também pode utilizar a técnica da fluidização que é uma tecnologia adequada para converter diversos resíduos agrícolas em energia, devido a suas vantagens inerentes de flexibilidade, baixas temperaturas e condições isotérmicas de operação. A fluidização é uma operação em que um sólido entra em contato com um líquido ou um gás, de maneira tal que o conjunto adquire características similares aos fluidos, de modo que as taxas de transferência de massa e energia são elevadas (ABREU et al., 2010).

O material combustível a ser processado é incorporado ao leito aquecido, recebendo deste a energia necessária para a sua decomposição térmica durante o processo. Para este processo pode-se utilizar diferentes tipos de agentes gaseificantes ou misturas destes, como por exemplo, ar, oxigênio puro e vapor. O gaseificador de leito fluidizado é o sistema mais conveniente para utilização de biomassa polidispersa de pequenas dimensões. É uma tecnologia bastante promissora e tem a possibilidade de utilização de combustíveis como o bagaço da cana e a casca de arroz.

O gás de síntese é uma opção muito interessante para a utilização dos gases provenientes da gaseificação. Como utilização da mistura de gases de composição química variada (basicamente H₂ e CO), ele é obtido a partir da gaseificação da biomassa previamente pirolisada, com potencial aplicação para a produção de diversos compostos químicos, como as

moléculas orgânicas, tais como o gás natural ou os biocombustíveis líquidos, cita-se o diesel ou gasolina sintética, aldeídos e o metanol. (SADAKA, 2012 e SCHLITTLER, L. A. E. S.; GOMES, E. B. et al., 2009).

O gás produzido pode ser utilizado também para a geração de energia elétrica, pois o processo de gaseificação pode ser acoplado a turbinas a gás, a motores de combustão interna e a células de combustíveis (SCHLITTLER, L. A. E. S. e GOMES, E. B. et al., 2009).

2.3TORREFAÇÃO

A torrefação é um tratamento térmico suave, que normalmente ocorre em temperaturas na faixa de 225-300°C, na qual a biomassa perde a sua elasticidade e propriedades fibrosas (PRINS, 2005). A torrefação da biomassa produz um combustível com melhores características energéticas. Tal tratamento é realizado em atmosfera reduzida caracterizada pela ausência parcial ou completa de agentes oxidantes.

Com esse processo a lignina e a celulose sofrem uma leve despolimerização, e a hemicelulose é degradada, provocando a liberação de ácido acético, fenol e outros compostos de baixo poder calorífico (CORTEZ et al., 2008). Tanto o dióxido de carbono como a umidade são removidos pelo tratamento térmico, sendo que ambos retiram o oxigênio da biomassa (PIMCHUAI et al., 2010).

A torrefação proporciona um produto intermediário entre a biomassa anidra e o carvão vegetal. O produto principal é um material sólido que mantém 75-95% do conteúdo energético original (PRINS et al., 2006).

O pré-tratamento da biomassa antes da torrefação geralmente consiste na secagem e, após a torrefação, na moagem. O processamento de torrefação de biomassa implica em aumentar a sua temperatura até o nível desejado para um determinado tempo de residência. Isso geralmente é feito usando o aquecimento por convecção dentro de uma câmara selada, com gás inerte. O Pós-tratamento da biomassa pode incluir refrigeração ou densificação. Muitas vezes, a densificação é usada para melhorar as características de manuseio e transporte do material (CIOLKOSZ; WALLACE, 2011).

2.3.1 - A QUÍMICA DA TORREFAÇÃO

Durante a torrefação, a biomassa perde oxigênio e hidrogênio, em quantidade relativamente superior em relação ao carbono. A destruição dos grupos OH na biomassa por meio de reações de desidratação provoca a perda da capacidade de formar ligações de hidrogênio com a água, tornando a biomassa hidrofóbica (USLU, 2005). Conforme Brito et al. (2008) e Bergman et al. (2005), a torrefação ocorre em cinco fases importantes:

- O aquecimento inicial: a biomassa é inicialmente aquecida até o estágio de secagem. Esse processo ocorre geralmente em uma estufa. Nesta etapa, a temperatura é aumentada até 130°C, e permanece constante, enquanto no final deste estágio, a umidade diminui, passando de 50% para até 15%.
- Pós-secagem e aquecimento intermediário: a temperatura da biomassa é aumentada gradativamente até 200°C. Água fisicamente ligada é liberada. Durante esta fase alguma perda de massa pode ocorrer. O resultado do calor induzido é a transformação dos componentes da madeira, causando uma leve degradação.
- Na terceira fase, o processo real ocorre. A torrefação vai começar quando a temperatura chegar a 200°C e termina quando a biomassa é novamente resfriada a uma temperatura específica de 200°C. A temperatura de torrefação é definida como a temperatura máxima constante e ocorre entre a faixa de 200 a 280°C. A biomassa permanece em temperatura constante por um tempo de residência. A temperatura escolhida para que o processo ocorra depende do tipo de biomassa. Durante este período, acontece perda de massa e geralmente envolve a destruição total da hemicelulose. Nesta fase, há alterações significativas na lignina.
- A destruição da celulose: presume-se que ocorra durante a quarta fase, entre aproximadamente 330 e 370°C.
- A quinta etapa ocorre em temperaturas acima de 350°C, quando o carvão vegetal é produzido, e acontece intensa degradação (ALMEIDA et al., 2010). A Tabela abaixo representa o processo simplificado da torrefação.

Tabela 2.4: Fases e produtos da degradação térmica da madeira (Fonte: Rousset, 2008. Adaptado).

<i>Fase</i>	<i>Temperatura C °</i>	<i>Produtos</i>
I Endotérmica	Até 200	Água
II Endotérmica	200 a 270-280	Água e ácido acético

Os produtos da torrefação da biomassa lignocelulósica são de aproximadamente 70 - 90% de sólidos, 6 - 35% de líquido e 10% de gases (em uma base de massa). A fração sólida é conhecida como biomassa torrefeita. O aumento da severidade da reação aumenta o rendimento relativo de gases e líquidos. Vários estudos sugerem que uma pequena degradação da celulose e da lignina também ocorre durante a torrefação (NIMLOS et al., 2003). Torrefação em condições de temperaturas mais altas que 270°C é relatada para dar início a um maior grau de degradação da celulose.

O principal produto volátil é o vapor, que é formado por reações de desidratação da biomassa, referente à degradação da hemicelulose e é reduzida dos radicais da hidroxila, onde normalmente se fixariam moléculas de água (HAKKOU et al., 2006; MBURU et al., 2007).

Os produtos orgânicos são formados, principalmente o ácido acético que segundo Ciolkosz (2011), provém da presença de xilana (xilana é polímero de xilose, sendo a principal hemicelulose de madeiras provenientes de angiospermas) que é responsável por conduzir a formação do ácido acético, enquanto glicomanana (polissacarídeo presente na hemicelulose) leva à produção de ácido fórmico, mas também furfural, metanol, ácido láctico, fenol e outros. Os produtos gasosos não condensáveis consistem tipicamente de dióxido de carbono e de monóxido de carbono, com pequenas quantidades de hidrogênio e metano. A produção de CO₂ deve ser um subproduto da descarboxilação de grupos ácidos na biomassa (PRINS et al., 2006).

Bridgeman et al. (2008), que analisou os principais produtos gerados durante a torrefação, constatou a presença da acetona e do metanol, orgânicos condensáveis, além de traços de amônia.

2.3.2 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA TORREFAÇÃO

A biomassa torrefeita varia entre as cores marrom e preto, com uma aparência semelhante à da matéria-prima original. O combustível passa por mudanças físicas, aumentando a sua natureza frágil e reduzindo a tenacidade das fibras poliméricas presentes na biomassa das espécies herbáceas e lenhosas (BRIDGEMAN et al., 2010). Outras propriedades físicas de importância incluem densidade, compressibilidade, moabilidade e hidrofobicidade.

A densidade energética é o conteúdo energético por unidade de massa. A densidade energética e os teores de carbono fixo aumentam quando são incrementados os parâmetros de temperatura e tempo. O rendimento decresce com o aumento da temperatura.

A biomassa torrefeita também é hidrofóbica; devido às transformações de caráter físico-químico, a reabsorção de umidade é praticamente nula e, então, ela pode ser armazenada a céu aberto por longos períodos sem tomar água, semelhante às infraestruturas utilizadas para o carvão. A biomassa torrefeita torna-se friável, porém em menor grau que o carvão vegetal, facilita o manejo do material sem perdas consideráveis (CORTEZ et al., 2008). O material torrefeito exige menos energia para esmagar, moer ou pulverizar, e as mesmas ferramentas para esmagar o carvão podem ser utilizadas.

2.2.3 - BALANÇOS DE MASSA E DE ENERGIA DE TORREFAÇÃO

Conforme Bergman (2005), a figura seguinte fornece um típico balanço de massa e balanço energético da torrefação. Geralmente, 70% da massa é mantida como um produto sólido contendo 90% do conteúdo inicial de energia, 30% da biomassa é convertida em gases que contém somente 10% do conteúdo energético da biomassa.

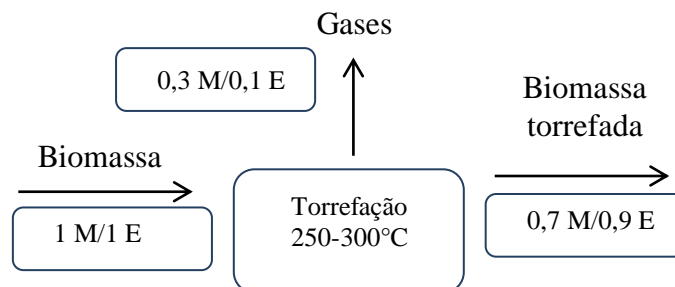


Figura 2.1: Balanço de massa e de energia da torrefação. M: unidade de massa; E: unidade de energia (Adaptado de Bergman, 2005).

Em um processo mais detalhado, segundo o estudo do ECN (2005) realizado a uma temperatura de 280° C com o tempo de reação de 17,5 minutos, o rendimento em massa de secagem foi cerca de 60%. Este número corresponde perda de umidade. Ou seja, o teor de umidade da biomassa na entrada foi de 50% e o de umidade deixando o secador foi de 15% (USLU, 2005).

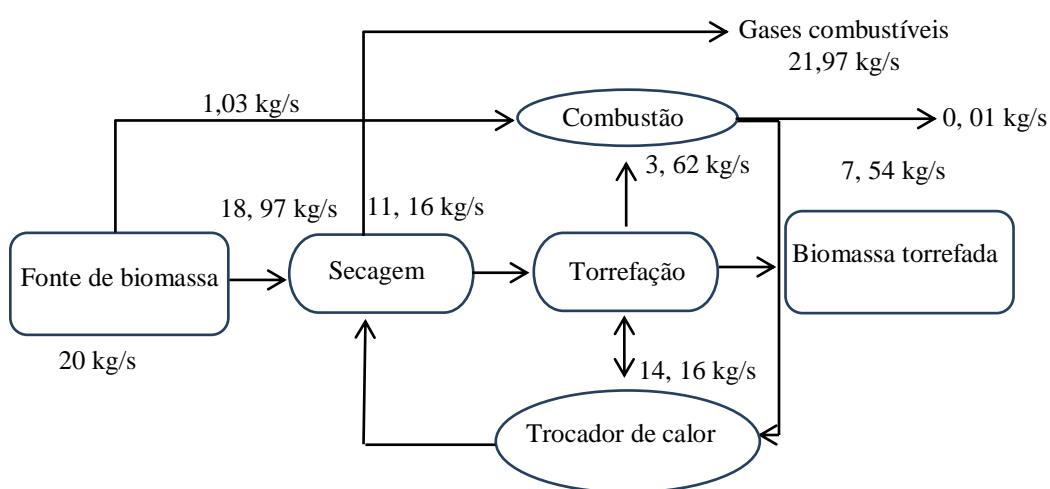


Figura 2.2: Fluxo de Massa correspondente a torrefação realizada a 280° C. Adaptado de Ayla Uslu. Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation. Relatório ECN. 2005.

O fluxo massa representado na Figura 2.2 revela-se promissor, pois neste processo de torrefação, que é baseado no aquecimento direto da biomassa utilizando gás quente reciclado do próprio processo de torrefação, esses gases derivam também da combustão da biomassa. O gás da torrefação é pressurizado e aquecido antes que ele seja reciclado no reator. A combustão do gás de torrefação é esperada para cobrir a demanda de energia do secador utilizando o mínimo, ou nenhum consumo de energia. O resultado é um gasto energético muito pequeno, pois os gases da torrefação são aproveitados no processo com uma eficiência térmica de 96%. Essa planta foi escolhida para realizar o estudo.

Segundo Prins e colaboradores (2006), a madeira torrificada retém entre 70% a 90% da massa inicial, e diminui de 80% para 60 - 75% o seu teor de matérias voláteis e de 10% para 03% o seu teor de umidade. Ciolkosz (2011) relata que o processo de torrefação tem um rendimento energético de até 80%. A eficiência do processo térmico pode ser aumentada através do aumento da utilização dos gases de torrefação e líquidos como fonte de energia, ou selecionando condições de processamento que maximizam o rendimento energético do material torrefeito.

A Figura 2.3 mostra o balanço de massa e equilíbrios globais de energia para os dois experimentos desempenhados por Prins et al. (2006). A biomassa utilizada foi o salgueiro. A torrefação da madeira foi realizada de duas formas distintas: a 250° C por 30 minutos, e a 300° C por 10 minutos.

O rendimento em massa para os dois casos é de 87% e 67%, respectivamente e o balanço energético mostra que 95% e 79% da energia consumida nos dois experimentos, simultaneamente, são retidas no produto sólido. O balanço de massa e de energia demonstra o papel da temperatura final do processo, ou seja, em temperaturas mais altas ocorre maior formação de voláteis e conseqüentemente maiores perdas de massa.

Outros autores como Ptasinski et al. (2011) e Bergman et al. (2005) relatam que o balanço de massa e o balanço de energia para torrefação de biomassa lenhosa é respectivamente 70% da massa, que é mantida como um produto sólido, contendo 90% do conteúdo energético inicial. Os outros 30% da massa são convertidos em gás de torrefação, que contém apenas 10% da energia da biomassa.

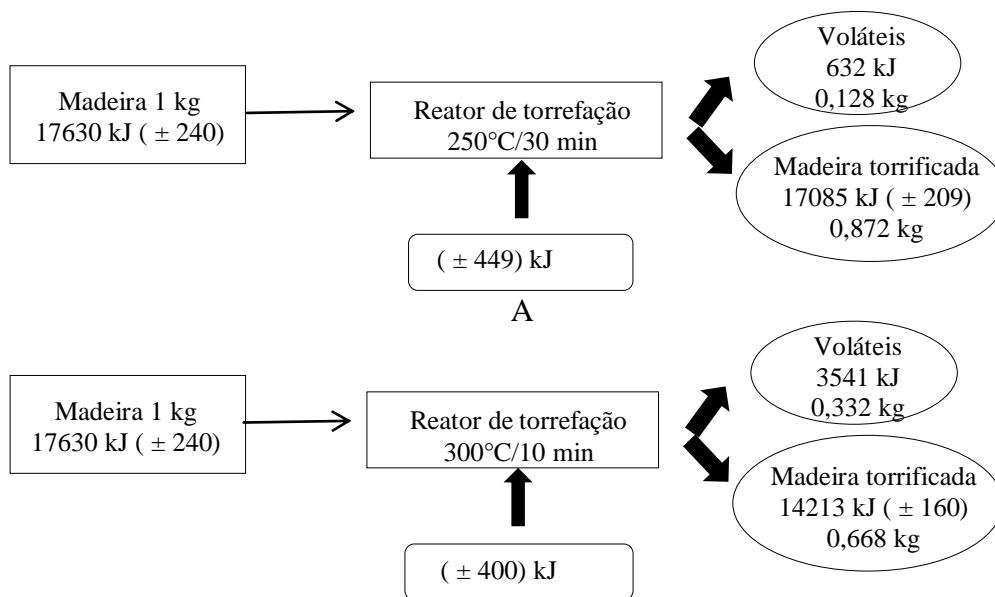


Figura 2.3: Balanço de massa e energético para a torrefação de *Salix sp* (seco) à temperatura e tempo de reação de (A) 250°C por 30 minutos e (B) 300°C por 10 minutos. Prins et al., 2006.

A secagem da matéria prima antes de entrar no forno de torrefação pode reduzir as necessidades de energia global, assim como a recuperação de calor a partir da matéria prima processada. O balanço de massa e de energia evidencia o papel da temperatura final do processo: temperaturas mais altas causam maior formação de voláteis, portanto, maiores perdas de massa (CIOLKOSZ; WALLACE, 2011).

2.3.4 APLICAÇÕES DA BIOMASSA TORREFEITA

A torrefação permite produtos com grande uniformização. A partir do mesmo processo podemos fabricar combustíveis para diferentes finalidades. Algumas aplicações serão descritas a seguir:

Gaseificação: Segundo Almeida et al. (2010), a torrefação é recomendada como um pré-tratamento da biomassa antes da gaseificação, pois diminui as propriedades mecânicas, como estrutura fibrosa facilitando o processo de gaseificação. A biomassa torrefeita precisa de menos energia para a moagem (ALMEIDA et al, 2009).

Combustível industrial e doméstico: O fato de possuir baixas emissões de fumaças durante a combustão, além de poder ser estocada por longos períodos, são fatores que

favorecem o uso doméstico da madeira torrificada. Industrialmente a biomassa torrada pode ser utilizada em grande escala para a produção de eletricidade na queima em caldeiras para a produção de vapor. Outro uso alternativo seria na co-combustão com carvão mineral, pois proporcionaria benefícios ambientais pela redução de emissões de dióxido de enxofre (ARACATE, 2002).

Redução: O alto teor de carbono fixo da madeira torrada proporciona potencialidade para ser aplicada como redutor na indústria metalúrgica. Experimentos realizados em um forno para a produção de silício, o qual requer redutores de alta resistência mecânica, onde a madeira torrada é mais eficiente que a tradicionalmente usada mistura de carvão a madeira torrefada (FELFLI, 2003).

2.3.5 VANTAGENS DA BIOMASSA TORREFEITA

A torrefação tem um grande efeito sobre as propriedades físicas e químicas da biomassa, portanto este processo traz alguns benefícios, tais como:

- Os resíduos agrícolas não têm propriedades caloríficas favoráveis, como umidade muito alta e baixa densidade energética. Assim sendo, o processo de torrefação é um método promissor para o pré-tratamento de resíduos, pois retira a umidade dos resíduos agrícolas e aumenta a densidade energética dos mesmos (JIAN DENG et al., 2009).
- A moabilidade é facilitada e, em consequência disso, o consumo de energia para a moagem é de três a sete vezes menor que o da matéria prima, que não passará pelo processo de torrefação (ARIAS et al., 2008; PRINS et al., 2006).
- A porosidade aumenta, portanto a biomassa torrefeita torna-se mais reativa durante a combustão e gaseificação (PRINS et al., 2006; SVOBODA et al., 2009).
- O processo torrefação faz com que a logística de transporte e armazenamento de biomassa seja mais eficiente, pois o custo com o transporte, armazenamento e transbordos são principalmente com base no volume do material, a torrefação diminui o volume da biomassa transportada, portanto torna-se um propulsor econômico para reduzir o volume da biomassa antes do seu transporte (ZWART, 2006).

2.3.6 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DA TORREFAÇÃO

Os primeiros estudos focados em torrefação foram iniciados na França em 1930, quando foram propostos distintos processos de obtenção de combustíveis torreficados, como uma fonte alternativa aos derivados do petróleo (LUENGO et al., 2006). Devido à segunda Guerra Mundial era necessário procurar novas estratégias para substituir os derivados de petróleo. Neste contexto, ocorre o desenvolvimento da torrefação como método para melhorar a qualidade da madeira.

Com o fim da guerra e o preço do petróleo a torrefação deixou de ser interessante. Na década 1970 aconteceu uma nova crise nos preços dos combustíveis fósseis, que estimulou o avanço na pesquisa e desenvolvimento de fontes renováveis de energia. Em 1980 surgiu novamente o interesse na torrefação na França.

A Figura 2.4 representa uma planta desenvolvida na França. O projeto realizado pela companhia *Le Bois Torréfié du Lot*, em que a transferência de calor é produzida por condução pelo contato da biomassa com as superfícies aquecidas do reator (GIRARD; SHAH, 1991). Para obter um bom resultado a madeira deve ser previamente seca e picada em pedaços de 10mm antes de entrar no forno de torrefação (CORTEZ et al., 2008). A produção de 12.000 toneladas por ano é realizada em um forno rotatório.

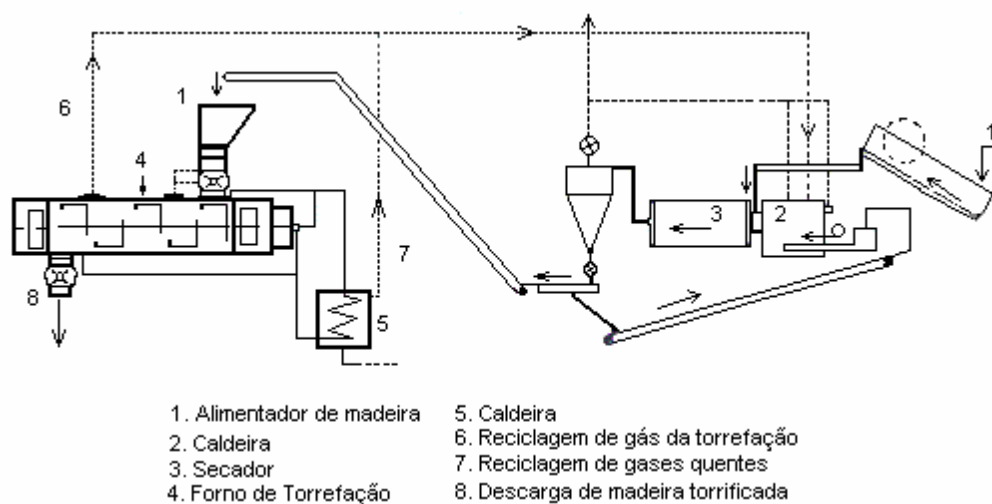


Figura 2.4: Planta de torrefação da PECHINEY Eletrometalurgia (Luengo et al, 2006 e GIRARD;SHAH, 1991).

ARCATE (2000) desenvolveu um procedimento, no qual a biomassa é torrefeita através de vapor superaquecido, que é reciclado entre a biomassa e um sistema de aquecimento que fornece a energia necessária para o processo. Essa tecnologia está descrita na Figura 2.5. O *Airless Drying* só pode ser utilizado em peças com dimensões grandes.

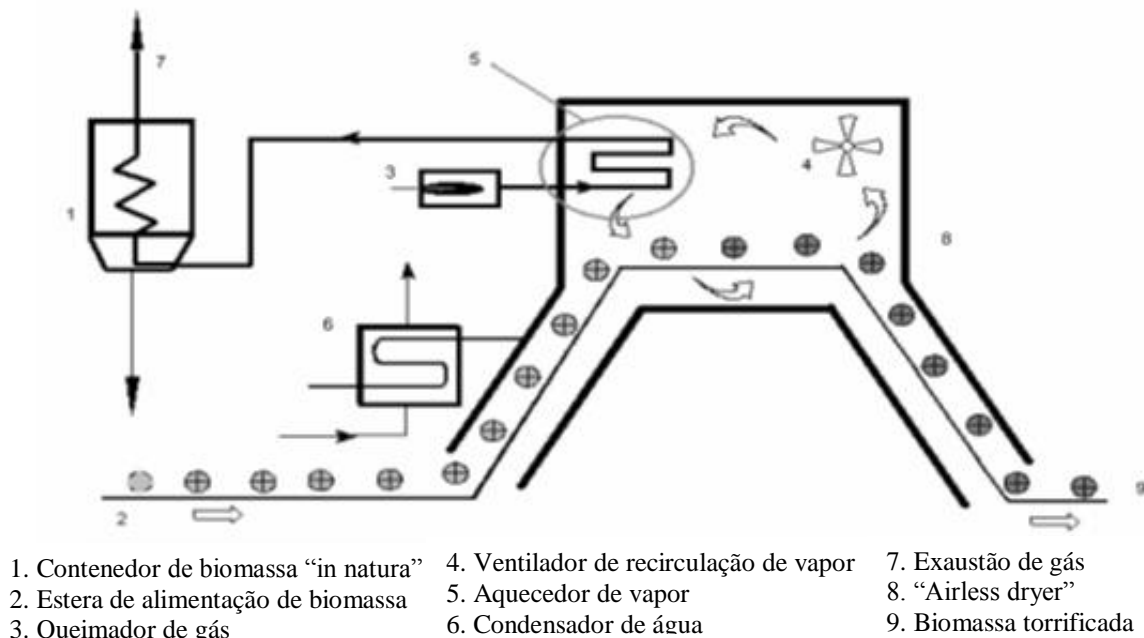


Figura 2.5: Sistema "Airless Drying" para Torrefação de biomassa (ARACATE, 2000).

No Brasil, o Grupo Combustíveis Alternativos (UNICAMP) desenvolveu um reator de alvenaria para a torrefação de pedaços de madeira ou briquetes de biomassa. O forno funciona em regime descontínuo e o tempo de torrefação pode variar entre 3 e 5 horas em função das dimensões e do teor de umidade da matéria prima. No forno ocorre a secagem e a torrefação da biomassa, e os gases da torrefação são recirculados para a câmara de combustão. Este equipamento pode torrefazer até 50 kg de madeira por ciclo operacional, apresentando rendimentos entre 70 e 90 % em função da temperatura de operação (FELFLI et al., 2003).



Figura 2.6: Forno para a Torrefação de biomassa no GCA (IFGW/UNICAMP)

(Fonte: CORTEZ et al.,2008).

O Centro de Energia dos Países Baixos (ECN) vem trabalhando no princípio da torrefação desde 2002, e publicou vários relatórios. Até agora, a sua investigação tem sido focada na biomassa. Em particular, a influência da alimentação, tamanho de partícula, temperatura de torrefação e tempo de reação sobre as características de torrefação, como massa e energia, rendimento e propriedades do produto têm sido investigadas (BRIDGEMAN et al., 2008).

Como torrefação não está disponível comercialmente no momento, muito do conhecimento gerado é usado para desenvolver esta tecnologia. Enquanto isso, o ECN anunciou que irá construir a primeira planta em escala comercial de torrefação de biomassa, que vai produzir *pellets* segunda geração, conforme a Figura 2.6.

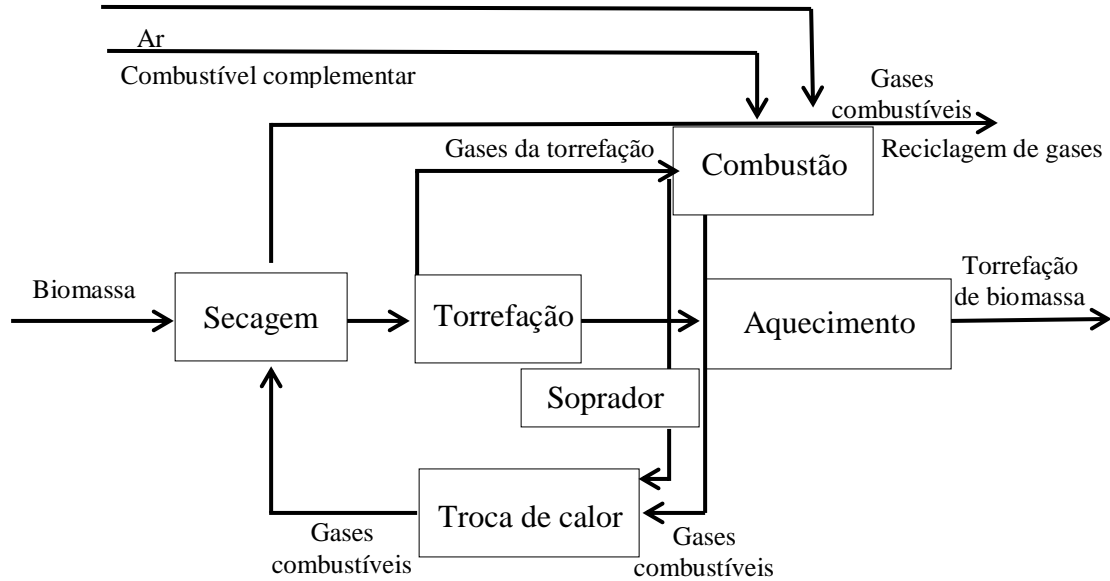


Figura 2.7: Esquema da torrefação que antecede a compactação (pelletização) TOP (BERGMAN, 2005).

A tecnologia é considerada importante, pois permite que uma ampla variedade de resíduos tais como lascas de madeira e resíduos agrícolas possam ser utilizados. O processo, denominado TOP – *Combined Torrefaction and Pelletisation*, é baseado na combinação da compactação com pelletização após a torrefação. (BERGMAN, 2005).

Torrefação, por meio deste processo, agrega vantagens. O método TOP gera um combustível com densidade típica de $750-850 \text{ kg/m}^3$, um poder calorífico de 19 a 22 MJ/kg e uma densidade volumétrica de $14-18,5 \text{ GJ/m}^3$ (a granel) (BERGMAN, 2005). Demonstrado em estudo, em comparação com a pirólise e a pelletização, o processo TOP apresenta produto com densidade energética 1,75 maior que a dos *pellets* convencionais e três vezes maior que a biomassa só torrificada (USLO et al., 2008)

Em outra pesquisa, também patrocinada pela ECN, o engenheiro químico holandês Prins (2005) demonstrou que gaseificação da biomassa torrefeita é um meio eficiente de produzir energia sustentável e que o gás produzido pode ser usado para a produção de eletricidade, mas também como combustíveis e produtos químicos. Prins (2005) seguiu uma abordagem termodinâmica para investigar como a biomassa poderia ser gaseificada da forma mais eficiente possível. Ele desenvolveu um conceito que combina as duas técnicas: a torrefação

e a gaseificação. A torrefação aumenta o poder calorífico da biomassa e diminui o seu teor de umidade. Isso melhora consideravelmente as propriedades da biomassa para a gaseificação. Em temperaturas de gaseificação entre 900 e 1200° C, a biomassa torrada torna-se menos oxidada do que a biomassa não tratada, que é favorável para a eficiência do processo.

CAPÍTULO III

3.1. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi desenvolvida por ser uma metodologia para avaliação dos aspectos ambientais e dos impactos potenciais associados a um sistema ou produto, compreendendo as etapas que vão desde a retirada, da natureza, das matérias-primas elementares que entram no sistema produtivo (o berço), até a disposição do produto final (o túmulo). Ela analisa os aspectos ambientais em todas as fases da sua vida, constituindo vínculos entre esses aspectos e categorias de impacto potencial, ligados ao consumo de recursos naturais, à saúde humana e à ecologia (SANTIAGO, 2005).

A ACV, portanto, gera elementos que permitem compreender o comportamento ambiental de um sistema de produto específico ou compreender o desempenho ambiental de um sistema, ou ainda, comparar dois ou mais processos, para determinar a superioridade ou equivalência entre eles. As informações geradas podem auxiliar na elaboração de políticas públicas, no planejamento estratégico, na definição de prioridades, na revisão de processos ou produtos e no desenvolvimento de novas tecnologias (SANTIAGO, 2005).

A análise do ciclo de vida surge a partir das normas ISO 14000, padronizados pelas normas ISO 14040 e ISO 14044 e constitui-se como instrumento que permite o desenvolvimento de critérios e procedimentos com objetivo de avaliar o impacto ambiental de produtos e processos.

Esta ponderação considera o ciclo de vida completo, isto é, desde a sua concepção (projeto) até o término da vida útil, com a sua disposição ou recuperação. Envolve, portanto, a contabilização de muitos parâmetros durante os diferentes estágios dos processos de um produto, a sua distribuição e a gestão dos resíduos (SANTIAGO, 2005). Conforme a norma ISO 14040, a ACV é a compilação das entradas e saídas do impacto ambiental de um sistema ou produto ao longo do seu ciclo de vida.

Os resultados são estruturados como um estudo de ACV, cuja estrutura metodológica é normatizada internacionalmente pela ISO e, no Brasil, pela ABNT. Tal estrutura determina

as fases e os procedimentos gerais da execução de um estudo de ACV, de acordo com as normas mundiais da série ISO 14040, e as correspondentes nacionais da série NBR ISO 14040. As características-chave para a realização de um estudo de ACV, segundo ABNT (2001), são:

- Abordagem sistemática e adequada com relação aos aspectos ambientais de sistemas de produto, desde a aquisição de matéria-prima até a disposição final.
- Possibilidade de alterações dos detalhes e do período de tempo de um estudo da ACV, dependendo da definição do objetivo e do escopo.
- Transparência quanto ao escopo, suposições, descrição da qualidade dos dados, dos métodos e apresentação dos resultados.
- Possibilidade de inclusão de novas descobertas científicas e melhoria no estado da arte da tecnologia.
- Inexistência de base científica para reduzir resultados da ACV a um único número ou pontuação globais.
- Inexistência de um único método para conduzir estudos da ACV, mas o método escolhido deve seguir a Norma NBR ISO 14040.

Portanto, a estrutura metodológica do estudo da ACV da torrefação segue as normas ISO 14040, componente da série 14000 de gestão ambiental mostrados na Figura 3.1.

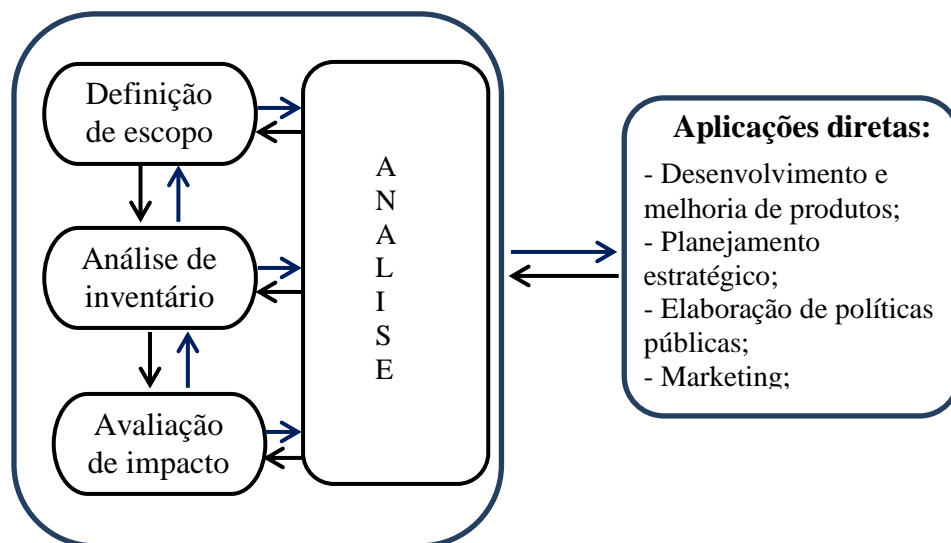


Figura 3.1: Estrutura da Avaliação do Ciclo de Vida. Adaptada do de, ISO (1997); ABNT (2001).

3.2 OBJETIVO E ESCOPO A PARTIR DO REFERENCIAL TEÓRICO METODOLÓGICO

A torrefação é um processo intermediário utilizado para tratar a biomassa e está sendo amplamente estudada, pois agrega valor energético e econômico, embora os impactos ambientais, mais especificamente o GEE, sejam desconhecidos. O presente estudo pretende avaliar o desempenho ambiental da torrefação, através da Avaliação do Ciclo de Vida da biomassa, por meio da identificação e da quantificação de energia utilizada e emissões ao longo do ciclo de vida, a fim de considerar os impactos sobre o ambiente e indicar oportunidades de melhorias ambientais. Nesse sentido, conforme a estrutura de ACV definida anteriormente, comenta-se a função do sistema, a unidade funcional, e a delimitação deste nas linhas seguintes.

- **Função do Sistema**

A torrefação da biomassa no início da cadeia de abastecimento é um método de reforço que preserva sua qualidade durante o armazenamento, reduzindo os custos de armazenamento e transporte. Além disso, o processo uniformiza matérias-primas de diferentes espécies, e prevê uma forma rentável e sustentável de obtenção de energia através da biomassa.

- **Unidade Funcional**

A unidade funcional utilizada foi kg/MJ. A energia do sistema deriva da combustão da biomassa.

- **Delimitação do Sistema**

As fronteiras do sistema representadas na figura 3.4 foram incluídas das etapas de fonte da biomassa, secagem, torrefação, combustão, trocador de calor, transporte e a gaseificação. O processo de torrefação ocorre próximo da fonte de biomassa. A distância é

ignorada e, em seguida, a parte dessa biomassa é utilizada na combustão. A energia gerada por esse processo de combustão é utilizado nas etapas de secagem e torrefação, ou seja, os gases combustíveis provém da combustão da biomassa e da torrefação esses gases serão queimados gerando energia para a secagem e a própria torrefação. Depois, a biomassa é transportada e gaseificada.

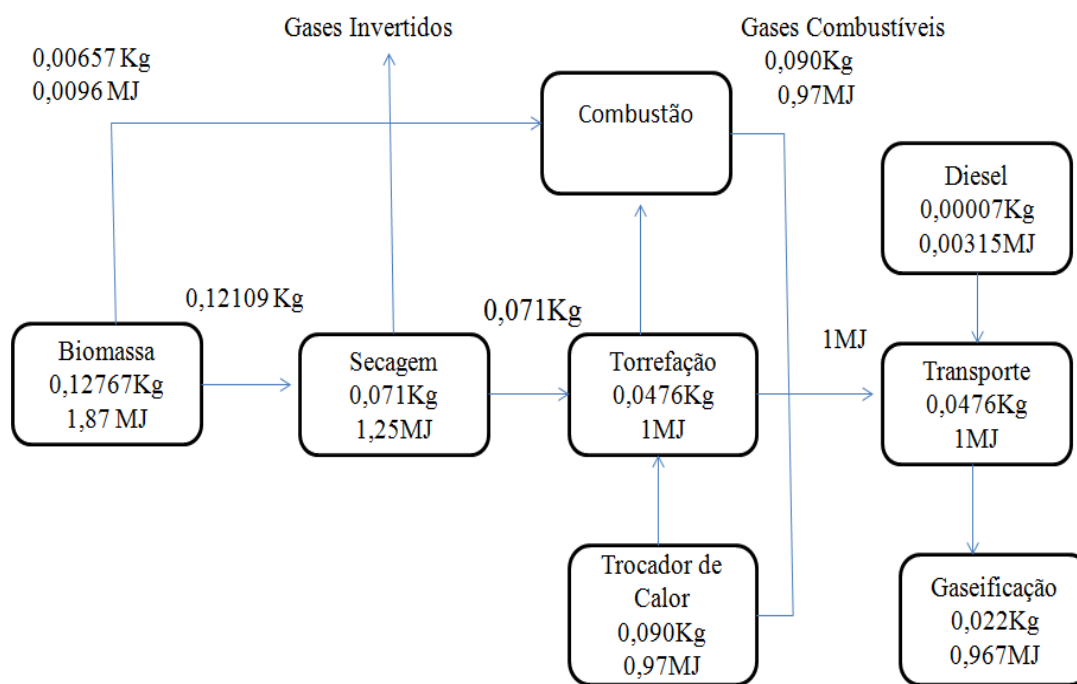


Figura 3.2: Processo de torrefação para produzir 1MJ . Adaptado de USLU, A. et al., 2008 adaptado.

Segundo o Energy Research Centre of the Netherlands - ECN a tecnologia de torrefação ainda não está comercialmente disponível. Por essa razão, este estudo baseou-se em dados da literatura. Adotou-se dois referentes básicos: Uslu, A. et al (2008) e Prins et al (2006).

Prins et al. (2006 b) fornece os dados sobre os gases de torrefação. Uslu, A. (2008) apresenta detalhes do fluxo de massa do processo de torrefação e a planta de torrefação esses dados foram utilizados na pesquisa . Para dar continuidade a presente pesquisa, tomou-se o salgueiro como fonte de biomassa. Da mesma forma que Prins, entende-se que essa cultura energética é encontrada na literatura em detalhes e, além disso, é menos dependente das

condições climáticas e de solo e exige menos insumos agrotóxicos, reduzindo assim a sua concorrência direta com a produção de alimentos (FARREL et al., 2006; ADLER et al, 2007; SCHMER et al, 2008).

A ACV em questão foi realizada conforme a estrutura da ISO 14041. A planta de torrefação foi adaptada do Centro de Pesquisas de Energia dos Países Baixos (ECN), para que os dados de Prins (2006) fossem utilizados e o estudo de ACV realizado. Os dados numéricos de Prins (2006) foram escolhidos, pois apresentam emissões de CO₂, CO, ácido acético e compostos orgânicos. Este processo de torrefação foi baseado no aquecimento direto da biomassa, utilizando os gases quentes reciclados que foram concebidos. O gás de torrefação foi pressurizado e aquecido, pois a pressurização e o aquecimento aumenta a energia cinética das moléculas, antes de ser reciclado para o reator. O teor de umidade da matéria-prima nesse processo é extremamente importante, pois a propriedade determina a demanda de matéria-prima de calor necessária (USLU, A. et al., 2008).

No Primeiro Cenário a combustão do gás de torrefação é esperada para cobrir a demanda de energia do secador, com ou sem um mínimo consumo de energia elétrica. O modelo de experimento utilizado para ACV aproveita *chips* da biomassa a uma temperatura de 280° C e o tempo de reação é de 17,5 minutos (USLU et al., 2008).

No Segundo Cenário analisado a biomassa passou pelos seguintes processos: fonte de biomassa, secagem, energia elétrica para secar a biomassa e transporte e a gaseificação como está descrito na figura seguinte.

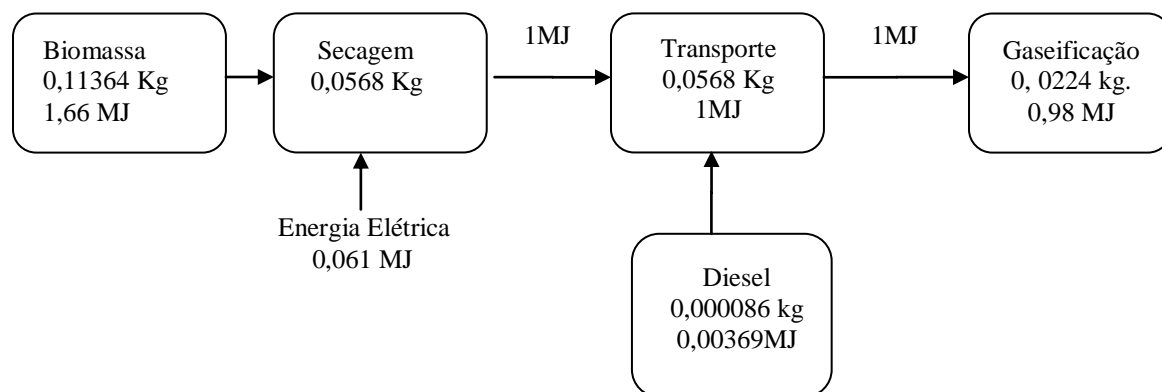


Figura 3.3: Segundo Cenário da Gaseificação da Biomassa sem passar pelo processo de torrefação. Adaptado de PRINS et al ,2006.

Nesse segundo cenário, também baseado na literatura, foi considerado o mesmo tipo de biomassa utilizado no primeiro cenário e o dados foram ajustados pelo programa *GaBi Education* para produzir e transportar 1MJ de energia através da biomassa gaseificada.

3.3 METODOLOGIA

Realizou-se vasta pesquisa bibliográfica para obter dados de emissões e fluxos de massas e plantas tecnológicas de torrefação para, através da metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), avaliar os impactos ambientais relacionados ao aquecimento global e o balanço energético dos dois cenários.

A ACV da biomassa torrefeita foi realizada conforme a ISO 14040, que utiliza a técnica para avaliar os aspectos ambientais de um sistema mediante a compilação do inventário de entradas e saídas pertinentes aos processos: fonte de biomassa, combustão, secagem, torrefação, gases que provém da torrefação e a combustão são utilizados para secar a biomassa, o transporte e a gaseificação. Para a interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e de avaliação de impactos em relação aos objetivos do estudo não foi considerado, neste estudo, o cultivo agrícola do Salgueiro (*Salix sp*), pois a torrefação é aplicada em diversos tipos de madeiras, resíduos agrícolas e florestais .

A energia considerada no Primeiro Cenário, no qual a biomassa é torrefada e gaseificada, provém da própria biomassa. Parte da massa da biomassa é utilizada na combustão e os gases da torrefação e da combustão são utilizados para secar a biomassa. A biomassa foi gaseificada após o processo de torrefação.

No Segundo Cenário que foi analisado, a biomassa foi seca e, em seguida, gaseificada. A energia utilizada para secar a biomassa provém da rede elétrica retirada da base de dados do *Gabi Education*.

Vale frisar que o único impacto que será analisado neste trabalho refere-se ao potencial aquecimento global, de acordo com a metodologia e balanço energético dos processos de ciclo de vida utilizando o programa GaBi 4.4 Education.

3.4 INVENTÁRIO

A ABNT considera o inventário como uma fase na qual ocorre a coleta e a quantificação de entradas e saídas que estão envolvidas no processo, ou seja, dados relacionados com análise de vida do sistema (ABNT, 2001). A condução do inventário é um processo iterativo onde ocorre uma sequência de eventos que envolvem a checagem de procedimentos. O requisito de qualidade estabelecido é elaborado numa lista, que contém quantidades de recursos e energia utilizados, e de poluentes emitidos. O inventário pode refinar as fronteiras do sistema, conforme Sallaberry (2009).

O inventário deste estudo de ACV foi realizado a partir da revisão bibliográfica, na qual os dados secundários foram coletados e calculados, pois o objetivo do inventário é obter informações ambientalmente relevantes para as unidades de processo, de acordo com a definição do escopo, como as trocas ambientais dos processos envolvidos no sistema.

O resultado da análise de inventário do ciclo de vida está apresentado nas tabelas 3.3 e 3.4, como forma de se obter uma melhor organização dos dados e um melhor entendimento sobre cada atividade do ciclo. Os resultados apresentam os dados secundários coletados, a unidade de referência para o tratamento deste e a quantidade relativa à unidade funcional.

Desta forma, utilizamos duas referências básicas: Prins et al.,(2006) e Uslu et al.,(2008) . Prins et al., (2006) em seus estudos apresenta com detalhes as substâncias químicas emitidas no processo de torrefação como esta demonstrado na tabela 3.1.Vale resaltar que essas emissões nos fornece dado imprescindíveis para a análise de ACV.Prins utilizou como referencia 1Kg de biomassa seca e depois torrefada.

Tabela 3.1: Origem dos dados secundários dos processos elementares. Adaptado de Prins et al., 2006.

Processos Elementares	Unidade	Origem dos Dados	Referências
Poder Calorífico da Biomassa	14,65MJ/Kg		GaBi 4.4 Education
Poder Calorífico da Biomassa Seca	17,6 MJ/Kg	Literatura	PRINS et al., (2006b)
Poder Calorífico da Biomassa Torrefada	21,0 MJ/Kg	Literatura	PRINS et al., (2006b)
Madeira Seca	1 Kg	Literatura	PRINS et al., (2006b)
Madeira torrefada	0.668 Kg	Literatura	PRINS et al., (2006b)
H ₂ O	0.066 Kg	Literatura	PRINS et al., (2006b)
Ácido Acético	0.072 Kg	Literatura	PRINS et al., (2006b)
Outros Compostos Orgânicos (Metanol)	0.142 Kg	Literatura	GaBi 4.4 Education
CO ₂	0.040 Kg	Literatura	PRINS et al., (2006b)
CO	0.012	Literatura	PRINS et al., (2006b)
H ₂	Traço	Literatura	PRINS et al., (2006b)
CH ₄	Traço	Literatura	PRINS et al., (2006b)

Consultando autores como JIAN DENG et. al. (2009), BRIDGEMAN et. al., (2007) e ARIAS et. al. (2007), pode-se confirmar as substâncias produzidas e emitidas na Tabela 3.1. Prins et al. (2006) informa dados referentes a emissões dos voláteis para 1 kg de biomassa seca que passa pelo processo de torrefação.

Já Uslu et al.,(2008) e Bergman et al, (2005) desenvolveram uma planta de torrefação utilizando-se de 20 Kg de biomassa inatura .Deste modo convertemos os dados de Prins(2006) para Uslu (2008) e após a secagem da mesma, obteve-se 11,16 Kg de biomassa seca. Os voláteis foram multiplicadas por 11,16 Kg . Obteremos dados conforme a tabela 3.2.

Os compostos orgânicos constituem-se do ácido fórmico, furfural, metanol, ácido láctico, fenol e outros. Como não foi encontrado na literatura dados com precisão sobre essas substâncias, escolheu-se o metanol como fator de referência dos outros compostos orgânicos condensáveis. Sandemann (2008) observou que o metanol aparece isoladamente nos gases emitidos no processo de torrefação, e que corresponde a 0,1%, enquanto os outros compostos orgânicos não estão expostos de forma isolada e estão presentes em menor quantidade. Conclui-se, assim, que o metanol pode representar o grupo de todos os compostos orgânicos para efeito do presente trabalho.

Os gases combustíveis utilizados para secar a biomassa são obtidos através da combustão da biomassa e da torrefação, como já foi citado anteriormente. Esses gases são aproveitados para secar a madeira, ou seja, não se utiliza energia de fora do processo. Após análise da literatura, assumiu-se o valor do poder calorífico dos gases e optou-se por utilizar uma média aritmética entre os valores 5,3-16,2 (PRINS et al.,2006b).

Tabela 3.2: Simulações de Valores Referente ao ACV da Torrefação

Processos Elementares	Unidade	Origem dos Dados	Referências
Fonte de Biomassa	2 0 Kg	Literatura	AYLA USLU et. al., (2008)
Biomassa para Combustão	1,03 Kg	Literatura	AYLA USLU et. al., (2008)
Biomassa após a secagem	11,16 Kg	Literatura	AYLA USLU et.al.,(2008)
H ₂ O	0,736 Kg	Calculado	–
Ácido Acético	0,803 Kg	Calculado	–
Outros Compostos Orgânicos (Metanol)	1,585 Kg	Calculado	–
CO ₂	0.446 Kg	Calculado	–
CO	0,134	Calculado	-
H ₂	Traço	Literatura	PRINS et al.,(2006)
CH ₄	Traço	Literatura	PRINS et al.,(2006)
Gases Combustíveis	kg/10,75MH	Literatura	PRINS et al.,(2006)

Recorde-se que foram considerados dois cenários: no primeiro, a biomassa é torrefada e gaseificada e, no segundo, a biomassa é somente seca e depois gaseificada. Portanto, para comparar os dois processos, converteu-se a massa da biomassa em todos os processos para a produção e o transporte de 1MJ de energia proporcionalmente no software *GaBi Education*, conforme as tabelas a seguir. O resultado nas tabelas 3.3 e 3.4 foram obtidos da seguinte forma através do *GaBi Education* forma:

Equação de proporcionalidade (*GaBi Education*)

$$T \times (PC)=R \qquad T/R=FP$$

Obs*:T é a massa total de 20 Kg dado tirado da literatura(ENC,2005 e Uslu et al.,(2008); PC poder calorífico da madeira por Kg(*GaBi Education*,2004);R é a multiplicação da massa total com poder calorífico e FP é o fator de proporcionalidade.

3.3: Simulações de Valores Referente ao ACV da Torrefação e a Gaseificação.

Processos	Unidade	Origem dos Dados	Referências
Elementares			
Fonte de Biomassa	0,12767 Kg	Base de Dados	GaBi 4.4 Education.
Biomassa para Combustão	0,0065747 Kg	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
Biomassa após a secagem	0,071237 Kg	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
H ₂ O	0,0046981 Kg	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
Ácido Acético	0,0051258 Kg	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
Outros Compostos Orgânicos (Metanol)	0,010117 Kg	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
CO ₂	0,0028469 Kg	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
CO	0,00085536	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
H ₂	Traço	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
CH ₄	Traço	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
Gases Combustíveis	0,009Kg/0,97MJ	Base de Dadoa	GaBi 4.4 Education

A tabela 3.3 discrimina a simulação de valores realizadas pelo *GaBi Education* no processo no qual a biomassa é seca, transportada e gaseificada. A análise da ACV foi realizada comparando-se os dois cenários.

Tabela 3.4: Simulações de Valores Referente ao ACV da Gaseificação da Biomassa.

Processos Elementares	Unidade	Origem dos Dados	Referências
Fonte de Biomassa	0,11364 Kg/1,66 MJ	Base de Dados	GaBi 4.4 Education.
Biomassa após a secagem	0,0568Kg	Base de Dados	GaBi 4.4 Education
Energia Elétrica	0,06 MJ	Base de Dados	GaBi 4.4 Education

- Gaseificador

Sabemos que existem vários tipos de gaseificadores desenvolvidos a fim de atender as peculiaridades e características da matéria prima, e as necessidades do tipo de gás. Porém, este estudo se limitou apenas a um tipo de gaseificador: o gaseificador de leito fixo, do tipo concorrente. Escolheu-se este gaseificador em função da baixa produção de alcatrão, que praticamente é desconsiderado nesse tipo de reator. Além disso, a construção é simples, o gaseificador tem um alto potencial de conversão de carbono, gás produzido relativamente limpo, que pode ser utilizado em motores de linha sem grandes modificações, e o combustível utilizado no gaseificador de leito fixo necessita ter baixa umidade (< 20 %), ou seja, é necessário passar pelo processo de secagem ou torrefação da biomassa. (LORA et al,2012).

- GaBi Education

Ressalte-se que, para caracterizar os modelos e processos tecnológicos utilizou-se o software *GaBi 4.4 Education*, e a base de dados ELCD. O *GaBi Education* possui, em sua base de dados, 666 unidades de processos e 989 inventários consolidados do tipo *cradle to gate* (do berço ao túmulo), relacionados aos mais diversos setores industriais para diversos países. Sua base de dados contempla recursos essenciais para qualquer modelagem em ACV, como a produção e a distribuição elétrica de combustíveis (petróleo, carvão, gás natural, etc.), produtos intermediários (substâncias orgânicas e inorgânicas), sistemas de transportes e a

disposição de resíduos e outros. O GaBi foi desenvolvido pelo PE (Portal Internacional da Alemanha) e a versão é gratuita e disponível (GABI, 2003).

- Transporte

Conforme a literatura adotada, a planta de pré-tratamento está localizada próximo das áreas agrícolas, portanto a distância entre a planta e a área agrícola foi desconsiderada. Zwart (2006) relata, em seu estudo que a planta esta localizada em Roterdã, uma província da Holanda. Ele considera que a biomassa, depois de torrefada, é transportada a uma distância de 100 km. Esta é uma distância média de transporte da área de colheita para o ponto de transferência, em relação à capacidade de pré-tratamento da unidade (ZWART, 2006). Neste trabalho considerou-se que a biomassa foi transportada também nas distâncias de 300km e 500 km nos dois cenários.

A malha de transporte de 10 a 30% ocorre em vias urbanas ou estradas, e de 70 a 90% ocorre em rodovias, sendo respectivamente definidas as porcentagens de 20 e 80% para esse estudo. Além disso, todos os meios de transporte assumidos consomem óleo diesel como combustível. E, por fim, na base de dados do GaBi escolheu-se o processo GLO: Truck PE, Euro 3, com peso padrão de carga igual a 25 toneladas de carga transportada conforme a literatura (ZWART, 2006).

CAPÍTULO IV

4.0 ANÁLISE DO INVENTÁRIO

Serão discutidos, a seguir, os resultados referentes aos impactos ambientais na categoria de impacto de emissões de gases de efeito estufa, tanto para o processo da biomassa torrefada e gaseificada, quanto para a biomassa só gaseificada. O método utilizado foi o CML, que tem o seu nome associado ao instituto que o estabeleceu, no caso, o Centro de Ciências Ambientais (CML) da Universidade Leiden, na Holanda. Para a categoria de aquecimento global, o CML baseia-se no relatório do IPCC (International Panel on Climate Change). O método caracteriza as entradas e saídas do inventário, em um horizonte de tempo de 100 anos por kg de dióxido de carbono. O escopo geográfico desse indicador é de escala global (GUINÉE, 2001).

Utilizou-se a versão CML de 2001, caracterizada como método *midpoint* (GUINÉE, 2001), que agrupa os resultados em categorias de ACV de ponto médio, de acordo com temas. Os temas referidos são mecanismos comuns (por exemplo, alterações climáticas) ou agrupamentos (por exemplo, ecotoxicidade). Ou seja, para cada problema ou categoria de impacto do método existem fatores de caracterização específica já previamente quantificados. A modelagem de médio ponto fornece resultados que são significativos a partir de uma perspectiva científica.

No método *midpoint* não são contemplados procedimentos de ponderação e agregação, os resultados em categorias denominadas ponto médio estão de acordo com os temas. Os temas são mecanismos comuns (por exemplo, alterações climáticas) ou a depleção da camada de ozônio. A categoria analisada foi o Potencial de Aquecimento Global, como está descrito na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Categoria de Impacto de Potencial Aquecimento Global.

Categoria	Alcance geográfico	Vínculo com a categoria de dano do Impacto.
Aquecimento Global 100 anos	Global	Alteração no clima

O aquecimento global é definido como o impacto de emissões antropogênicas, ou seja, emissões geradas por ações humanas de gases do efeito estufa para a atmosfera. A queima desses gases produz o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O). Os gases referidos retêm o calor proveniente das radiações solares, causando um aumento da temperatura superficial da terra, algo que vem implicando negativamente no ecossistema.

No caso da produção da biomassa, a contribuição para o aquecimento global é causada pelas emissões dos gases do efeito estufa (CO₂, N₂O e CH₄), que provém da utilização da energia fóssil para transportar a biomassa, e do processamento. Os gases do efeito estufa envolvem a Terra e fazem parte da atmosfera. Tais gases aspiram parte da radiação infravermelha refletida pela superfície terrestre, evitando que a radiação escape para o espaço e aquecendo a superfície da Terra (CARBONO BRASIL, 2011).

As emissões que contribuem para as mudanças climáticas (CO₂, N₂O e CH₄) são multiplicadas por seus respectivos potenciais de aquecimento global para alcançar os equivalentes valores para 1 kg de CO₂, unidade de medida de avaliação dos impactos causados por mudanças climáticas. O fator Potencial de Aquecimento Global (PAG₁₀₀)* é a razão entre a absorção refratada de emissões instantâneas de 1 kg de uma substância qualquer e uma emissão igual de dióxido de carbono num período de tempo de 100 anos (NARAYANASWAMY et al.,2003).

Atualmente, não existe nenhum fator de normalização que refira, de forma específica, aos efeitos ambientais para o contexto brasileiro. Por esse motivo, julgou-se mais conveniente fazer uso do fator CML 2001.

Na metodologia empregada, os dados foram coletados do inventário e em seguida adaptados e inseridos no *software GaBi Education*. Ele compilou os dados na categoria de impacto escolhida, de acordo com a unidade de referência de cada processo e com a caracterização dos fluxos ambientais.

Na tabela 4.2 está retratada a categoria específica do impacto ambiental analisado. A fórmula refere-se ao Global Warming Potential (GWP) ou, em português, Potencial de Aquecimento Global (PAG). O PAG é um parâmetro de como uma determinada quantidade de gás do efeito estufa (GEE) contribui para o aquecimento global, é uma medida relativa que

compara o gás em questão com a mesma quantidade de dióxido de carbono, cujo potencial é definido como 1.

O Potencial de Aquecimento Global é calculado sobre um intervalo de tempo específico, geralmente de 20, 100 ou 500 anos. Neste estudo o tempo estimado foi de 100 anos. Assim, um potencial de aquecimento global elevado correlaciona-se com uma grande absorção de infravermelhos e um longo tempo de vida atmosférica. O PAG baseia-se num certo número de fatores, incluindo a eficiência da radiação (capacidade de absorção no infravermelho) de cada um dos gases em relação à de dióxido de carbono, bem como a taxa de atenuação de cada gás (o valor retirado da atmosfera durante um dado número de anos) em relação ao do dióxido de carbono.

Tabela 4.2: Especificação da Categoria CML. Fonte: CML, 2001.

Categoria	Fórmula (unidade)	Contribuição
Aquecimento Global	$\sum_i \text{GWPI} \times e_i \text{ (Kg}_{\text{eq}} \text{ CO}_2\text{)}$	Mede a absorção de radiação infravermelha absorvida por certa substância em comparação com CO ₂ .

Obs: e_i = emissão da substância para o ambiente, em massa; GWP = Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potential).

O aquecimento global refere-se às alterações climáticas ocorridas no planeta. No entanto, as principais atribuições para o aquecimento global são relacionadas às atividades, que intensificam o efeito estufa através das emissões de gases como o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), que retêm o calor proveniente das radiações solares, como se funcionassem como o vidro de uma estufa de plantas. Esse processo causa o aumento da temperatura. O aquecimento global é expresso em kg CO₂ equivalente da emissão.

A avaliação do ciclo de vida foi realizada seguindo a norma EN ISO 14040:2006, na qual o dióxido de carbono (CO₂), o metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) são considerados na ACV. Estes dois últimos gases são convertidos nas quantidades equivalentes de CO₂ (Kg de CO₂ eq.), usando o potencial de aquecimento global (PAG) listado na tabela abaixo. As

emissões de dióxido de carbono (CO₂) da biomassa estão de acordo com as diretrizes do IPCC.

Tabela 4.3: Potenciais de Aquecimento Global. Fonte: IPCC, 2006.

Gás	CO ₂ - equivalente
CO ₂	1
CH ₄	25
N ₂ O	296

4.1 O CENÁRIO DA BIOMASSA TORREFADA E, DEPOIS, GASEIFICADA E RESULTADOS.

O cenário da Avaliação do Ciclo de Vida da Torrefação e Gaseificação da Biomassa é constituído pelas seguintes etapas: fonte de biomassa, combustão da biomassa, secagem, torrefação, gases combustíveis (obtidos através da combustão e da torrefação da biomassa que serão utilizados no processo de secagem), gases invertidos (gases emitidos a partir da secagem, da combustão e do processo de torrefação), a biomassa torrefada e o transporte e gaseificação. A fonte de biomassa é considerada a biomassa colhida, úmida, pronta para ser seca. Neste processo, os gases da torrefação da combustão são utilizados na secagem, ou seja, os gases são reutilizados como descrito no modelo de Uslu (2008). Conforme a figura seguinte 3.2 que já foi descrita anteriormente.

No presente estudo a ACV, a plantação e a colheita do Salgueiro não foram considerados, pois não foram encontrados dados adequados para o estabelecimento de correlação. Os gases emitidos e contabilizados na ACV, no processo de gaseificação da biomassa, foram: o monóxido de carbono, o hidrogênio e o metano, pois esses gases têm maior aplicabilidade na escala comercial para competir com os combustíveis fósseis. Eles podem ser utilizados de diversas formas, inclusive na produção do gás de síntese e na geração de energia elétrica. Além dos gases citados antes, o gás produzido também inclui os produtos característicos da combustão: CO₂, H₂O, O₂ e N₂ (quando o agente gaseificador é o ar), assim como teores menores de hidrocarbonetos (LORA et al, 2012).

Analisando a avaliação do ciclo de vida da biomassa torrefada e gaseificada através do software *Gabi Education* os processos que mais contribuíram para o PAG foram a gaseificação, com 94,4%; o diesel, com 0,6 %; e o transporte, com 5,0%. Observa-se que a gaseificação da biomassa é a categoria que mais contribui para emitir CO₂. Lembrando que o diesel esta sendo considerado a partir da sua geração em uma usina. Lembrando que o Diesel considerado provem da usina de beneficiamento.

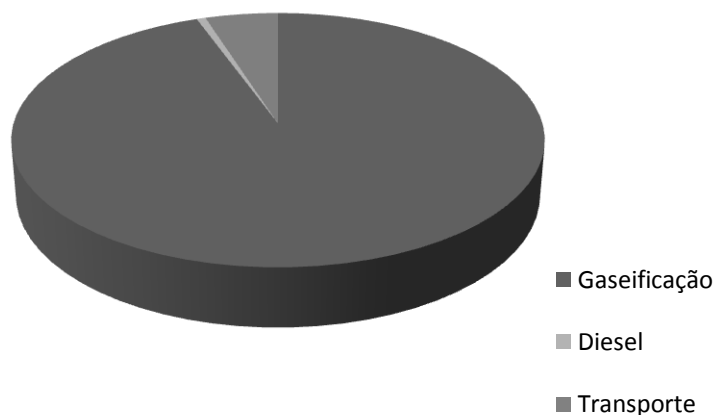


Figura 4.1: Processos que mais contribuem para o PAG.

Na literatura existem relatos sobre a vantagem econômica de transportar a biomassa torrefada. ZWART et al. (2006), diz que a opção de pré-tratamento é atrativa, pois a biomassa torrefada reduz os custos econômicos do transporte. Além do mais, o processo de torrefação produz uma biomassa com densidade energética maior que a biomassa natural e com baixa umidade. Isso traz, como consequência, a possibilidade de se transportar mais biomassa torrefada, em comparação com a biomassa natural reduzindo-se, assim, os custos de transporte.

Tudo isso nos leva à compreensão de que, além de vantajoso, é ambientalmente viável transportar a biomassa, conforme revela a observação da figura 4.1: dentre os três processos descritos, o transporte contribui pouco para emissão de Gases Efeito Estufa (GEE), cerca de 5%.

Na Avaliação do Ciclo de Vida da Biomassa torrefada foram analisadas 03 distâncias através do software *Gabi Education*: A distância inicial observada inicialmente foi de 100 km, em seguida, 300 km e finalmente 500 km. Observou-se, como esperado, que o aumento da

distância entre as emissões também sofreu elevação proporcionalmente, conforme descrito na tabela 4.4. Mas, vale considerar, o transporte não é a principal fonte de emissões de dióxido de carbono equivalente para a ACV da gaseificação da biomassa torrefada. Os valores percentuais foram menores que no primeiro cenário. Isso ocorreu devido à distância percorrida.

Tabela 4.4: Emissões do transporte conforme a distância percorrida

Distância Percorrida	Emissões do Transporte na ACV
100 km	5%
300 km	13,5 %
500 km	20,5%

A tabela 4.3 demonstra os principais gases emitidos no processo de pré-tratamento (torrefação) da biomassa. Os dados foram reunidos e convertidos no software *GaBi Education*, de acordo com os fatores de emissão do Potencial de Aquecimento Global de kg CO₂-Equivalente.

Tabela4.5: Conversões dos gases emitidos do processo de torrefação e gaseificação da biomassa para kg CO₂-Equiv.

Gases Emitidos	kg CO₂- Equiv.
Dióxido de Carbono	0,7225 kg
Óxido Nitroso	0,00129 kg
Metano	0,00097 kg

Como se demonstra na Figura 4.1 as emissões que mais contribuem para o índice do potencial de aquecimento global (PAG) no processo de gaseificação da biomassa, utilizando a torrefação como pré-tratamento, é o dióxido de carbono (CO₂) biótico, que provém da biomassa, e o dióxido de carbono originado do transporte de emissões orgânicas, especificamente o metano, com participação de 0,018%. Conclui-se, portanto, que as emissões do óxido nitroso são irrisórias. Para se determinar a probabilidade do efeito climático de cada gás de efeito estufa, utilizou-se o PAG. De acordo com o IPCC de 2001, o PAG pode ser determinado com variação na forçante radioativa, na atmosfera, em um

determinado período de tempo para cada gás em função do CO₂ (IPCC 2001; D'AMELIO, 2006).

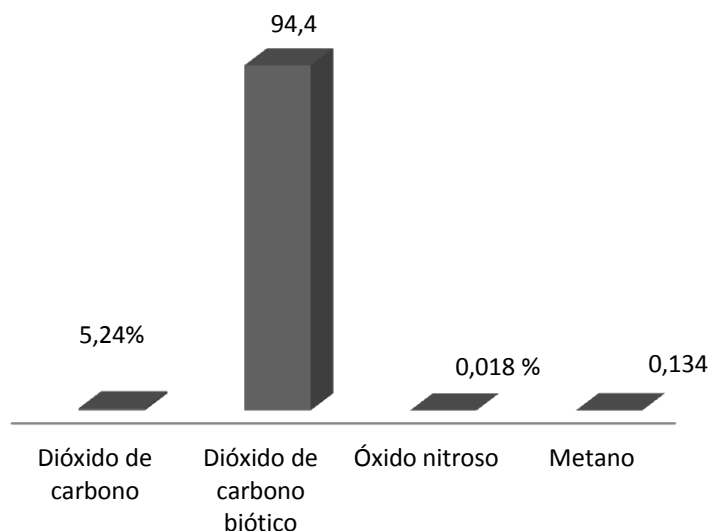


Figura 4.2: Emissões dos gases emitidos nos processos de Gaseificação da biomassa torrefada.

Como citado anteriormente, a avaliação do ciclo de vida da biomassa torrefeita e gaseificada é constituída pelos seguintes processos: fonte de biomassa, combustão, secagem, torrefação, gases combustíveis, transporte e a gaseificação. A planta adaptada de Uslu et al (2008) e Bergamn et al (2005) foi utilizada para realizar este estudo. O processo cita que os gases emitidos nos processos de torrefação e na combustão são utilizados no processo de secagem da biomassa.

Ou seja, os gases que são produzidos na combustão e na torrefação entram no processo e são utilizados para secagem do material e, segundo a literatura, uma etapa onde ocorre um grande gasto energético é a secagem do material (PRINS et al,2006). Foi considerado neste trabalho a quantidade de gases que provêm da combustão e da torrefação utilizada na secagem e, em seguida, saiu para a atmosfera, gerando um balanço neutro.

Para realizar o balanço de CO₂ equivalente foram consideradas as entradas e saídas de dióxido de carbono (CO₂) equivalente para a produção de 1 MJ, que foi transportado e, em

seguida, gaseificado. Este procedimento ocorreu nos dois cenários avaliados. A massa da biomassa foi dividida proporcionalmente, para se obter a massa necessária para produzir 1MJ.

Na planta de torrefação e gaseificação da biomassa utilizou-se 0,12767 kg de biomassa, sendo que, desse valor, foi retirado 0,0065747 Kg para o processo de combustão. Após a secagem obteve-se 0,071237 Kg de biomassa seca e, em seguida, foi torrefada, obtendo-se 0,047619 Kg de biomassa torrefada. Após, essa biomassa foi gaseificada, resultando em uma massa de 0,022 Kg de gases. Mas, excluindo-se a emissão de dióxido de carbono do processo de gaseificação da biomassa torrefada e considerando-se somente os gases combustíveis (H₂,CO e CH₄), a massa final para produzir 1MJ é de 0,018 Kg .

O resultado é muito interessante, pois as emissões que contribuem para o PAG provêm da gaseificação e do transporte, que contribuem, respectivamente, com 0,00437 kg CO₂-equivalente e 0,0023 kg CO₂-equivalente. A tabela seguinte sintetiza o balanço.

Tabela 4.6: Balanço de CO₂ Equivalente no processo de Gaseificação da Biomassa Torrefada retirado do ACV do GaBi Education para produção 1MJ.

Kg de Dióxido de Carbono Equivalente	
Entrada	4,637 x 10⁻⁹ Kg de CO₂ eq
Saída	4,6384 x 10 ⁻³ Kg de CO ₂ eq
Total	-4,64x 10 ⁻³ Kg de CO ₂ eq

Através dos dados compilados no *GaBi Education* acerca da avaliação do ciclo de vida da biomassa torrefada e gaseificada observou-se que as emissões de dióxido de carbono equivalente dos processos de combustão e torrefação retornam através da renovação na biomassa. A quantidade emitida é absorvida através do chamado ciclo do carbono pelo processo de fotossíntese, em que as plantas retiram o gás carbônico do ar e produzem oxigênio. A queima da matéria orgânica provocou a liberação de CO₂ na atmosfera. Porém, as plantas, através da fotossíntese, transformam o CO₂ e a água nos hidratos de carbono, que compõem sua massa .

O ciclo de carbono na produção da biomassa torrefada e gaseificada tem apresentado resultado positivo. O saldo de emissões de dióxido de carbono é baixo, como foi demonstrado na tabela 4.6. Além disso, para a produção de 1MJ o meio absorve 0,00437 Kg de CO₂ equivalente do processo de gaseificação. Nesse processos ocorre o balanceamento do dióxido de carbono, que retorna, pela absorção da planta na fotossíntese, para o ciclo de vida da biomassa torrefada. O retorno do dióxido de carbono equivalente vai para a composição celulósica dos resíduos vegetais e participa na fórmula molecular dos materiais consumidos.

Porém, 5% (0,00023 Kg de CO₂ equivalente) do valor total da emissão provém do transporte. Quando a biomassa é transportada por 100 Km, não volta para o ciclo, pois é originada do diesel, derivado do petróleo, que demora alguns milhões de anos para retornar ao ciclo. No entanto, a participação do transporte na Avaliação do Ciclo de Vida da Torrefação é pequena, considerada uma baixa emissão. O processo de torrefação e gaseificação da biomassa é sustentável, e pode-se afirmar que a utilização da biomassa torrefada evita o Potencial Aquecimento Global, ou seja, é um processo de pré-tratamento, benéfico para o meio ambiente.

4.2 O CENÁRIO DA GASEIFICAÇÃO DA BIOMASSA SEM TORREFAÇÃO.

Para comparar o efeito da torrefação antes da gaseificação da biomassa foi realizado um modelo utilizando a biomassa e, em seguida, essa biomassa seca foi transportada e, finalmente, gaseificada, conforme a figura 4.3.

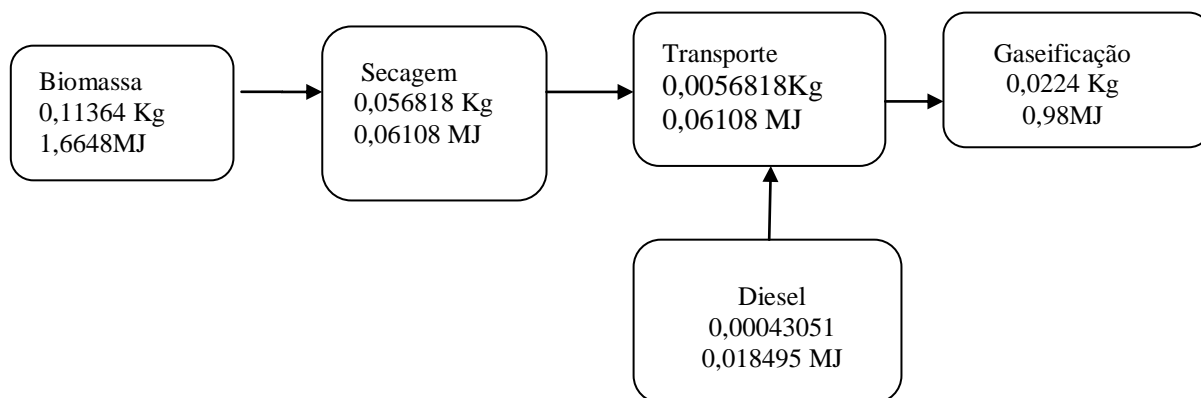


Figura4.3: Fluxograma da Biomassa Gaseificada para produzir 1MJ.

Na gaseificação da biomassa sem passar pelo processo de pré-tratamento, de acordo o programa *GaBi Education*, observou-se que o processo que mais contribuiu para a Avaliação do Ciclo de Vida foi a fonte de energia elétrica com participação de 71,9% das emissões de dióxido de carbono. Essa energia elétrica externa foi acrescentada ao processo e utilizada para secar a biomassa. O segundo processo que mais contribuiu para a ACV foi à gaseificação, que contribuiu com 26,2% da emissão de dióxido de carbono biótico, dióxido este que provém da biomassa e, em terceiro lugar, ficou o transporte, com 1,8% de dióxido de carbono.

As emissões que mais contribuíram para o índice do potencial de aquecimento global (PAG) no processo de gaseificação da biomassa utilizando o dióxido de carbono (CO_2) que provém da fonte de energia elétrica é o dióxido de carbono biótico originado da gaseificação da biomassa de emissões orgânicas, especificamente o metano, com participação de 0,5%. Conclui-se que as emissões do óxido nitroso são irrisórias.

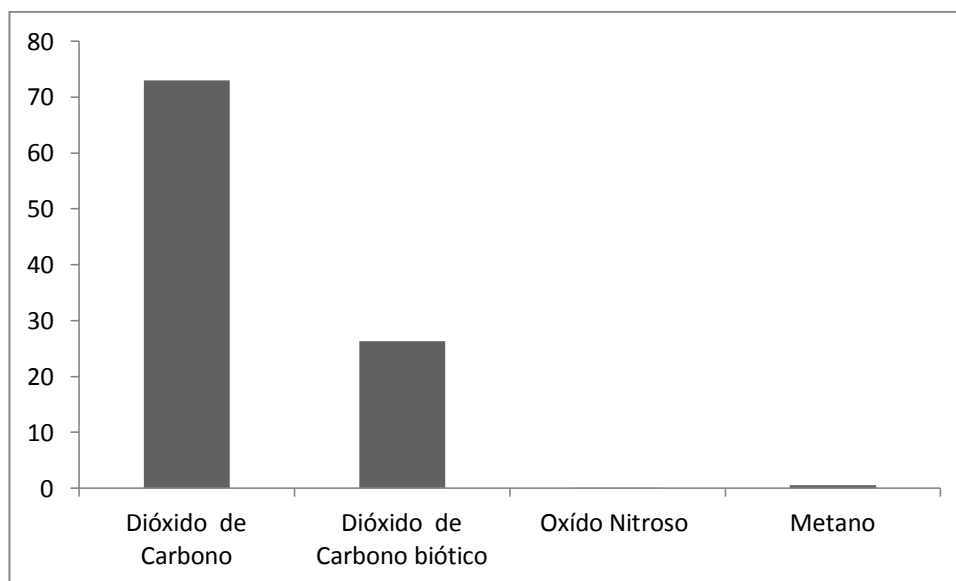


Figura 4.4: As emissões dos gases do processo de gaseificação sem pré-tratamento para 100 Km .

A planta de gaseificação da biomassa utilizou 0,11364 kg de biomassa e, em seguida, a biomassa passou pelo processo de secagem ocorrendo perda de massa e obtendo-se 0,056818 Kg para o processo de gaseificação. A massa final obtida após a gaseificação foi de 0,022 Kg, incluindo-se a massa de dióxido de carbono.

Os processos que liberam mais emissões de CO₂-equivalente, como já foi citado anteriormente para produzir 1MJ são: gaseificação da biomassa (0.00443 Kg de CO₂ eq), energia elétrica (0,012976 Kg de CO₂-eq) e o transporte (0,0003075 Kg de CO₂-eq). Neste caso, a maior emissão de dióxido de carbono decorreu da utilização da energia elétrica para secar a biomassa.

No balanço de CO₂ equivalente foram consideradas as entradas e saídas de dióxido de carbono (CO₂). O ciclo do carbono na produção da biomassa gaseificada consiste no retorno e absorção do dióxido de carbono (CO₂), pois no processo da gaseificação, o dióxido de carbono emitido é absorvido pela plantação através da fotossíntese. Esse mesmo dióxido retorna ao ciclo de vida como carbono equivalente à composição celulósica dos vegetais e à participação na fórmula molecular do material consumido. A seguir os dados obtidos depois de compilados no GaBi Education.

Tabela 4.7: Balanço de CO₂ Equivalente no processo de Gaseificação da Biomassa sem torrefação. .

Kg de CO₂ equivalente	
Entrada	7,85 x 10 ⁻⁴ de Kg de CO ₂ -eq
Saída	1,8 x 10 ⁻² Kg de CO ₂ -eq
Total	-1,69 x 10 ⁻² Kg de CO ₂ -eq

Na Avaliação do Ciclo de Vida da Biomassa Gaseificada, como já foi citado anteriormente, o processo que mais contribuiu com a emissão de dióxido de carbono equivalente foi a energia elétrica, com 71,9%(0,0012976 Kg de CO₂ equivalente) do valor total da emissão de CO₂ equiv. A energia elétrica considerada é originada por usina hidrelétrica. Apesar dessa fonte energética ser renovável ocorre emissão de dióxido de carbono (MTC, 2006). Portanto essa emissão demora alguns milhões de anos para voltar ao ciclo, acumulando-se na atmosfera .

A gaseificação contribuiu com 26,2% (0.00443 Kg de CO₂ equivalente), com um aumento de 2,27% de emissão de dióxido de carbono equivalente comparado com a biomassa torrefada e gaseificada. Esta emissão volta para o ciclo e é absorvida pela planta através da fotossíntese.

Recorde-se que o procedimento que mais contribuiu para esse aumento foi a energia elétrica utilizada para secar a biomassa, o que não ocorreu na biomassa torrefada, pois os gases de combustão e torrefação foram utilizados conforme a planta citada na literatura para secar a biomassa.

Analisando os dados compilados no *GaBi Education*, onde a distância foi modificada de 100 Km para 200km e para 500Km, para transportar um 1MJ de energia no processo de gaseificação da biomassa sem passar pela torrefação, como era de esperar a contribuição das emissões aumentaram gradativamente, devido o aumento do consumo do combustível, como está descrito na tabela a seguir.

Tabela 4.8: Emissões do transporte conforme a distância percorrida para Gaseificação da biomassa sem pré-tratamento

Distância Percorrida	Emissões do Transporte na ACV
100 km	1,8%
300 km	5,3 %
500 km	8,5%

Analisando-se os dois cenários e comparando-se a massa do combustível com as distâncias percorridas que já foram descritas anteriormente (de 100 km, 300 km e 500km), notou-se que, quando transportamos a biomassa torrefada antes da gaseificação tem-se um gasto menor em combustível, próximo de 15%, nos três espaços percorridos . A tabela abaixo expõe os valores analisados.

Tabela 4.9: Análise dos dois Cenários para gasto de combustível

Distância Percorrida	Sem torrefação Combustível Kg	Com torrefação Kg	%
100 km	0,000086	0,000073	15,1
300 km	0,0002583	0,00021978	14,94
500 km	0,0004301	0,00036631	14,88

Vários autores como Prins, Bergam e Zwart já relataram em seus artigos as vantagens da torrefação. Depois de analisar os resultados, observou-se que a opção de pré-tratamento é atrativa, pois a biomassa torrefada reduz os custos econômicos do transporte. O processo de torrefação produz uma biomassa com densidade energética maior que a biomassa natural e com baixa umidade, ou seja, ocorre um aumento na concentração do carbono na biomassa e

saída de água do material . Isso traz como consequência a possibilidade de se transportar mais biomassa torrefada, em comparação com a biomassa natural reduzindo-se, assim, os custos de transporte. Também é ambientalmente viável pois, consumindo-se menos combustível, reduz-se as emissões de gases do efeito-estufa.

Comparando-se os dois cenários referentes às emissões de dióxido de carbono equivalente, como era de se esperar por transportar mais biomassa com baixa densidade energética e gastar mais combustível, quem mais contribuiu para o Potencial Aquecimento Global foi o processo no qual a biomassa não passa pelo pré-tratamento (a torrefação) e analisando, conclui-se que esta diferença chega a ser de 98.2%.Na tabela abaixo temos as emissões de dióxido de carbono equivalente nos dois cenários.

Tabela 4.10:Emissões dos processos que contribuíram para avaliação do impacto ambiental.

Biomassa Torrefada e Gaseificada Kg CO ₂ equivalente		Biomassa Gaseificada Kg CO ₂ equivalente		
Transporte	Gaseificação	Transporte	Gaseificação	Energia Elétrica
0,00023	0,00437	0,0003075	0,00443	0,012976

Pode-se afirmar que a utilização do processo de torrefação como opção do pré-tratamento da biomassa antes da gaseificação é benéfico para o meio ambiente é evita o potencial aquecimento global.

4.3. BALANÇO ENERGÉTICO

No primeiro cenário a fonte de energia utilizada no processo de Gaseificação da biomassa torrefada provém da própria biomassa. Essa energia vem da combustão e da torrefação. Analisando-se a tabela abaixo observou-se que 51,9 % da energia utilizada é gasta no processo.

Tabela 4.11: Balanço energético da biomassa torrefada e gaseificada para produzir 1MJ.

Entrada	1,87 MJ
Saída	0,97MJ
Total	-0,90 MJ

O saldo energético é negativo, porém sabemos que a Tecnologia de Gaseificação está em constante crescimento, e a utilização do gás de síntese vem ganhando notoriedade. A partir desse gás é possível produzir uma vasta quantidade de compostos químicos, agregando-se, assim, valor econômico ao produto.

No segundo cenário a biomassa passou pelo processo de secagem e depois foi transportada e gaseificada. A energia utilizada para secar a biomassa provém da energia elétrica da base de dado do GaBi Education. Foi considerado 1MJ par secar um 1Kg de biomassa (Prins et al 2006). A tabela abaixo sintetiza o balanço energético.

Tabela 4.12: Balanço de energético da biomassa gaseificada para produzir 1MJ

Tabela Entrada	1,66 MJ
Saída	0,98MJ
Total	-0,68 MJ

Observou-se que o consumo de energia gasto no processo total é de 59%. Comparando-se os dois saldos energéticos dos dois cenários analisados pode-se concluir que ocorreu menor gasto energético no cenário da Gaseificação da biomassa torrefada. Conforme Uslu et al, (2008) a planta de torrefação estudada, os gases oriundos da combustão e da torrefação são esperados para cobrir a demanda de energia do secador de biomassa. Sendo assim, isso resulta em um processo mais sustentável.

4.4 – CONCLUSÃO

A torrefação é um pré-tratamento realizado na biomassa. Trata-se de um processo que pode ser utilizado antes da combustão direta, da pirólise e da gaseificação, e que tem um papel fundamental no tratamento da biomassa, apresentando muitas vantagens. Compreende-se que a densificação da biomassa por torrefação melhora a sua qualidade para o armazenamento, reduzindo os custos com o transporte. Porém, os impactos ambientais dessa tecnologia eram desconhecidos, o que nos causou interesse.

Portanto este trabalho buscou descobrir quais eram as emissões do processo de torrefação partindo do balanço de dióxido de carbono equivalente e empregando o balanço energético baseado na literatura pela avaliação do ciclo de vida da torrefação, produzido a partir de biomassa “Salgueiro”.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) foi a metodologia adotada no presente estudo e permitiu-nos definir a procedência, natureza dos materiais participantes do sistema de torrefação, possibilitando quantificar entradas e saídas de dióxido de carbono equivalentes em cada processo do seu ciclo. Para aplicação da ACV utilizou-se a ferramenta GaBi Education.

Analisando os dois cenários (Biomassa Torrefada Gaseificada e a Biomassa Gaseificada) observou-se que as principais emissões foram o dióxido de carbono, óxido nítrico e o metano. Os balanços das emissões de CO₂ equivalente e energético se mostraram favoráveis aos dois, respectivamente, para o ambiente, diante do retorno e absorção do dióxido de carbono (CO₂), pois o processo da gaseificação e o dióxido de carbono emitido é absorvido na plantação através da fotossíntese.

O cenário mais vantajoso ambientalmente e energeticamente é aquele em que a biomassa é torrefada e gasificada. Isso se deve ao fato de que os gases produzidos no processo de torrefação são reciclados, reaquecidos e utilizados para secar e torrefar a biomassa.

O processo de torrefação e gaseificação da biomassa tem um balanço favorável ao meio ambiente. Pode-se dizer que a utilização da biomassa torrefada evita o Potencial Aquecimento Global, ou seja, é um processo de pré-tratamento benéfico para o meio ambiente.

Prevê-se, assim, que a biomassa desempenhe um papel importante na redução das emissões de CO₂ e na introdução de fontes renováveis. Desse modo, o uso da torrefação como pré-tratamento é primordial para que esta tecnologia avance.

Já o segundo cenário, comparado com primeiro, apresentou um aumento de 98,2% das emissões de dióxido de carbono equivalente, devido à utilização da energia elétrica para secar a biomassa.

Pode-se dizer que a utilização da biomassa torrefada evita o Potencial Aquecimento Global, ou seja, é um processo de pré-tratamento benéfico para o meio ambiente. O processo no qual a biomassa é seca e gaseificada também é positivo.

Prevê-se que a biomassa desempenhe um papel importante na redução das emissões de CO₂ e na introdução de fontes renováveis. Desse modo, o uso da torrefação como pré-tratamento é primordial para que esta tecnologia avance.

RECOMENDAÇÃO

Diante do exposto, recomenda-se a realização de experimentos da torrefação da gaseificação com um cromatógrafo acoplado para quantificar os gases emitidos, de modo a se ofertar dados reais que permitam o aprofundamento das investigações.

|

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Y. V.; OLIVEIRA, M. A. G.; GUERRA, MALLET-GUY. S. (2010). **Energia, Economia, Rotas Tecnológicas. Palmas, Brasil. p. 295.**

ALMEIDA, M. B. B. (2008). **Bio-oil from sugar cane straw fast pyrolysis, thermal and catalytic, and its co-processing with gasoil in catalytic cracking.** Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. AMS – Associação Mineira de Silvicultura. **Origem natural do carvão vegetal consumido no Brasil.** Disponível em: <http://www.silviminas.com.br>. Acesso em: outubro de 2010.

ARIAS, B.; PEVIDA, C. ;FERMOSO, J. ; PLAZA, M.G. ; RUBIERA, F. AND PIS, J. (2008).**Influence of torrefaction on the grindability and reactivity of woody biomass.** *Fuel Process Technol* **89**:169–175.

AYLA USLU; FAAIJ ,ANDRE P.C.; BERGMAN, P.C.A. (2008). **Pre-Treatment technologies and their effects on the international bioenergy supplychain logistics - Techno-economic evaluation of torrefaction, fast pyrolysis and pelletisation.** *Energy.* Energy Research Centre of the Netherlands (ECN): Petten, The Netherlands

BENITES, V. M.; TEIXEIRA, W. G. T.; REZENDE, M. E. R.; PIMENTA, A. S. P. (2010).**Utilização de Carvão e Subprodutos da Carbonização Vegetal na Agricultura: Aprendendo com as Terras Pretas de Índio.** Acessado em: <http://www.biochar.org/joomla/images/stories/Cap_22_Vinicius.pdf>.Acesso em: novembro de 2010

BERGMAN, P. C. A.(2005). **Combined Torrefaction and Pelletisation: The TOP Process;** Report C--05-073; Energy Research Centre of The Netherlands (ECN): Petten, The Netherlands, p 29.

BERGMAN, P. C. A.(2005). Torrefaction for Biomass Co-Firing in Existing Coal-Fired Power Stations “BIOCOAL”; Report C--05-013; Energy Research Centre of The Netherlands (ECN): Petten, The Netherlands, July 2005; p 72.

BERGMAN, P. C. A.; BOERSMA, A. R.; KIEL, J. H. A.; PRINS, M. J.; PTASINSKI, K. J.; JANSSEN, F. J. J. G. (2005). **Torrefaction for Entrained Flow**

Gasification of Biomass; Report C--05-067; Energy Research Centre of The Netherlands (ECN): Petten, The Netherlands, p 51.

BRIDGWATER, A. V.(2003). **Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass**. *Chemical Engineering Journal*, v. 91, n. 2-3, p. 87-102.

BRIDGWATER, A.V.(2007). **Biomass Pyrolysis an overview prepared by Task 34. IEA Bioenergy Annual Report** .Disponível em: < www.ieabioenergy.com>.

CARAMEZ, M. (1999). “Produção de endoxilanas termooestáveis por *Termomyces lannuginosus* IOC-4145 em meio semi-sólido”. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos. Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

CARVALLHO, Walter *et al.* (2010). Sacarificação da Biomassa Lignocelulosica Através de Pré-hidrolise Ácida Seguida por Hidrolise Enzimática: Uma Estratégia de Desconstrução da Fibra Vegetal . *Revista Analytica*, Nº44.

CASTRO, A. J.A; CASSIANO, D. A. ;FERREIRA, N. L. (2009). Gaseificação do Bagaço de Cana-de-açúcar : Modelagem , Analise e Comparação com Sistema Real. *Exacto, São Paulo, v.7, n 1, p. 39-47*.

CIOLKOSZ,D.; WALLACE, R. (2011).**A review of torrefaction for bioenergy feedstock production** . *Biofuels, Bioprod* .Wiley Online Library .

DERMIBAS, A. (2007). The influence of temperature on the yields of compounds existing in bio-oils obtained from biomass samples via pyrolysis. *Fuel Processing Technology* .Turquia, p. 591–597.

EUROSTAT (2011). **Indicadores de transportes, ambiente e energia**; *Pocketbooks Eurostat*, ISSN-1725-4566.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations (2007). **Global Partnership Initiative for Plant Breeding Capacity Building. GIPB** Disponível em: <http://www.fao.org/gipb>. Acesso em: outubro de 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of The United Nations (2006) **Global forest resources assessment 2005**. Rome: FAO, 2006. 320p. Disponível em:< www.fao.org/forestry/fra2005>. Acesso em : outubro de 2010.

FARFAN, V. E. (2004). Biomassa: uma energia brasileira. Revista Eco 21. Rio de Janeiro, n. 93, 2004. Disponível em: <<http://www.eco21.com.br/textos/textos.asp?ID=843>>. Acesso em setembro de 2010.

FISHER, T. ; HAJALIGOL, M. ; WAYMACK, B. AND KELLOGG, D. (2002). **Pyrolysis behavior and kinetics of biomass derived materials.** *J Anal Appl Pyrol* .**62**:331–349 .

FREITAS, S. R.; LONGO, K. M.; DIAS, M. A. F. S. (2005). **Emissões de queimadas em ecossistemas da América do Sul** . vol.19 n.53 ,São Paulo .

FUKUSHIMA R. S.; HATFIELD. R.D. (2003). **Composição fenólica de ligninas dioxano determinadas pela reação oxidativa com o nitrobenzeno.** Pesquisa Brasileira., Brasília, v. 38, n. 3, p. 373-378.

GABI 4 (2003). **Software und Datenbank zur Ganzheitlichen Bilanzierung.** IKP, Universität Stuttgart und PE Europe GmbH, Leinfelden-Echterdingen.

GENOVESE, A. L.; MORALES, M. E. U. ; GALVAO, L. C. R. (2006) **Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo.** Enc. Energ. Meio Rural.

GOLDEMBERG, J. (2009). **Biomassa e energia.** *Química Nova*. Vol.32 n°. 3 ,São Paulo.

GOMES, IGOR ALBERTO SILVA (2011). **Desenvolvimento de um reator de carbonização pressurizada para resíduos agroindustriais.** Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, p. 27.

GÓMEZ, E. O. (2009). **Tecnologia de Pirólise no Contexto da Produção Moderna de Bicomcombustíveis: Uma Visão Perspectiva.** Classificados e Notícias - Biodiesel e Bicomcombustíveis.

HASSUANI, S. J. (2005). Resíduos agrícolas: palha. In: Curso Internacional **Energia na indústria de açúcar e álcool.** Piracicaba. São Paulo: CTC - Copersucar.

JIAN DENG, WANG. ; KUANG, G. ; ZHANG, J.U. AND LUO, Y . (2009). **Pre-treatment of agricultural residues for co-gasification via torrefaction.** *J Anal Appl Pyrol* **86**:331–337 .

KOLLMAN, F.; CÔTE, Jr., W. A. (1968) **Principles of wood science and technology. I– solid wood.** New York, N. Y. *Springer Verlag*. 592 p.

LEAL, M. R. (2005) .**O potencial de aproveitamento da energia da biomassa.** Inovação Uniemp vol.1 n°.3. Campinas.

LIPINSKY,R. S; ARCATE,J. R. ; REED,T. (2002) .**Enhanced wood fuels via torrefaction.** *American Chemical Society. Division of Fuel Chemistry* **47**:408–410

LOPES, R. P. SILVA, J. S.; MAGALHÃES, E. A.; SILVA, J. N. (2002). **Energia no Pré-processamento de Produtos Agrícolas.** Disponível em: <<http://www.poscolheita.com.br/poscolheita/Secagem/Energia%20no%20preprocessamento.pdf>> .Acessado em 7 de fevereiro de 2011.

LORA, ELECTO EDUARDO SILVA; VENTURINI, OSVALDO JOSÉ. (2012) **Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis .** Biocombustíveis - Vol. 2. Editora: Interciência, p.411 a 440.

LUENGO, C.A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. (2006) **Pirólise e Torrefação da biomassa.** In: *Biomassa para energia.* p 10.

M,PUIG-ARNAVAT; BRUNO ,J.C ; CORONAS, A. (2010).**Review and analysis of biomass gasification models.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* .University Virgili .Espanha.

MARCELO, C. R. (2007). **Determinação da Relação Siringila /Guaicila em Ligninas de *Eucalyptus* ssp. por Pirolise Associada a Cromatografia Gassosa e a espectrometria de Massa.** Dissertação (Magister Scientiae em Agroquímica Departamento de Agronomia) Universidade Federal de Viçosa.

MELO,F.A.O; SILVA J.N, ; SAMPAIO,C.P. ; SILVA,D.F.(2010).**Desenvolvimento e construção de fornalha para biomassa com sistema de aquecimento direto e indireto do ar .** *Technology.* Maringá, v. 32, n. 2, p. 129-136.

MENDONÇA, R.M. (2007). **Carbon Life Cycle Assessment on Soybean oil-based Biodiesel Utilization (InPortuguese).** Master Dissertation, Dept. of Mechanical Eng., University of Brasilia

NEVES, B. M. C. (2007).**Efeito de Queimadas em áreas de cerrado sensu stricto na Biomassa de raízes finas.** Tese de Doutorado. Universidade de Brasília.

NIMLOS, M.; BROOKING, E. ; LOOKER, M. ; EVANS, R. (2003).**Biomass torrefaction studies with a molecular beam mass spectrometer.** *American Chemical Society. Division of Fuel Chemistry* **48**:590–591 .

NOGUEIRA, L. A. H, LORA E. E. S. (2003). “**Dendroenergia: Fundamentos e aplicações**”. 2 ed. PortoAlegre: Interciência, p.199.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta.(2003). **Dentroenergia** .Editora: Interciência . Rio de Janeiro.

PELIZER, L. H.; PONTIERI, M. H.; MORAES, I. O. (2007). **Utilização de resíduos agro-industriais em processos biotecnológicos como perspectiva de redução do impacto ambiental**. *J. Technol. Manag. Innov.* Volume 2.

PEREIRA Jr., N.; SCHLITTLER, L.A.F.S.; COUTO, M.A.P.G.; MELO, W.C. (2010).**Biomass of lignocellulosic compostion for fuel ethanol production and the context of biorefinery**. In: Brazilian Network on Green Chemistry Awareness, Responsibility and Action.UFC Fortaleza-CE, p. 591-627,2010.

PIMCHUAI , A. ; DUTTA ,A. and BASU, P. (2010).**Torrefaction of Agriculture Residue To Enhance Combustible Properties**. *Energy Fuels*, p. 4638–4645.

PRINS M . J. ; PTASINSKI K .J ; JANSSEN, F . (2006).**Torrefaction of wood part 1: weight loss kinetics**. *J Anal Appl Pyrol* **77**:28–34 .

PRINS M .J, ASINSKI KJ, P.T. AND JANSSEN, F. (2006). **More efficient gasification via torrefaction**. *Energy* **31**:3458–3470.

PRINS, M. J. (2005).**Thermodynamic analysis of biomass gasification and torrefaction**. Tese de Doutorado, Department of Chemical Engineering, Technische Universiteit Eindhoven. p 164.

QUÍMICA VERDE NO BRASIL 2010-2030. (2010). Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, DF.

RENDEIRO, Gonçalo. et.al., (2008).**Combustão e gasificação de biomassa sólida**. Brasília . Ministério de Minas e Energia, p. 53.

REPELLIN, V. ; GOVIN, A. ; ROLLAND, M. AND GUYONNET, R. (2010). **Modelling anhydrous weight loss of wood chips during torrefaction in a pilot kiln**.*Biomass Bioenerg* **34**:602–609.

REZAIYAN , J. ; CHEREMISINOFF,N.P .; (2005).Gasification Techonlogy :Aprimer for Engineers and Scientists .CRC Press.

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

ROUSSET, P. (2005). Apresentação Eletrônica – **A Carbonização da Madeira**. Sand Meyer Steel (s.d). Brasília;UNB Acesso em 2010. Disponível em: www.sandmeyersteel.com/304L.htm#5.

ROUSSET, P. (2008). **Condicionamento da Biomassa através do processo de Torrefação para injeção na Gaseificação: aspectos fundamentais**. Terceiro Congresso Internacional de Bioenergia. Curitiba, Paraná, Brasil.

SADAKA, S. (2012) **Gasification Producer Gas and Syngas**. Agriculture and Natural Resources. University Arkansas, United States Department of Agriculture, and County Governments Cooperating.

SALMAN, Z. (2009). **Biomass Pyrolysis by Eearth Conscious Magazine**. Disponível em: < <http://www.earthconsciousmag.com/biomass-pyrolysis-by-salman-zafar/>>. Acessado em 03 de março de 2011.

SCHLITTLER, L. A. E. S.; GOMES, E. B. et al. (2009). Gaseificação da Biomassa. *Diálogos & Ciência*, p.114.

STELT VAN DER, M.J.C. ; GERHAUSER, H.; KIEL, J.A.I. e PTASINSKI K.J. (2011). **Biomass upgrading by torrefaction for the production of biofuels: A review**. Eindhoven University of Technology, Department of Chemical Engineering and Chemistry, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands.

SYRED, C.; GRIFFITHS, A. J.; SYRED, N.; BEEDIE, D.; JAMES, D. **A Clean, Efficient System for Producing Charcoal, Heat and Power (CHaP)**. *Fuel*, v. 85, p.1566-1578, 2006.

ZWART, R.; WILEN, C.; PUCKER, J.; PECK, A. P.; T. MÄKINEN et al. (2009). **As perspectivas para a produção e utilização de gás substituto natural renovável de biomassa**. *Bioenergy*, p. 64.

ZWART, ROBIN W. R.; BOERRIGTER, H. ; DRIFT, A.(2006). **Pretreatment on the Feasibility of Biomass Conversion to Fischer-Tropsch Products** .*Energy & Fuels*, p. 2192-2197. Energy Research Centre of The Netherlands (ECN), Unit Biomass, Coal, and Environmental Research(BKM), P. O. Box 1, 1755 ZG Petten, The **Netherlands**