



DENDROENERGIA E TERMOTECNOLOGIAS

Marina Moura Morales¹ & José Claudio Moura²

RESUMO: A dendroenergia tem sido fundamental para o desenvolvimento da civilização, passando por um período de menor importância, com a descoberta do petróleo. Atualmente, com a crise energética e as mudanças do clima, em consequência do aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera reacendeu o uso da dendroenergia como fonte renovável e limpa, utilizando diferentes termotecnologias para a conversão da madeira em energia, de forma direta ou indireta (combustíveis sólidos, líquidos e gasosos), assim como na obtenção de produtos químicos. Acreditando na importância do tema, reunimos informações sobre o potencial da dendroenergia, assim como as características específicas de termotecnologias disponíveis, hoje, no mercado.

PALAVRA CHAVE: Biomassa, Energia, Floresta.

DENDRO ENERGY AND THERMOTECNOLOGY

ABSTRACT: The dendroenergy has been an instrument in the civilization development for a long time, passing through a period of less importance with the discovery of oil. Currently, with the energy crisis and climate change, caused by rising concentrations of greenhouse gases in atmosphere, the dendroenergy use revived as a renewable and clean source, using different thermal technologies for wood conversion into energy, by directly burning or using byproducts (combustible solids, liquids, and gases) as well as extract chemicals. This review concentrates on the potential of dendroenergy, as well as the specific features of thermal technologies available.

KEYWORDS: Biomass, Energy, Forest.

1 INTRODUÇÃO

O novo milênio tem como um de seus maiores desafios produzir energia sustentável, a tarefa começa por avanços de tecnologias que otimizam o uso do sol, a fonte primária de energia que rege a Terra. O sol opera como usina transformadora de matéria em energia e de toda energia enviada pelo sol à superfície da terra, em torno de 70%, é absorvida e o restante é refletida pela atmosfera em processos de regulação termodinâmicos que permitem a manutenção de vida no planeta.

A energia absorvida têm funções definidas, sendo que, aproximadamente, 46% é absorvida pela atmosfera e transformada em calor, pela superfície da Terra e pelos oceanos, 23% é utilizada na evaporação, circulação superficial da água, convecção, precipitação, 0,2% provoca a circulação do ar atmosférico e 0,02% é utilizada como base energética do planeta, via reação da fotossíntese (CARVALHO, 2004).

Apesar da maior parte da energia absorvida pela Terra influenciar nas condições de vida no planeta, como o ciclo de água e temperatura ambiente, é a sua menor fração que possui a função vital de produzir compostos orgânicos. Isso significa dizer, produzir a partir da energia solar, alimentos, fibras e energia sustentável para atender as necessidades de uma população crescente.

Energia sustentável está intimamente ligada a dendroenergia, termo criado há alguns anos com intuito de renovar o conceito de “energia proveniente das árvores” (NOGUEIRA, LORA, 2003). Este conceito contabiliza as árvores de plantios florestais, conhecidas também como florestas energéticas, assim como, as árvores de florestas nativas manejadas, ou seja, árvores que são extraídas respeitando a capacidade de reposição natural da floresta (BRASIL, 2007), trazendo maior visibilidade e aceitação aos sistemas energéticos criados a partir de biomassas.

No Brasil e no mundo, as florestas energéticas possuem grande potencial de crescimento, com alta produtividade sob manejo sustentável, tornando essa fonte de biomassa cada vez mais atrativa na matriz energética pela conversão direta da madeira na forma de lenha em energia, assim como convertidas através de termotecnologias via oxidação parcial em carvão vegetal, bio-óleo e gás combustível (singás).

As termotecnologias, capazes de converter a energia contida na madeira, são conceituadas pela aliança entre o conhecimento técnico e o científico dos processos de queima e transformação controlados. Esses processos são variados e adaptam-se a diferentes necessidades de geração de energia, nas formas de eletricidade e calor.

Visto a importância do tema, temos como meta apresentar a dendroenergia, focada nas florestas plantadas e elucidar as aplicações de diferentes

¹ Embrapa Florestas. E-mail: marina.morales@embrapa.br

² Unicamp/Termoquip. E-mail: matielomoura@yahoo.com.br. Engenheiro químico, pesquisador da Termoquip Energia Alternativa LTDA e professor aposentado da da Unicamp.

termotecnologias como: torrefação, pirólise, liquefação gaseificação e combustão.

2. IMPORTÂNCIA DAS FLORESTAS PLANTADAS

O forte crescimento de florestas plantadas, esperado para as próximas décadas, as tornará o principal segmento no desenvolvimento do setor florestal. Nos anos de 2005 a 2010 a área de floresta plantada no mundo expandiu em média 4,3 milhões de hectares por ano, com tendências de crescimento maiores que poderão conduzir a uma área plantada superior a 300 milhões de hectares até 2020 (FAO, 2010). Lembrando que florestas plantadas são de usos múltiplos e contabilizam madeira para papel, celulose, serraria e energia, este último uso dá a floresta o nome de florestas energéticas.

As tendências de crescimento das áreas de florestas plantadas refletem o aumento da demanda por madeira em tora, fibras, lenha, entre outros produtos madeireiros aliados ao comportamento ativo dos consumidores desses produtos no cenário ambiental, pela importância dada às florestas plantadas nas mitigações das mudanças do clima.

A área de florestas plantadas no mundo chega a 264 milhões de hectares (FAO, 2010). Os países com maior destaque no setor (China, EUA, Rússia, Índia, Japão, Canadá, Polônia e Brasil) tem áreas estáveis ou crescentes de cobertura florestal.

No passado, o desflorestamento esteve frequentemente ligado ao desenvolvimento de um país, hoje essa realidade é associada ao subdesenvolvimento, sendo a regeneração de florestas foco ao desenvolvimento.

O processo de alteração na cobertura florestal apresenta mudanças na importância das florestas de acordo como estágio de desenvolvimento do País, Figura 1.

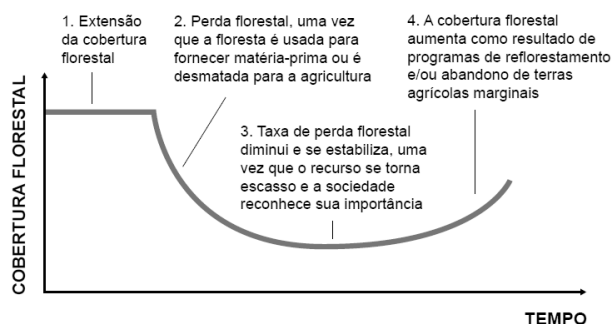


Figura 1 – Transição da cobertura florestal ao longo do tempo na maioria dos países.

Fonte: Verissimo, Nussbaum, 2011.

A maioria dos países no início de seu desenvolvimento usam a floresta primária como fonte de matéria prima e para abertura de áreas agricultáveis. Entretanto, esse comportamento tende a diminuir com o passar do tempo

e se estabilizar tanto com a escassez do recurso quanto com a conscientização da importância da cobertura florestal pela sociedade e pelos governos. Assim, ela volta a crescer através de ações organizadas com programas de estímulo ao reflorestamento e leis rigorosas para proteção ambiental.

A China no início do século XX teve perdas elevadas em suas florestas e hoje pratica um amplo programa de reflorestamento (VERISSIMO, NUSSBAUM, 2011) com aumentos consideráveis em florestas plantadas, naturalmente regeneradas e estabilização das florestas primárias. Países como Rússia, Índia, EUA, Canadá, Japão e Polônia também podem ser tomados como exemplo da transição florestal, com representação atual do 4º estágio.

O Brasil ainda passa pelo terceiro estágio da transição florestal, com diminuição das taxas de desmatamento e aumento de florestas plantadas e naturalmente regeneradas. A substituição dos produtos originados da extração vegetal pelos da silvicultura no país teve início em 2003 e continua em ascensão, com crescimento de florestas plantadas de aproximadamente 1.440.000 ha em dois anos (BRASIL, 2009), sendo Pinus e Eucaliptos as principais espécies plantadas (ABRAF, 2012).

O Brasil possui clima apropriado para cultivo florestal, ciência e tecnologia que garantem o desenvolvimento silvicultural com ótimas taxas de crescimento, dando ao setor ferramentas competitivas para as florestas plantadas.

Além disso, o Brasil segue a tendência mundial com pesquisa e desenvolvimento para o setor florestal voltados, principalmente, ao manejo e melhoramento genético de espécies florestais, com o objetivo de atingir metas ainda mais ambiciosas de produtividade das florestas plantadas e, assim, otimizar o uso das áreas de plantio.

2.1. DENDROENERGIA

A segurança energética mundial vem crescendo em importância nas agendas políticas dos países no mundo todo, visto os riscos que o setor energético convive pela pressão na produção de petróleo, gerando especulação de preços no mercado internacional e, conseqüentemente, causando crises energéticas e instabilidade em assegurar energia a todos. Além disso, a crescente preocupação com as mudanças climáticas vêm atraindo o interesse cada vez maior pelas fontes renováveis de energia.

A dendroenergia reflete essa realidade, visto a versatilidade na geração de energia, pela conversão da madeira: via queima direta em forma de lenha, carvão vegetal, bio-óleo, pellets, briquetes e gás combustível (singás).

Neste contexto, as florestas energéticas, possuem lugar de destaque pela alta tecnologia empregada no manejo, colheita florestal e o estudo de novos materiais

genéticos, desenvolvida e constantemente aprimorada. Isso permite a produção de madeira com menor custo e maior qualidade, uma vez que a implantação e desenvolvimento da floresta são otimizados para aprimorar sua conversão em energia. Para tal, as florestas contam com diferentes áreas de apoio.

As áreas de apoio mais importantes são, o melhoramento genético e o manejo florestal, que juntas promovem maior produtividade e manutenção da fitossanidade da floresta, otimizam a conversão da biomassa florestal em energia atuando nas propriedades da madeira como: umidade, densidade, homogeneidade, teor de lignina e extrativos (AGENDA 2020 TECHNOLOGY ALLIANCE, 2006).

A área de serviços ambientais participa nas ações de manutenção do ecossistema, incluindo a gestão de bacias hidrográficas, sequestro de carbono, habitat de vida selvagem, e da oferta de matéria-prima renovável para bioenergia, bioprodutos e produtos químicos (AGENDA 2020 TECHNOLOGY ALLIANCE, 2006).

Os resultados obtidos, da sinergia entre as áreas de apoio ao longo dos anos são visíveis, pela evolução significativa na capacidade de suprimento de energia. Tomamos como exemplo o Brasil que nos últimos 22 anos aumentou o incremento médio anual de folhosas e coníferas de 26 para 40,1 e 35 para 36,9 m³ ha⁻¹ano⁻¹, respectivamente (ABRAF, 2006; ABRAF, 2012).

As florestas nativas manejadas tem sua reconhecida importância para geração de energia, entretanto esta técnica, bastante utilizada em países desenvolvidos, ainda é incipiente no Brasil. As florestas manejadas brasileiras são guiadas pela legislação florestal vigente no país, como base de sua produção em constante processo de adequação às demandas do mercado, aliando assim eficiência produtiva, inovações tecnológicas e práticas sustentáveis. A prática mais difundida, atualmente, é a da conversão dos resíduos da serraria em briquetes e pellets (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2012).

Aliada às ações empregadas no cultivo de florestas energéticas e manejo sustentável de florestas nativas têm-se as ações de desenvolvimento de termotecnologias de conversão de biomassa, para incrementar o potencial energético das florestas, resultando em ganhos ainda mais expressivos na produção de energia.

As termotecnologias mais utilizadas na conversão da madeira em energia são: Torrefação, pirólise, liquefação, gaseificação e combustão. Muito embora tenhamos bons resultados na conversão de biomassa em energia, a pesquisa, desenvolvimento e inovação podem potencializar ainda mais esses resultados, investindo no material dendroenergético como: novos materiais genéticos, secagem, densificação, entre outros.

3. TERMOTECNOLOGIAS

3.1. HISTÓRICO

O domínio do fogo, pela combustão direta da madeira, deu ao homem os primeiros passos para o seu desenvolvimento, proporcionou melhor qualidade de vida com a confecção de utensílios e ferramentas, aumentou o leque de opções dos alimentos, além de preservá-los por mais tempo via cocção, deu conforto térmico nos dias de frio e segurança nas noites escuras, conferindo a lenha como combustível mais antigo da humanidade.

Entre os processos de conversão da madeira em energia, o mais clássico é a carbonização. Nos primórdios a madeira era queimada em ambientes fechados, se tornava preta e friável produzindo um combustível com menos fumaça, sem chama e calor mais intenso que a própria madeira. Começou-se assim, a produção de carvão vegetal para utilização como fonte de energia nas habitações (JUVILLAR, 1980).

O domínio efetivo do fogo iniciou-se a partir do conhecimento dos princípios básicos da gaseificação no final do século XVIII e foi sendo aprimorada, até que em 1830 foram registradas as primeiras aplicações comerciais. Em 1850, grande parte da cidade de Londres contava com iluminação e aquecimento com gás; a partir de 1860 a indústria então estabelecida cresceu usando gaseificadores para produzir gás, principalmente de carvão mineral e madeira (STASSEN, 1995; BASU, 2010).

Com o passar do tempo, a incorporação de novas fontes de energia pelo homem, principalmente o petróleo, fez com que o uso da lenha fosse considerado um indício de atraso tecnológico e econômico, fazendo com que as termotecnologias para madeira caíssem em desuso, reavivando sua utilização, somente, em tempos de crise do petróleo, (HAMILTON, 2011; BASU, 2010).

A exemplo disso, na Segunda Guerra Mundial, com o aumento do preço do petróleo, o interesse pelas termotecnologias foram reacesas, sobretudo, para uso no transporte (HAMILTON, 2011; BASU, 2010). Nos anos setenta, novamente pela elevação do preço do petróleo, a dendroenergia volta a se destacar economicamente, satisfazendo as demandas de energia térmica nas indústrias e centrais elétricas de pequena e média capacidade. Contudo, voltando a perder espaço para o petróleo na década de oitenta, ressurgindo nos anos noventa com desenvolvimento de tecnologias avançadas e com a inserção definitiva do contexto ambiental (NOGUEIRA e LORA, 2003), em que dispor de energia limpa é estratégico à composição da matriz energética mundial.

É fato que potencializar o desenvolvimento tecnológico e a inovação em termotecnologias, aliada a viabilidade econômica, social e ambiental, é uma tendência cada vez mais forte no nível nacional e internacional.

Entender o funcionamento das tecnologias de conversão da madeira é indispensável, lembrando que a termotecnologia conta, quase sempre, com o processo de queima pelo menos parcial da biomassa, passando pelo processo de pirólise, ou seja, a quebra das ligações químicas dos compostos orgânicos de grandes cadeias, pelo calor, em cadeias menores.

As termotecnologias utilizadas na geração de energia pela conversão da madeira são: (I) Torrefação (II) pirólise (III) liquefação, (IV) Gaseificação, (V) Combustão, Figura 2. A densificação, apesar de não ser definida como termotecnologia também será abordada, tanto pela sua importância para o uso da dendroenergia, como para melhor preparação dos materiais provenientes do processo de torrefação.

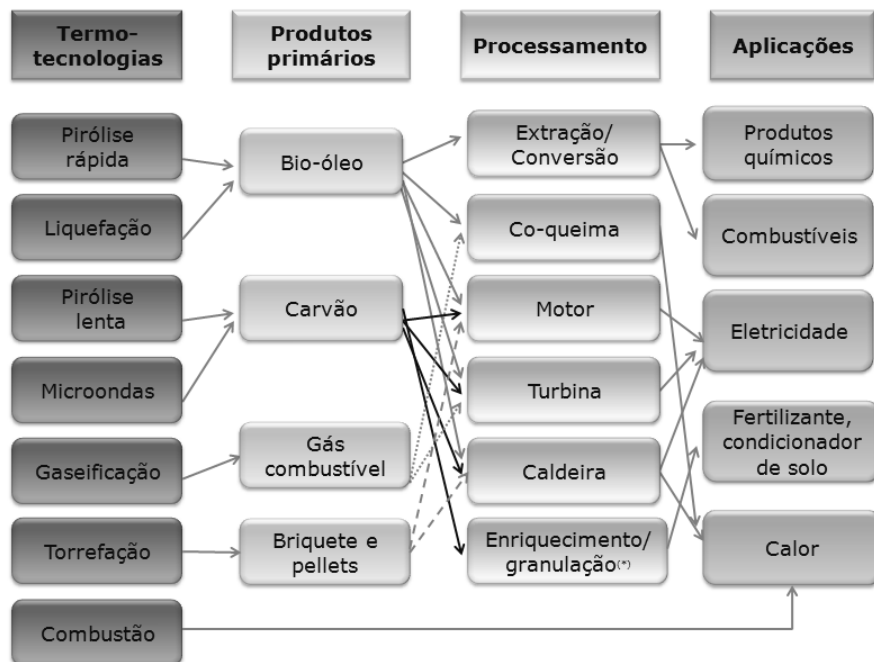


Figura 2 - Termotecnologias seus produtos primários, principais processos e aplicações.

(*) O Carvão, não precisa passar pelo processo de enriquecimento com nutrientes e granulação para ser considerado fertilizante e condicionador do solo, entretanto, essa etapa otimiza sua aplicação.

As termotecnologias mencionadas têm aplicações particulares, com geração de sólidos, líquidos e gases, sendo cada um desses produtos gerados em escala de prioridade, Tabela 1. Nos processos termotecnológicos mencionados, a qualidade dos produtos e eficiência energética dos reatores, indiferente da tecnologia utilizada, são influenciados pelo: material usado, pré-

tratamento do material usado (umidade e granulometria), tempo de residência, taxa de aquecimento, temperatura, pressão e reagentes adicionados (BRIDGWATER, 1994). Ressaltando que investir na otimização dessas tecnologias, significa investir também em sistemas de secagem, picadores, densificadores e reatores com recuperação de gases.

Tabela 1 – Principais características e rendimento dos produtos das termotecnologias de torrefação, pirólise, liquefação, gaseificação e combustão.

Termotecnologias	Características principais		Rendimento dos produtos (% p/p)			
	Temperatura (°C)	Tempo de residência ⁴	Líquido	Sólido	Gás	Produtos e coprodutos
Torrefação	220 - 300	Curto	-	75	25	Combustível sólido (pellets e briquetes)
Micro-ondas	200 - 300	Curto	22	58	20	Carvão, gás, bio-óleo e extrato ácido
Pirólise	Lenta	Muito Longo	30	35	35	Carvão, gás, alcatrão ¹ e extrato ácido
	Rápida	Curto	75	12	13	Bio-óleo ² , gás, carvão e extrato ácido
Liquefação	250 - 450	Curto	57	8	35	Bio-óleo e gás
Gaseificação	700 - 1000	Longo	05	10	85	Gás combustível ³
Combustão	>1000	Curto	-	-	-	Calor

¹ A pirólise lenta produz primordialmente alcatrão ou óleo secundário, ² A pirólise rápida produz primordialmente Bio-óleo ou óleo primário, ³ Gás de síntese ou Gasogênio ou Singás; ⁴ Curto=segundos, Longo=horas, Muito Longo=dias.

Fonte: Bridgwater, 1994; Bridgwater, 2003; Cortez, et al., 2008; Peacocke, Joseph, [200-?]; Zhang, 2010; Vardon, 2012; Miura et al., 2004, Masek et al., 2013; Wild, Reith, Heeres, 2011; Mckendry, 2002; Garcia-Perez, et al. 2009.

3.2 APLICAÇÕES

Os processos termoquímicos são responsáveis pela produção da maior parte da energia do mundo, aplicadas no transporte (carros, aviões, trens, navios, etc), usinas termelétricas, processos industriais, aquecimento doméstico, cozimento de alimentos e outros.

O desafio é a utilização desses processos na geração de energia renovável, pois representam um importante vetor de desenvolvimento social e econômico. As termotecnologias são estratégicas para o desenvolvimento sustentável e democratização do acesso à energia, pois podem atender comunidades isoladas, gerando empregos, melhoria da qualidade de vida, além de dinamizar as atividades econômicas e reduzir os custos relativos à distribuição e transmissão da energia gerada (COELHO, et. al. 2004).

Apesar da aplicabilidade para estes fins serem interessantes, o que ainda limita a aderência das termotecnologias no Brasil é o restrito número de pessoas envolvidas no tema e, conseqüentemente, empresas que trabalham com a fabricação deste tipo de tecnologia, muitas vezes necessitando de importação do equipamento e expertise, o que aumenta consideravelmente o custo de aquisição.

3.2.1. Densificação (briquetagem e pelletização) e torrefação

Densificação de biomassa é um processo mecânico que concentra a energia da biomassa, ou seja, há maior geração de energia por unidade de volume. No processo, ocorre a aglomeração de pequenas partículas através do calor, gerado no próprio equipamento (100 a 200°C) e pressão (≥ 200 MPa) (TUMULURU, et al., 2010). A esta temperatura ocorre a plastificação da lignina, que atua como elemento aglomerante das partículas.

No processo de densificação, qualquer tipo de biomassa pode ser compactado pela briquetagem ou pelletização, bastando atender às necessidades granulométricas (0,5 a 1 cm) e umidade (5% e 10%) exigidas pelo processo. Quanto ao teor de lignina, este pode ser resolvido com adição de aglutinantes como resinas e ceras (DIAS, et al., 2012).

O briquete possui diâmetro a partir de 50 mm e forma uniforme, o mesmo volume de briquete pode gerar até cinco vezes mais energia do que a lenha (QUIRINO, 1991).

O pellet tem dimensão variando entre 6 a 16 mm. Além disso, suas dimensões reduzidas os tornam mais atrativos

por poderem ser operados em sistemas automatizados (VIDAL e HORA, 2011) e queimarem mais facilmente, visto a maior área de contato com o ar. O processo de pelletização é mais exigente e restrito a matérias primas que a briquetagem. Entretanto, ambos otimizam a logística de transporte e armazenamento. Uma opção para aumentar ainda mais a eficiência energética do briquete é a densificação do material orgânico previamente carbonizado.

Outro processo que permite aumentar a eficiência da densificação, é a torrefação, este se desenvolve antes da densificação da biomassa, em temperatura entre 220 e 300°C e baixa taxa de aquecimento (ANTAL JUNIOR et al., 1990). Nestas condições a umidade que resta na biomassa é removida e a hemicelulose parcialmente degradada, aumentando a densidade energética do material. O material resultante é mais facilmente moído e densificado sem aglomerante, formando pellets ou briquetes hidrofóbicos.

3.2.2 Pirólise

O conceito básico da pirólise é a degradação térmica da biomassa em ausência total ou quase total (relação $\lambda = \text{ar utilizado/ar para queima estequiométrica} < 0,2$) de agente oxidante (PEACOCKE, JOSEPH, 200-?), havendo transformação em frações de combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Esta termotecnologia é desdobrada em três:

a) Pirólise lenta ou carbonização

Pirólise lenta consiste na decomposição térmica da biomassa sob ação do calor, na presença de quantidades controladas de ar, gerando carvão vegetal, diferentes produtos químicos e combustíveis líquidos e gasosos. Esse processo é realizado a baixas taxas de aquecimento (1°C s^{-1}) e elevados tempos de residência, horas ou dias (HAYASHI, MIURA, 2004).

Basicamente, a pirólise lenta concentra o carbono e elimina o oxigênio (via eliminação de material volátil), com conseqüente aumento do conteúdo energético do produto principal, o carvão vegetal.

Como já foi dito, o produto principal da pirólise lenta é o carvão vegetal, largamente usado para produção de energia e nas siderurgias, para redução do minério de ferro (NOGUEIRA, LORA, 2003). Entretanto, o produto também pode ser usado como fertilizante e condicionador do solo, sendo então conhecido como biocarvão (STEINER et al., 2007).

Já a fração líquida é dividida em duas fases; uma aquosa, que poder ser usada como pesticida, fertilizante e outra composta de óleo secundário, que pode ser usado como combustível, entretanto, seu uso ainda é restrito para queima em turbinas e caldeiras modificadas para este fim, devido à alta corrosividade e viscosidade (BRIENS et al., 2008).

b) Pirólise assistida por micro-ondas

A pirólise assistida por micro-ondas, ao contrário das demais tecnologias abordadas, é desenvolvida a partir do centro para a camada superficial da madeira, de modo que os voláteis da madeira passem pela zona de baixa temperatura, o que permite reduzir as reações indesejáveis dos produtos voláteis, uma vez que os voláteis produzidos no núcleo da madeira irão difundir em direção à região de menor temperatura.

A pirólise assistida por micro-ondas em temperatura moderada (<400°C) produz, com bom rendimento, bio-óleo de poder calorífico comparável a outros óleos pirolíticos, além de apresentar potencial para uso como combustível e refino para fabricação de produtos químicos (AZIZ et al., 2013).

3.2.3 Liquefação

A produção de líquidos a partir da biomassa ocorre de maneira indireta, através da transformação catalítica do gás de síntese, ou direta, através pirólise rápida e hidrotérmica.

a) Liquefação Indireta com Processo de Fischer-Tropsch

Este processo consiste na polimerização do gás (CO+H₂), via processo de gaseificação (item 3.2.4), à hidrocarbonetos líquidos (C₅ – C₂₅), mantido a temperaturas moderadas entre 200 a 350°C, juntamente com catalisadores como, cobalto, ferro, níquel e rutênio (SCHULZ, 1999; DRY, 2002).

b) Liquefação direta: Pirólise rápida e liquefação hidrotérmica (LHT)

A pirólise rápida utiliza dispositivos que permitem a decomposição de partículas de material orgânico com altas taxas de aquecimento e curtos tempos de residência, com ausência total ou parcial de oxigênio visando incrementar a quebra das macromoléculas e assim, maximizar a produção de bio-óleo.

O bio-óleo produzido possui alto teor de oxigênio e de água, alta densidade, e seu poder calorífico superior,

representa cerca de 50% do poder calorífico do Petróleo (MULLEN, BOATENG, 2008). Esse óleo é solúvel em solventes polares, mas imiscível em hidrocarbonetos; é instável, podendo sofrer polimerização e condensação ao longo do tempo (BRIDGWATER, 2003).

As principais desvantagens do uso de bio-óleo como combustível são a baixa volatilidade, a alta viscosidade, formação de coque e corrosividade, o que limita o uso para queima em motores a diesel. Entretanto, o bio-óleo tem sido usado com sucesso em caldeiras e tem mostrado potencial para uso em motores a diesel e turbinas modificadas (CZERNIK e BRIDGWATER, 2004).

A liquefação hidrotérmica (LHT) é o processo que mais se assemelha aos processos geológicos de produção de combustíveis fósseis, transforma o material orgânico em produtos líquidos (óleos primários e químicos) através do processo a altas pressões (50 - 200 atm) e temperaturas moderadas (250 - 450 °C) em presença de água (>50% de umidade) (ZHANG, 2010; PEACOCKE, JOSEPH, 200-?), ou solventes orgânicos com ou sem utilização de catalisadores, conforme as necessidades do processo (HUBER, IBORRA, CORMA, 2006). Esse processo, apesar de seguir a mesma premissa da pirólise rápida apresenta maior grau de controle nos mecanismos de reação usando pressão, permitindo a produção de óleo de melhor qualidade quando comparado ao da pirólise rápida, Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades do bio-óleo da pirólise rápida e liquefação, ambos a partir de madeira, e petróleo.

Propriedades	Bio-óleo (Pirólise rápida)	Bio-óleo (Liquefação)	Petróleo
<i>Composição elementar (% p/p)</i>			
C	54 - 58	73	85
H	5,5 - 7,0	8,0	11,0
O	35 - 40	16	1,0
N	0,0 - 0,2	-	0,3
Umidade (%)	15 - 30	5,1	0,1
Viscosidade (cP)	40 - 100 ^[a]	15000 ^[b]	180 ^[a]
Poder calorífico superior (MJ kg ⁻¹)	16 - 19	34	40

^[a] a 50°C. ^[b] a 61°C.

Fonte: HUBER e CORMA, 2007.

Embora, o bio-óleo produzido LHT apresente poder calorífico mais alto e maior potencial para produção de químicos quando comparado com o bio-óleo de pirólise rápida, há menor interesse no processo de LHT, devido ao alto grau de complexidade para alimentar e processar a biomassa, além de ser mais oneroso (MCKENDRY, 2002).

3.2.4 Gaseificação

A gaseificação é um processo que consiste em altas temperaturas (700 - 1000°C) e longo tempo de residência, visa otimizar a produção de gás combustível através da combustão parcial com o ar (relação estequiométrica $\lambda =$ ar utilizado/ar para queima estequiométrica entre 0,3 a 0,4) (PEACOCKE E JOSEPH, 200-?). Portanto, essa tecnologia é largamente empregada na geração de energia, via queima de seu produto principal, o gás (CO + H₂) na produção de combustíveis líquidos e compostos químicos via Fischer-Tropsch (item 3.2.2.3 a), na incineração de resíduos tóxicos, biológicos infectantes e na queima completa de gases poluentes.

3.2.5 Combustão

Combustão é um processo de oxidação completa de combustível autossustentável (relação estequiométrica $\lambda =$ ar utilizado/ar para queima estequiométrica >1) (PEACOCKE E JOSEPH, 200-?), ou seja, quando o calor irradiado das chamas atinge o combustível, este é decomposto em partículas menores, que se combinam com o comburente e queimam, irradiando outra vez calor para o combustível, formando um ciclo constante.

O processo é amplamente usado, principalmente, em indústrias com caldeiras a vapor e na produção de energia elétrica em termoeletricas e requer grandes volumes para a geração contínua de energia (VIDAL e HORA, 2011).

4 CONCLUSÃO

A dendroenergia aliada a termotecnologia é parte importante da segurança energética no Brasil e no mundo, por otimizar a geração de energia com ganhos ambientais na mitigação das mudanças do clima, fornecendo energia mais limpa.

Os desafios no uso das termotecnologias estão relacionados com as seguintes áreas: (1) Técnica, principalmente, pela pouca pesquisa e desenvolvimento dos processos termotecnológico, falta de profissionais qualificados na área e tecnologia nacional (2) Econômica, pela logística para a matéria-prima, redução

de custos de produção; (3) Técnico-econômico, pela integração de processos e infraestruturas e (4) Política, pela falta de políticas públicas de apoio.

As oportunidades estão na quantidade de opções em reatores já existentes no mercado, que atendem boa parte das necessidades atuais. Em grande escala, o mercado vem adquirindo cada vez mais espaço, contando com tecnologia de ponta em reatores e avanços na produção e produtividade de florestas plantadas para esse fim.

Em pequena escala pode-se contribuir com o acesso a energia em comunidades isoladas e afastadas de centros urbanos, que podem ser beneficiadas com a instalação de reatores de conversão com biomassa florestal para suprir a necessidade de energia.

Por essas razões, ressaltamos a importância do estabelecimento de políticas públicas no incentivo ao desenvolvimento e uso da dendroenergia e termotecnologias no país de forma mais organizada e acelerada.

5. AGRADECIMENTOS

Ao colega Aisten Baldan pelo apoio nas referências.

6. REFERÊNCIAS

- AGENDA 2020 TECHNOLOGY ALLIANCE. **Forest products industry technology roadmap**. Washington: U.S. Department of Energy, 2006. Disponível em: <http://www.twosides.info/Content/rsPDF_101.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2012
- ANTAL JUNIOR, M. J.; MOK, W.S.L.; VARHEGYI, G.SZEKELY. T. Review of methods for improving the yield of charcoal from biomass. **Energy & Fuels**, Washington, v. 4, n. 3, p. 221-225, May-Jun 1990. Disponível em: < dx.doi.org/10.1021/EF00021A001 >. Acesso em: 15 nov. 2012.
- ANUÁRIO ESTATÍSTICO DA ABRAF: ano base 2005. Brasília, DF: ABRAF, 2006.
- ANUÁRIO ESTATÍSTICO DA ABRAF: ano base 2011. Brasília, DF: ABRAF, 2012.
- AZIZ, S. M. A.; WAHI, R.; NGAINI, Z.; HAMDAN, S. Bio-oils from microwave pyrolysis of agricultural wastes. **Fuel Processing Technology**, Amsterdam, v. 106, p. 744-750, Feb 2013. Disponível em: < dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2012.10.011 >. Acesso em: 10 jun. 2013.

- BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory**. Burlington: Academic Press, 2010
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Câmara Setorial de Silvicultura. Agenda Estratégica do setor de florestas plantadas. Brasília: [MAPA], 2009. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/camaras_setoriais/Florestas_plantadas/9_reuniao/Agenda_Sivicultura.pdf>. Acesso em: 19 nov. 2012.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Dendroenergia**. Itajubá, MG, 2007. Disponível em: <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/arquivos/cartilhas/cartilhas-energias-renovaveis-dendroenergia.pdf>>. Acesso em: 01 fev. 2013
- BRIDGWATER, A. V. Catalysis in thermal biomass conversion. **Applied Catalysis a-General**, Amsterdam, v. 116, n. 1-2, p. 5-47, Sep. 1994. Disponível em: <[dx.doi.org/10.1016/0926-860X\(94\)80278-5](http://dx.doi.org/10.1016/0926-860X(94)80278-5)>. Acesso em: 03 fev. 2012
- _____. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, Lausanne, v. 91, n. 2-3, p. 87-102, Mar. 2003. Disponível em: <[dx.doi.org/10.1016/S1385-8947\(02\)00142-0](http://dx.doi.org/10.1016/S1385-8947(02)00142-0)>. Acesso em: 17 maio 2012
- BRIENS, C.; PISKORZ, J.; BERRUTI, F. Biomass valorization for fuel and chemicals production - A review. **International Journal of Chemical Reactor Engineering, Berkeley**, v. 6, 2008. Disponível em: <dx.doi.org/10.2202/1542-6580.1674>. Acesso em: 05 jul. 2013
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Cadeia Produtiva de Floresta Nativa**. Brasília : CNI/Fórum Florestal, 2012. Disponível em: <<http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo/18/2013/09/23/4970/20131003104014338713a.pdf>>. Acesso em 25 jan. 2013.
- CARVALHO, J. F. Fotossíntese e energias renováveis. In: Semana Nacional de Ciência e Tecnologia, 18 a 22 de outubro, 2004, Rio de Janeiro, RJ. **Palestras**. [Rio de Janeiro]: CBPF, 2004. Disponível em: <http://cbpfindex.cbpf.br/publication_pdfs/cs00105.2010_08_10_16_37_00.pdf>. Acesso em 22 de Nov. 2012.
- CORTEZ, L. A. B., LORA, E. S., OLIVAREZ GÓMEZ, E. **Biomassa para energia**. Unicamp: Editora da Unicamp, 2008. Disponível em <<http://www.nipe.unicamp.br/2013/docs/publicacoes/inte-biomassa-energia070814.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2012.
- CZERNIK, S.; BRIDGWATER, A. V. Overview of applications of biomass fast pyrolysis oil. **Energy & Fuels**, Washington, v. 18, n. 2, p. 590-598, Mar./Apr. 2004. Disponível em: <dx.doi.org/10.1021/ef034067u>. Acesso em: 23 ago. 2013.
- DRY, M. E. The Fischer-Tropsch process: 1950-2000. **Catalysis Today**, Amsterdam, v. 71, n. 3-4, p. 227-241, Jan. 2002. Disponível em: <[dx.doi.org/10.1016/S0920-5861\(01\)00453-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-5861(01)00453-9)>. Acesso em: 17 set. 2012
- FAAIJ, A.; WALTER, A.; BAUEN, A.; BEZZON, G.; ROCHA, J. D.; MOREIRA, J. R.; CRAIG, K. R.; OVEREND, R. P.; BAIN, R. L. Novas tecnologias para os vetores modernos de energia de biomassa. In: ROSSILO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H (Org). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. 1. ed. Campinas, SP: editora da UNICAMP, 2005. p 339-417.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Global forest resource assessment**. [Roma, IT], 2010. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf>>. Acesso em: 12 de Nov. 2012.
- GARCIA-PEREZ, M., CHEN, S., ZHOU, S., WANG, Z., LIAN, J., JOHNSON, R. L., LIAW, S, DAS, O. **New bio-refinery concept to convert softwood bark to transportation fuels: final report to the Washington State Department of Ecology**. [Olympia, Wash.]: Washington State Dept. of Ecology, [2009]. Disponível em: <<https://fortress.wa.gov/ecy/publications/publications/0907061.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2016.
- HAYASHI, J.; MIURA, K. PYROLYSIS OF VICTORIAN BROWN COAL. In: Li, Chun-Zhu. **Advances in the Science of Victorian Brown Coal**. Amsterdam: Elsevier Science, 2004. Capítulo 4. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780080442693>>. Acesso em: 05 de fev. 2014
- HAMILTON, J. D. **Historical oil shocks**. Cambridge: National bureau of economic research, 2011 Disponível em: <http://www.nber.org/papers/w16790.pdf?new_window=1>. Acesso em: 16 Jan. 2013.
- HUBER, G. W.; CORMA, A. Synergies between bio- and oil refineries for the production of fuels from

biomass. **Angewandte Chemie-International Edition**, WEINHEIM, v. 46, n. 38, p. 7184-7201, 2007. Disponível em: < dx.doi.org/WEINHEIM >. Acesso em: 26 out. 2012

HUBER, G. W.; IBORRA, S.; CORMA, A. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. **Chemical Reviews**, Washington, v. 106, n. 9, p. 4044-4098, Sep. 2006. Disponível em: < dx.doi.org/10.1021/cr068360d >. Acesso em: 27 jan. 2012

JUVILLAR, J. B. Tecnologia de transformação de madeira em carvão. In: PENEDO, W. R. (Comp.). *Uso da madeira para fins energéticos*. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais-CETEC, 1980. v. 1., p 67-82.

MASEK, O.; BUDARIN, V.; GRONNOW, M.; CROMBIE, K.; BROWNSORT, P. FITZPATRICK, E.; HURST, P. Microwave and slow pyrolysis biochar- Comparison of physical and functional properties. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 100, p. 41-48, Mar. 2013. Disponível em: < dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2012.11.015 >. Acesso em: 15 mar. 2014. //

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (part 2): conversion technologies. **Bioresource Technology**, OXFORD, v. 83, n. 1, p. 47-54, May 2002. Disponível em: < [dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00119-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00119-5) >. Acesso em: 11 nov. 2012

MIURA, M.; KAGA, H.; SAKURAI, A.; KATUCHI, T.; TAKASHASHI, K. Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, Amsterdam, v. 71, n. 1, p. 187-199, Mar. 2004. Disponível em: < [dx.doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00087-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00087-1) >. Acesso em: 06 dez. 2012.

MULLEN, C. A.; BOATENG, A. A. **Fast Pyrolysis and Bio-oil Production from Agricultural Residues and Energy Crops**. IN: SYMPOSIUM ON BIOTECHNOLOGY FOR FUELS AND CHEMICALS, 30., 2008, ... [New Orleans, LA]: [SBFC]. [2008]. Anais... [New Orleans, LA]: [SBFC]. [2008]. 4-47. Disponível em: <<http://afsrweb.usda.gov/SP2UserFiles/Place/36200000/ERRC-P2.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2013.

NOGUEIRA, L. A. H; LORA, E. E. S. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PEACOCKE, C.; JOSEPH, S. **Notes on Terminology and Technology in Thermal Conversion**. [s.l.]: [s.n.], [200-?]. Disponível em: <http://www.carbon-negative.us/docs/IBI_Terminology.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2013.

QUIRINO, W. F. - **Características de briquetes de carvão vegetal a seu comportamento na combustão**. Piracicaba, janeiro, 1991. 80 p (Dissertação de Mestrado apresentada à ESALQ/LISP para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais).

SCHULZ, H. Short history and present trends of Fischer-Tropsch synthesis. **Applied Catalysis a-General**, Amsterdam, v. 186, n. 1-2, p. 3-12, Oct. 1999. Disponível em: < [dx.doi.org/10.1016/S0926-860X\(99\)00160-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0926-860X(99)00160-X) >. Acesso em: 14 fev. 2013.

STEINER, C., TEIXEIRA, W. G., LEHMANN, J., NEHLS., MACÊDO, J. L. V., BLUM, W. E. H., ZECH, W. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. **Plant and Soil**, Berlin, v. 291, p. 275-290, 2007.

STASSEN, H.E. **Small-Scale Biomass Gasifiers for Heat and Power: A Global Review**. World Bank Technical Paper Number 296, Energy Series. 1995. Disponível em: <http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/1999/08/15/000009265_3961214154711/Rendered/PDF/multi_page.pdf>. Acesso em 5 fev. 2013.

TUMULURU, J. S, Wright, C. T., Kenny, K. L., Hess, J. R.. *A Review on Biomass Densification Technologies for Energy Application*. [Washington]: Idaho National Laboratory, 2010. Disponível em: <<http://www.inl.gov/technicalpublications/documents/4886679.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2014.

VARDON, D. R. **Hydrothermal liquefaction for energy recovery from high-moisture waste biomass**. 2012. 80 f. Tese (Doutorado em Environmental Engineering in Civil Engineering) - University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, 2012. Disponível em: <https://www.ideals.illinois.edu/bitstream/handle/2142/34327/Vardon_Derek.pdf?sequence=1>. Acesso em: 02 mai. 2013.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. da. **Perspectiva do setor de biomassa de madeira para a geração de energia**. BNDES Setorial 33, Rio de Janeiro, 2011, p. 261-314, mar. 2011.

VERISSIMO, A; NUSSBAUM, R. **Um Resumo do Status das Florestas em Países Selecionados:** Nota Técnica. [Belém: Imazon; The Proforest Initiative, 2011]. Disponível em <http://www.proforest.net/objects/publications/um-resumo-do-status-das-florestas-em-paises-selecionadas-nota-tecnica/at_download/file>. Acesso em: 10 nov. 2012

ZHANG, Y. Hydrothermal Liquefaction to Convert Biomass into Crude Oil. **In.** Biofuels from Agricultural Wastes and Byproducts. 2010. Disponível em: <<http://age-web.age.uiuc.edu/bee/research/IntroHTL.pdf>>. Acesso em: 18 fev. 2013.

WILD, P.J., REITH, H., HEERES, H.J. Biomass pyrolysis for chemicals. **Biofuels**. 2011. 2 (2), 185 – 208. Disponível em: <<http://dissertations.ub.rug.nl/faculties/science/2011/p.j.de.wild/>>. Acesso em 22 nov. 2013