

**DIRETRIZES DE POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A INDÚSTRIA CANAVIEIRA
DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Programa de Pesquisa em Políticas Públicas (PPPP)

***Roadmap* tecnológico da termoconversão de biomassa para a tecnologia
BTL (Biomass to Liquid)**

Por

Juan M. Mesa-Pérez, José D. Rocha, Rodrigo A. Jordan, Luis A.B. Cortez

FAPESP

Campinas, setembro de 2009

1. Introdução

Entre as biomassas vegetais com finalidade energética, a cana de açúcar ocupa uma posição de destaque no Brasil. Trata-se de uma cultura já consolidada com uma logística bastante desenvolvida em termos de colheita e transporte, conferindo-lhe uma enorme competitividade frente a outras culturas energéticas.

Mas, mesmo com o nível excepcional atingido pela indústria sucroalcooleira, o aproveitamento energético tal como o processo produtivo tem sido conduzido atualmente ainda é baixo. Isto, porque o modelo de produção de etanol utilizado até então, contempla apenas o uso da sacarose, que contem entre 32 e 35% da energia primária da cana de açúcar. Estando a maior parte (entre 65 e 68%) concentrada na fração lignocelulósica composta pelas folhas e o bagaço.

A produção de etanol através do processo de fermentação da sacarose se situa em torno de 86 litros por tonelada de cana, representando aproximadamente 26% da energia primária da cana integral. Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégico - CGEE (2004), para cada tonelada de cana limpa (colmos), são produzidas as seguintes quantidades de matéria seca: 140 kg de palha, 140 kg de bagaço e 150 kg de açúcares. De acordo com LEAL (2007), para estas quantidades, a energia primária está distribuída da seguinte forma: palha (2500 MJ), bagaço (2500 MJ) e açúcares (2400 MJ).

A rota termoquímica apresenta-se como uma opção para a conversão do material lignocelulósico da cana em bio-combustíveis, passando pela obtenção de gás de síntese, seguido da síntese catalítica, o que torna possível a obtenção de hidrocarbonetos, álcoois, hidrogênio, amônia, gás natural sintético, etc. Os processos da rota termoquímica são conhecidos como BTL, biomassa para produção de combustíveis líquidos (do inglês *Biomass to liquid*).

A gasificação é uma rota utilizada para transformar os componentes da biomassa em gás de síntese (CO e H_2), utilizado na síntese catalítica para a produção de combustíveis líquidos. A tecnologia de gasificação encontra-se em estado avançado de desenvolvimento. Porém, problemas com a alimentação de biomassa em reatores pressurizados, limpeza dos gases e a necessidade

de larga escala de produção para alcançar a viabilidade econômica, são fatores que tem barrado a sua exploração comercial.

A síntese de biocombustíveis mostra bons indicadores de viabilidade econômica apenas quando utilizada em larga escala. Alguns estudos indicam valores superiores a 1.700 MW térmicos de energia da biomassa, outros se referem a 5 milhões toneladas de biomassa por ano como o mínimo econômico (LORA, 2008). Isto faz com que os gasificadores de leito fixo ou borbulhante, típicos de capacidades térmicas pequenas não sejam perspectivas para projetos industriais de produção de gás de síntese para biocombustíveis. Além disso, as plantas de produção de O_2 apresentam custos relativos desproporcionados para pequenas capacidades.

Os gasificadores de leito arrastado, embora facilmente escaláveis, exigem uma granulometria muito fina da biomassa, difícil de alcançar tecnicamente, devido ao alto consumo de potência para o pré-tratamento. O pré-tratamento por torrefação facilita o processo de redução granulométrica. Por este motivo, a pirólise rápida de biomassa para produção de lama (mistura de bio-óleo e finos de carvão do processo) e sua posterior gasificação nebulizada, apresenta-se como uma opção para operação deste tipo de gaseificador, além de reduzir custos relacionados ao transporte da biomassa.

A pirólise rápida é uma tecnologia que já se mostra viável economicamente em plantas com capacidade a partir de 2 toneladas/hora de biomassa. Este processo transforma a biomassa em carvão (20-30%), bio-óleo (20-30%), ácido pirolenhoso (5-10%), sendo o restante, gases quentes com temperatura entre 400 e 600 °C. Porém é preciso aumentar o rendimento de produção de bio-óleo, que atualmente ainda é baixo.

Espera-se que a gasificação de bio-óleo sob pressão e em atmosfera de oxigênio gere um gás de síntese mais limpo e com qualidade para seu uso no processo de síntese catalítica. O uso de reatores pressurizados, alimentados com bio-óleo, visa diminuir o custo de investimentos e aumentar a escala de produção do gás de síntese. Embora, isso possa ser uma realidade, existem vários gargalos tecnológicos a serem resolvidos, com relação à alimentação de bio-óleo, qualidade do gás, condições operacionais do reator, etc.

2. Necessidades e Capacidades Tecnológicas

2.1. Produtos ou tecnologias almejadas

A pirólise rápida para a produção de bio-óleo destinado à obtenção de gás de síntese se mostra, dentro das tecnologias que estão sendo propostas, como uma opção para a utilização da palha e do bagaço da cana na produção de biocombustíveis sintéticos via BTL, aumentando assim a produção de energia por hectare sem a necessidade de aumentar a área plantada, através de um aproveitamento mais eficiente da energia primária da cana de açúcar.

Neste cenário a pirólise rápida poderá ser utilizada como uma etapa de pré-tratamento, melhorando as características da biomassa para o transporte a longas distâncias, reduzindo assim os custos relacionados a esta etapa, que hoje pesam significativamente sobre o seu custo.

O bio-óleo pode ser considerado uma biomassa líquida que apresenta densidade de 1200 kg/m^3 , muito superior à densidade a granel da biomassa polidispersa que esta na faixa de $80\text{-}240 \text{ kg/m}^3$.

O transporte de biomassa no estado líquido, ou seja, na forma de bio-óleo é mais conveniente do que na forma sólida polidispersa, devido a sua elevada densidade energética, menor teor de umidade e cinzas. É possível adequar a logística de transporte desenvolvida para outros combustíveis líquidos ao bio-óleo.

Além do mais, o uso do bio-óleo em gasificadores apresenta vantagens relacionadas ao sistema de alimentação e a produção de um gás mais limpo, de melhor qualidade, tanto para a queima em motores de combustão e turbinas (geração de energia), como para uso em sínteses catalíticas para combustíveis sintéticos, simplificando as etapas de purificação.

A gasificação com oxigênio pressurizado ao invés de ar atmosférico resulta em um gás de síntese de alta qualidade e compatível com sistemas catalíticos de síntese de combustíveis e com o uso direto em turbinas a gás convencionais. Por ser uma biomassa liquefeita, o bio-óleo pode se ajustar melhor aos gasificadores pressurizados com oxigênio como os leitos de arraste ou fluidizados.

Analisando as possibilidades para a produção de combustíveis via BTL utilizando a palha e o bagaço de cana, propõe-se aqui a rota passando pela pirólise e depois a gasificação, onde o bio-óleo será utilizado como matéria prima para a produção de gás de síntese. Neste caso, o bio-óleo será obtido em plantas de pirólise rápida em leito fluidizado, em pequena escala. Estas plantas poderão ser até modulares, de maneira a ficarem locadas o mais próximo possível da biomassa. A mistura de toda a produção de bio-óleo será transportada até uma planta de grande porte para ser gasificada e produzir biocombustíveis sintéticos, fertilizantes e outros produtos via síntese catalítica. Essa é a descrição de uma biorrefinaria baseada em gás de síntese. Sua estrutura deve ser em larga escala já que as plantas de catálise são caras e apenas se justificam para grandes volumes de produção. A Figura 2.1 mostra um esquema exemplificando este cenário.

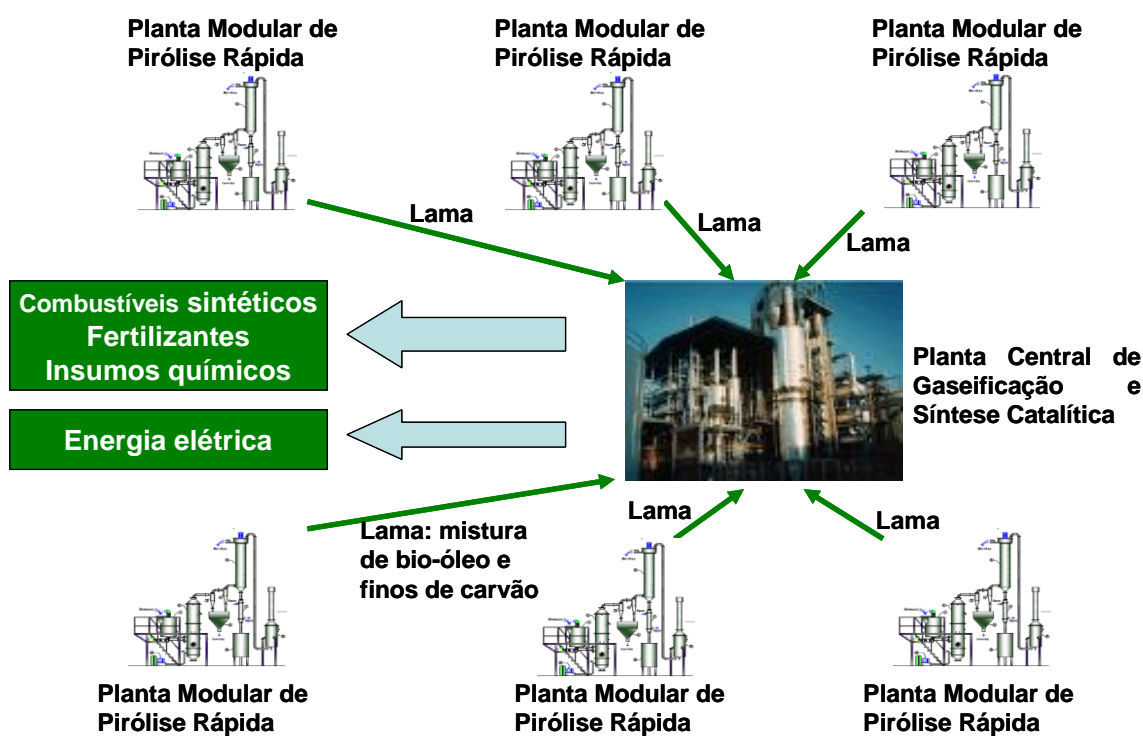


Figura 2.1- Cenário proposto para Pirólise/Gaseificação/Síntese - BTL.

Cálculos realizados, considerando a média de produção para as usinas do estado de São Paulo (safra 2006/2007), mostram que são necessárias aproximadamente, entre 28 e 29 usinas fornecendo palha e bagaço para viabilizar uma planta de gasificação e síntese. Isto, considerando a capacidade mínima viável de 5 milhões de toneladas de biomassa por ano. Este cálculo considerou o aproveitamento de 30% do bagaço e 40% da palha (biomassa seca).

Uma outra possibilidade para viabilizar a síntese de biocombustíveis, seria a integração com refinarias de petróleo. O bio-óleo produzido poderia ser enviado até mesmo por oleodutos às refinarias, onde seria misturado ao petróleo no processo de refino. Um exemplo deste arranjo seriam as refinarias de Paulínia, que poderiam processar bio-óleo produzido nas regiões de Campinas e Piracicaba, que somam 26 usinas (UNICA, 2009; UDOP, 2009).

Sob o ponto de vista de fornecimento de matéria prima, é possível também, a integração de plantas de pirólise com plantas de hidrólise, utilizando a lignina, resultante do processo de pré-tratamento da hidrólise. A lignina é responsável pela formação dos componentes fenólicos no bio-óleo, além da implementação de carbono fixo na fração sólida (LUENGO et al., 2008). Para o processo de pirólise, não haveria problemas em operar apenas com lignina. Isto possibilitaria até aumentar a capacidade de processamento de uma planta baseada na conversão de biomassa lignocelulósica integral, composta por lignina, celulose e hemicelulose.

Num primeiro instante, pode parecer simples a implantação deste cenário, até pelo fato das tecnologias de termoconversão não se tratarem de tecnologias novas, já sendo conhecidas de várias décadas. Porém, com o advento do petróleo, as pesquisas com estas tecnologias foram abandonadas, fazendo com que alguns gargalos não fossem resolvidos, principalmente, no que se refere à aplicação com biomassa.

A Figura 2.2. mostra um diagrama de bloco simplificado da rota proposta, com as etapas críticas mostradas em vermelho, onde existem os gargalos que precisam ser sanados para que o cenário proposto possa atingir a maturidade comercial.

Por uma característica do processo de pirólise rápida proposto, primeiramente é feita a extração dos finos de carvão e, depois, do bio-óleo. Isto

se deve ao fato do sistema de separação de bio-óleo utilizar um lavador de gases para extração de ácidos carboxílicos, antes da extração do bio-óleo. A posterior mistura dos finos de carvão ao bio-óleo (lama) para a gaseificação, possibilita aumentar a oferta de produto para este processo, além de elevar a eficiência global da rota proposta.

As etapas identificadas como críticas, são as áreas tecnológicas para onde deverão ser canalizados os esforços com a finalidade de resolver os problemas relacionados a estas, os quais impedem a aplicação comercial imediata da rota proposta. Alguns problemas ainda envolvem pesquisa básica, porém, a maioria é de caráter técnico-econômico, relacionados a questões de aumento de escala das tecnologias envolvidas.

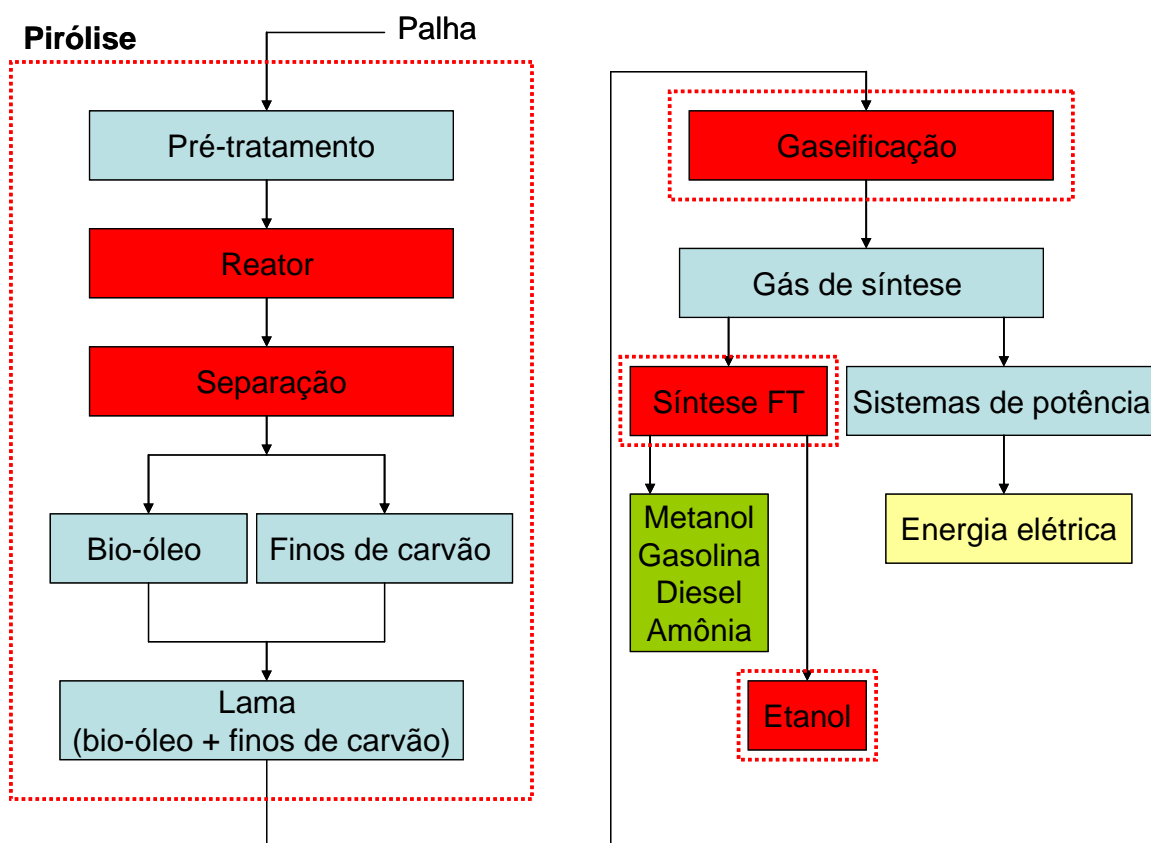


Figura 2.2- Diagrama de bloco da rota termoquímica para produção de bio-combustíveis e geração de energia elétrica passando pela pirólise e gaseificação.

2.2. Requisitos críticos de sistema

O objetivo da rota proposta é aumentar o rendimento global no que diz respeito ao aproveitamento da energia primária da cana de açúcar, onde, apenas com a produção de etanol pelo processo atual, este se situa em torno de 26%. A conversão da palha e do bagaço em energia, seja na forma de outros biocombustíveis que não sejam propriamente o etanol, ou na geração de energia elétrica, permitirá aumentar a quantidade de energia produzida a partir de um mesmo hectare de cana plantada.

A Tabela 1 mostra a projeção para o crescimento da energia produzida por hectare de cana de açúcar em função do aumento do aproveitamento da energia primária da cana de açúcar, com a utilização da palha e do bagaço na rota proposta. O cenário atual considera apenas a produção de etanol pelo processo de fermentação da sacarose (rota convencional). Pois, atualmente, ainda não existe no Brasil uma produção de biocombustível sintético pela rota proposta, nem em escala piloto. Para os anos seguintes (projeções), a produção total é resultante da soma da produção de etanol pela fermentação da sacarose à produção de biocombustíveis pela rota termoquímica: Pirólise/Gasificação/Síntese catalítica.

O crescimento projetado deve-se a implementação da rota termoquímica e as melhorias graduais dos seus processos (escala, custo, eficiência, etc.), previstas para os próximos 20 anos. Estes dados são apresentados mais detalhadamente, no item “II.4. Condutores Tecnológicos”.

Tabela 1- Projeção para a produção de energia por hectare e eficiência global da conversão da energia primária da cana de açúcar.

	Atual	5 anos	10 anos	20 anos
Etanol via fermentativa (GJ/ha.ano)	155	185	202	217
Equivalência (litros de etanol/ha.ano)	7310	8741	9520	10257
Eficiência global (energia produzida/energia primária da cana)	26%	30%	33%	36%

Para a confecção da Tabela 1 foram considerados os seguintes dados: produção de 85 toneladas de colmos de cana por hectare; produção de 86 litros de etanol por tonelada de colmos; aproveitamento de 40% da palha produzida no campo e 30% do bagaço. Para o etanol considerou-se um poder calorífico inferior de 21,2 MJ/litro. Os dados referentes a produção de açúcares, bagaço e palha e, equivalências energéticas, são os mesmos mostrados na “Introdução”, apresentados por CGEE (2004) e por LEAL (2007).

Para o atendimento das projeções mostradas na Tabela 1, têm-se os requisitos críticos: produtividade, custo e impacto ambiental. A Tabela 2, baseada nas mesmas hipóteses da Tabela 1, mostra as projeções dos requisitos críticos para os próximos 20 anos.

A questão ambiental não se mostra um ponto crítico para a rota proposta, uma vez que o uso de água nos processos termoquímicos é mínimo, e os gases gerados são ou podem ser reaproveitados para geração de calor nos próprios processos.

Tabela 2- Requisitos críticos de sistema para a rota termoquímica propostos para produção de biocombustíveis sintéticos.

RCS	Atual	5 anos	10 anos	20 anos
Produtividade (GJ/ha.ano)	n.e.	30	47	62
Produtividade ((litros/ha.ano)*	n.e.	1431	2210	2947
Custo (US\$/GJ)	51,5	31,2	16,5	13,4
Custo (US\$/litro)*	1,09	0,67	0,35	0,28
Impacto ambiental	Baixo	Baixo	Baixo	Baixo

(*) equivalência em litros de etanol

Mesmo não existindo ainda uma produção em escala comercial, estimou-se o custo atual de produção de biocombustível sintético pela rota proposta. Este custo foi estimado com base em dados de operação da planta piloto de pirólise rápida da UNICAMP (PPR-200), com capacidade de 200 kg/h de biomassa. O custo atual para a gasificação e síntese foi estimado com base em informações bibliográficas, considerando a escala da planta de pirólise PPR-200. Estes dados se baseiam em LORA (2008), SEABRA (2008) e dados do IPT (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2009).

Tomou-se o custo atual da biomassa como sendo igual ao preço pago pela palha de cana utilizada para testes com a planta piloto PPR-200, que é de R\$ 60 a tonelada. Para os cenários futuros, considerou-se uma redução no preço, para R\$ 40 num cenário de 5 anos e, para R\$ 20 num cenário de 10 a 20 anos. Isto, em virtude da melhoria das técnicas para recuperação da palha, como por exemplo, a colheita integral e, o uso do bagaço em conjunto com a palha.

Projeta-se o surgimento de uma produção de biocombustíveis sintéticos a partir do bagaço e da palha nos primeiros 5 anos e o aumento desta produção ao longo dos próximos 15 anos em função do aumento da eficiência dos processos termoquímicos empregados, além do aumento de escala, reduzindo com isto o custo de produção, principalmente em se tratando da síntese e gasificação.

As estimativas de custo para a gasificação e síntese, para os cenários de 5, 10 e 20 anos, também foram baseadas em dados de LORA (2008), SEABRA (2008) e dados do pesquisador Daniel Ushima do IPT, citados por INOVAÇÃO TECNOLÓGICA (2009).

2. 3. Grandes áreas tecnológicas

2.3.1. Pirólise

As observações a respeito dos gargalos tecnológicos da pirólise, foram feitas com base em resultados de testes com a planta piloto PPR-200 da UNICAMP.

A Figura 2.3. mostra um esquema com os principais componentes desta planta, denominada de PPR-200. A operação da planta se dá da seguinte maneira: a biomassa é alimentada no silo (1), o qual apresenta uma rosca sem fim (2) que injeta a biomassa no reator de pirólise rápida de leito fluidizado (3). A biomassa ao entrar em contato com o leito do reator a uma temperatura de aproximadamente 450-500 °C é volatilizada, transformando-se em um sólido (carvão), vapores (bio-óleo e extrato ácido) e em gases. O carvão é separado na bateria de ciclones (4 e 5) e armazenado no silo (9), o extrato ácido e o bio-óleo são separados no sistema de recuperação (6) de forma independente. No reservatório (7) é obtido o extrato ácido e o bio-óleo é retirado pela saída lateral superior do sistema de separação através do sistema mecânico rotativo. Os gases restantes são queimados na câmara de combustão (10). Esses gases poderiam ser usados como agente de fluidização do leito usando um trocador de calor (12) e um soprador de gás quente (13). Porém os testes até então realizados, usam ar atmosférico proveniente do soprador existente (14).

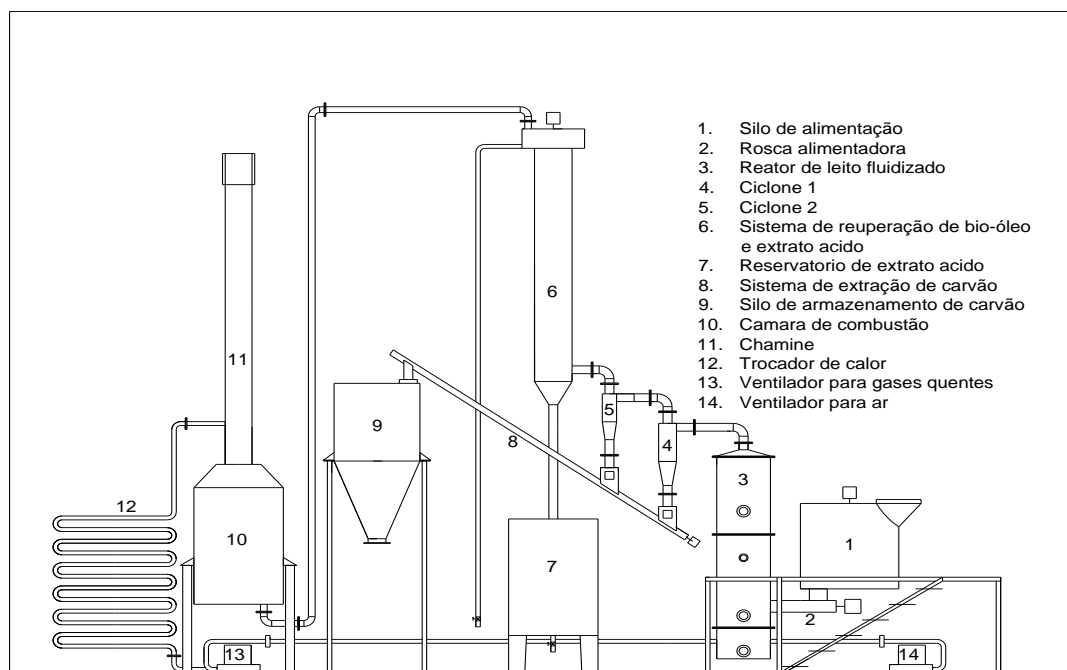


Figura 2.3- Esquema da planta de pirólise rápida da UNICAMP (PPR-200).

II.3.1.1. Automação das etapas dentro da planta de pirólise

Existem processos que acontecem em meio aquoso, como é o caso dos processos biotecnológicos: fermentação, biodigestão, etc. Porém, para os processos térmicos é desejável ter o biocombustível seco ou com umidade compatível podendo variar entre 8-15%, e para isso deve-se usar energia. Embora no Brasil a indústria canavieira tenha se especializado na queima direta de bagaço com alta umidade, outros processos de conversão termoquímica como a pirólise rápida e a gaseificação trabalham geralmente com biomassa com baixo teor de umidade.

Uma estocagem apropriada pode ajudar na perda de umidade inicial da biomassa. Muitos processos têm geralmente excedente de energia térmica que pode ser usada para secagem, isso é uma vantagem em plantas anexas a uma unidade fabril já existente, como por exemplo nas usinas, onde poderia ser feito o aproveitamento dos gases de exatão das caldeiras. A integração energética do processo deve ser considerada e praticada possibilitando o maior aproveitamento da matéria-prima.

Na etapa de pré-tratamento, a biomassa precisa ser homogeneizada, envolvendo as seguintes operações: picagem, moagem e peneiração. Essas operações unitárias são usadas para a redução e uniformização do tamanho das partículas. Alguns processos de termoconversão, como é o caso da pirólise

rápida, exigem a homogeneidade das partículas e o controle sobre a distribuição de tamanho é necessário e crítico, garantindo uma estreita faixa de tamanhos.

A Figura 2.4. mostra as etapas de pré-tratamento da palha de cana de açúcar ao dar entrada na planta pirólise rápida PPR-200. Por se tratar de uma planta experimental, que não opera continuamente, essas operações são todas manuais. Porém, em se tratando de uma escala industrial estas operações devem passar a ser automatizadas.

A automação é um ponto importante relacionado a questão de alimentação do reator de pirólise. Manter a temperatura de operação do reator sob controle é muito importante e afeta diretamente o rendimento em bio-óleo. Temperaturas do leito do reator acima de 500 °C são pouco favoráveis a produção de bio-óleo. Assim como elevadas vazões de ar, utilizado como agente de fluidização do leito de reatores de leito fluidizado, auto-térmicos, caso do reator da PPR-200.

No caso da PPR-200 o controle da temperatura no reator é feito através do controle manual da alimentação de biomassa e da vazão do agente fluidizante, a qual é ajustada através de válvulas, de abertura e fechamento manual. Um sistema de monitoramento informa dados de perfis de temperatura e pressão no reator.



Figura 2. 4- Etapas de pré-tratamento da palha de cana em uma planta de pirólise rápida de biomassa em escala piloto (200 kg/h).

A automação do sistema de alimentação do reator é importante, de maneira a se obter uma planta robusta, capaz de ajustar automaticamente as condições e características da biomassa e de processo, objetivando sempre o maior rendimento em bio-óleo.

No que se refere á sistemas de pré-tratamento e alimentação, no Brasil, a disponibilidade de equipamentos para estas operações é grande, como picadores e moinhos industriais, silos armazenadores, correias transportadoras e secadores de vários tipos. Tem-se apenas que adequar estes equipamentos as necessidades das plantas de pirólise, como regime de operação, capacidade, etc.

Na parte de automação, para uma eficiência de operação é necessário o desenvolvimento de um sistema supervisor capaz de receber informações da planta, como temperatura, pressão, etc., e tomar decisões de operação, como aumentar ou reduzir a alimentação de biomassa automaticamente. No mercado Brasileiro existe uma gama de interfaces e controladores lógicos programáveis

(CLP's). Existindo apenas a necessidade de desenvolver a lógica de controle, baseada nas informações que serão disponibilizadas.

2.3.1.2. Consumo de energia no processo de pirólise

O consumo de energia da planta de pirólise rápida é devido a necessidade de fornecimento de calor ao reator e energia mecânica para movimentação de ar, biomassa, água de lavagem e separação de produtos. A Figura 2.5 mostra o balanço de fluxo de energia da planta PPR-200 operando com palha de cana, realizado com base em dados de operação e rendimento, considerando os valores de poder calorífico inferior da palha, do bio-óleo e dos finos de carvão, determinados através de análises destes produtos. O valor de fluxo de energia relacionado aos gases e perdas foi determinado por diferença.

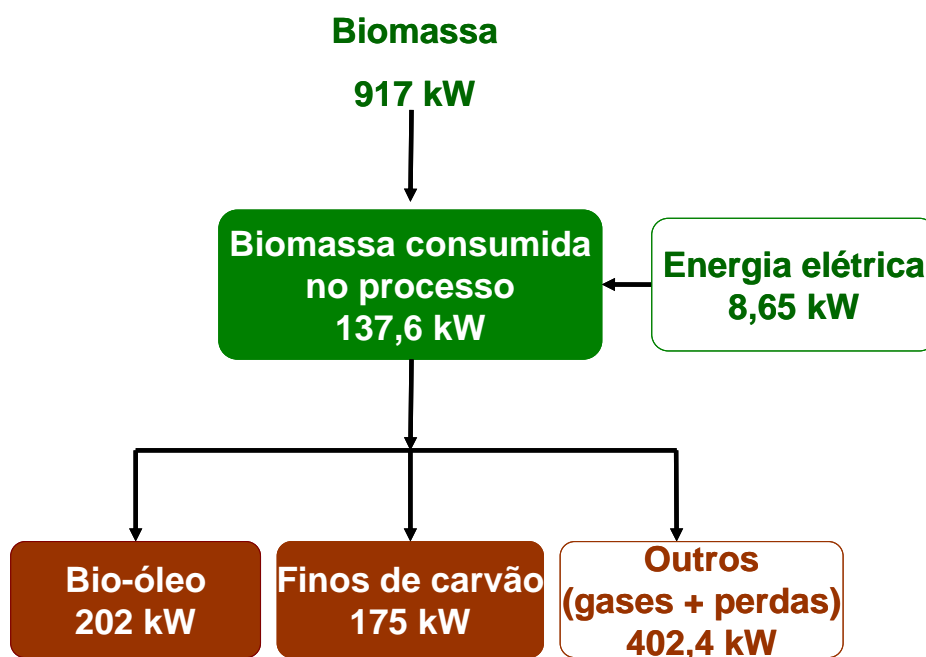


Figura 2.5- Balanço do fluxo de energia da planta PPR-200.

A energia elétrica representa o consumo de energia mecânica, a qual não é superior a 1,6% da energia produzida na forma de bio-óleo e finos de carvão. A energia térmica representa o maior consumo da planta, 36,5% da energia gerada na forma de finos de carvão e bio-óleo. Pelo fato do reator ser auto-térmico, isto leva a um consumo significativo de biomassa, fazendo com

que o rendimento de bio-óleo em relação a biomassa bruta (rendimento mássico) não ultrapasse os 22%. A biomassa bruta é o total que entra na planta, sem os descontos de umidade, cinzas e percentual que sofre combustão.

O aproveitamento dos gases gerados no processo possibilitaria reduzir para zero o consumo de biomassa para geração de calor. Haveria um consumo inicial até o reator entrar em regime e depois, o mesmo seria retro-alimentado por estes gases, que serviriam como fonte de calor e agente de fluidização do leito.

Este sistema encontra-se projetado para a PPR-200, sendo inclusive até comentado na Figura 2.3. necessitando de financiamento para testes. Pois é necessário avaliar o comportamento do reator operando com a injeção destes gases, em termos de qualidade e rendimento de produtos.

A biomassa consumida para geração de calor seria disponibilizada para a produção de finos de carvão e bio-óleo. Com esta mudança, a eficiência global de conversão da planta baseada nos fluxos de energia em finos de carvão e bio-óleo, passaria, considerando os rendimentos atuais, de 41% para 51,6%, o que ainda é baixo. Porém, existe também a questão de aumento do rendimento de bio-óleo.

2.3.1.3. Rendimento de bio-óleo

Os rendimentos dos produtos da pirólise rápida em escala de laboratório usando equipamentos de recuperação de bio-óleo altamente eficientes podem chegar até 75 % em massa (Tabela 3). Esse rendimento considera a massa de líquido total recuperado tais como: água, ácidos, extrativos e o bio-óleo.

Tabela 3- Rendimentos dos produtos típicos obtidos por meio de diferentes formas de pirólise de madeira (base seca).

Processo	Líquido	Carvão	Gás
Pirólise rápida	75%	12%	13%
Carbonização	30%	35%	35%
Gaseificação	5%	10%	85%

Fonte: BRIDGEWATER, 2001.

Na prática, conforme pode ser visto na Tabela 4, onde são mostrados os rendimentos médios em produtos da pirólise rápida da planta piloto PPR-200, o rendimento em bio-óleo não é tão alto, estando entre 20-25% dependendo da composição da biomassa, considerando como base de cálculo, a massa orgânica seca contida na biomassa alimentada ao reator.

Tabela 4- Rendimentos médios dos produtos na planta de pirólise rápida PPR-200, instalada na FEAGRI/UNICAMP.

Produto	Rendimento em base mássica (%)
Carvão	25-30
Bio-óleo	20-25
Extrato ácido	10-15
Gases quentes (calculado por diferença)	30-35

A massa orgânica (massa líquida de biomassa) é calculada subtraindo-se a quantidade de água e cinzas presentes na biomassa e, descontando-se o percentual de biomassa que sofre combustão pelo oxigênio contido no ar de fluidização para fornecer calor ao processo. No caso da PPR-200, entre 10 e 15% da biomassa é utilizada para fornecer calor ao processo, pois o reator é auto-térmico.

Além da questão relacionada ao consumo de biomassa para fornecimento de calor ao processo de pirólise, existem outros fatores que afetam o rendimento de bio-óleo, como o tempo de retenção (tempo de residência) e o sistema de separação de bio-óleo.

O tempo total de residência na planta PPR-200, desde a entrada da partícula de biomassa no reator até a saída da partícula de bio-óleo no separador, ainda é alto, cerca de 8 segundos. Alterando o projeto do reator e da coluna de separação, seria possível reduzir este tempo para até 2 segundos. Assim, reduz-se a possibilidade da partícula de bio-óleo sofrer craqueamento, convertendo-se em gás.

O sistema de separação de bio-óleo é outro gargalo da pirólise, pois quando resfriado este se condensa em forma de névoa. O uso de equipamentos caros embora eficientes nem sempre é viável quando o assunto é biomassa. Para a planta PPR-200 foi desenvolvida uma tecnologia de separadores centrífugos, que embora ainda opere com rendimentos modestos, é robusta e barata, podendo ser melhorada.

2.3.1.4. Escala de plantas de pirólise

No que diz respeito à questão de escala, existem certas discussões e controvérsias em torno das plantas de pirólise rápida de biomassa. Algumas empresas no mundo utilizam várias tecnologias com grandes capacidades instaladas, da ordem de 100 a 200 toneladas de biomassa por dia. Porém, estas escalas não têm tido muito êxito devido à complexidade das plantas e o seu desempenho relativamente baixo.

Em termos de valores, conforme pode ser visto na Tabela 5, para as plantas de pirólise rápida a relação custo/capacidade é decrescente. Enquanto que o valor de uma planta para 200 kg/h é de R\$ 300 mil, o valor de uma planta de 2 t/h é de R\$ 1,3 milhões, sendo sua capacidade dez vezes maior.

Tabela 5- Valores de plantas de pirólise rápida com reator de leito fluidizado.

Capacidade (kg/h)	Valor (R\$)	Valor/Capacidade (R\$/kg/h)
40	150.000,00	3.750,00
200	300.000,00	1.500,00
500	500.000,00	1.000,00
1000	800.000,00	800,00
2000	1.300.000,00	650,00
2500	1.500.000,00	600,00

Fonte: BIOWARE (s.d.)

No Brasil, os estudos chegaram até a escala de 200 kg/h (PPR-200) e plantas de 20 a 40 toneladas por dia são possíveis de funcionar satisfatoriamente. Essa escala já está projetada, necessitando de investimentos para sua construção como etapa fundamental de aumento de escala.

As grandes dificuldades tecnológicas envolvidas no *scaleup* estão ligadas ao fato da fluidodinâmica do reator de leito fluidizado ser complicada. Operações estáveis do reator (isso é perfis de pressão e temperatura ao longo do reator em regime estacionário) só são possíveis se a mistura entre o material inerte e a biomassa for adequada. Problemas de aumento de temperatura localizados, sinterização, vazamento de gases são comuns quando a fluidodinâmica do leito não é dominada.

O aumento da escala, situação equivalente ao aumento do diâmetro do reator, apresenta o inconveniente do ponto de alimentação não garantir mistura homogênea da biomassa ao longo do perímetro do diâmetro do leito. Colocar pontos de alimentação distribuídos pode ajudar a resolver o problema, porém aspectos econômicos e financeiros na implementação dessas soluções devem ser avaliados com cautela. O uso de reatores em paralelo pode ser uma prática menos arriscada.

2.3.1.5. Estabilidade do bio-óleo

Saindo da questão de processo, entrando na questão de produtos, tem-se a questão da elevada viscosidade associada à instabilidade do bio-óleo, o qual tende a aumentar com a idade, ao ponto de fazer o bio-óleo se assemelhar a um piche. O que pode representar um problema para o transporte e aplicação em processos, quando se pensa em escoamento em dutos. O aquecimento do bio-óleo, em vez de uma solução, pode representar um problema, caso o controle de temperatura não seja bem feito, pois o mesmo quando aquecido acima de 70 °C sofre coquificação. Por outro lado, a 60 °C apresenta um comportamento bastante fluído.

O estudo de catalisadores para serem injetados no reator durante o processo de pirólise rápida, ou de aditivos para serem misturados diretamente ao bio-óleo, são algumas opções. Neste sentido já foram realizados testes utilizando álcool como aditivo para o bio-óleo. O uso de álcool além de diminuir a viscosidade, conferiu estabilidade química ao bio-óleo, além de melhorar as suas propriedades combustíveis. Acima de 40 °C, com uma concentração de álcool de 15% em massa, o bio-óleo é totalmente fluído.

O alto valor da viscosidade do bio-óleo in natura se deve ao uso de ar como agente de fluidização o qual incrementa a concentração da lignina pirolítica e a degradação dos compostos mais leves do bio-óleo. Assim, a substituição do ar de fluidização pelos gases gerados no processo pode agir no sentido de reduzir a viscosidade do bio-óleo.

O problema de estabilidade do bio-óleo pode ser sanado reduzindo o tempo entre a produção e o processamento.

2.3.2 . Gasificação

A tecnologia de gasificação é antiga, tendo sido utilizada pela Alemanha durante a Segunda Guerra Mundial. Mas, enquanto os alemães convertiam carvão mineral em combustível, o desafio atual é fazer o mesmo com a biomassa.

A conversão da biomassa em gás combustível permite a utilização de motores e turbinas em aplicações de geração de energia, seja apenas para o acionamento de cargas ou para a geração de eletricidade, o que constitui um potencial técnico para o acréscimo da eficiência de conversão. A partir da biomassa gasificada, conhecida como gás de síntese, também é possível obter hidrocarbonetos com características semelhantes aos combustíveis líquidos comerciais, como a gasolina e o diesel.

No caso da geração de energia elétrica, a gasificação possibilita implementar o uso da biomassa em turbinas a gás, em cujo ciclo térmico de potência os fluidos de trabalho operam a temperaturas médias bem mais elevadas (acima de 1.200° C) do que nos ciclos convencionais a vapor (abaixo de 600° C), o que reduz as perdas termodinâmicas e maximiza o desempenho.

Nesse sentido, a integração com ciclos combinados de turbinas a gás/turbinas a vapor (*biomass integrated gasification/gas turbine combined cycle* BIG/GT-CC) pode contribuir para o aumento da eficiência da conversão da biomassa em energia elétrica. Estima-se que a eficiência do BIG/GT-CC para geração de energia elétrica possa chegar a 45%, ao passo que nos ciclos de turbina a vapor, esta eficiência se situa entre 15-35% (BNDES e CGEE, 2008). A Figura 2.6. mostra um esquema simplificado do sistema BIG/GT-CC, adaptado de LEAL e LAMÔNICA (2003).

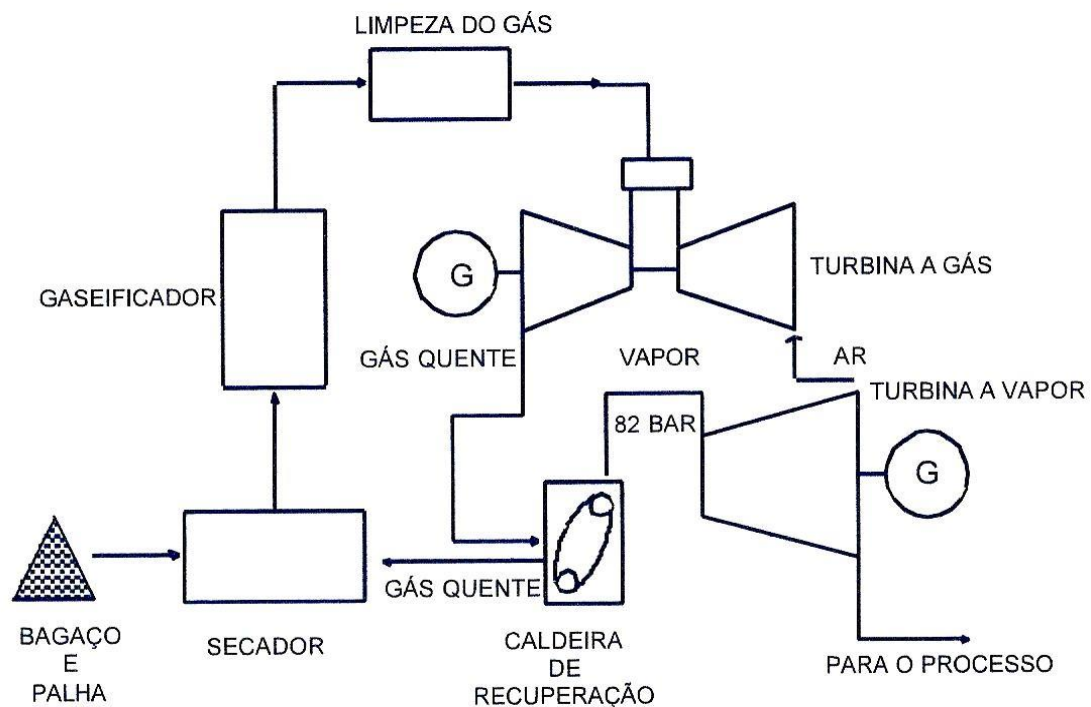


Figura 2. 6.- Esquema simplificado BIG-GT.

Porém, a gasificação da biomassa sólida polidispersa representa um desafio em termos de alimentação de reatores, em questão, relacionada qualidade do gás, conforme já comentado anteriormente. São notórios os casos de abandono de projetos por problemas na alimentação da biomassa

A peletização pode ser uma alternativa para o problema de alimentação na gasificação pressurizada, por aumentar a densidade da biomassa, facilitando sua injeção no reator.

Por outro lado, a qualidade dos gases fica seriamente comprometida para seu uso na geração elétrica quando a biomassa sólida é gaseificada de forma integral. A Tabela 6 mostra os requisitos para uso do gás de síntese como combustível em algumas aplicações.

Tabela 6- Requisitos para uso do gás de síntese em motores de combustão, turbinas a gás e células a combustível.

Impurezas	Unidades	Motores a combustão interna	Turbinas a gás	Células a combustível
Teor de partículas	Mg/Nm ³	<50	<30	-
Dimensões das partículas	µm	<3	<5	-
Teor de alcatrão	Mg/Nm ³	<100	-	<1
Teor de álcalis	Mg/Nm ³	-	<0,25	-
NH ₃	Mg/Nm ³	<55	-	<0,1
H ₂ S	Mg/Nm ³	<1150	-	<1
HCl	ppm	-	-	<1
SiO ₂	Mg/Nm ³	-	-	<1

Fonte: KALTSCHMITT E HARTMANN (2001) citados por LORA e VENTURINI (2008).

Outra questão diz respeito a capacidade dos gasificadores, que deve ser elevada, por questões econômicas e, também, para atender aos volumes de produção das usinas de cana de açúcar. Os gasificadores de leito fixo são normalmente destinados a conversão de pequenas quantidades de biomassa, empregados geralmente em projetos de geração de energia elétrica de pequena capacidade. Os modelos de fluxo ascendente, normalmente produzem gás com alto teor de alcatrão interferindo na operação de motores de combustão interna. Nos modelos de fluxo descendente, o rendimento e a dificuldade de manuseio de alta quantidade de umidade e cinzas são problemas comuns.

Gasificadores de leito fluidizado já são mais adequados à conversão de uma maior quantidade de biomassa, e sistemas com capacidade entre 10 e 20 ton/h já são operacionais. Porém, apresentam problemas de adequação dos gases quanto à sua qualidade. Em função da própria natureza do processo, a quantidade de material particulado arrastada tende a ser maior; um segundo aspecto é que a maior temperatura de saída dos gases permite que os álcalis saiam ainda na fase gasosa, impondo dificuldades adicionais à limpeza.

De acordo com SEABRA (2008), os principais gargalos da gasificação de biomassa são:

- Sistema de alimentação de biomassa polidispersa e de baixa densidade em reatores pressurizados;
- Limpeza de gases;
- Operação prolongada e confiável em escala comercial de gasificadores pressurizados com oxigênio;
- Necessidade de larga escala de produção para atingir viabilidade econômica.

2.3.3. Síntese catalítica

Os combustíveis produzidos a partir de matérias primas lignocelulósicas, são conhecidos como de segunda de geração. Estes podem ser produzidos pela rota termoquímica, através da gasificação da biomassa para produção de gás de síntese, o qual permite a produção de combustíveis líquidos por vários processos catalíticos. Os processos da rota termoquímica, também conhecidos como processos BTL estão em desenvolvimento, existindo ainda uma série de desafios, principalmente relacionados à etapa de gasificação propriamente dita.

Os processos de síntese de combustíveis apresentam uma série de requerimentos com relação a pressão, temperatura no reator, tipo de catalisador e relação H_2/CO no gás de síntese (Tabela 7). A relação H_2/CO pode ser ajustada durante o condicionamento do gás utilizando-se a reação de *shift*.

Tabela 7- Parâmetros e relação de H_2/CO para diferentes processos de síntese.

Processo	Produto	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	Catalisador	Relação H_2/CO
Metano	CH ₄	1 – 30	300 – 400	Ni	3/1
Metanol	CH ₃ OH	50 -100	250 – 280	Cu/ZnO	2/1
F-T	- CH ₂ -	3 -25	190 – 240	Co	2/1
F-T	- CH ₂ -	3 -25	250 – 300	Fe	2/1

Fonte: ZUBERBULHER et al. (2006) citados por LORA e VENTURINI (2008).

Um outro fator importante é a qualidade do gás, no que diz respeito aos teores de H₂S e outros compostos sulfurosos, partículas, alcatrão e compostos alcalinos. A qualidade requerida do gás depende de qual é o processo que utiliza o gás de síntese como matéria-prima. A Tabela 8 apresenta estes requerimentos para o caso da síntese de metanol.

Tabela 8- Parâmetros de qualidade do gás de síntese (síntese de metanol).

Componente	Concentração permissível (mg/Nm ³)
H ₂ S e outros compostos sulfurosos	< 0,1
Partículas	<0,1
Alcatrão	<1
Compostos alcalinos	<0,25

Fonte: ZUBERBULHER et al. (2006), citados por LORA e VENTURINI (2008).

A Figura 2.7 mostra um arranjo para obtenção de combustíveis pela rota termoquímica, passando pela gasificação direta da biomassa, obtenção de gás de síntese e síntese Fischer-Tropsch.

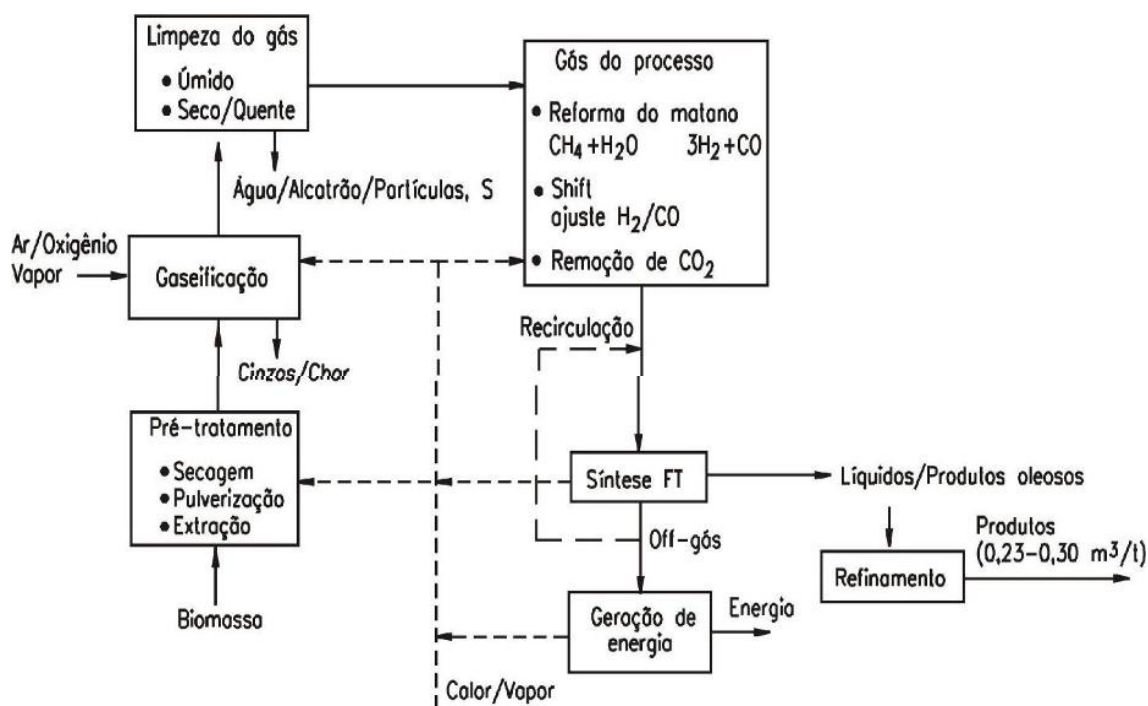


Figura 2.7- Etapas do processo de obtenção de combustíveis pela rota termoquímica, adaptado de JENKINS (2007) citado por LORA e VENTURINI (2008).

De acordo com SEABRA (2008), os principais obstáculos da síntese catalítica de biomassa são:

- Limpeza do gás;
- Catalisadores (aumento da reatividade e redução do custo);
- Escala de plantas de síntese.

A rota termoquímica da BTL que passa pela pirólise, produção de bio-óleo e gaseificação do bio-óleo, seguido da síntese Fischer-Tropsch, apresenta vantagens em termos de alimentação de gaseificadores pressurizados e qualidade do gás para uso na síntese catalítica.

A Figura 2.8. tirada de LORA (2008) mostra a relação do custo de conversão com a escala de plantas de gasificação e síntese. Quanto menor a escala maior é este custo, onde estão incluídos custos de capital, operação e manutenção.

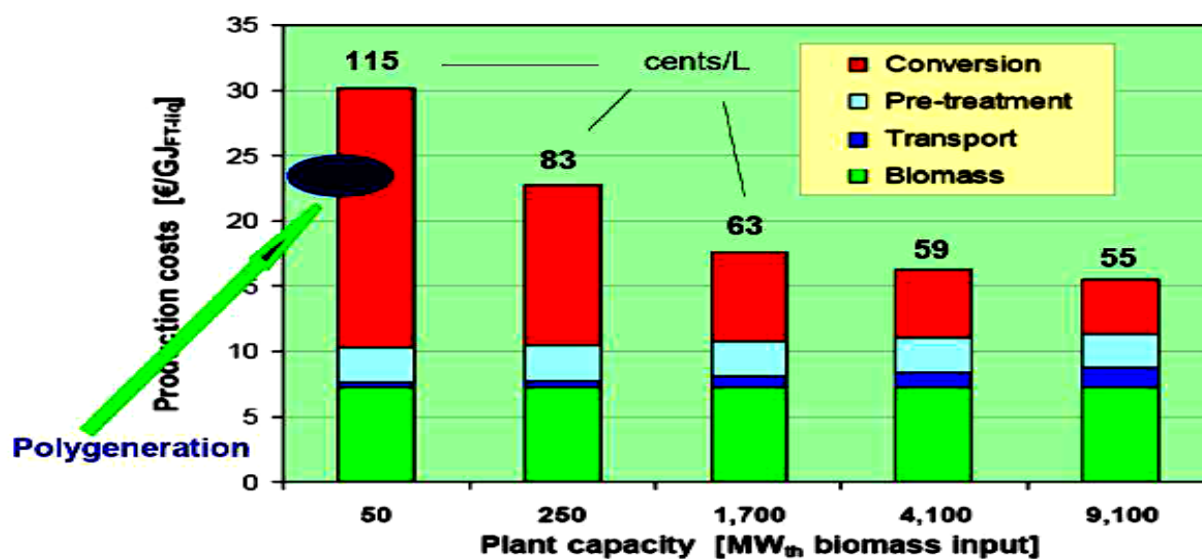


Figura 2.8.- Relação entre escala e custo de plantas de gasificação e síntese

2.4. Condutores tecnológicos

Com base nas necessidades de cada área tecnológica abordada dentro da rota Pirólise rápida/Gasificação/Síntese catalítica, criam-se os condutores tecnológicos para o atendimento dos requisitos críticos “Produtividade” e “Custo”.

A Tabela 9 mostra os condutores tecnológicos para cada uma das áreas tecnológicas no que diz respeito ao requisito crítico “Produtividade”.

Tabela 9- Condutores tecnológicos da meta de aumento da produtividade da rota Pirólise rápida/Gasificação/Síntese catalítica para produção de biocombustíveis sintéticos.

	Atual	5 anos	10 anos	20 anos (Visão)
Produtividade (litros/ha.ano)*	n.e.	1431	2210	2997
Pirólise				
Tempo de residência (s)	8	4	2	2
Rendimento em bio-óleo (% em base mássica)**	25	35	50	56
Rendimento em finos de carvão (% em base mássica)**	30	20	15	15
Eficiência energética de conversão (%)	41	51	63	70
Gasificação e síntese catalítica				
Eficiência energética de conversão (%)	30	40	50	60
Relação H ₂ /CO	1/1	2/1	3/1	3/1
Rendimento (litros de etanol/ton de lama)*	-	369	482	588

n.e.: não existente

(*) Equivalência em litros de etanol (PCI = 21,2 MJ/litro)

(**) massa de produto/massa líquida orgânica livre de umidade e cinzas

A automação do processo de pirólise, a redução do consumo de biomassa para fornecimento de calor ao reator e a melhoria do sistema de recuperação de bio-óleo, permitirão aumentar o rendimento total em produtos,

de 55% atualmente, para 71% num prazo de 20 anos. Com isto, a eficiência energética de conversão do processo de pirólise, que hoje é de 41%, aumentará para 70%. Os dados atuais são baseados em testes com uma planta piloto. Os rendimentos de bio-óleo tomam como referência a massa orgânica disponível para a pirólise (massa líquida), a qual despreza o teor de umidade e cinzas, além da biomassa consumida para fornecimento de calor ao reator.

A Tabela 10 mostra os condutores tecnológicos para cada área tecnológica, visando o atendimento da meta referente ao requisito “Custo”, que prevê a redução do custo atual, estimado em US\$ 1,09 por litro de combustível sintético, para US\$ 0,28 num prazo de 20 anos. Esta redução é fruto do aumento de eficiência dos processos, além do atendimento da escala econômica para produção de biocombustíveis sintéticos.

A escala de planta de pirólise (ton de biomassa/h) considera a massa bruta alimentada, com teor de umidade e cinzas.

Tabela 10- Condutores tecnológicos da meta de redução de custos da rota Pirólise/Gaseificação/Síntese catalítica para produção de biocombustíveis sintéticos.

	Atual	5 anos	10 anos	20 anos (Visão)
Custo (US\$/litro)	1,09	0,67	0,35	0,28
Pirólise				
Escala de planta de pirólise (ton de biomassa/h)	0,2	5	7	10
Produção por planta (ton de lama/h)	0,073	2,74	4,66	7,44
Custo (US\$/ton de lama)	150	80	50	42
Gaseificação e síntese catalítica				
Escala de plantas de gaseificação (ton de lama/h)	n.e.	30	175	450
Plantas de gaseificação e síntese/plantas de pirólise	n.e.	1/19	1/38	1/60
Escala de síntese (1000 litros de combustível/h)	n.e.	10,38	97,48	326,25

Estudos sobre a gasificação de bio-óleo atualmente estão sendo encaminhados em unidades de bancada e piloto. Acredita-se que em 5 anos será possível gasificar também o carvão misturado com o bio-óleo em forma de lama. A projeção acima realizada para a pirólise considera um módulo de pirólise que pode chegar até uma escala de alimentação de biomassa de 10 ton/h. A distribuição de vários módulos de pirólise para a produção de lama permitirá atingir a escala econômica para a produção de combustíveis sintéticos, que é de 5 milhões de tonelada/ano de biomassa, aproximadamente 600 ton/h de biomassa, cerca de 450 to/h de lama, correspondendo a 60 unidades de pirólise com uma capacidade de produção de 7,44 ton/hora de lama.

2.5. Capacidades científicas e tecnologias atuais

O Estado de São Paulo possui várias instituições capacitadas. A UNICAMP, nos últimos 20 anos vem realizando estudos na área de biomassa, gasificação e pirólise, possuindo, inclusive, uma planta piloto de pirólise rápida. O IPT tem realizado pesquisas na área de conversão de biomassa em combustível, através da rota passando pela gasificação e síntese catalítica.

As pesquisas voltadas ao estabelecimento da rota, que está sendo proposta poderão ser realizadas, através da cooperação de universidades e centros de pesquisa (UNIFEI, IPT, UNICAMP e UFPA) com fabricantes (Termoquip) e empresas interessadas (Bioware, Petrobrás, Oxiteno, BRASKEM, etc.). É possível também a implementação de projetos conjuntos em centros de pesquisa no exterior.

Na área de pirólise rápida a Empresa Bioware em cooperação com Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI/UNICAMP) vem desenvolvendo pesquisas relacionadas à pirólise da palha de cana e da cana integral. Os objetivos, destas pesquisas tem sido o aumento do rendimento de bio-óleo e a melhoria das suas características físicas e químicas, principalmente, no que diz respeito a sua estabilidade. A questão de aumento de escala de plantas de pirólise tem sido outro foco de trabalho.

Na área de catalisadores, o Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST/UNIFEI) junto com a Empresa Termoquip testaram um sistema de limpeza catalítica (base Ni) acoplado a um gaseificador de fluxo cruzado. No Brasil outras universidades também possuem grupos de pesquisa com alto nível no desenvolvimento de catalisadores. Dentre deles o CENPES-PETROBRAS, o Grupo de catálise (DEQ/UFRN), o Grupo de Estudos em cinética e catálise (IQ/UFBA), o Grupo de Peneiras moleculares (IQ/UNICAMP), além de outros.

2.6. Lacunas e barreiras

O custo da biomassa se mostra um ponto importante, devendo ser trabalhado, pois afeta diretamente o custo dos produtos de todas as tecnologias propostas para o aproveitamento da biomassa lignocelulósica. Conforme estudos realizados, no cenário atual, um valor acima de US\$ 50 por tonelada inviabiliza o emprego da biomassa em tecnologias de termoconversão. O custo da tonelada de palha de cana recolhida, transportada até 20 km de distância pode chegar até 30 dólares, ao passo que uma tonelada de colmos de cana transportados a mesma distância não sai por mais de US\$ 20 por tonelada.

O custo atual do bio-óleo, com base no custo de produção apurado em testes com planta piloto, considerando o valor da palha de cana de US\$ 30,00/ton com 15% de umidade e 11% de cinzas, é de US\$ 150 por tonelada (0,508 tep), considerando a venda dos finos de carvão produzidos a US\$ 150 por tonelada. Ao passo que o custo de uma tonelada de etanol (0,494 tep) está por volta de US\$ 300. Já uma tonelada de petróleo (6,3 barris) está por volta de US\$ 225, considerando o valor de US\$ 30 o barril. Mais de 70% do custo de produção do bio-óleo é representado pelo custo da matéria prima.

Uma maneira de reduzir estes custos pode estar na colheita integral da cana com a implantação da limpeza a seco. Onde as plantas de pirólise poderão ser instalações anexas às usinas, valendo-se de toda a estrutura existente para redução de custos nas etapas de colheita e acondicionamento

2.7. Conclusões

A rota termoquímica proposta neste Roadmap é uma opção interessante para aumentar a eficiência de aproveitamento da energia primária da cana de açúcar, com a conversão da palha e do bagaço em combustíveis.

As tecnologias de termoconversão, como a pirólise rápida e a gasificação já são existentes. Porém, existe a necessidade de adequar estas tecnologias a conversão de biomassa. Pesquisas voltadas a resolver problemas de operação com biomassa e aumento de rendimento e eficiência são necessários. A eficiência destas tecnologias com a utilização de biomassa, com base em testes piloto, ainda é baixa.

As tecnologias de síntese catalítica já são comerciais e utilizadas na conversão de gás natural em gasolina sintética. Para a aplicação na rota de conversão de biomassa, existe a necessidade de melhorar a qualidade do gás, no que diz respeito a pureza e as concentrações de H_2 e CO . A questão de escala se mostra uma das principais barreiras, quando o assunto é o custo de produção.

É necessária a criação de um mercado para os produtos da pirólise rápida, para que seja viabilizada uma escala de produção capaz de suprir a demanda mínima necessária para a produção de biocombustíveis sintéticos. Para isto são necessárias pesquisas voltadas ao estudo para aplicação dos produtos gerados.

Bibliografia consultada

BIOWARE. Material informativo BIOWARE (catálogo). (s.d.).

BNDES - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social; CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Sugarcane-based bioethanol: energy for sustainable development. Rio de Janeiro: BNDES. 304 p. 2008.

BRIDGEWATER, A.V. Towards the bio-refinery fast pyrolysis of biomass. Renewable Energy World, Jan.-Feb., 2001.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. Álcool brasileiro apresenta desperdício energético por falta de tecnologia. Disponível em <http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=010115070904>. Acesso em: 2 abr. 2009.

LEAL, M. R. L. V., LAMÔNICA, H. M. Gaseificação: Chegou a Hora ?. In: 2º Seminário Internacional de Cana de Açúcar, 2003, Ribeirão Preto.

LEAL, M. R L.V. Cana de açúcar como fonte de energia. Energia na indústria de açúcar e álcool, 2007, Pirassununga. Disponível em <http://www.fzea.usp.br/green/GERA/7%20-%20Regis%20Lima%20Verde%20Leal.ppt>. Acesso em: 3 ago. 2009.

LORA, E. E. S. Gaseificação de biomassa. Workshop de Tecnologias BTL (Biomass to Liquid), 2008, São Paulo. Disponível em http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/position_paper_painel3_electo.pdf. Acesso em: 3 ago. 2009.

LORA,E.E.S.Gaseificação de biomassa. Workshop de Tecnologias BTL (Biomass to Liquid), 2008, São Paulo. Disponível em http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/apresentacao_wks_btl_painel3_electo.pdf. Acesso em: 3 ago. 2009.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. Termoquímica para combustíveis. XIII Encontro Nacional de Metodologias de Laboratório (XIII MET). 2008. Disponível em <http://xiiimet.cpatu.embrapa.br/arquivos/Termoquimica%20para%20Biocombustiveis%20-%20P1.pdf>. Acesso em: 9 jul. 2009.

LUENGO, C. A.; FELFI, F. F.; BEZZONI, G. Pirólise e torrefação de biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. e OLIVAREZ GÓMEZ, E. Biomassa para energia. Editora da Unicamp. Campinas, SP. 2008. Cap. 10, p. 333 a 352.

SEABRA, J. E. A. Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica. Unicamp. 2008.

UDOP - União dos Produtores de Bionergia. Disponível em: www.udop.com.br. Acesso em: 22 set. 2009.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-açúcar. Disponível em: www.portalunica.com.br. Acesso em: 22 set. 2009.