

# ESTUDO DE VIABILIDADE DE COGERAÇÃO DE UMA UNIDADE DE EXTRAÇÃO DE ÓLEO DE PALMA INTEGRADA A UMA USINA DE BIODIESEL

**Bruno Bocchi**

bocchisolar@yahoo.com.br

**Silvio de Oliveira Junior**

silvio.oliveira@poli.usp.br

*Resumo. Este trabalho consiste na elaboração de um estudo de viabilidade de uma planta de cogeração de uma unidade de extração de óleo de palma integrada a uma usina de biodiesel com capacidade de produção de 50.000 toneladas/ano. Os combustíveis utilizados são os resíduos do dendê, resultantes da extração do óleo de palma, e a glicerina, resultante do processo de transesterificação. Foi verificado economicamente que a planta integrada é viável comparando-se com o modelo atual, em que as usinas de extração e de biodiesel se encontram fisicamente separadas. A exportação de energia elétrica é viável com as condições atuais de mercado, mas dependendo do preço da eletricidade, da taxa de juros e do custo da biomassa perderia a viabilidade. Por meio de uma análise exergética da planta, obtiveram-se os custos operacionais de produção de vapor de baixa pressão e energia elétrica e sua influência no preço do óleo vegetal e do preço do biodiesel. Por meio de análise do ciclo de produção do biodiesel a partir do óleo de palma, quantificou-se a redução das emissões de gases geradores do efeito estufa com a cogeração.*

**Palavras chave:** cogeração, biodiesel, óleo de palma, glicerina, glicerol

## 1. Introdução

Com o presente estudo, visa-se demonstrar a viabilidade técnico-econômica de um sistema de cogeração aplicado a um novo modelo de planta de produção de biodiesel a partir do óleo de palma, no qual a unidade de extração do óleo vegetal está integrada à usina de biodiesel.

O que motivou este trabalho é a possibilidade de redução de custos operacionais, de exportação de eletricidade para a rede e de destinação final para a glicerina pela sua combustão, reduzindo os impactos ambientais da produção de biodiesel. Outra motivação é mostrar como o dendê pode ser uma alternativa viável para a produção deste combustível renovável.

## 2. Produção de óleo de palma atual

No Brasil, em 2006, a produção de óleo de palma ficou na ordem de 140 mil toneladas. Somente o Grupo Agropalma é responsável por mais de 95% da produção, com uma área cultivada de 32.000 ha e com uma área de reservas florestais de 50.000 ha. (Brito, 2006)

Segundo estimativas, o Brasil possui aproximadamente 70 milhões de hectares disponíveis para o plantio da palma (Lima, 2000). Esta quantidade de terras disponíveis é um fator que possibilita a expansão da produção de biodiesel a partir do dendê. Além disso, a sua produtividade é muito elevada em relação a outras oleaginosas com uma produção de 5 t-óleo/ha.ano enquanto a maior parte das oleagionas produz menos que 1 t-óleo/ha.ano. (Monteiro et all, 2005)

### 2.1. Unidades de extração

Segundo Brito (2006), inicialmente, os cachos ou comumente chamados de FFB (Fresh Fruit Bunch) são colhidos nas plantações de palma e são transportados até a unidade de extração. Ali, os cachos são aquecidos com vapor a uma temperatura de aproximadamente 135°C, por aproximadamente uma hora. Este seria o principal consumo de vapor do processo.

Depois os frutos passam pelo debulhador, onde ocorre a separação dos frutos e cachos. Os cachos vazios são os primeiro resíduos da extração do óleo de palma e recebem o nome de buchas ou EFB (Empty Fruit Bunch). Depois, os frutos são prensados para a retirada do óleo cru. Este então é transferido para o desaerador, onde são retiradas as partículas pesadas, e depois ocorre uma clarificação e filtração para a remoção de umidade e de sujeira, obtendo-se o óleo de palma bruto. Os resíduos desses processos são a fibra, as nozes e impurezas diversas. As nozes são transferidas para um moinho o qual separa as amêndoas das cascas. Das amêndoas é extraído o óleo de palmiste sendo as cascas o resíduo desta etapa.

Atualmente, a fibra e as cascas são utilizadas como combustível no processo de geração de vapor. Turbinas de contrapressão são empregadas para geração de energia elétrica, não havendo exportação para a rede, e o vapor que deixa as turbinas é utilizado, principalmente, no processo de aquecimento do FFB. As buchas e as cascas são utilizadas

como adubo e os efluentes líquidos são utilizados na fertirrigação. Os seguintes valores foram obtidos em relação à porcentagem mássica e ao poder calorífico inferior (PCI) de cada componente, ao consumo de vapor e de eletricidade.

Tabela 1. Valores relevantes para a cogeração (Arrieta et al, 2007, e Husain et al, 2003)

Fibra (PCI de 18,6-19,2 MJ/kg)	% FFB	11,6-15
Casca (PCI de 20,8-21,4 MJ/kg)	% FFB	5-7,4
EFB (PCI de 8,2 MJ/kg)	% FFB	17,7-30,1
Óleo vegetal	% FFB	18,8-21
Consumo de vapor a 135 °C	kg/t-FFB	550-650
Consumo de eletricidade	kWh/t-FFB	17-38

### 3. Produção de biodiesel

A produção comercial de biodiesel pode se dar atualmente ou por meio de uma esterificação ou por meio de um transesterificação. Outra vertente é a escolha do álcool a ser utilizado na produção: o metanol ou o etanol. No presente estudo, será estudada a produção pela via do metanol já que essa hoje é a opção mais barata, apesar de não ser a mais ambientalmente recomendável, já que o metanol é produzido a partir do gás natural, uma fonte não renovável de energia.

A esterificação utiliza os ácidos graxos livres, resíduos do processo de fabricação do óleo vegetal, sendo sua produção muito pequena, enquanto a transesterificação utiliza o próprio óleo vegetal, sendo esta a reação mais difundida atualmente para a produção de biodiesel, gerando como resíduo a glicerina. Em uma usina de biodiesel, segundo Talens et al (2007), consomem-se 22 kWh de eletricidade e 577 kg de vapor (a uma temperatura de 120 °C) para cada tonelada de biodiesel produzido. Atualmente, utilizam-se caldeiras elétricas ou caldeiras alimentadas com combustíveis diversos para a geração deste vapor.

#### 3.1. Glicerina

Deseja-se buscar uma destinação final para a glicerina já que a demanda atual da indústria de cosméticos será muito menor do que a oferta gerada pelas usinas de biodiesel com a crescente adição de biodiesel ao diesel prevista para ocorrer nos próximos anos. Além disso, existe um custo grande na purificação da glicerina para que ela possa ser utilizada pela indústria de cosméticos. Com base nessa constatação, a solução analisada por esse estudo é a queima da glicerina gerando calor para a cogeração, cujo PCI é de aproximadamente 19,0 MJ/kg. A maior dificuldade é possibilitar a sua queima, já que possui um grande poder incrustante e baixa inflamabilidade, sendo a sua temperatura de auto-ignição por volta de 370 °C (Metzger, 2007). Outro problema em queimar a glicerina é a possibilidade de gerar como produto da combustão a acroleína, gerada a partir da decomposição térmica da glicerina por volta de 280 °C, que é abaixo da temperatura de auto-ignição (Metzger). A acroleína pode trazer riscos para a saúde em concentrações inferiores a 0,09 ppm (EPA, 2003).

Experimentos realizados por Metzger no desenvolvimento de um queimador para a glicerina mostraram que, quando a combustão ocorre em temperaturas elevadas, a acroleína não é gerada e os níveis de emissões de CO, NO<sub>x</sub> e aldeídos são muito próximos daqueles quando se queimam hidrocarbonetos comuns como querosene.

Atualmente, existem equipamentos de pequeno porte para a queima do glicerol, misturado com 10-12% de biodiesel, como o fabricado pela King Built (2008) que produzem água quente. A questão é que esses equipamentos são de batelada e voltados para a queima de pequenas quantidades de glicerina. Cogitou-se o uso de caldeiras em leito fluidizado para a queima da glicerina, que já foram desenvolvidas em escala piloto pela Energy Systems & Solutions (2007), mas devido ao alto custo de investimento, 40% superior a de uma caldeira comum para uma mesma vazão de vapor e pressão, e devido ao fato desta concepção ainda estar em caráter experimental, foi abandonada por este estudo.

Pela pouca quantidade de glicerina em massa produzida em relação à quantidade de biomassa total, a melhor maneira de queima da glicerina é sua mistura com a biomassa no leito fixo. Como o leito atinge temperaturas bem elevadas, não haveria risco de geração de acroleína na sua combustão. Este modelo de queima foi implementado com sucesso pela Big Frango, empresa de avicultura que produz biodiesel a partir da gordura de frango, gerando uma economia de 10% no consumo de lenha das suas caldeiras.

### 4. Unidade integrada de biodiesel

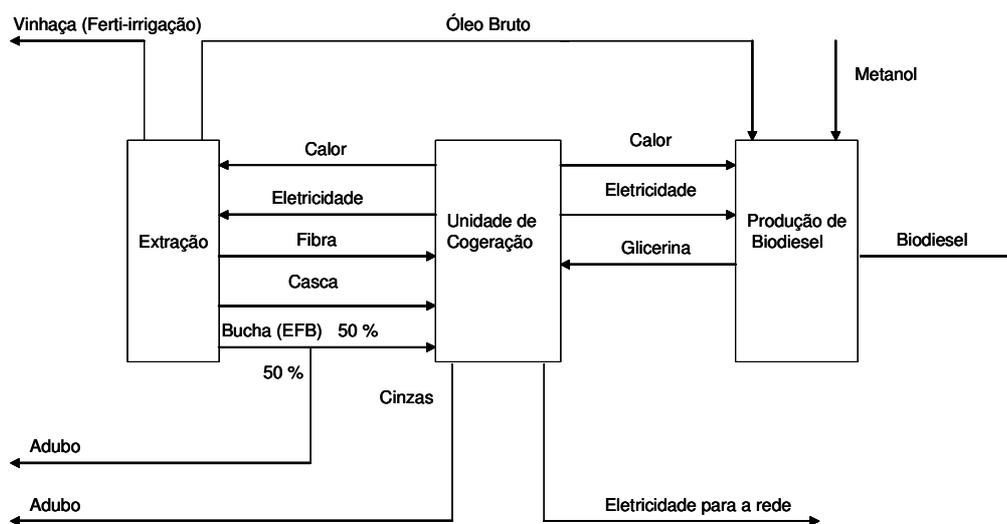
Com a obrigatoriedade 5% em 2013, aumentar-se-á a demanda por este combustível de maneira abrupta, necessitando-se a construção de novas plantas para suprir este consumo. Estas deverão ser mais eficientes com intuito de se obter rendimentos com a exportação de energia elétrica. Além disso, a produção de óleo vegetal deverá ser direcionada diretamente para a fabricação de biodiesel, sendo utilizado o processo de transesterificação. A Agrenco, empresa envolvida na produção de óleo de soja, está construindo uma planta de esmagamento de soja integrada a uma

usina de biodiesel com capacidade de 160.000 toneladas/ano no Mato Grosso e que utiliza a cogeração para cobrir sua demanda energética e exportar energia elétrica. A tendência é que os novos projetos utilizem a cogeração para se aumentarem os lucros com a exportação de energia elétrica para a rede e integrem a extração do óleo com a fabricação de biodiesel.

#### 4.1. Estudo de caso

A usina de biodiesel integrada a ser analisada tem uma capacidade de produção de biodiesel de 50.000 toneladas/ano. Existe uma limitação no tamanho de uma futura usina, já que a área de palmares ao redor para a produção de óleo não pode ser muito grande para suprir esta produção de biodiesel. Para uma usina com esta capacidade, estima-se uma área de palmares de no máximo 17 mil hectares, supondo uma produção de 3.000 kg de óleo vegetal por hectare. Na Figura (1), pode se observar como se dará a cogeração.

Figura 1. Planta integrada de Biodiesel



Para o estudo da cogeração, foram escolhidas as condições das turbinas de extração-condensação fornecidas pela TGM (2008) (vapor super aquecido a 45 bar e a 450 °C), a qual é a maior fabricante de turbinas a vapor de pequeno porte para o mercado brasileiro. Optou-se por se utilizar apenas uma extração a 120 °C, já que as temperaturas dos consumos de vapor da usina de biodiesel e da unidade de extração são muito próximas e uma diminuição da temperatura do vapor não afetaria o processo de produção na extração de óleo de dendê. A relação entre a massa de FFB e a de biodiesel produzida é de aproximadamente 18,8 % (Husain et all, 2003), supondo que todo óleo vegetal seja utilizado pela usina de biodiesel, enquanto a relação entre a massa de glicerina produzida e a de biodiesel é de 19% e a relação entre massa de biodiesel e de óleo vegetal é de 1:1 (Talens et all, 2007). Além disso, foram adotados os seguintes valores para a cogeração:

Fator de Capacidade = 80% (Prasertsan et all, 1996)

Eficiência da caldeira = 85%

Temperatura máxima da caldeira = 450 °C

Pressão da caldeira = 46,3 bar

Perda de pressão até a entrada da turbina = 3%

Eficiência isentrópica da turbina = 85%

Pressão de condensação = 0,1 bar (TGM, 2008)

Eficiência do gerador = 98% (Epple, 2006)

Eficiência da turbina (perdas no mancais) = 99% (Epple, 2006)

Eficiência de auto-consumo = 98% (Epple, 2006)

Usando-se os valores acima, os valores intermediários de PCI e de porcentagens mássicas da Tab. (1) combinados com a vazão mássica e PCI da glicerina, os consumos de vapor e de eletricidade na planta de biodiesel e na unidade de extração, chegou-se aos seguintes resultados principais expostos na tabela a seguir.

Tabela 2. Potência gerada e consumida

Potência gerada (kW)		Potência consumida (kW)	
Q, Fibra	26.897	W, extração	968
Q, Casca	13.791	W, biodiesel	157
Q, EFB	10.323	W, exportação	11.790
Q, Glicerina	7.155	Q, extração	14.797
Q, Total	58.166	Q, biodiesel	2.519

Baseando-se nos dados da Tab. (2), obteve-se um fator de utilização igual 0,5197. Pode-se observar que, com o uso da cogeração com turbinas de extração-condensação, houve exportação de energia elétrica (11.790 kW) conforme previsto. Esta energia é de origem renovável e disponível durante o ano todo, já que a produção de dendê é pouco sazonal. Deve-se salientar que a exportação não ocorre nas unidades de extração do óleo atuais pela presença de turbinas de contra-pressão e pelo pouco aproveitamento da biomassa. A destinação final da glicerina pela sua combustão se mostrou adequada ao processo, já que sua contribuição mássica e energética é pequena em comparação aos outros combustíveis. O excesso de glicerina poderia provocar problemas de operação na caldeira pela baixa inflamabilidade.

Com a cogeração toda demanda elétrica e térmica da planta de biodiesel é suprida sem gastos adicionais com combustíveis ou energia elétrica da rede. Isto acarretará em uma diminuição dos custos operacionais da planta como um todo, além de se obterem rendimentos com a exportação da energia elétrica. No tópico a seguir, verificar-se-á a viabilidade econômica do empreendimento.

## 5. Estudo de viabilidade econômica

Com o intuito de se avaliar a viabilidade econômica da cogeração da usina integrada de biodiesel, foram estipuladas quais seriam as alternativas mais exequíveis. Inicialmente foi estipulada uma linha de base, que possui as seguintes características, que correspondem ao estado atual das usinas de extração e de biodiesel.

Linha de base - unidade de extração de óleo de palma e usina de biodiesel fisicamente separadas:

Na usina de extração, o ciclo é composto por uma turbina a vapor de contrapressão de 300 °C e 22,7 bar alimentada por uma caldeira de 9,8 t/h utilizando a fibra do dendê como combustível. O vapor de escape a 2,5 bar é utilizado no processo de extração. Além disso, uma caldeira a vapor de 2,5 bar com vazão 15,4 t/h é utilizada para suprir a demanda adicional de vapor. Enquanto isso, a usina de biodiesel utiliza eletricidade da rede e possui uma caldeira a vapor de 2 bar com vazão de 5 t/h alimentada com óleo diesel com custo de R\$2,47/kg (R\$ 2,10/litro). A utilização do óleo diesel na queima se deve ao fato desse ser mais barato do que o biodiesel, cujo preço está por volta de R\$ 3,02/kg (R\$2,60/litro) além de possuir um maior PCI. A glicerina não seria utilizada na caldeira pela necessidade de queima em leito fluidizado ou em queimadores especiais, tecnologia ainda em estágio inicial de desenvolvimento. As três alternativas à linha de base estão expostas a seguir:

1ª Opção - unidade de extração de óleo de palma e usina de biodiesel integradas:

O ciclo é composto por turbina a vapor de contrapressão de 300 °C e 22,7 bar alimentada por uma caldeira de 11,4 t/h utilizando a fibra do dendê como combustível. O vapor de escape a 2,5 bar é utilizado nos processos de extração e de fabricação do biodiesel. Além disso, uma caldeira a vapor de 2,5 bar com vazão de 18,2 t/h deve ser utilizada. A glicerina não seria utilizada nas caldeiras pelo mesmo motivo da linha de base.

2ª Opção - unidade de extração de óleo de palma e usina de biodiesel fisicamente separadas com exportação de energia de elétrica:

Na usina de extração, o ciclo é composto por uma turbina a vapor de extração-condensação de 450 °C e 45 bar alimentada por uma caldeira de 52,2 t/h alimentada com a biomassa do dendê (fibra, casca e EFB). O vapor de extração a 2 bar é utilizado no processo. Enquanto isso, a usina de biodiesel possui uma caldeira a vapor de 2 bar elétrica com vazão de 5 t/h e utiliza eletricidade exportada pela usina de extração, que é transmitida pela rede. O uso da eletricidade nessas caldeiras se deve ao baixo preço de venda (R\$150/MWh) já que esta seria produzida pela própria empresa, o que a torna economicamente viável em relação ao diesel. Do ponto de vista energético, não é recomendável o emprego de eletricidade já que sua geração e utilização são muito mais ineficientes do que a utilização do diesel. A glicerina não seria utilizada nas caldeiras pelo mesmo motivo da linha de base.

3ª Opção - Unidade de extração de óleo de palma e usina de biodiesel integradas fisicamente separadas com exportação de energia de elétrica:

Na usina de extração, o ciclo é composto por uma turbina a vapor de extração-condensação de 450 °C e 45 bar alimentada por uma caldeira de 59,7 t/h utilizando a biomassa do dendê e a glicerina como combustíveis. O vapor de

extração a 2 bar é utilizado nos processos. A energia é exportada para a rede. A glicerina seria utilizada nas caldeiras já que a sua vazão mássica seria muito inferior à vazão da biomassa total.

## 5.1 Análise Financeira

Para se poderem comparar e avaliar os benefícios financeiros que a cogeração traria inicialmente, foram adotadas algumas premissas:

- não há uma diminuição de custos operacionais com a integração das duas plantas. Existe uma diminuição de custos, mas por serem difíceis de serem avaliados, foram desprezados.
- não há custos de investimentos em linhas de transmissão. Supõe-se que a usina esteja perto de uma linha de transmissão que suporte esta oferta de energia.
- a taxa mínima de atratividade (TMA) desejada deve ser maior que 15% para um período 20 anos. 90% do investimento é financiado por meio de um empréstimo, cujo financiamento é adquirido junto ao BNDES com juros de 5,5% ao ano com início dos pagamentos no primeiro ano de operação. Estas condições foram utilizadas para o leilão de energia pela Empresa de Pesquisa Energética (2008) para o 1º leilão de energia de reserva de biomassa.
- tempo de construção de dois anos sendo o investimento do empreendedor dividido igualmente entre os dois anos.
- custo de condensador equivale em média a 20% do custo de investimento para turbinas de extração-condensação (Sala Lizarraga, 1999)
- foram pesquisados os custos de investimentos na aquisição de turbinas e geradores de vapor. Com base nesses custos somados aos custos com condensador (nos casos com turbina de extração-condensação), foi adotado 20% desse valor para os gastos com outros equipamentos. Sobre esses valores somados, foi adotado o percentual de 10% para os custos de projeto e de implementação. Esses dados foram estimados a partir de dados obtidos para a cogeração de usinas de açúcar e álcool da Revista Engenharia (2007).
- custos de operação da cogeração são iguais a 10% do custo de investimento, enquanto esses mesmos custos são iguais a 5% para operação de sistema com somente aquecimento de vapor de baixa pressão. Esse modelo é conservador para verificar a viabilidade da cogeração.
- preço da eletricidade de biomassa de R\$150/MWh conforme último leilão de energia de reserva da Empresa de Pesquisa Energética e do diesel de R\$2,47/kg. O preço de compra da eletricidade da rede é de R\$ 300/MWh.
- foram incluídos impostos sobre o faturamento (PIS e COFINS) de 9,25 % e impostos sobre o lucro (IR e CSL) de 34,0%.

A Tabela (3) abaixo sintetiza os investimentos, custos e receitas das opções:

Tabela 3. Comparação entre as alternativas

Opção	Linha de Base	1ª Opção	2ª Opção	3ª Opção
Investimento total (R\$)	6.125.122	6.068.475	32.239.187	37.047.078
Custo operacional anual (R\$)	5.235.250	606.847	6.039.634	3.704.708
Receita operacional anual (R\$)	-	-	10.938.787	12.393.648

Inicialmente comparou-se a linha de base com a 1ª Opção para se avaliar a viabilidade desta. Observa-se que o volume de investimentos necessários entre as duas opções é muito próximo e a economia muito elevada, sendo o investimento viável. Isto se deve ao fato do diesel ser um produto que possui um preço muito alto.

Iniciou-se, então, a comparação entre as próximas alternativas com base no método da Taxa de Retorno Incremental (TRI). Este método analisa a taxa interna de retorno levando em consideração o investimento adicional que deve ser feito para se conseguir uma diminuição de custos ou um aumento de receitas adicionais, e é extremamente eficaz para se avaliarem alternativas que possuem volumes de investimentos diferentes. Na Tabela (4), obtiveram-se as respostas com o uso da TRI. Para uma taxa de juros de 5,5% e eletricidade a R\$ 150,00/MWh, a 3ª opção é a mais vantajosa.

Atualmente não existe valor comercial para os resíduos do dendê (Yacob, 2008) e para a glicerina. Com o aumento da demanda com o uso como combustível, como ração animal ou como fertilizantes, pode haver uma precificação no futuro. Para se analisar este aspecto, foi feita uma análise de sensibilidade de preço da biomassa e da glicerina.

O preço da biomassa e da glicerina foi estipulado em uma base energética, tomando como referência o bagaço de cana, já que este é utilizado na maioria das vezes como combustível de caldeiras. O bagaço de cana custa atualmente R\$ 17,50/t (EPE, 2008), com um PCI de 7.673 kJ/kg. Isto se traduz em  $2,282 \cdot 10^{-6}$  R\$/kJ. Na Tabela (4), mostra-se que a 3ª Opção continua sendo a mais vantajosa, com as condições atuais de mercado.

Tabela 4. Análise de sensibilidade

		Preço da eletricidade (R\$/MWh)				Preço da eletricidade com biomassa (R\$/MWh)			
		<108	108<p<129	129<p<156	>156	<134	134<p<155	155<p<181	>181
Taxa de juros	5,5%	1ª Opção	3ª Opção	3ª Opção	3ª Opção	1ª Opção	3ª Opção	3ª Opção	3ª Opção
	10%	1ª Opção	1ª Opção	3ª Opção	3ª Opção	1ª Opção	1ª Opção	3ª Opção	3ª Opção
	15%	1ª Opção	1ª Opção	1ª Opção	3ª Opção	1ª Opção	1ª Opção	1ª Opção	3ª Opção

Pode-se perceber também que, em diferentes condições de taxas de juros, preços de eletricidade e preços da biomassa, a integração das usinas é a alternativa mais viável. Dependendo das condições das variáveis, a exportação de energia elétrica pode ou não ser considerada viável.

## 6. Análise exergética de custos

Para se realizar uma análise termoeconômica dos custos operacionais de produção de vapor de baixa pressão e de eletricidade e se obter o impacto desses na produção de óleo de palma, foram realizados balanços de custos exergoeconômicos da usina integrada com exportação de eletricidade.

### 6.1. Exergia dos vapores de alta e baixa pressão

Para a obtenção da exergia de um fluxo de vapor, usa-se a definição de exergia física, desprezando-se os termos relacionados à velocidade e força gravitacional. Os estados de referência utilizados são  $T_o = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $p_o = 101,3 \text{ kPa}$ .

$$b_{va} = h_{va} - h_o - T_o \cdot (s_{va} - s_o) \quad (1)$$

$$\dot{B}_{va} = \dot{m}_{vapor} \cdot b_{va} \quad (2)$$

### 6.2. Custos da caldeira e da turbina

Foram utilizados os custos de investimento da caldeira e da turbina do estudo de viabilidade. Os custos dos outros equipamentos e de projeto foram divididos proporcionalmente aos valores da turbina e da caldeira. O custo do condensador foi englobado no custo da turbina.

### 6.3 Custos e exergia dos combustíveis

Para a obtenção dos valores de exergia química da biomassa do dendê e da glicerina, foram utilizadas respectivamente as seguintes equações obtidas por Szargut et al (1988) que expressam a relação entre o PCI e a exergia química.

$$\beta = \frac{1,0412 + 0,216 \cdot \frac{Z_{H_2}}{Z_C} - 0,2499 \cdot \frac{Z_{O_2}}{Z_C} \cdot \left[ 1 + 0,7884 \cdot \frac{Z_{H_2}}{Z_C} \right] - 0,045 \cdot \frac{Z_{N_2}}{Z_C}}{1 - 0,3035 \cdot \frac{Z_{O_2}}{Z_C}} \quad (3)$$

$$\beta_{Glicerina} = \frac{1,04414 + 0,0177 \cdot \frac{H_{Glicerina}}{C_{Glicerina}} - 0,3328 \cdot \frac{O_{Glicerina}}{C_{Glicerina}} \cdot \left[ 1 + 0,0537 \cdot \frac{H_{Glicerina}}{C_{Glicerina}} \right]}{1 - 0,4021 \cdot \frac{O_{Glicerina}}{C_{Glicerina}}} \quad (4)$$

Para a biomassa, utilizam-se as relações mássicas para o cálculo do beta entre cada um dos seus componentes, enquanto para a glicerina utilizam-se relações molares. Para a obtenção das relações mássicas da fibra do dendê foram utilizadas análises disponibilizadas pelo Laboratório de Termodinâmica da Universidade Nacional de Medellín, Colômbia (Tab. (5)). Para a casca e para o EFB foram utilizados valores calculados para a casca de bananas obtidos no mesmo laboratório. Para a glicerina foram utilizadas as relações com base na fórmula química:  $C_3H_5(OH)_3$ . Assim chegou-se aos betas de 1,127 para a fibra, 1,06 para a casca e para o EFB, e 1,189 para glicerina. Além disso, em virtude da biomassa conter umidade, esses valores devem ser corrigidos pela seguinte equação, aplicável a qualquer material proveniente da biomassa:

$$b_{EFB} = \beta \cdot (PCI_{EFB} + L_{agua} \cdot Z_{agua;EFB}) + b_{agua} \cdot Z_{agua;EFB} \quad (5)$$

Em que  $Z_{\text{água}}$ , expressa a fração mássica de umidade para cada um dos componentes,  $b_{\text{água}}$ , a exergia química da água líquida, que é igual a 50 kJ/kg e  $L_{\text{água}}$ , a entalpia de vaporização da água. Na Tabela (5), estão relacionados os teores de umidade para o dendê segundo Arrieta et al (2007) e Husain et al (2003).

Atualmente, não existe valor comercial para a biomassa do dendê e para a glicerina. Mesmo na Malásia, maior produtor de óleo de palma, apenas 10 % da biomassa da palma tem destino comercial (Yacob, 2008). Futuramente, com o direcionamento da biomassa e da glicerina para novas aplicações, provavelmente estes terão um preço no mercado depois de um tempo de operação da usina integrada.

Com o intuito de se obter uma estimativa desses valores foi feita uma relação entre o bagaço de cana, atualmente a biomassa mais utilizada para a combustão pelo mercado brasileiro e a sua exergia química por unidade de massa. O bagaço possui um PCI de 7.637 kJ/kg e 50% de umidade. Utilizando as relações de Szargut et al (1988) e os percentuais dos constituintes da cana da Tab. (5) (Zamboni, 2005), obtém-se uma exergia química de 10.104 kJ/kg. Com o bagaço, custando em média R\$ 17,50/t (EPE, 2008), chega-se a um valor de  $1,732 \cdot 10^{-6}$  R\$/kJ. Esse valor corresponde a um custo estimado exergético da biomassa e da glicerina. Então, com base nos valores da exergia química dos combustíveis e vazões mássicas, obtém-se o resultado para a seguinte equação:

$$\dot{B}_{\text{comb}} = \dot{m}_{\text{FFB}} \cdot ( b_{\text{EFB}} \cdot \text{EFB}_{\text{FFB}} + b_{\text{Casca}} \cdot \text{Casca}_{\text{FFB}} + b_{\text{Fibra}} \cdot \text{Fibra}_{\text{FFB}} ) + \dot{m}_{\text{Glicerina}} \cdot b_{\text{Glicerina}} \quad (6)$$

Tabela 5. Valores utilizados para os constituintes do dendê e do bagaço de cana

Fração mássica em base seca	Fibra	EFB	Casca	Bagaço
Carbono	48,15%	39,90%	39,90%	48,37%
Hidrogênio	7,75%	5,80%	5,80%	6,53%
Oxigênio	40,80%	42,80%	42,80%	45,10%
Nitrogênio	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
Teor de umidade	40,00%	50,00%	10,00%	50,00%

#### 6.4 Custos da eletricidade e vapor de baixa pressão

O cálculo de custos da eletricidade e do vapor de baixa pressão dependerá basicamente de qual método será utilizado para a partição de custos: critério da igualdade ou critério da extração. O critério da igualdade considera que o vapor de baixa pressão e a eletricidade possuem o mesmo custo por unidade de exergia, enquanto o critério da extração considera que o vapor de alta pressão e o vapor de baixa pressão possuem o mesmo valor de custos por unidade de exergia. No equacionamento da caldeira, para ambos os métodos o custo do vapor de alta pressão é obtido da mesma forma. (Oliveira Júnior, 2006)

Tabela 6. Equacionamento dos custos exergéticos para a caldeira e para a turbina

Caldeira	Turbina (Igualdade)	Turbina (Extração)
-	$c_{vb} = c_e$ (7)	$c_{vb} = c_{va}$ (8)
$c_{va} = \frac{c_{\text{comb}} \cdot \dot{B}_{\text{comb}} + \dot{C}_{\text{caldeira}}}{\dot{B}_{va}}$ (9)	$c_e = \frac{c_{va} \cdot \dot{B}_{va} + \dot{C}_{\text{turbina}}}{\dot{W}_e + \dot{B}_{vb}}$ (10)	$c_e = \frac{c_{va} \cdot (\dot{B}_{va} - \dot{B}_{vb}) + \dot{C}_{\text{turbina}}}{\dot{W}_e}$ (11)

Com o uso da análise exergética, podem-se quantificar os custos de vapor e de eletricidade na produção de biodiesel e óleo vegetal de palma em sistemas de cogeração e obter qual seria o impacto desses na produção. Foi assumida a hipótese de que todo vapor utilizado na unidade de extração de óleo de palma é consumido na produção do óleo vegetal, apesar de ser utilizado em outros subprodutos do cacho do dendê como o óleo de palmiste. Os dados utilizados na elaboração dos custos foram os mesmos utilizados no estudo de viabilidade, sendo desconsiderada a 2ª Opção pela falta de viabilidade em quaisquer condições de mercado. Na Tabela (7) estão dispostos os custo exergéticos.

Tabela 7. Custo exergéticos

		Linha de base		1ª opção		3ª Opção	
		igualdade	extração	igualdade	extração	igualdade	extração
vapor	óleo vegetal (R\$/t-óleo)	19,44	15,70	18,91	15,68	99,61	45,71
	biodiesel (R\$/t-biodiesel)	80,55	80,55	3,16	2,62	16,62	7,63
eletricidade	óleo vegetal (R\$/t-óleo)	1,78	6,17	1,69	5,50	6,37	11,47
	biodiesel (R\$/t-biodiesel)	6,60	6,60	0,27	0,89	1,03	1,86
total	(R\$/t-biodiesel)	108,37	109,02	24,02	24,69	123,63	66,66

Pode-se observar que houve uma redução drástica nos custos de geração de vapor e de eletricidade com a adoção das usinas integradas. Com a exportação de energia elétrica houve um aumento no custo de geração de vapor e de eletricidade. Este aumento nos custos não implica necessariamente em uma diminuição do viés econômico do empreendimento, já que haveria um aumento de receitas proveniente da exportação de energia elétrica.

## 7. Análise de emissões de gases geradores do efeito estufa

Nesta seção do trabalho, será discutida a viabilidade ambiental da cogeração da usina integrada do ponto de vista do balanço das emissões de créditos-carbono. Inicialmente, foi feita uma comparação das emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> entre a usina integrada com exportação de energia elétrica (3ª Opção) e a linha de base adotada no estudo de viabilidade econômica, na qual a usina de extração se encontra fisicamente separada da usina de biodiesel. Após esta análise, analisou-se como a usina integrada com exportação de eletricidade poderia reduzir as emissões em toda a cadeia de produção de biodiesel produzida do óleo de palma.

### 7.1. Redução de emissões da usina integrada

Para o cálculo das emissões, foi utilizada a seguinte equação com os valores da Tab. (8).

$$\text{Redução de Emissões} = \text{Emissões}_{\text{linha de base}} + \text{Redução de Emissões}_{\text{eletricidade}} - \text{Emissões}_{\text{projeto}} \quad (12)$$

As definições de cada termo estão abaixo:

Emissões de linha de base: emissões decorrentes do uso de combustíveis fósseis nas caldeiras da usina de biodiesel e emissões decorrentes do uso de energia elétrica da rede de origem fóssil pela usina de biodiesel. Para o cálculo, basta multiplicar o consumo de anual de cada um pelo seu fator de emissão.

Emissões do projeto: emissões decorrentes da queima da glicerina, em cuja composição há átomos de carbono de origem não renovável provenientes do metanol. Para o cálculo, levou-se em consideração a reação de transesterificação, na qual 1 molécula de óleo de palma com 54 carbonos reagem com 3 moléculas de metanol com 1 carbono cada, resultando em 3 moléculas de metil-éster com 18 carbonos cada e uma molécula de glicerina com 3 carbonos. Com o balanço de massa de carbonos, chega-se a um valor de 5% de carbono que teve como origem o metanol para cada molécula de glicerina. Assim basta multiplicar o valor de 5% pelo fator de emissão do metanol e pela vazão de glicerina.

Redução de emissões com a exportação de energia elétrica: obtida com a exportação de energia elétrica para a rede de origem renovável. Para tanto, basta multiplicar a exportação de energia elétrica da rede pelo fator de emissão da energia elétrica do sistema brasileiro de eletricidade.

Tabela 8. Valores utilizados para o cálculo da redução de emissões

Emissões de linha de base	consumo de diesel (t/ano)	1.753	calculado
	fator de emissão do óleo diesel (t-CO <sub>2</sub> /t-diesel)	3,1200	CETESB (2007)
	eletricidade consumida (MWh)	1.100	calculado
	fator de emissão da eletricidade (t-CO <sub>2</sub> /MWh)	0,2915	MCT (2007)
Emissões do projeto	consumo de glicerina (t/ano)	9.500	calculado
	percentual da glicerina do metanol	5%	calculado
	fator de emissão do metanol (t-CO <sub>2</sub> /t)	0,786	Wicke et all (2008)
Redução com exportação de eletricidade	eletricidade exportada (MWh)	11.790	calculado
	fator de emissão de eletricidade (t-CO <sub>2</sub> /MWh)	0,2915	MCT (2007)

Com base nesses cálculos, chega-se a uma redução de 8.853 t-CO<sub>2</sub>.

### 7.2. Redução de emissões em comparação à cadeia de produção do biodiesel

Em uma segunda análise, avaliou-se como essa redução obtida no item anterior impactaria as emissões de toda a cadeia de produção do biodiesel. Reijnder et all (2008) e Wicke et all (2008) analisaram minuciosamente as emissões de gases geradores do efeito estufa na produção de biodiesel a partir do óleo de palma, chegando à conclusão de que a derrubada de florestas nativas sob qualquer hipótese traria muito mais emissões do que reduções, sendo aconselhado o

uso somente de terras degradadas. Com base nesses estudos, foram calculadas as emissões na cadeia produtiva com a cogeração e sem a cogeração na Tab. (9).

Tabela 9. Emissões evitadas na cadeia do biodiesel com cogeração e sem cogeração

Total de redução de emissões	com derrubada de florestas		com terras degradadas	
emissões evitadas (t-CO <sub>2</sub> /ano)	sem cogeração	com cogeração	sem cogeração	com cogeração
		-11.908	-3.055	219.414

Pode se observar como a usina integrada de biodiesel é mais ecologicamente correta do ponto de vista das emissões de efeito estufa, traduzindo em um aumento da redução de emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> de 4,03% na cadeia do biodiesel. Mesmo com essa redução, a derrubada de florestas principalmente com o uso de queimadas não pode ser considerada ambientalmente correta já que uma grande parte quantidade de carbono está fixada na matéria orgânica da vegetação.

## 8. Conclusões

A palma pode ser uma alternativa viável do ponto de vista econômico para a produção de biodiesel devido à grande disponibilidade de terras e à alta produtividade. As unidades de extração de óleo vegetal atualmente são muito ineficientes do ponto de vista energético por utilizarem turbinas de contrapressão na geração de energia elétrica e não aproveitarem toda a biomassa disponível.

Com a crescente produção de biodiesel, serão construídas novas plantas de biodiesel e estas poderão ser integradas às unidades de extração de óleo por meio da cogeração. Com isso, encontrar-se-ia uma destinação final para a glicerina por meio da sua combustão.

Com o estudo de caso da planta integrada, verificou-se a exportação de energia para a rede de 11.790 kW, sendo que esta potência pode ser exportada quase o ano inteiro, já que a palma não é uma cultura sazonal.

Verificou-se a viabilidade econômica da planta integrada sem exportação da energia elétrica. Com exportação de energia elétrica, também foi comprovada a viabilidade econômica do empreendimento com o uso do método da Taxa de Retorno Incremental. Com o uso da análise exergética, corroborou-se a viabilidade econômica da exportação de energia elétrica, além de serem encontrados os custos de eletricidade e de vapor na produção de óleo vegetal e de biodiesel.

Analisando-se o ciclo de carbono na produção do biodiesel a partir do óleo de palma, comprovou-se a viabilidade ambiental quando são utilizadas terras degradadas de floresta para a sua plantação. A cogeração contribuiu com um aumento do superávit de carbono na cadeia de produção de biodiesel.

## 9. Referências

- Arrieta, F.R.P., Teixeira, F.N., Yáñez, E., Lora, E. e Castillo, E., 2007, Cogeneration Potential in the Columbian palm oil industry, *Biomass and Bioenergy*, vol. 31, p. 503-511.
- Brito, T.D., 2006, Competitividade e sustentabilidade no agronegócio: o caso do óleo de palma, Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 172 p., Dissertação de mestrado em agronegócio
- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2007, Inventário de Emissões de CO<sub>2</sub> - Manual de preenchimento [on-line]. [31-10-2008]. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/emissoresco/Manual\\_de\\_Preenchimento.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/emissoresco/Manual_de_Preenchimento.pdf)>
- EPA, Environmental Protection Agency, 2003, "Toxicological Review of Acrolein", CAS No. 107-02-8, EPA/635/R-03/003, [on-line], [03-11-2008]. Disponível em: <http://www.epa.gov/iris/toxreviews/0364-tr.pdf>
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética, 2008, 1º Leilão de energia de reserva de biomassa – definição do preço inicial, 2008, Ministério das Minas e Energia. 13 p.
- Energy systems & solutions, 2007, Konzept zur thermischen Nutzung von Glycerin / Schleimstoff in ES+S – Wirbelschichtverbrennungsanlagen [on-line]. [17-05-2008]. Disponível em: <<http://www.wirbelschichtverbrennung.de/Material/Glycerin-20therm.%20Nutzung%20%20%20Mai%202007.pdf>>
- Epple, B., 2006, Skript zur Vorlesung: Energiesysteme I, Technische Universität Darmsatdt, 124 p.
- Husain, Z., Zainal, Z.A. e Abdullah, M.A.Z., 2003, Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in plam oil mills, *Biomass and Bionergy*, vol. 24, p. 117-124.
- King built, 2008, [on-line]. [13-04-2008]. Disponível em: <<http://www.kingbuilt.com/>>
- Lima, S.M., 2000, Desempenho da cadeia produtiva do dendê na Amazônia Legal., Convênio SUDAM/ Fundação do Desenvolvimento da UFPE, 151 p.
- Metzger, B., 2007, Glycerol Combustion [on-line], North Carolina State University, 45 p. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica, [03-11-2008]. Disponível em: <[www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-07312007-153859/unrestricted/etd.pdf](http://www.lib.ncsu.edu/theses/available/etd-07312007-153859/unrestricted/etd.pdf)>

- MCT, Ministério da Ciência e Tecnologia, 2007, Fatores de Emissão de CO<sub>2</sub> de acordo com a ferramenta metodológica : “Tool to calculate the emission factor for an electricity system” aprovada pelo Conselho Executivo do MDL [on-line], [31-10-2008]. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/74691.html>>
- Monteiro, K.F.G., Silva, A.R.F., Souza, C.T., Conceição, E.R. e Pallheta, R.P., 2006, O Cultivo do Dendê como Alternativa de Produção para a Agricultura Familiar e sua Inserção na Cadeia do Biodiesel no Estado do Par [on-line], [13-04-2008]. Disponível em: <[www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/agricultura/CultivoDende.pdf](http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/agricultura/CultivoDende.pdf)>
- Oliveira Júnior, 2006, S. Fundamentos da análise exergetica e termoeconômica de processos de conversão de energia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica
- Prasertsan, S. e Prasertsan P. Biomass Residues from palm oil mills in Thailand: an Overview on quantity and potential usage, Biomass and Bioenergy, 1996, vol. 11, p. 387-395
- Reijnders, L. e Huijbregts, M. A. J., 2008, Palm oil and the emission of carbon-based greenhouse gases, Journal of Cleaner Production, vol. 16, p. 477-482
- Revista engenharia, 2007, Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usina de açúcar e álcool, vol.583, p.88-95
- Sala Lizarraga, J. M., 1999 Cogeneracion: aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos,.
- Szargut, J., Morris, D. R. e Steward, F. R., 1988, Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Processes, Hemisphere Pub Co., N. Y.
- Talens, L., Villalba, G. e Gabarrel, X., 2007, Exergy analysis applied to biodiesel production, Resources, Conservation and Recycling, vol. 51, p. 397-407.
- TGM, 2008, [on-line].[13-04-2008]. Disponível em: <<http://www.tgmturbinas.com.br/>>
- Wicke, B., Dornburg, V., Junginger, M. e Faaij, A., 2008, Different palm oil production systems for energy purposes and their greenhouse gas implications, Biomass and Bioenergy
- Yacob, S., 2008, Progress & challenges in utilization of palm biomass, Advanced Agriecolological Research, [on-line], [12-11-2008], Disponível em: <[http://www.jst.go.jp/asts/asts\\_j/files/ppt/15\\_ppt.pdf](http://www.jst.go.jp/asts/asts_j/files/ppt/15_ppt.pdf)>
- Zamboni, L. M., 2005, Avaliação comparativa de sistemas híbridos de cogeração a gás natural e bagaço de cana, Universidade de São Paulo, 96 p., Dissertação de mestrado em engenharia mecânica

## 10. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

### FEASIBILITY STUDY OF COGENERATION OF A PALM OIL MILL INTEGRATED WITH A BIODIESEL PLANT

**Bruno Bocchi**

bocchisolar@yahoo.com.br

**Silvio de Oliveira Junior**

silvio.oliveira@poli.usp.br

**Abstract.** This work consists in a technical and economic feasibility study of a cogeneration plant, which integrates a palm oil mill with a biodiesel plant with a capacity of 50.000 tonnes/year. The combusted fuels are the palm residues, resultants of the palm oil extraction, and the glycerin, resultant of the transesterification process. It was verified that the integrated plant is feasible, comparing with the baseline, in which the palm oil mill is separated of the biodiesel plant. An integrated plant with electricity exported to the grid is feasible considering the current market conditions. Depending of the electricity price, the interests rate and the biomass cost, it could become unfeasible exporting electricity to the grid. Using an exergetic analysis, the energy based operational costs and their influence on vegetable oil and biodiesel prices were found. Analysing the palm oil biodiesel production cycle, the greenhouse gases emissions reduction with the cogeneration was quantified.

**Keywords:** cogeneration, biodiesel, palm oil, glycerin, glycerol