

## **AVALIAÇÃO DE UMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL COM BASE NUMA ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA**

**Ronaldo José Amorim Campos, ronaldo\_campos@hotmail.com<sup>1</sup>**

**Renato Wagner da Silva Barros, rwsbarros@yahoo.com.br<sup>2</sup>**

**Jorge Recarte Henríquez Guerrero, rjorge@ufpe.br<sup>1</sup>**

**José Carlos Charamba Dutra, charamba@ufpe.br<sup>1</sup>**

**James Correia de Melo, james@cetene.gov.br<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco. Av. Acadêmico Helio Ramos s/n, Cidade Universitária, CEP: 50740-530, Recife-PE, Brasil.

<sup>2</sup>Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira, Rodovia BR 232 km 214 – Prado, CEP: 55.200-000, Pesqueira – PE, Brasil.

<sup>3</sup>Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste/Ministério da Ciência e Tecnologia (CETENE/MCT), Avenida Professor Luis Freire, 01, Cidade Universitária, CEP: 50740-540, Recife-PE, Brasil.

**Resumo:** No processo de produção do biodiesel devem ser assegurados alguns aspectos de eficiência energética de produção e qualidade, conforme padrões previamente estabelecidos por órgão reguladores. Estes aspectos dependem fortemente do tipo de matéria prima usada, do processo tecnológico utilizado e das condições operacionais da planta. Do ponto de vista energético, a forma clássica de determinar a eficiência de plantas de processos é através da utilização da primeira lei da termodinâmica. Apesar de muito difundida e muito fácil de ser aplicada, esta metodologia tem suas limitações, pois não contabilizam as irreversibilidades inerentes a todos os processos. Para considerar este aspecto é necessário o uso da segunda lei da termodinâmica, através de uma análise exergética. Este trabalho apresenta uma metodologia de análise, utilizando o software EES (Engineering Equation Solver), envolvendo aspectos energéticos e exergéticos numa planta piloto de produção de biodiesel. O trabalho da Análise energética e exergética foi realizado na unidade experimental de biodiesel de Caetés, Pernambuco. A unidade experimental de biodiesel de Caetés utiliza o óleo de algodão bruto como matéria-prima, em batelada, via reação de transesterificação, a 40°C, em rota metálica com razão molar óleo:álcool de, aproximadamente, 5,3, utilizando catalise básica, NaOH<sub>(s)</sub>, com razão em massa catalisador:óleo de, aproximadamente, 0,7%. Foram realizadas medições experimentais em cada etapa do processo na planta e de posse destes resultados foram feitas as análises energética e exergética. Verificou-se a grande importância da composição química detalhada dos reagentes e produtos para a realização das análises, e sua influência nos valores dos resultados. Os rendimentos das reações químicas do processo se mostraram bastantes satisfatórios, refletindo em altos valores das eficiências exergéticas nas etapas do processo. Entretanto, devido as perdas de energia pelas paredes dos equipamentos e ao consumo elétrico elevado na planta, verificou-se valores insatisfatórios para as eficiências energéticas no processo.

**Palavras-chave:** Biodiesel; Análise energética; Análise exergética

### **1. INTRODUÇÃO**

Iniciativas que impulsionem a diversificação da matriz energética nacional são de importância estratégica para diminuição da dependência externa de derivados de petróleo para fins energéticos e para enfrentar de forma mais robusta as crises energéticas que assombram o país de tempos em tempos. Uma das alternativas mais promissoras, na qual o Brasil apresenta vantagens comparativas inigualáveis, dado sua extensão geográfica, variedade de climas e biodiversidade, corresponde ao uso intensivo de fontes energéticas alternativas baseadas na biomassa ou mais especificamente na obtenção de combustíveis líquidos a partir de produtos agrícolas e florestais. Neste contexto, a diversidade de opções para a confecção do biodiesel e a, cada vez maior, valorização dos aspectos ambientais e de sustentabilidade dos sistemas energéticos, ocasionaram uma preocupação com a qualidade que o processo está aproveitando a energia que entra ao sistema. Muitas vezes o maior valor da eficiência energética pode ser conseguido com economia quando são pesados no desenvolvimento do projeto os fatores que causam irreversibilidade no processo.

A taxa de conversão do óleo neutro em ésteres depende diretamente da maneira que a reação de transesterificação é conduzida, bem como das condições do processo. Assim, o curso da transesterificação é influenciado por vários fatores que incluem o tipo de catalisador, razão molar álcool/óleo vegetal, temperatura, pureza dos reagentes e o teor de ácidos graxos livres, os quais têm influência no curso da transesterificação.

Análise Exergética é uma ferramenta para a identificação de resíduos de materiais e as perdas de energia, a detecção das áreas que requerem melhorias tecnológicas através do cálculo da eficiência exergética. As análises energéticas geralmente falham ao identificar perdas ou o uso efetivo dos recursos, uma vez que a energia, sendo uma grandeza conservativa, considera como única perda aquela associada aos fluxos que fisicamente saem da instalação. A eficiência exergética é definida como a razão entre a exergia útil de um processo e a exergia total utilizada para realizar esse processo. Exergia é um indicador útil para medir o potencial da qualidade e reatividade do material, comparando diferentes processos de produção de produtos substitutos, que é especialmente útil na comparação de fontes renováveis de energia. O conteúdo exergético de um recurso natural de entrada pode ser interpretado como uma medida da sua qualidade ou potencial útil, ou a sua capacidade para realizar "trabalho útil". Conseqüentemente, exergia pode medir qualidade dos recursos, bem como a quantidade, e é aplicável para ambos os materiais e energia (Talens et al, 2007).

Análises das perdas exergéticas parciais fornecem informações sobre os impactos das imperfeições de todos os processos parciais conectados com a produção do produto útil final considerado. Ela indica as possibilidades de melhoria dos processos parciais (Szargut, 2001).

Este trabalho foi realizado considerando uma abordagem teórica e experimental. Na abordagem teórica foi desenvolvida uma metodologia de análise energética e exergética da planta em estudo. Na abordagem experimental serão realizadas as medições dos parâmetros físicos fundamentais para a análise energética e exergética, incluindo entre outros os fluxos de massa da matéria prima, dos produtos resultantes do processo e rejeitos do mesmo. Assim como medições de pressão, temperatura, e outras propriedades termodinâmicas que possam ser necessárias.

Uma planta de biodiesel é formada por um conjunto de equipamentos que transformam óleos vegetais ou animais num óleo combustível com propriedades semelhantes ao óleo Diesel mineral. Isto é feito através de um processo químico conhecido como transesterificação, que corresponde a uma reação entre o óleo e um álcool na presença de um catalisador e do qual resulta em ésteres (o biodiesel) e glicerol.

O trabalho da Análise energética e exergética foi realizado em uma planta piloto de produção de biodiesel de forma experimental. A análise energética e exergética foram realizadas em cada componente da planta piloto, ou seja, individualmente em cada equipamento da planta envolvido no processo, considerando os fluxos de massa, energia e exergia. Identificamos no processo global as etapas onde existe a maior e menor eficiência energética e exergética, apontando quais processos intermediários podem ser melhorados de forma consistente que permitam alcançar um processo eficiente. Assim, as etapas que estão gerando maiores irreversibilidades foram evidenciadas e modificações sugeridas para que obtenham melhores ganhos na eficiência energética e exergética global do processo.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DA PLANTA PILOTO

A unidade experimental de biodiesel de Caetés utiliza o óleo de algodão bruto como matéria-prima para produção de biodiesel. O óleo de algodão bruto é fornecido por uma unidade de extração de óleo de algodão em Caetés.

A produção do biocombustível na unidade é realizada em batelada via reação de transesterificação a 40° C em rota metálica com razão molar óleo:álcool de aproximadamente 5,3, e utilizando catálise básica com razão em massa catalisador:óleo de aproximadamente 0,7%. O processo de produção de biodiesel na unidade experimental de Caetés é mostrado de maneira resumida através do fluxograma mássico na figura abaixo.

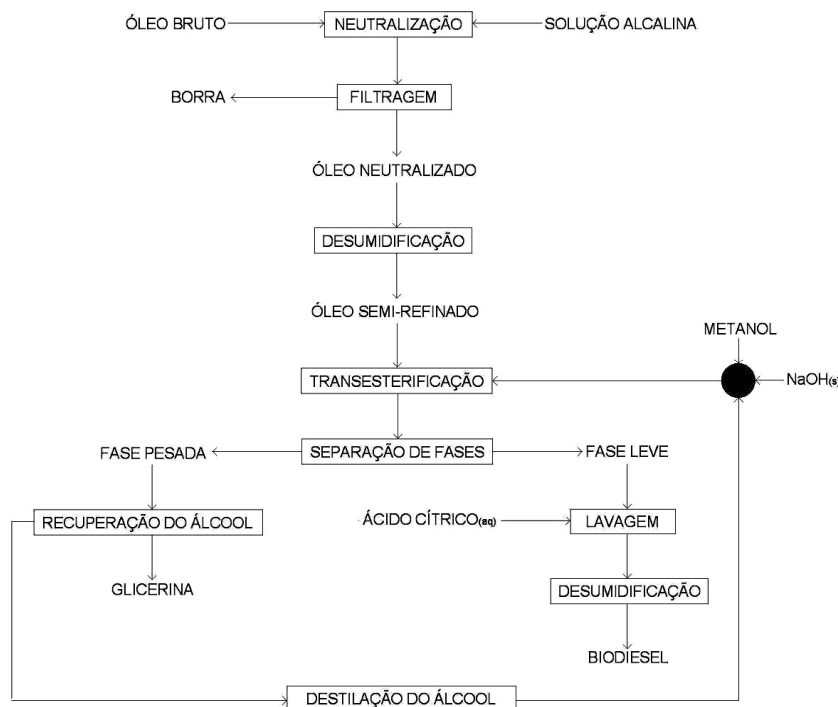


Figura 1 - Fluxograma mássico resumido do processo da usina.

Descrevendo de uma maneira mais detalhada, o processo de produção de biodiesel da unidade experimental de biodiesel de Caetés pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Semi-refino do Óleo Bruto (neutralização, filtragem e desumidificação);
- Preparação do catalisador;
- Transesterificação;
- Separação de fases;
- Obtenção do Álcool Recuperado (Recuperação do álcool a partir da fase pesada);
- Recuperação do Álcool Anidro;
- Lavagem do Biodiesel;
- Desumidificação do Biodiesel.

A figura 2 mostra a área externa, e a figura 3 mostra a área interna da usina.



Figura 2 - Imagens externas da usina piloto de biodiesel de Caetés.



Figura 3 - Imagens internas da usina piloto de biodiesel de Caetés.

O Semi-refino do óleo bruto é composto pela neutralização do óleo bruto, filtragem do óleo neutralizado e desumidificação do óleo neutralizado de algodão.

A neutralização do óleo bruto tem como função a retirada dos ácidos livres presentes na composição do óleo. A partir da reação de óleo bruto de algodão com uma solução aquosa de hidróxido de sódio de, é obtido o óleo neutralizado e a borra de neutralização. A finalidade da remoção dos ácidos graxos livres é obter elevados rendimentos nas reações dos glicerídeos, em presença de catalisadores básicos. A filtragem tem como função a retirada de resíduo de borra neutralização presente no óleo vegetal neutralizado, e também a retirada de outras impurezas presentes no óleo antes mesmo da neutralização do óleo bruto. Além disso, a separação posterior dos sabões formados é difícil e conduz a perdas no rendimento da mistura de ésteres. A borra de neutralização consiste basicamente de água, sais sódicos de ácidos graxos, triglicerídeos, fosfolipídios, matéria insaponificável e produtos de degradação do óleo.

Uma solução de hidróxido de sódio em metanol é preparada em tanques de mistura. Com auxílio de uma bomba, a solução circula pelos tanques até completa dissolução do hidróxido de sódio no metanol, formando o metóxido de sódio  $[(CH_3O)Na]$ . Após a dissolução de todo o hidróxido de sódio no metanol, a solução catalisadora segue para o reator onde ocorrerá a transesterificação.

O óleo semi-refinado e a solução catalisadora são enviados para os reatores onde ocorrerá a transesterificação. Os reatores possuem sistema de agitação, aquecimento, condensadores para refluxo do evaporado e tanques de circulação para aumentar a eficiência da reação. Através do sistema de separação de fases, o produto da reação é dividido em duas fases: a fase do biodiesel (fase leve) e a fase da glicerina (fase pesada).

A fase pesada é enviada para o sistema de recuperação do álcool. Após extração do álcool da fase pesada, a glicerina bruta é enviada para o tanque auxiliar de glicerina bruta, e depois armazenada em reservatórios. O objetivo desta etapa é a recuperação de parte do excesso de álcool utilizado durante a reação de transesterificação. O álcool recuperado é enviado para a torre de destilação para reutilização através da obtenção do álcool com maior pureza. A fase leve segue para lavagem em um tanque de mistura onde é adicionada uma solução aquosa de ácido cítrico para neutralizar o excesso de catalisador, reduzindo o pH e eliminando assim qualquer sabão de ácidos graxos livres, reduzindo a tendência emulsificante.

Álcoois, como o metanol e o etanol, assim como o catalisador alcalino, apresentam maior solubilidade na fração de glicerina, de maior polaridade; Assim, a maior parte destes materiais residuais é removido quando o glicerol é separado do biodiesel. No entanto, após a separação, o biodiesel ainda pode apresentar 2 a 4% do álcool utilizado. Mas, qualquer álcool remanescente no biodiesel deve ser eliminado durante a etapa de lavagem aquosa.

A centrífuga é utilizada para separar o biodiesel da fase aquosa. A centrífuga possui uma bomba de sucção e uma bomba de rotação, e é utilizada para separar o biodiesel da fase aquosa. Como a separação não é completa, o biodiesel é

chamado de turvo. O biodiesel turvo é enviado à etapa da desumidificação do biodiesel. O aquecimento do biodiesel turvo acontece em um evaporador, e à medida que o desumidificador é preenchido, o vapor d'água é extraído através de uma purga no topo do desumidificador.

Toda adição da carga térmica no processo de produção de biodiesel da usina piloto de biodiesel de Caetés é realizada pela caldeira a óleo mineral e toda remoção da carga térmica durante o processo de produção de biodiesel é realizada utilizando-se da água da torre de resfriamento.

### 3. METODOLOGIA DE ANÁLISE ENERGÉTICA E EXERGÉTICA

Os parâmetros para os cálculos vão variar de acordo com a etapa do processo da planta piloto. Entre outros, as temperaturas, as massas de entrada e de saída em cada etapa, a composição dos reagentes e produtos, tempo de cada etapa e de utilização de cada equipamento, propriedades físicas e químicas dos reagentes e produtos, dimensões dos equipamentos, etc. Para a realização das medições dos parâmetros foi necessário fazer o levantamento de dados com a planta em funcionamento.

A 1ª Lei da Termodinâmica foi utilizada para a realização do balanço energético em cada etapa estudada.

$$\left. \frac{dE}{dt} \right|_{v.c.} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_{entra} \dot{m}_i h_i - \sum_{sai} \dot{m}_i h_i \quad (1)$$

A entalpia,  $h_i$ , representa a medida da energia do sistema que está disponível na forma de calor à pressão constante. Pode ser definida de maneira como as energias relacionadas com as mudanças de estado e variações de temperatura em uma reação química (Van Wylen et al, 1998).

$$h_i = h_{f,i} + \Delta h_i \quad (2)$$

A entalpia de formação,  $h_{f,i}$ , refere-se à energia liberada ou absorvida quando um mol de um composto se forma a partir de substâncias simples no estado padrão (as quais têm entalpia-padrão igual a zero). Então, nas etapas onde houve reação química foi levada em consideração a entalpia de formação.

A variação de entalpia,  $\Delta h_i$ , em cada estado é função do calor específico a pressão constante e a diferença entre temperatura no estado ( $T_i$ ) e a temperatura de referência. Foi considerada a temperatura de referência ( $T_0$ ) como sendo a temperatura ambiente (Van Wylen et al, 1998).

$$\Delta h_i = C p_i (T_i - T_0) \quad (3)$$

O balanço exergético foi realizado através da equação obtida de uma combinação entre a primeira e Segunda Lei da Termodinâmica (Van Wylen et al, 1998).

$$\left. \frac{dEx}{dt} \right|_{v.c.} = \sum_j \left( 1 - \frac{T_0}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \left( \dot{W} - P_0 \frac{dV}{dt} \right) + \sum_{entra} \dot{m}_i e_i - \sum_{sai} \dot{m}_i e_i - \dot{Ex}_d \quad (4)$$

A exergia, ou disponibilidade energética, de um sistema termodinâmico, num dado estado, é definida como o trabalho máximo que se pode obter levando-se o sistema ao estado de equilíbrio com o ambiente, num processo reversível. Num processo real (irreversível), há uma parcela de trabalho não realizado, que dá uma medida da irreversibilidade do processo.

A exergia total do fluxo será é a soma da exergia química e física específica:

$$e_i = e^{fis}_i + e^{ch}_i \quad (5)$$

A exergia física específica ( $e^{fis}_i$ ) é calculada de acordo com a equação abaixo:

$$e^{fis}_i = \left[ (h_i - h_i^0) - T_0 (s_i - s_i^0) \right] = \Delta h_i - T_0 \Delta s_i \quad (6)$$

Onde, a variação de entropia foi calculada através da relação:

$$\Delta s_i = C p_i \ln \frac{T_i}{T_0} \quad (7)$$

O cálculo da exergia química específica ( $e^{ch}_i$ ) pode ser realizado através de uma relação entre  $\phi$  e  $PCI$ , como mostra a equação a seguir (Kotas, 1995):

$$e^{ch}_i = \phi_i PCI_i \quad (8)$$

Onde,  $\phi$  expressa a relação entre a exergia química do combustível e sua composição elementar (Kotas, 1995).

$$\phi_i = 1,0401 + 0,1728 \cdot \left( \frac{x_i^H}{x_i^C} \right) + 0,0432 \cdot \left( \frac{x_i^O}{x_i^C} \right) + 0,2169 \cdot \left( \frac{x_i^S}{x_i^C} \right) \cdot \left( 1 - 2,0628 \cdot \left( \frac{x_i^H}{x_i^C} \right) \right) \quad (9)$$

Em alguns casos, os valores das exergias químicas de algumas substâncias foram obtidos em tabelas contidas na literatura.

O calor perdido pelas paredes dos equipamentos para o meio ambiente ocorre por convecção natural e radiação térmica. Assim, para calcular o calor transferido entre o equipamento e a vizinhança, ou calor perdido, foram utilizadas a lei de Newton de resfriamento e a lei de Stefan-Boltzmann através da seguinte relação:

$$\{\text{Calor perdido}\} = \{\text{Calor perdido por convecção}\} + \{\text{Calor perdido por radiação}\} \quad (10)$$

O cálculo do trabalho exercido pelo motor de agitação é calculado através do cálculo da potência ativa para uma ligação trifásica:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 \quad (11)$$

Onde,

$$P_i = \frac{3 \cdot V_i}{\sqrt{3}} I_i \cos \varphi \quad (12)$$

Portanto,

$$W = \left[ \frac{3 \cdot V_1}{3^{1/2}} I_1 \cos \varphi + \frac{3 \cdot V_2}{3^{1/2}} I_2 \cos \varphi + \frac{3 \cdot V_3}{3^{1/2}} I_3 \cos \varphi \right] t \quad (13)$$

As eficiências energéticas e exergéticas foram formuladas para cada etapa de maneira independente. Foram feitas algumas considerações para suprir a necessidade de alguns cálculos. Maiores detalhes da metodologia de análise energética e exergética podem ser encontrados em Campos et al. De uma maneira geral, podemos listar as considerações realizadas: Como o processo de produção da planta piloto não é um processo contínuo, mas em batelada, consideramos que as etapas se passam em regime permanente.

Geralmente as entalpias de formação dos produtos e dos reagentes são encontradas tabeladas na literatura especializada. Caso a entalpia de formação de alguns dos combustíveis não esteja disponível e conhecendo o Poder Calorífico, o que é mais usual e mais fácil de obter experimentalmente podemos, obter a entalpia de formação aplicando novamente a primeira lei à reação de combustão considerando que os produtos no final do processo de reação se encontram na mesma condição termodinâmica (mesma pressão e temperatura) que os reagentes. Este é o procedimento teórico de obtenção de poder calorífico e será utilizado aqui para obter a entalpia de formação de aqueles combustíveis para os quais este parâmetro não se encontra disponível na literatura.

O Rendimento bruto do processo foi definido como a razão entre a massa de combustível produzida e a quantidade de óleo utilizada no processo.

$$RB, \% = \frac{m_{\text{biodiesel}}}{m_{\text{óleo}}} \quad (14)$$

Onde,  $m_{\text{biodiesel}}$  é a massa produzida de biodiesel; e,  $m_{\text{óleo}}$  é a massa de óleo utilizada para produzir o biodiesel.

Definimos o rendimento em ésteres do processo, que diz respeito à quantidade de triglicerídeos que são transformados em metil ésteres justificando assim as diferenças entre a massa de biodiesel obtida e a esperada.

$$RE, \% = \frac{m_{EM}}{m_{\text{óleo}}} \quad (15)$$

Onde,  $m_{EM}$  é a massa produzida de ésteres metílicos no biodiesel.

A pureza do biodiesel indica o percentual de ésteres metílicos no biodiesel. Sendo de grande importância para mostrar a qualidade do produto final da transesterificação.

$$\text{Pureza}, \% = \frac{m_{EM}}{m_{\text{biodiesel}}} \quad (16)$$

Onde,  $m_{\text{biodiesel}}$  é a massa produzida de biodiesel.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos através da aplicação das equações utilizadas na metodologia proposta de análise energética e exergética em cada etapa, utilizando o software EES32 (*Engineering Equation Solver*). As análises estão sendo apresentadas para uma produção de 1000 litros de óleo bruto.

O tempo de funcionamento de cada equipamento, acessório e abertura de válvula foi medido. Tão como, o tempo de cada etapa do processo de produção do biodiesel de Caetés, como mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Tempo total de cada etapa.

Equipamento	Tempo, h	Tempo, %
Neutralização e filtragem do óleo bruto	2,37	6,73
Desumidificação do óleo neutralizado	3,11	8,82
Preparação do catalisador	1,65	4,68
Transesterificação	4,07	11,56
Recuperação do álcool da Fase Pesada	3,98	11,29
Destilação do álcool recuperado	12,00	34,08
Lavagem do biodiesel	2,52	7,16
Relavagem do biodiesel	1,03	2,92
Desumidificação do biodiesel	4,50	12,77

A partir dos tempos coletados, foi observado que a destilação do álcool hidratado e a desumidificação do biodiesel foram as etapas do processo mais duradouras. A partir da tabela 1 obtemos que o tempo total do processo de produção de biodiesel é de, aproximadamente, 35 horas.

Os fluxos de massa de entrada nos equipamentos foram obtidos através de informações dadas pelos funcionários da usina. Mas, para o cálculo dos fluxos de saída foi utilizado correlações matemáticas com as dimensões e volume ocupado dos equipamentos envolvidos em cada etapa.

Sabendo a composição em ácidos graxos do óleo, e a composição em ésteres do biodiesel, foram calculados os pesos moleculares do óleo de algodão e do biodiesel deste óleo de algodão. Os respectivos valores foram de 860,45 g/mol e 864,45 g/mol. Estes valores são importantes para o cálculo do rendimento bruto e o rendimento em ésteres da reação de transesterificação, e a pureza do biodiesel.

Conhecendo os pesos moleculares do óleo e do biodiesel, a massa do óleo de entrada, e o percentual de glicerina no óleo, pode-se prever a massa mínima e máxima formada de glicerina no processo. Para o caso da unidade experimental de biodiesel de Caetés, a massa mínima e máxima de glicerina que podem ser formadas na reação de transesterificação é de, respectivamente, 27,274 kg e 79,844 kg.

A partir da composição de ácidos graxos do óleo, e de ésteres de ácidos graxos do biodiesel foi possível calcular a composição elementar dos mesmos com simples relações matemáticas envolvendo os pesos moleculares das composições.

Através do balanço de massa, foi verificado que o óleo bruto utilizado possui aproximadamente 10% de glicerina e 9,6% de ácidos graxos livres, e só 80,4% do óleo são triglicerídeos capazes de formar o biodiesel.

No caso da borra neutralização, foi considerado que 69% da sua composição é água, 29,5% é sabão, e 1,5% é de óleo puro (Fré et al, 2009). Então, a partir de 915 kg de óleo bruto (1000 litros), 6 kg de NaOH<sub>(s)</sub> e 161,19 kg de álcool (204 litros), foram formados, aproximadamente 745,85 kg de biodiesel, 79,84 kg de glicerina, e 94,501 kg de borra de neutralização. A diferença da massa de entrada e de saída está relacionada com as massas de água líquida e vapor de saída, e impurezas que são retiradas durante a filtração, lavagem, etc.

Foram feitas medições de temperatura nas etapas onde existiu transferência de calor entre os equipamentos e o meio ambiente, ou onde existiu troca térmica entre os fluido de aquecimento, ou resfriamento, e o equipamento. Em geral, foram medidas as temperaturas na entrada e na saída do fluido de aquecimento, ou resfriamento, nos equipamentos, possibilitando a quantificação da troca térmica. Tão como, as temperaturas nas paredes dos equipamentos e nas entradas e saída dos fluxos de massa nos equipamentos. Em muitos casos, os fluxos de massa entram e saem em temperatura ambiente.

A partir da tabela 2, foi observado que a etapa onde houve o maior consumo de trabalho elétrico foi a etapa da destilação do álcool recuperado. Essa grande diferença do consumo é devido ao tempo de duração desta etapa, que é aproximadamente 12 horas. A etapa com o segundo maior consumo elétrico foi a desumidificação do biodiesel. Este alto consumo é devido ao grande número de acessórios elétricos utilizados na etapa. Houve uma grande perda de energia por perdas pelas paredes dos tanques, influenciando diretamente, entre outras, o aumento da necessidade de fornecimento de calor através de fluxo de óleo mineral. E, assim, trabalho elétrico consumido pelas resistências da caldeira. Então, as etapas onde houve um maior consumo elétrico foram as com grande número de acessórios elétricos e as de maior tempo de duração. Assim, para um processamento de 1000 litros de óleo bruto, o consumo total foi de, aproximadamente, 1.706,5 MJ.

Tabela 2 - Trabalho elétrico consumido em cada etapa.

<b>Etapa</b>	<b>W, kJ</b>	<b>POT, kW</b>	<b>W, %</b>
Neutralização e filtração do óleo bruto	4066	22,140	2,38
Desumidificação do óleo neutralizado	145521	64,71	8,53
Preparação do catalisador	4494	2,274	0,26
Transesterificação	49674	69,45	2,91
Recuperação do álcool da Fase Pesada	171819	66,48	10,07
Destilação do álcool recuperado	901007	20,860	52,80
Lavagem do biodiesel	35430	12,774	2,08
Relavagem do biodiesel	19062	12,648	1,12
Desumidificação do biodiesel	338911,5	32,175	19,86

Um dos fatores que acarretaram o valor elevado das perdas de calor, é que os tanques de mistura que possuem sistema de aquecimento, como por exemplo, os reatores e evaporadores, não possuem revestimento externo para redução das perdas de calor para o meio externo.

A partir dos cálculos efetuados, foi encontrado que a perda de energia pelas paredes,  $Q_j$ , foi de aproximadamente 305,3 MJ.

A tabela 3 mostra o valor da exergia destruída, em kJ e kW, de cada etapa do processo da unidade experimental de biodiesel de Caetés.

Tabela 3 - Exergia destruída em cada etapa.

<b>Etapa</b>	$e_d$ [KW]	$e_d$ [KJ]	$e_d$ %
Neutralização e filtragem do óleo bruto	141,20	1204294,8	18,69
Desumidificação do óleo neutralizado	67,23	250498,98	3,89
Preparação do catalisador	2,186	4319,14	0,07
Transesterificação	390	1905150	29,56
Recuperação do álcool da Fase Pesada	108,12	515732,4	8,00
Destilação do álcool recuperado	21,15	913680	14,18
Lavagem do biodiesel	361,50	1093176	16,96
Relavagem do biodiesel	188,64	233159,04	3,62
Desumidificação do biodiesel	30,04	324275,68	5,03

A partir da tabela 3, foi observado que a etapa onde há a maior exergia destruída foi na etapa de transesterificação. Indicando a etapa onde há maior irreversibilidade de todo o processo. As etapas de neutralização, lavagem do biodiesel e destilação, seguem como as etapas onde há maior exergia destruída no processo

Para saber a causa de uma etapa possuir alta irreversibilidade, devemos observar a equação 4 e verificar a parcela mais participativa no aumento da exergia destruída, ou irreversibilidade no processo, se é devido ao alto calor perdido pelas paredes, ao alto trabalho elétrico consumido, ou ao gradiente entre o fluxo de exergia que entra e sai devido ao fluxo mássico. Para o processo de produção de biodiesel da unidade de Caetés, verificamos que as etapas onde há maior exergia destruída foram as mesmas onde há maior trabalho elétrico consumido e maior perda de energia pelas paredes, com exceção da transesterificação que, apesar de possuir um elevada perda de energia pelas paredes, o não reaproveitamento dos subprodutos da reação de transesterificação ocasiona um aumento na irreversibilidade do sistema.

Assim, para um processamento de 1000 litros de óleo bruto, a exergia destruída total no processo foi de, aproximadamente, 6.444,3 MJ. Ou seja, o trabalho, ou energia, que deixou de ser utilizado de alguma maneira.

A tabela 4 mostra em percentual a eficiência energética de cada etapa do processo de produção da unidade experimental de biodiesel de Caetés.

Tabela 4 - Eficiência energética em cada etapa.

<b>Etapa</b>	<b>Eficiência energética, %</b>
Neutralização e filtragem do óleo bruto	68,83
Desumidificação do óleo neutralizado	72,50
Preparação do catalisador	51,16
Transesterificação	68,61
Recuperação do álcool da Fase Pesada	69,24
Destilação do álcool recuperado	74,56
Lavagem do biodiesel	96,83
Relavagem do biodiesel	99,32
Desumidificação do biodiesel	59,35

A partir da tabela 4, verifica-se que as etapas com menores eficiências energéticas foram as etapas de preparação do catalisador e desumidificação do biodiesel, e as etapas com maiores eficiências energéticas foram as etapas de lavagem e relavagem do biodiesel.

A tabela 5 mostra em percentual a eficiência energética de cada etapa do processo de produção da unidade experimental de biodiesel de Caetés.

Tabela 5 - Eficiência exergética em cada etapa.

<b>Etapa</b>	<b>Eficiência exergética, %</b>
Neutralização e filtragem do óleo bruto	96,24
Desumidificação do óleo neutralizado	99,26
Preparação do catalisador	99,88
Transesterificação	95,39
Recuperação do álcool da Fase Pesada	95,18
Destilação do álcool recuperado	94,68
Lavagem do biodiesel	96,67
Relavagem do biodiesel	99,26
Desumidificação do biodiesel	98,93

A partir da tabela 5, verifica-se que as etapas com menores eficiências exergéticas foram as etapas da transesterificação e recuperação do álcool a partir da FP, e as etapas com maiores eficiências exergéticas foram as etapas de preparação do catalisador, lavagem e relavagem do biodiesel

O valor do rendimento bruto do processo de produção é de grande importância, uma vez que dá uma razão entre o produto final obtido, e a matéria prima utilizada. O objetivo é obter o maior valor possível, pois este significa um

melhor aproveitamento da matéria prima. Assim, o rendimento bruto para o processo de produção de biodiesel da unidade experimental de biodiesel de Caetés foi de, aproximadamente, 81,51%.

No entanto, no rendimento bruto do processo não se encontra expresso a quantidade de ésteres produzidos. Havendo a necessidade de quantificar a quantidade de ésteres produzidos no processo. Assim, o rendimento em éster da transesterificação para o processo de produção de biodiesel da unidade experimental de biodiesel de Caetés foi de, aproximadamente, 80,85%.

A pureza do biodiesel do processo de produção de biodiesel da unidade experimental de biodiesel de Caetés foi de, aproximadamente, 99,19%.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados das análises energéticas e exergéticas se mostraram condizentes com o esperado em relação às perdas de energia e trabalho elétrico, que foram os principais causadores das baixas eficiências nas etapas do processo.

A falta de revestimento externo, ou isolamento térmico, nos equipamentos acarretou grande perda de energia no processo, assim, os baixos valores das eficiências energéticas no processo são reflexos dessas perdas de energia pelas paredes.

Através das medições do tempo de funcionamento de cada acessório elétrico, foi verificado um elevado consumo elétrico da planta. A maior fonte de consumo elétrico da planta é o sistema de aquecimento, resistência da caldeira e bomba da caldeira, que durante todo o processo ficam ligados. A utilização do fluxo de aquecimento pelo óleo mineral associado às grandes perdas de energia pelas paredes dos equipamentos acarreta um maior consumo elétrico pelas resistências da caldeira, já que mais energia tem que ser fornecida ao óleo mineral para manter em equilíbrio as temperaturas internas dos equipamentos. Lembrando que, também, existe perda de energia pela parede da caldeira, aumentando a energia fornecida pelas resistências da caldeira, e assim, o consumo elétrico.

A utilização da energia elétrica como fonte nobre de energia primária para o aquecimento, contradiz o objetivo principal da usina produtora de biocombustíveis, podendo utilizar a própria queima do biocombustível como fonte de energia para o aquecimento do processo.

Os rendimentos das reações químicas do processo se mostraram bastantes satisfatórios. E, o reflexo dos bons rendimentos pode ser visto nos altos valores das eficiências exergéticas dos processos.

É importante para melhorar a eficiência exergética do processo, a reutilização dos subprodutos do processo. Como por exemplo, a glicerina, o álcool e, também, a borra de neutralização. Assim, a não utilização desses subprodutos foi um dos fatores que ocasionaram um aumento na exergia destruída.

Verificou-se a grande importância da composição química detalhada dos reagentes e produtos para a realização das análises, e sua influência nos valores dos resultados.

Do mesmo modo, os valores das temperaturas são essências para uma boa análise experimental. Como pequenas variações de temperaturas provocam grandes alterações nos resultados, é de grande importância fazer uma análise considerando os desvios padrões das medições.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e à FACEPE pelo suporte financeiro dos projetos de pesquisa CTEneg/MCT/CNPq Proc. 550967/2005-2 e Proc. APQ-1080-3.05/08, respectivamente. Além disso, o primeiro e o segundo autor agradecem à FACEPE pelas bolsas de Mestrado e Doutorado respectivamente.

## 7. REFERÊNCIAS

Fré, N.C. Da. Obtenção de ácidos graxos a partir da acidulação da borra de neutralização de óleo de soja. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Porto Alegre, 2009.

Kotas, T.J., 1995, "The Exergy Method of Thermal Plant Analysis", Krieger Publishing Company, Florida, USA, 328.

Campos, R.J.A. Metodologia de análise energética e exergética aplicada à planta piloto de biodiesel de caetés-PE. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, 2009.

Talens, L.; Villalba, G.; Gabarrell, X. Exergy analysis applied to biodiesel production. Resources, conservation and recycling 51, p. 397-407, 2007.

Szargut, J. Sequence method of determination of partial exergy losses in thermal systems. Exergy, an international journal, 1(2), p.85-90, 2001.

Van Wylen G.J., Sonntag, R. E., Borgnakke, C., Fundamentos da Termodinâmica, 5<sup>a</sup> ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1998.





**VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
**18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil**  
**August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil**

## **EVALUATION OF A PLANT OF BIODIESEL'S PRODUCTION BASED ON AN ENERGETIC AND EXERGETIC ANALYSIS**

**Ronaldo José Amorim Campos, ronaldo\_campos@hotmail.com<sup>1</sup>**

**Renato Wagner da Silva Barros, rwsbarros@yahoo.com.br<sup>2</sup>**

**Jorge Recarte Henríquez Guerrero, rjorge@ufpe.br<sup>1</sup>**

**José Carlos Charamba Dutra, charamba@ufpe.br<sup>1</sup>**

**James Correia de Melo, james@cetene.gov.br<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Department of Mechanical Engineering, Federal University of Pernambuco. Academic Helio Ramos Avenue, City University, CEP: 50740-530, Recife – PE, Brazil.

<sup>2</sup>Federal institute of Education, Science and Technology of Pernambuco, Campus Pesqueira, Highway BR 232 km 214 – Prado, CEP: 52200-000, Pesqueira – PE, Brazil.

<sup>3</sup>Strategic center of technologies of the northeastern/ Ministry of Science and Technology, Professor Luis Freire Avenue, 01, City University, CEP: 50740-540, Recife – PE, Brazil.

**Abstract.** *In the process of biodiesel production should be ensured some aspects of efficiency of production and quality standards as previously established by national regulators. These are heavily dependent on the type of raw material used, the process technology used and operating conditions of the plant. From the energy point of view, the classic way to determine the efficiency of process plants is by using the first law of thermodynamics. Although very popular and very easy to be applied, this methodology has its limitations because it does not account for the irreversibility inherent in all processes. To consider this aspect is necessary to use the second law of thermodynamics, through an exergetic analysis. This paper presents a methodology for analysis, using the software EES (Engineering Equation Solver), involving energy and exergetic aspects of a pilot plant production of biodiesel. The work of the energetic and exergetic analysis was conducted in the experimental biodiesel Caetés, Pernambuco. The experimental unit of biodiesel Caetés uses cottonseed oil as raw material, batch, by transesterification reactions at 40 °C, in methilic route with methanol molar ratio of oil: alcohol, approximately 5.3, using basic catalysis, NaOH<sub>(s)</sub>, with mass ratio catalyst: oil of about 0.7%. Experimental measurements were performed at each step of the process in plan and in possession of these results were made energetic and exergetic analysis. It was the great importance of detailed chemical composition of the reactants and products in carrying out the analysis, and its influence on the values of the results. Income from chemical reactions in the process proved quite successful, reflected in high values of the exergetic efficiencies in the process steps. However, due to energy loss through the walls of the equipment and the high electricity consumption in the plant, was found unsatisfactory values for energy efficiencies in the process.*

**Keywords:** *Biodiesel, Energetic analysis, Exergetic Analysis*