

# OTIMIZAÇÃO DO PROJETO DE GERADOR DE VAPOR QUE UTILIZA BIODIESEL

**Danielle Bonfim Tanaka**

[danibonta@gmail.com](mailto:danibonta@gmail.com)

## Resumo

O gerador de vapor é um dos principais mecanismos usados na produção de vapor de água, fluido amplamente usado na indústria. Este trabalho tem por foco o uso do biodiesel como combustível para tais geradores. A primeira parte deste estudo apresenta uma revisão da literatura sobre o assunto. Em seguida, discute-se, através de cálculos, a otimização do projeto em si.

O objetivo principal foi tornar mais eficientes as trocas de calor no gerador de vapor, o que acarretou na diminuição da área total de 80%. Partiu-se da hipótese de que a temperatura dos gases de combustão na caldeira é próxima da temperatura adiabática de chama, o que implicou em uma maior temperatura – também dos gases – no economizador. Dessa forma, a taxa de transferência de calor por área aumentou significativamente.

**Palavras chave:** Gerador de vapor, Biodiesel, Transferência de calor, Radiação na fornalha.

## 1. Introdução

A necessidade de fontes de energia alternativas ao uso do petróleo tem conduzido pesquisas acerca de novos combustíveis, viáveis comercialmente e industrialmente. É a partir dessas premissas que se baseia o estudo do biodiesel, como uma fonte de energia renovável e ambientalmente limpa.

Vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia. Isso se deve a vários fatores, dentre eles podemos destacar que a água é o composto mais abundante da Terra e, portanto, de fácil obtenção e baixo custo. Na forma de vapor, tem alto valor de energia por unidade de massa e volume. Toda indústria de processo químico tem vapor como principal fonte de aquecimento: reatores químicos, trocadores de calor, evaporadores, secadores e inúmeros processos e equipamentos térmicos. Mesmo em outros setores industriais, como metalúrgico, metal-mecânico e eletrônico, vapor pode ser utilizado como fonte de aquecimentos de diversos processos.

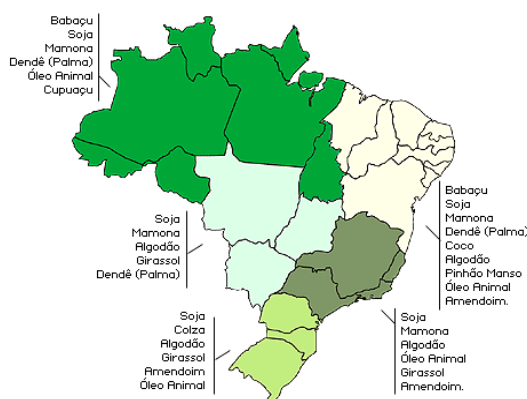
Através de estudos de viabilidade, características do biodiesel e metodologia para construção de um gerador de vapor, pretende-se otimizá-lo e procurar, na medida do possível, torná-lo uma opção economicamente atraente e ecologicamente viável para as indústrias que o utilizam.

## 2. Biodiesel

No atual cenário energético mundial, com o advento de políticas ambientais que sugerem a diminuição da emissão de poluentes, o biodiesel tem sido considerado um combustível alternativo ecologicamente correto e energeticamente equiparável ao óleo mineral; é biodegradável, de fontes renováveis, podendo ser utilizado em motores de ciclo diesel com baixa ou até mesmo nula necessidade de adaptação.

Seu uso é alternativo ao uso do óleo diesel proveniente do petróleo; seu poder calorífico é comparável ao do óleo diesel mineral e apresenta menor combustão incompleta do que os hidrocarbonetos, reduzindo assim a emissão de monóxido de carbono, óxidos de enxofre e nitrogênio e material particulado.

Além disso, o biodiesel é responsável também pela economia de divisas com a importação do petróleo e do óleo diesel mineral, gerando alternativas de empregos em áreas geográficas menos atraentes para outras atividades econômicas e conseqüentemente promovendo a inclusão social.



fonte: Petrobrás

Figura 1. Distribuição do plantio de oleaginosas matéria-prima para a produção de biodiesel

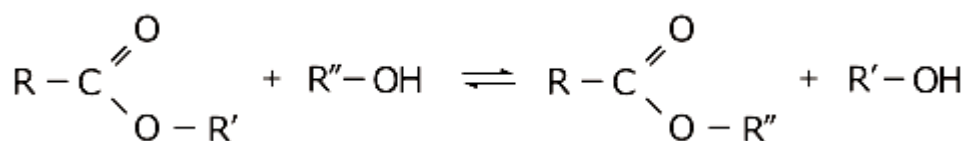
### 2.1 Produção e Propriedades

Vários estudos (Ferrari et al; PORTAL DO BIODIESEL) mostram que a reação de óleo vegetal, obtido a partir de plantas oleaginosas, com etanol ou metanol na presença de um catalisador é relativamente simples, no entanto o processo empregado e os tipos de plantas existentes numa determinada região devem ser considerados quando se decide implantar uma usina produtora de biodiesel em determinado local. Na região Norte do país, nos estados do Amazonas e Pará, devido ao clima equatorial úmido, com solo fértil de pequena profundidade e elevada taxa de pluviosidade, a produção de oleaginosas de palmeiras, com destaque para o dendê, é a mais recomendada. Já nos estados do Maranhão, Tocantins e parte do Piauí, Goiás, Mato Grosso e Pará, há a predominância da babaçu, com 17 milhões de hectares plantados. A região semi-árida, que abrange quase todos os estados do Nordeste e parte de Minas Gerais, propicia o cultivo da lavoura de sequeiro de oleaginosas, como é o caso da mamona e do algodão.

Tabela 1. Propriedades de óleos vegetais in natura e do óleo diesel comercial, cuja densidade foi determinada a 20°C<sup>i</sup>

| Características                                            | Tipo de óleo |        |        |       |        | Óleo diesel* |
|------------------------------------------------------------|--------------|--------|--------|-------|--------|--------------|
|                                                            | mamona       | babaçu | dendê  | soja  | piqui  |              |
| Poder calorífico (kcal/kg)                                 | 8913         | 9049   | 8946   | 9421  | 9330   | 10950        |
| Ponto de névoa (°C)                                        | 10           | 26     | 31     | 13    | 26     | 0            |
| Índice de cetano                                           | nd           | 38     | 38-40  | 36-39 | 38     | 40           |
| Densidade a 25°C                                           | 0,9578       | 0,9153 | 0,9118 | nd    | 0,9102 | 0,8497       |
| Viscosidade a 37,8°C (cSt)                                 | 285          | 30,3   | 36,8   | 36,8  | 47,0   | 2,0-4,3      |
| Destilação a 90% (°C)                                      | nd           | 349    | 359    | 370   | nd     | 338          |
| Teor de cinzas (%)                                         | nd           | 0,03   | 0,01   | nd    | 0,01   | 0,014        |
| Cor (ASTM)                                                 | 1,0          | 0,5    | 1,0    | nd    | 2,0    | 2,0          |
| Resíduo de carbono Conradson sobre 10% do resíduo seco (%) | nd           | 0,28   | 0,54   | 0,54  | nd     | 0,35         |

A transesterificação consiste na reação química de triglicerídeos (gorduras animais ou óleos vegetais) com um álcool de cadeia curta (metanol ou etanol) na presença de catalisador e é atualmente o processo mais utilizado para a obtenção do biodiesel.



Essa reação química pode ser catalisada utilizando-se agentes ácidos ou alcalinos. No entanto observa-se mais comumente o emprego de catalisadores básicos devido a uma maior velocidade de reação verificada nesse meio, bem como problemas relacionados à corrosão. Os mais utilizados são o Hidróxido de Potássio (KOH) e Hidróxido de Sódio (NaOH).

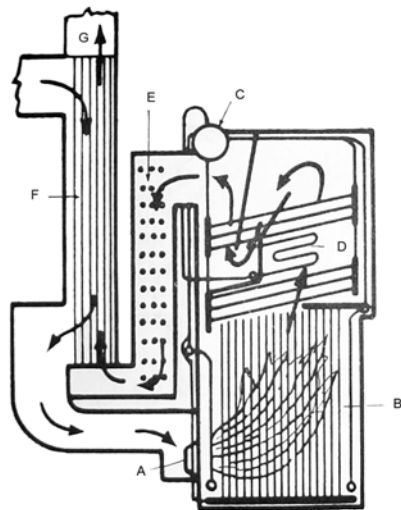
### 3. Geradores de Vapor

O Gerador de Vapor é um trocador de calor complexo que produz vapor a partir de energia térmica, ar e fluido vaporizante, constituído por diversos equipamentos associados, perfeitamente integrados, de forma a permitir a obtenção do maior rendimento térmico possível.

#### 3.1 Classificação e Componentes de Geradores de Vapor

A classificação mais usual de caldeiras de combustão refere-se à localização de água e dos gases. São divididas em três tipos: flamotubulares, aquatubulares e mistas (Shields; Pêra).

Os geradores de vapor possuem uma associação de componentes de maneira a constituírem um aparelho complexo. Esses componentes são superaquecedores, economizadores, pré-aquecedores de ar, captadores de fuligem, extratores mecânicos de cinza, entre outros. A Figura 2 mostra esquematicamente a disposição desses elementos em uma unidade complexa com fornalha para queima de óleo.



- A. Fornalha com Grelha ou Queimadores de Óleo
- B. Câmara de Combustão
- C. Caldeira
- D. Superaquecedor
- E. Economizador
- F. Aquecedores de Ar
- G. Canais de Gases

Figura 2. Princípio de Funcionamento de uma Unidade Complexa que utiliza óleo combustível

### 3.2. Descrição de Funcionamento

Ar frio atravessa e se aquece no pré-aquecedor de ar, graças ao insulflamento feito por um ventilador, projetando-se em seguida na fornalha, onde reage com combustível, assegurando sua queima contínua. Os gases de combustão provenientes dessa queima circulam através de todas as partes do gerador de vapor (caldeira, super aquecedor, economizador, aquecedor de água), fazendo trocas com todas as superfícies de absorção até atingirem a chaminé e serem eliminados para a atmosfera. Desta forma, resumidamente, a água é aquecida no economizador, vaporizada na caldeira (elevando-se a sua pressão) e superaquecida no superaquecedor até a temperatura de trabalho. O ciclo dos fluidos no gerador pode ser observado na Figura 3:

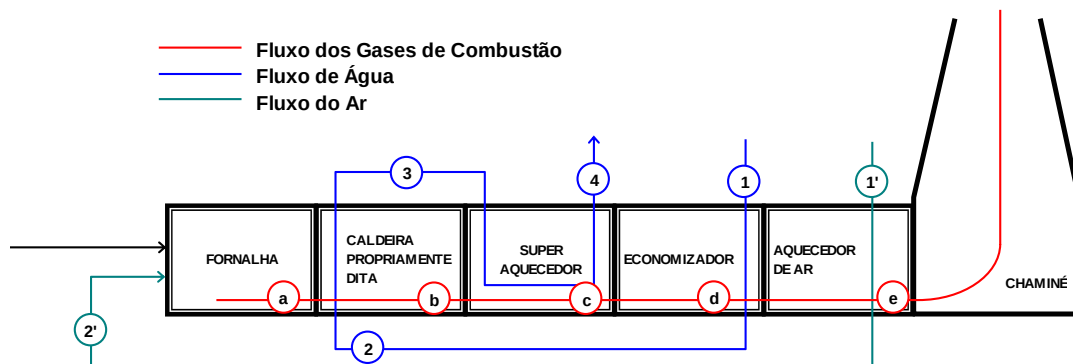


Figura 3. Esquema simplificado de um Gerador de Vapor Completo

O processo, desde a água líquida até a fase de vapor saturado, pode ser descrita no diagrama T-s, como mostra a Figura 4:

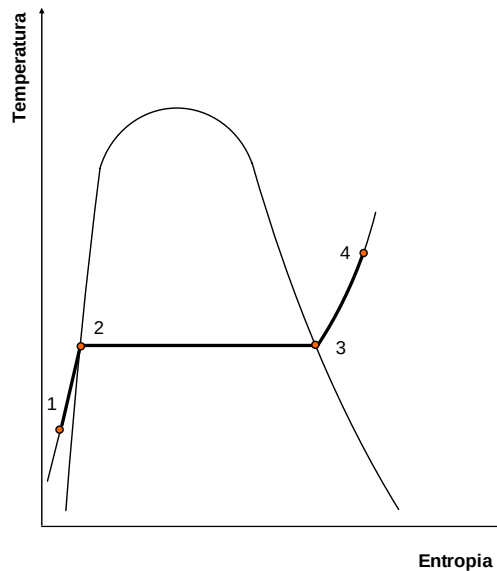
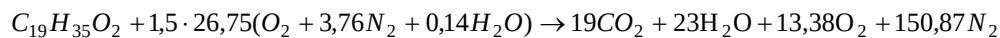


Figura 4. Diagrama T-s da água no gerador de vapor

#### 4. Transferência de Calor no Gerador de Vapor

A caldeira propriamente dita, os superaquecedores, os pré-aquecedores e os economizadores, embora sejam aparelhos de composição geométrica diferentes, se comportam como trocadores de calor. O seu dimensionamento implica no estabelecimento do tamanho da área de troca compatível com a quantidade de calor requerida do projeto. A reação de combustão do biodiesel, com 50% de excesso de ar teórico, é mostrada abaixo:



A água de alimentação se encontra a temperatura de 25°C, a partir da qual será gerado vapor saturado a pressão de 5 MPa. Temos abaixo os valores referentes às entalpias da água líquida, a 25°C, a de saturação e a da transformação líquido – vapor, na pressão desejada:

$$h_{ent} = 104,5 \text{ kJ / kg}$$

$$h_{sat} = 1154,2 \text{ kJ / kg}$$

$$h_{l-v} = 1640,1 \text{ kJ / kg}$$

A água de alimentação, portanto, deverá ser aquecida até a saturação no economizador e então passará à caldeira, onde será levada até o estado de vapor saturado. Para tanto, será necessário o seguinte fluxo de calor:

$$\dot{m}_{\text{água}} = 10,8 \text{ ton / hora} = 10,8 \cdot 10^3 \text{ kg / hora} = \frac{10,8 \cdot 10^3 \text{ kg / h}}{3600 \text{ s / h}} = 3 \text{ kg / s}$$

$$\dot{q}_{econ} = \dot{m}_{\text{água}} \cdot (h_{sat} - h_{ent}) = 3 \cdot (1154,2 - 104,5) = 3149,1 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{q}_{cald} = \dot{m}_{\acute{a}gua} \cdot (h_{l-v}) = 3 \cdot (1640,1) = 4920,3 \frac{kJ}{s}$$

E portanto, a vazão necessária de ar e combustível teórico é:

$$\dot{m}_{comb} = \frac{\dot{q}_{cald} + \dot{q}_{econ}}{\eta \cdot PCI} = \frac{3149,1 + 4920,3}{0,7 \cdot 9046} = 304,2 g / s$$

$$\dot{m}_{gases} = (AC + 1) \cdot \dot{m}_{comb} = (19,008 + 1)304,2 = 6,086 kg / s$$

Tendo em mãos os dados acima calculados, pode-se partir para o cálculo da transferência de calor no economizador e na caldeira.

#### 4.1 Correlações de Convecção e Diferença Média Logarítmica de Temperatura

Para a realização dos estudos de troca de calor no gerador, devem ser adotadas as correlações corretas (Incropera; Sonntag). A convecção, apesar de ser comum tanto na caldeira quanto no economizador, tem comportamento diferente em cada um desses dispositivos.

Na caldeira, o modelo de escoamento sobre uma placa plana é adotado, apesar de nela existirem feixes de tubos ao invés de placas. As devidas adaptações foram realizadas para a utilização de tal modelo, e a taxa de transferência de calor é calculada em função do adimensional Nusselt, função das características dinâmicas do escoamento (expressa através do número de Reynolds) e térmica (número e Prandlt).

$$\overline{Nu}_L = 0,664 Re_x^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \quad (1)$$

Já no economizador, o modelo adotado é o de escoamento sobre feixe de tubos em quicôncio. Dessa forma, a correlação que melhor expressa o escoamento é:

$$\overline{Nu}_D = 1,13 \cdot C_1 \cdot Re_{D,max}^m \cdot Pr^{1/3} \quad (2)$$

Na convecção, a variação da temperatura do fluido ao longe, ou seja, dos gases de combustão, é considerável, sendo então necessário a adoção do conceito de Diferença Média Logarítmica de Temperatura, a fim de não se superestimar a parcela de diferença de temperatura na troca de calor. Desta forma, a troca de calor em um trocador de calor pode ser expressa da seguinte forma:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (3)$$

na qual, para um trocador de calor de correntes contrárias, a expressão de  $\Delta T_{lm}$  assume a fórmula:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (4)$$

$$\Delta T_1 \equiv T_{h,e} - T_{c,s}$$

$$\Delta T_2 \equiv T_{h,s} - T_{c,e} \quad (5)$$

onde os índices *h* e *c* referem-se ao fluido quente e ao fluido frio, respectivamente, e *e* e *s* referem-se às seções de entrada e saída. À diferença média logarítmica de temperatura, para um trocador de calor de correntes cruzadas, é empregado um fator de correção *F*, e desta forma:

$$\Delta T_{lm} = F \cdot \Delta T_{lm,CC} \quad (6)$$

$$Q = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{lm,CC} \quad (7)$$

#### 4.2 Radiação no Gerador de Vapor

A radiação da chama do combustível se verifica em comprimentos de ondas luminosas. Os corpos receptores dessa radiação são as placas metálicas resfriadas pela água.

Na Caldeira Propriamente Dita, a influência da radiação de chama do biodiesel é a maior responsável pela transferência de calor. A chama do combustível é responsável por esse modo de transmissão de calor, que pode ser equacionado da seguinte maneira:

$$Q = \psi \cdot P \cdot \varepsilon_p \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_{ch}^4 - T_p^4) \quad (8)$$

na qual

$\psi$  é fator geométrico do trocador de calor;

$P$  é a emissividade da chama do combustível;

$\varepsilon_p$  é a emissividade do material do tubo;

$A$  é a área do tubo irradiada;

$T_{ch}$  é a temperatura de chama ;

$T_p$  é a temperatura dos tubos;

$\sigma$  é constante de Stefan-Boltzmann.

A radiação dos gases ocorre no comprimento de ondas do infravermelho. Gases biatômicos existentes nos produtos de combustão, principalmente o gás carbônico e o vapor d'água se comportam como bons emissores de energia radiante. A radiação nos gases difere daquela verificada nos corpos sólidos em dois aspectos: no comprimento de onda e na forma da emissão. Nos corpos sólidos, a irradiação é um fenômeno de superfície enquanto que nos gases dependem, além da temperatura, da espessura da camada, pressão de cada componente, do formato e da área da superfície exposta. Dessa forma, a taxa de transferência de calor fornecida através da radiação dos gases pode ser expressa da seguinte maneira:

$$Q_{gases} = \sigma \cdot A \cdot [\varepsilon_g(T_g) \cdot T_g^4 - \alpha_p(T_p) \cdot T_p^4] \quad (9)$$

$\varepsilon_g(T_g)$  é a emissividade dos gases;

$\alpha_p(T_p)$  é a absortividade dos gases;

$\sigma$  é a constante de Stefan Boltzmann;

e  $A$  é a área de troca de calor.

#### 5. Cálculos de Projeto

O Gerador de Vapor proposto inicialmente foi projetado para uma demanda de 10,8ton de vapor/hora numa pressão de 5MPa, não sendo necessário superaquecê-lo (Shintani e Yasuda, 2006). Dessa maneira, os componentes onde foram calculadas as trocas de calor são a caldeira integrada a fornalha e o economizador. O dimensionamento de cada um dos componentes levou em conta as seguintes dimensões e áreas para o escoamento dos gases de combustão:

**Economizador:** paralelepípedo, de dimensões 1,8m x 0,8m x comprimento a ser definido.

**Caldeira/fornalha:** paralelepípedo, de 1m x 1,8m x 1,2m de comprimento.

O arranjo esquemático é mostrado na Figura 5.

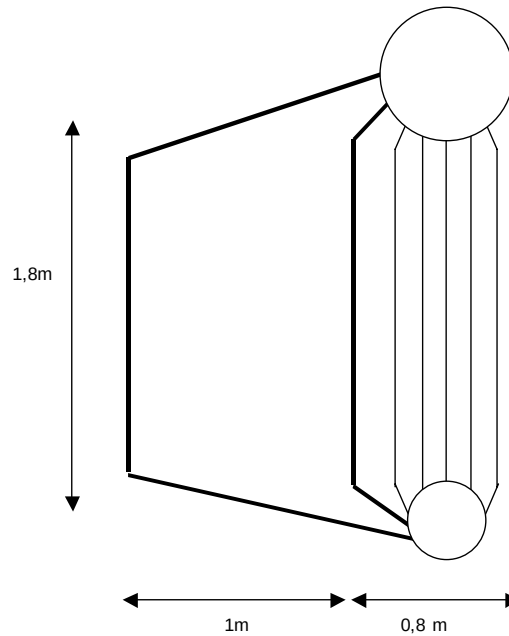


Figura 5. Desenho esquemático da caldeira e do economizador.

Resultados comparativos observados nas tabelas abaixo podem ser analisados.

Tabela 2. Resultados comparativos da otimização do Gerador de Vapor (I)

|                     | Temperatura de entrada dos Gases (°C) |         | Temperatura de Saída dos Gases (°C) |         |
|---------------------|---------------------------------------|---------|-------------------------------------|---------|
|                     | Otimizado                             | Inicial | Otimizado                           | Inicial |
| <b>Caldeira</b>     | 1894                                  | 883,4   | 1875                                | 838     |
| <b>Economizador</b> | 1875                                  | 838     | 1357                                | 450     |

Uma grande diferença é a temperatura de entrada dos gases em cada um dos componentes. No projeto otimizado, ela é próxima da temperatura adiabática de chama do biodiesel. Isso foi resultado da integração da caldeira à fornalha, minimizando as perdas para o ambiente. Consta na literatura que uma boa aproximação pode ser feita considerando-se uma diminuição de 3% da temperatura, fato utilizado no projeto.

Tabela 3. Resultados comparativos da otimização do Gerador de Vapor (II)

|                     | Área Total m² |           | Troca de Calor (kW) | Taxa de troca de calor específica (kW/m²) |           |
|---------------------|---------------|-----------|---------------------|-------------------------------------------|-----------|
|                     | Inicial       | Otimizado |                     | Inicial                                   | Otimizado |
| <b>Caldeira</b>     | 8,99          | 5,842     | 4920,3              | 547,3                                     | 842,2     |
| <b>Economizador</b> | 41,47         | 4,49      | 3149,1              | 75,9                                      | 701,4     |

O modo como o projeto foi feito inicialmente levou em conta uma área pré-estabelecida, partindo-se para a busca então das temperaturas dos gases. Na otimização, a temperatura foi fixada, sendo o objetivo final o cálculo da área de troca de calor.

## 6. Conclusões

A utilização do biodiesel como combustível alternativo ao uso de derivados de petróleo tem-se mostrado bastante atraente por diversos aspectos. Dentre eles, podemos citar o biodiesel como sendo um combustível ecologicamente correto, que contribui para a diminuição de gases que causam o efeito estufa na atmosfera, uma vez que é ele originado de plantas que realizam fotossíntese, capturando carbono da atmosfera. Além do

mais, a sua produção tem diversos atrativos. A abundância de terras cultiváveis de suas matérias primas (soja, dendê, mamona, entre várias outras) também se apresenta como um grande incentivo à sua utilização.

Geradores de vapor compactos, como o apresentado no projeto, que utilizam óleos como combustível (seja o biodiesel, ou mesmo o óleo diesel de origem mineral) apresentam um bom rendimento térmico se forem construídos de forma a se minimizar as perdas.

A união da caldeira propriamente dita à fornalha minimizou uma dessas perdas. A radiação da chama é destinada quase integralmente ao tubos de água que, como foi visto, dependem, nesse parte do gerador, dessa forma de transferência de calor. Além disso, essa é a parte essencial no que se refere ao tipo de combustível utilizado. A radiação da chama, principal mecanismo de transferência de calor na fornalha, depende do combustível utilizado, no caso, o biodiesel.

Outra otimização no projeto foi aproximar a temperatura dos gases, logo na saída da fornalha, àquela da temperatura adiabática da chama. Foi visto que na caldeira, a variação de entalpia dos gases é pequena. Porém ela se torna fundamental no economizador, uma vez que a convecção é a maior responsável pela transferência de calor nesse componente. Ainda assim, após a troca de calor por convecção, a temperatura dos gases ainda será elevada o suficiente para que seja aproveitada em algum outro processo térmico, ou mesmo para o aquecimento do ar de combustão.

Tais melhorias no projeto resultaram na compactação do gerador de vapor, ou seja, menos área para a mesma quantidade de potência requerida para a geração do vapor.

## 7. Direitos autorais

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

## 8. Referências

- FERRARI, R. A. et al. *Biodiesel de soja – taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físicoquímica e consumo em gerador de energia*. Paraná: Quim. Nova, Vol. 28, No. 1, 19-23, 2005.
- HOTTEL, H. C.; SAROFIM, A. F. *Radiative Transfer*. New York: McGraw-Hill Book Company.
- INCROPERA, F. P. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- Ministério da Indústria e do Comércio, MIC; *Óleos Vegetais– Experiência de Uso Automotivo Desenvolvida pelo Programa OVEG I*; Secretaria de Tecnologia Industrial; Coordenadoria de Informações Tecnológicas; Brasília, DF, 1985.
- PERA, H. *Geradores de Vapor*. São Paulo: Editora Fama, 1990, p.1-6
- PORTAL DO BIODIESEL, [www.biodiesel.gov.br](http://www.biodiesel.gov.br), acessado em 28 de abril de 2007.
- SHIELDS, C. D. *Boilers*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1960. p. ix
- SHINTANI, C.; YASUDA, F. *Estudo da utilização do biodiesel na geração de vapor para a agroindústria*. São Paulo: Trabalho de conclusão de curso – EPUSP.
- SONNTAG, R. E.; VAN WYLEN, G. J.; BORGNAKKE, C. *Fundamentos da Termodinâmica*. São Paulo: Editora Edgar Blucher.

## BIODIESEL STEAM GENERATOR DESIGN OPTIMIZATION

**Danielle Bonfim Tanaka**

[danibonta@gmail.com](mailto:danibonta@gmail.com)

**Abstract.** Steam generators constitute a predominant mechanism employed in the production of steam, which is a fluid used in large-scale by the industry. This work focuses on the use of biodiesel as fuel for such generators. The first part this study presents a literature review on this topic. Following, the effectuality of the project is discussed through calculations. The main purpose was to optimize the heat transfers inside the steam generator, a process that resulted in the decreasing of 80% of the total area. The temperature of the combustion gases in the furnace is hypothetically considered as being close to the temperature of the adiabatic flame, which resulted in higher gas temperature in the economizer. In this way the rate of heat transference per area has increased significantly.

**Keywords.** Steam boiler, Biodiesel, heat transfer, furnace irradiation

---