

# **SIMULAÇÃO E CONTROLE GLOBAL DE UMA PLANTA TÍPICA PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL**

B. F. da SILVA<sup>1</sup>, F. V. da SILVA<sup>1</sup> e J. E. SCHMITZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química  
E-mail para contato: bfsfirmينو@yahoo.com.br

**RESUMO** – A produção de biodiesel tem crescido em importância nos últimos anos, sendo um importante substituto ao diesel. No Brasil, a maior parte da produção utiliza óleo de soja como matéria-prima, sendo a catálise homogênea alcalina a rota mais comum. O processo simulado representa um processo típico, no qual, óleo de soja é representado como trioleína pura na reação com metanol, utilizando soda cáustica como catalisador. Um modelo cinético rigoroso foi usado para representar a dinâmica do processo de transesterificação. Assim sendo, este trabalho tem como objetivo avaliar um sistema de controle global (plantwide) para um processo de produção de biodiesel. Foi utilizada a abordagem de simulação computacional para realizar a modelagem do processo, sendo escolhido o software Aspen Plus Dynamics para avaliar o comportamento dos controladores e das variáveis de interesse ao longo do tempo.

## **1. INTRODUÇÃO**

O biodiesel é uma alternativa ao diesel proveniente do petróleo. Sua utilização crescente, busca a redução da emissão de poluentes e diminuição de dependência do petróleo. Na última década, normas regulatórias colocaram a obrigatoriedade da adição de 5% de biodiesel ao diesel vendido ao mercado brasileiro, o qual denomina-se diesel B5.

No final de 2012, a venda de diesel B5 chegou a 55,88 milhões de m<sup>3</sup>, representando 43% do consumo de combustíveis. Esta cifra representa um aumento de 7% em relação a 2011. Totalizou-se 2,73 milhões de m<sup>3</sup> de biodiesel misturados no diesel B5, mostrando a grande demanda do biocombustível para o país (ANP, 2013, 2013b).

A mistura diesel e biodiesel, além de diminuir a dependência do combustível fóssil, traz vantagens ambientais, já que tem emissão de diversos poluentes reduzida com o aumento da porcentagem do biocombustível adicionada a mistura (EPA, 2002).

O termo biodiesel descreve uma mistura de substâncias semelhantes ao diesel que pode ser total ou parcialmente inserida como substituinte do diesel de origem fóssil. Comumente é composto por ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos. Para sua obtenção, realiza-se a esterificação de ácidos graxos ou a transesterificação de triglicerídeos presentes em óleos vegetais e gordura animal.

A transesterificação ocorre através da reação do óleo vegetal com um álcool e geralmente na presença de um catalisador, o qual pode ser alcalino ou ácido em meio homogêneo ou heterogêneo, havendo ainda a possibilidade de realizar a reação através de

catalisadores enzimáticos ou rotas não catalíticas envolvendo condições mais severas de temperatura e pressão.

## 2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo proposto, simula a reação do óleo de soja com metanol, na presença de NaOH como catalisador. A escolha da rota foi embasada no mercado brasileiro, que tem cerca de 70% da produção através do óleo de soja, segundo a ANP (2013) e apresenta o metanol como álcool mais utilizado devido ao custo e qualidade final do biodiesel.

Para fins de simulação, devido à dificuldade de encontrar dados termodinâmicos para os componentes da mistura de triglicerídeos do óleo de soja, optou-se por realizar uma aproximação. Utilizou-se trioleína, um triglicerídeo composto por três ácidos oleicos. O peso molecular desse componente se aproxima da média presente na mistura de triglicerídeos do óleo de soja, sendo uma aproximação utilizada em diversos estudos. (Wang, 2008; Kiss, 2011; Zhang *et al.*, 2012).

Para o modelo cinético da reação utilizou-se o trabalho de Nouredini e Zhu (1997). Os autores propuseram um conjunto de reações reversíveis, como pode-se observar na Figura 1. Os parâmetros cinéticos da transesterificação do óleo de soja com metanol e catalisador homogêneo básico, foram ajustados para o modelo de Arrhenius conforme a Tabela 1.

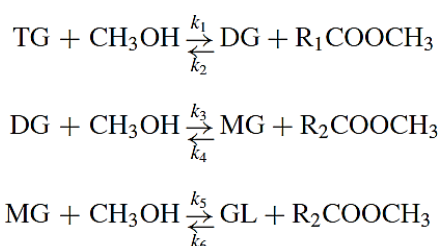


Figura 1– Reação de transesterificação, na qual TG, DG, MG e GL são triglicerídeos, diglicerídios, monoglicerídeos e glicerol.

Tabela 1– Parâmetros cinéticos da reação de transesterificação do óleo de soja.

	Óleo de Soja <sup>1</sup> (Nouredini e Zhu, 1997)	
	Energia de Ativação (cal/mol)	Constante da taxa (L/mol min) a 50°C
TG --> DG	E1 = 13145	k1 = 0,05
DG --> TG	E2 = 9932	k2 = 0,11
DG --> MG	E3 = 19860	k3 = 0,215
MG --> DG	E4 = 14639	k4 = 1,228
MG --> GL	E5 = 6421	k5 = 0,242
GL --> MG	E6 = 9588	k6 = 0,007

<sup>1</sup> Ensaios realizados com Re=6200.

O processo engloba a reação em três reatores CSTR sequenciais com alimentação de metanol em cada reator, o qual encontra-se em excesso em proporção de 9:1 necessária para

obter a pureza final dos produtos, conforme pode ser observado na Figura 2. O catalisador é incorporado em cada reator em solução alcóolica. Após as saídas dos dois primeiros reatores ocorre uma separação inicial dos produtos em dois decantadores (D100 e D101), os quais separam uma fase rica em glicerol para realizar a purificação deste subproduto por destilação e a fase rica com biodiesel segue para o próximo reator.

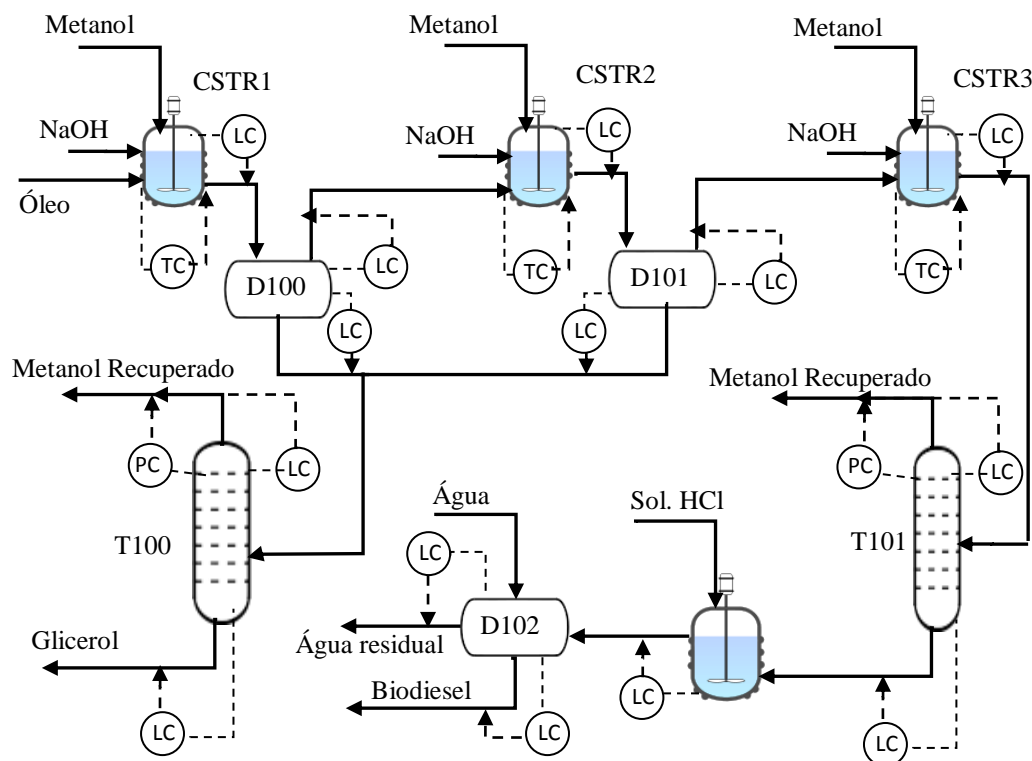


Figura 2 – Fluxograma do processo

As colunas de destilação são implementadas de modo a obter uma pureza necessária para um padrão internacional de comercialização, estabelecendo como restrição 96,5% de pureza para o biodiesel, valor este fixado pelo padrão europeu EN 14214, o qual influenciou o padrão brasileiro.

Para a coluna de destilação T100, responsável pela recuperação do metanol e do glicerol, foi utilizado 10 pratos com alimentação no 4º prato. A pressão de operação o condensador foi de 20 kPa. A coluna necessitou trabalhar com vácuo para atingir a separação desejada sem ultrapassar o limite de temperatura de 150 °C, na qual começa a ocorrer a degradação do glicerol.

Já a recuperação do biodiesel, ocorreu na coluna de destilação T101, na qual utilizou-se 5 pratos, com alimentação no 3º prato. A pressão de operação do condensador ficou em 50 kPa para garantir que a coluna não ultrapassasse 250 °C, temperatura na qual pode ocorrer a degradação dos ésteres.

Após a destilação, a corrente rica em ésteres passar por um neutralizador, que reage uma solução de HCl com o NaOH residual, gerando água e NaCl. Estes resíduos são eliminados na etapa seguinte de lavagem, na qual água é adicionada e ocorre a separação em um separador bifásico.

### 3. METODOLOGIA

Definiu-se a capacidade da planta em aproximadamente 200.000 toneladas por ano, produzindo biodiesel dentro dos padrões de comercialização presentes na norma europeia. Para atingir essa meta de produção, estabeleceu-se o valor de 28 kmol/h de trioleína como corrente de entrada.

O processo inicialmente foi simulado no software comercial *Aspen Plus*, através do qual obteve-se o regime permanente do processo. Para avaliar o comportamento ao longo do tempo, a simulação foi exportada para o software *Aspen Plus Dynamics*, o qual possibilitou a análise do regime transiente.

Para o cálculo das propriedades termodinâmicas das substâncias do processo foi utilizado o pacote termodinâmico UNQUAC, com a determinação dos parâmetros faltantes pelo método de contribuição de grupos UNIFAC. Esta consideração foi realizada em outros estudos, tais como os trabalhos de Zhang *et al.* (2012) e Kiss (2011).

Foram realizadas perturbações na entrada de trioleína do processo de -3%, -5%, -8%, 3%, 5% e 8% para o fluxo molar. O tempo de simulação foi estabelecido até um novo regime permanente. Controladores foram implementados focando-se na planta como um todo, priorizando-se os objetivos de controle, restrições e controles complementares para alguns equipamentos.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os controladores implementados são mostrados na Figura 2 na descrição do processo e os valores dos seus parâmetros de controle estão listados na Tabela 2. A sintonia foi realizada através do método de Ziegler-Nichols implementado no software *Aspen Plus Dynamics*. Escolheu-se utilizar somente controladores PID para esse processo, tendo como hipótese que não há limitação para seu uso, ou seja, supõe-se que esteja disponível poder computacional suficiente para sua utilização. Soma-se a isto a ampla presença destes controladores na indústria, sendo o controle PID o mais comum (Desborough e Miller, 2002).

Os controles aplicados ao processo mostraram-se adequados, tendo em vista que conseguiram manter os set-points das principais variáveis. A coluna T101, a qual é responsável pela recuperação do metanol e purificação do biodiesel, foi considerado um ponto crítico do processo, já que impacta diretamente na qualidade do produto. Atingiu-se a pureza de 98,48% de ésteres no biodiesel para alimentação inicial de trioleína, resultado acima do previsto pela norma EN 14214 que regula o biocombustível.

Tabela 2– Parâmetros de sintonia dos controladores.

Controlador	Ganho (%/%)	Constante de tempo integral (min)	Constante de tempo derivativo (min)
Pressão do condensador T100	0,51	2,40	0,60
Nível do condensador T100	0,24	4,36	1,09
Nível do refeedor T100	0,21	7,10	1,78
Pressão do condensador T101	0,19	2,40	0,60
Nível do condensador T101	0,06	2,40	0,60
Nível do refeedor T101	0,06	2,40	0,60
Nível da fase 1 do D100	90,95	3,50	0,87
Nível da fase 2 do D100	84,80	2,40	0,60
Nível da fase 1 do D101	0,52	2,56	5,00
Nível da fase 2 do D101	0,89	3,60	0,90
Nível do CSTR 1	81,91	2,47	0,62
Temperatura do CSTR 1	7,51	2,45	0,61
Nível do CSTR 2	89,07	2,46	0,62
Temperatura do CSTR 2	5,62	2,46	0,62
Nível do CSTR 3	64,42	3,68	0,92
Temperatura do CSTR 3	5,21	2,45	0,60

Para as perturbações de 3%,5% e 8% no fluxo molar na entrada de trioleína, notou-se que a pureza do biodiesel sofre leve queda seguida de uma subida até a estabilização em um patamar superior ao inicial, porém, dentro dos limites desejados para a variável, este resultado pode ser visto na Figura 3. A natureza sequencial da reação aliado a alteração na razão entre metanol e óleo promove este comportamento na curva de pureza.

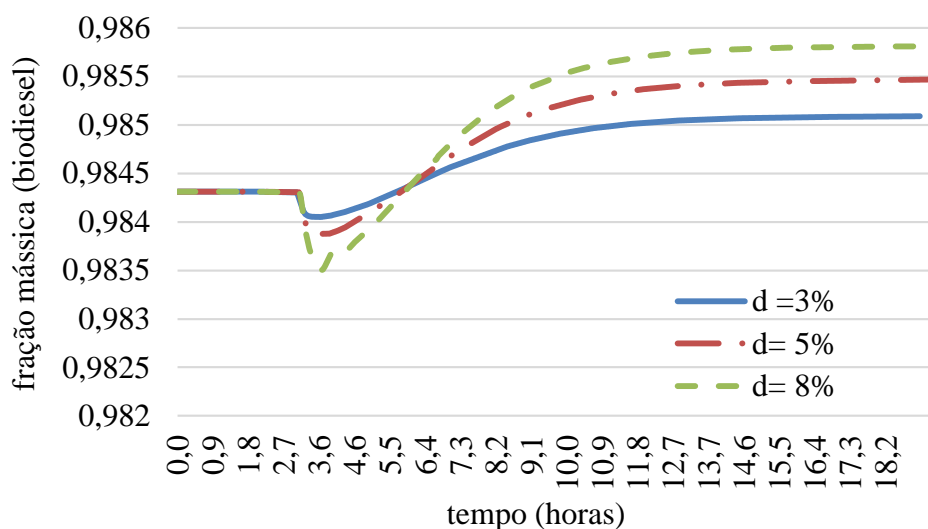


Figura 3 – Comportamento da pureza do biodiesel devido às perturbações de acréscimos do fluxo molar na corrente de trioleína.

Para as perturbações em que há queda do fornecimento de trioleína em -3%, -5% e 8% no fluxo molar, observa-se comportamento contrário, estabilizando-se em um novo regime permanente com uma pureza menor que a inicial. Este efeito acompanha o decréscimo na corrente de óleo, conforme se verifica na Figura 4.

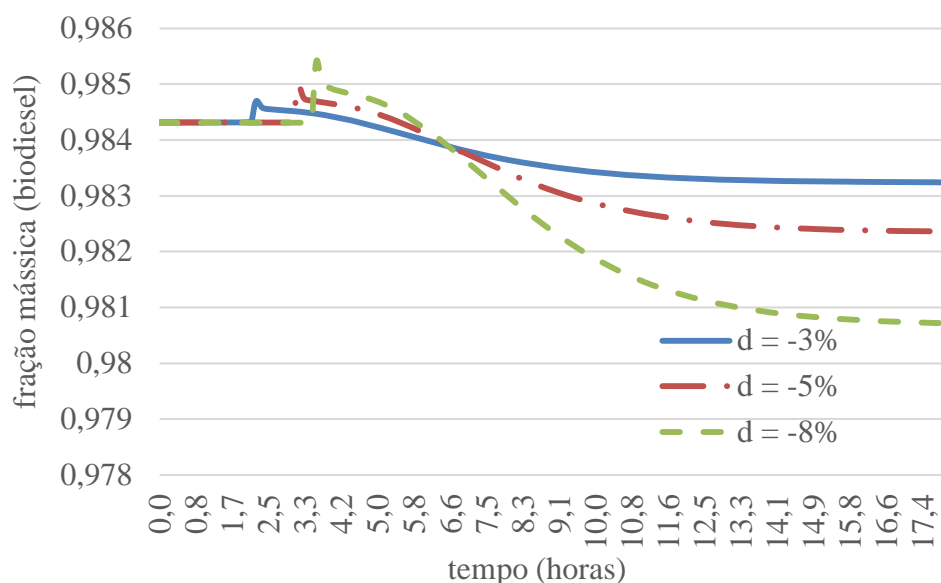


Figura 4 – Comportamento da pureza do biodiesel devido às perturbações de decréscimo do fluxo molar na corrente de trioleína.

A coluna de purificação de biodiesel T101 é um ponto crítico do processo, já que afeta diretamente a qualidade do produto final e tem a necessidade do controle da pressão do condensador, o qual trabalha com vácuo para evitar uma temperatura muito alta na separação e a degradação dos ésteres do biodiesel.

O controle da pressão foi realizado através da taxa de calor no condensador, ou seja, do fluxo de utilidade fria do mesmo. O condensador foi simulado de modo a obter uma saída subresfriada a 41,5 °C.

O comportamento das variáveis controladas e manipuladas da coluna de purificação de biodiesel pode ser visto na Figura 5, na qual aplicou-se um distúrbio no fluxo molar de trioleína de -3%. Nota-se uma rápida resposta e curto tempo de estabilização para a sintonia realizada. Para as demais perturbações estudadas obteve-se um resultado semelhante.

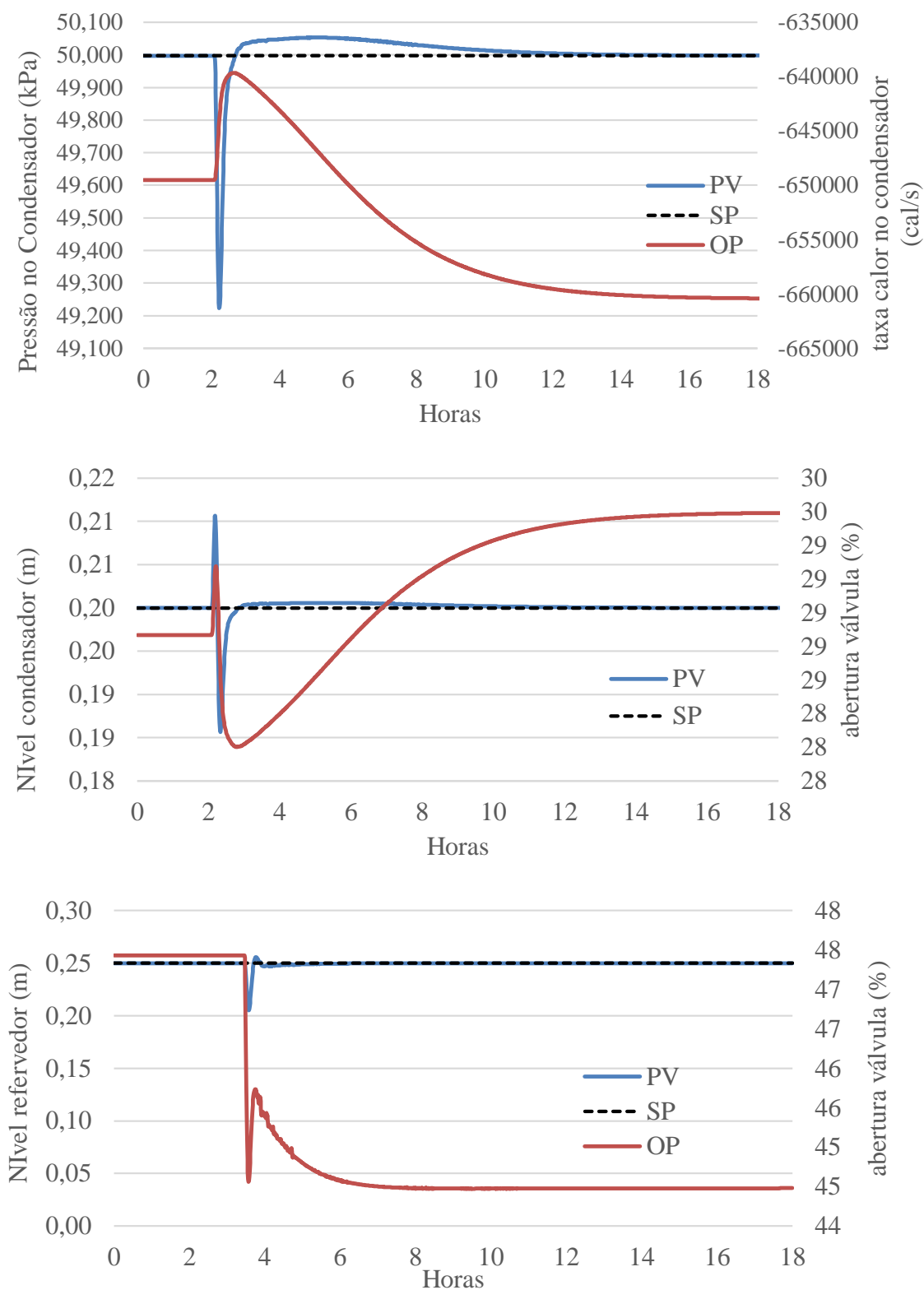


Figura 5 – Gráficos do comportamento dos controladores da coluna de purificação de biodiesel T101 (PV- Variável de processo; SP – set point; OP-Variável manipulada)

## 5. CONCLUSÕES

O trabalho apresentou uma simulação da rota reacional mais abrangente da indústria. Utilizou-se cinética rigorosa, com parâmetros ajustados ao modelo cinético de Arrhenius, em um conjunto de reatores CSTR em série. A simulação atingiu as restrições estipuladas para a produção do biodiesel, tal como a pureza em padrão comercial. Um sistema de controle para a planta inteira foi estabelecido, no qual alguns controladores foram analisados, verificando-se que foi possível o controle do processo para as perturbações testadas. Como sequência do trabalho, faz-se necessário à implementação de outras propostas de controle através de metodologias orientadas para o controle de planta inteira (*plantwide*), assim como de indicadores globais para realizar comparação da performance das propostas de controle.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e a Faculdade de Engenharia Química, a qual apoia o desenvolvimento científico e a formação de pessoal qualificado.

## 7. REFERÊNCIAS

ANP. Boletim mensal de biodiesel: mês de dezembro de 2012. 2013. Disponível em:<<http://www.anp.gov.br>>. Acessado em: 25/02/2013.

ANP. Boletim mensal de combustíveis: mês de fevereiro de 2013. 2013b. Disponível em:<<http://www.anp.gov.br>>. Acessado em: 25/02/2013.

DESBOROUGH, L., MILLER, R. “Increasing customer value of industrial control performance monitoring - Honeywell's experience”. *In AIChE symposium series* (pp. 169-189). New York; American Institute of Chemical Engineers; 1998, 2002.

KISS A. A. “Heat-integrated reactive distillation process for synthesis of fatty esters” .*Fuel Processing Technology*, 92(7), 1288–1296, 2011.

NOUREDDINI, N., ZHU, D. “Kinetics of transesterification of soybean oil”. *Journal of American Oil Chemists' Society*, 74, 1457–1463, 1997.

ZHANG, C.; RANGAIAH, G. P.; KARIWALA, V. *Plantwide Control: Recent Developments and Applications*. Cap. 14: Design and Plantwide Control of a Biodiesel Plant, p. 293, 2012.

WANG, T. Process simulation, integration and optimization of blending of petrodiesel with biodiesel. 2008. *Tese de Doutorado*. Texas. A&M University.