



## CONTROLE E MONITORAMENTO DE UMA PLANTA DE PRODUÇÃO DE BIODIESEL

João Nilson Medeiros Santos<sup>1</sup>; Yago Matheus da Silva Veloso<sup>1</sup>; Paulo Jardel P. Araujo<sup>1</sup>; Manuela Souza Leite<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Tiradentes, Instituto de Tecnologia e Pesquisa - ITP – [yagomsv@globo.com](mailto:yagomsv@globo.com)

### RESUMO

O biodiesel é um biocombustível que pode ser produzido através de matéria-prima renovável e pode substituir o diesel derivado do petróleo. Para isso o controle das reações de produção deste é de fundamental importância para a qualidade do produto final. Com isso existe a necessidade de que as variáveis do processo sejam monitoradas e controladas. Esse trabalho teve como objetivo desenvolver um protótipo automatizado visando o controle da temperatura da reação de transesterificação utilizado para produção de biodiesel. Para tal foi utilizado nesse protótipo um CLP (controlado lógico programável) que executa a função de controlar as variáveis desejadas, a leitura das temperaturas ao longo do sistema foi feito através de sensores PT100, utilizou-se um reator batelada encamisado, bombas volumétricas que tinham a função de circular um fluido de troca térmica para aquecimento ou resfriamento do reator. Além disso, foi desenvolvido um sistema supervisor para monitoramento em tempo real do processo. O sistema foi automatizado de forma a proporcionar o desenvolvimento de estratégias de controle baseadas em duas malhas de processo: malha interna utilizando a temperatura do fluido térmico do sistema como variável controlada e malha externa utilizando a temperatura interna do reator como variável controlada. O protótipo proporcionou a instrumentação do sistema e obtenção dos parâmetros de sintonia para controladores PID, seguindo procedimentos metodológicos descritos para treinamentos em sintonia de controladores. Os controladores projetados foram utilizados para realizar ensaios para a obtenção de resposta do sistema em malha fechada para fins de aplicação em controle experimental.

**Palavras-chave:** Biodiesel, controle, monitoramento, PID.

### 1. INTRODUÇÃO

O biodiesel é considerado um combustível natural usado em motores de ciclo-diesel, produzido através de fontes renováveis e atendendo as especificações da ANP. Do ponto de vista técnico, o biodiesel contribui com o desenvolvimento de novas tecnologias para propulsão de motores, abrindo portas para o desenvolvimento de novos combustíveis.

Recentemente, o grande interesse mundial para o aumento da produção de biodiesel tem crescido no mundo todo devido ao aumento do preço dos combustíveis e o aumento da demanda

dos combustíveis fósseis, os biocombustíveis de um modo geral se tornam uma boa alternativa de matriz energética em substituição aos combustíveis derivados do petróleo.

Quimicamente, o biodiesel é definido como éster monoalquílico de ácidos graxos derivados de lipídeos de ocorrência natural e pode ser produzido, juntamente com a glicerina, pela reação de triacilgliceróis (ou triglicerídeos) com álcool, comumente o etanol ou metanol, na presença de um catalisador ácido ou básico [SCHUCHARDT et al., 1998].

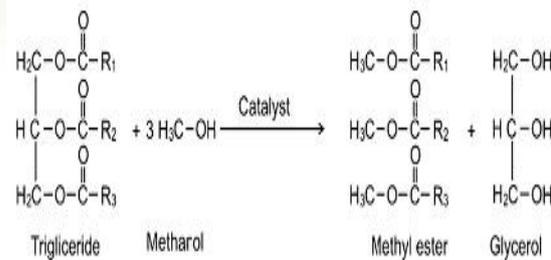


Figura 1: Ilustração da reação de transesterificação. Fonte: Chouhan et al., 2011.

Quanto às questões técnicas, de uma forma geral, o biodiesel, enquanto produto tem as seguintes características: é virtualmente livre de enxofre e aromáticos, possui viscosidade e ponto de fulgor superiores ao óleo diesel convencional, apresenta excelente lubricidade, é perfeitamente miscível no óleo diesel, possui nicho de mercado específico, diretamente associado à atividades agrícolas e é considerado como fonte não emissora de GEE (Gases de efeito estufa) [CHRISTOFF, 2006].

O principal problema do controle das variáveis em um reator de biodiesel é devido as não linearidades existentes, agravado pela modelagem complexa dos fenômenos de transferência de calor e massa, oscilações na pressão e temperatura interna do reator, e frequente overshoot. Além da natureza não linear do processo, é preciso considerar as limitações de segurança operacionais impostas pelas variáveis manipuladas [WALI et al., 2012; MJALLI e HUSSAIN, 2009]. Apesar da concordância quanto ao papel fundamental da automação e do controle de processos na qualidade final dos produtos em geral, ainda é incipiente o desenvolvimento de trabalhos experimentais na aplicação de controladores nestes processos.

Este trabalho propôs a configuração de um sistema de controle aplicado em um protótipo para produção de biodiesel. Destaca-se à configuração da comunicação realizada entre o

controlador lógico programável (CLP) e o sistema supervisor que é uma ferramenta muito importante para a manutenção das condições operacionais do processo.

Foi desenvolvido também estratégias para aplicação de controle de processo baseado em controle PID.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Aparato experimental

A planta do processo (Figura 2) é composta de um reator de aço inox encamisada com capacidade de 1,1L, sensores e transmissores de temperatura tipo pt100, bombas volumétricas, inversores de frequência e de potência, resistência elétrica. A planta irá opera de forma automatizada através do CLP. O sistema supervisor será interconectado com CLP, servindo como banco de dados. O aparato experimental foi montado no Laboratório de Energias Renováveis do Instituto de Tecnologia e Pesquisa (ITP).



Figura 2: Planta para produção de Biodiesel.

Para acionamento automático da planta foram utilizados inversores de frequência e variador de potência. Para acionar e variar a frequência de rotação



das bombas volumétricas das linhas de circulação do fluido de troca térmica foram utilizados inversores de frequência. Enquanto que os variadores de potência acionam e variam a carga térmica proporcionada pela resistência elétrica de imersão de 3000 W, aquecendo o fluido térmico que circulará no sistema.

Os sensores de temperatura utilizados neste trabalho foram do tipo Pt100. Estes sensores/transmissores foram instalados no sistema de forma a monitorar a temperatura do reator, selecionada como variável a ser controlada no processo, e as temperaturas de entrada e saída da camisa do reator.

## 2.2. Ensaios de reação

As reações de transesterificação foram realizadas em bateladas no reator de vidro encamisado, e com agitação mecânica (300 rpm). A este reator foram adicionados o óleo de gordura residual devidamente filtrado e tratado. Houve um pré-aquecimento do óleo a 50 °C, e em seguida, foram adicionados ao óleo o d etanol anidro 99.5% PA previamente misturado com o catalisador NaOH mantendo-se uma razão estequiométrica óleo/álcool/NaOH de 1:6. O set-point da reação foi de 60 °C e o set-point do fluido térmico da malha secundário do controle cascata utilizado foi de 100°C. Vazão de recirculação do fluido térmico foi fixada em 15 L/H.

As amostras do biodiesel produzido nesse processo foram analisadas ao final com a utilização de aparelho de cromatografia.

## 2.3. Determinação dos parâmetros do controlador PID

### 2.3.1. Método de sintonia de Ziegler-Nichols

Neste método ajustaram-se primeiro os valores de  $T_i=$  e  $T_d=0$ , utilizando-se somente a ação de controle proporcional. Aumentou-se o valor de  $K_p$  de 0 a um

valor crítico  $K_{cr}$  para o qual o sinal de saída apresenta oscilações mantidas.

Se o sinal de saída não apresentar oscilações, quaisquer que sejam os valores de  $K_p$ , então o método não se aplica. Em consequência, são determinados experimentalmente os valores de ganho crítico  $K_{cr}$  e o período crítico correspondente  $P_{cr}$ . Ziegler e Nichols sugeriram ajustar os valores dos parâmetros  $K_p$ ,  $T_i$  e  $T_d$  de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros para sintonia segundo o método de Ziegler - Nichols.

Tipo de controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	0,5 $K_{cr}$		0
PI	0,45 $K_{cr}$	1/1,2 $P_{cr}$	0
PID	0,6 $K_{cr}$	0,5 $P_{cr}$	0,125 $P_{cr}$

A avaliação do desempenho de controladores depende do interesse e da função de quem está avaliando, ou seja, as bases experimentais dependem da experiência pessoal de cada um. Muitas vezes um sistema com alta velocidade de resposta e com algumas oscilações é melhor do que um sistema sem oscilações, mas que demore um pouco pra estabilizar. Para um engenheiro de controle é mais importante manter a variável no nível desejado do que economizar energia, é claro que a energia também é um fator muito importante e nunca deve ser desconsiderado.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1. Controle e monitoramento das variáveis do processo

Para o controle do processo de produção de biodiesel foi montado um painel elétrico para a acomodação do sistema de automatização da planta que conta com: CLP e dois módulos (saídas e entradas analógicas e digitais), inversores



de frequência, relé de estado sólido e transformador.

A instrumentação para medição da temperatura ao longo do sistema foi feita através da instalação de sensores de temperatura do tipo PT100. Foram utilizadas duas bombas volumétricas nas linhas para deslocar o fluido térmico frio e quente.

Foram realizadas configurações de alarmes, para alertar sobre o estado e comportamentos das principais tags do processo em um sistema supervisório, vale ressaltar que o supervisório foi desenvolvido no software Indusoft Studio.

A implementação de alarmes é importante para alertar e informar ao supervisor valores que determinadas variáveis assumem e que implicam em relevância para o andamento do processo. Um exemplo seria alertar sobre quando a temperatura atinge seus valores de máximo e mínimo de operação dentro do processo.

A Figura 3 mostra a tela de variáveis de controle na qual é permitido atribuir valores as variáveis: vazão, RPM do motor da bomba e nível e acompanhar as respectivas saídas, é permitido também modificar o valor de setpoint (valor da temperatura) da variável de processo.



Figura 3: Variáveis de controle.

O processo de controle passa por duas etapas, a etapa manual e a automática, para fazer esse controle

através do supervisório foi necessário à criação de uma tag a qual pode assumir dois valores, manual ou automático. E o seu estado depende do comando do operador através de um botão no supervisório.

### 3.2. Ensaios de controle

#### 3.2.1. Controle da temperatura do fluido térmico

O objetivo a princípio é controlar a temperatura do fluido térmico do tanque regulando a energia elétrica dissipada no dispositivo resistivo de aquecimento que tem uma potencia máxima de 3000 watts. A regulação da energia dissipada de aquecimento é feita através da variação da tensão elétrica da rede utilizando um relé de estado sólido. A temperatura na saída do dispositivo de aquecimento é medida utilizando um Pt100. Basicamente se trata de um sistema com uma entrada (tensão aplica ao dispositivo de aquecimento) e uma saída (temperatura na saída do dispositivo de aquecimento). É importante observar que a planta apresenta uma grande versatilidade para o estudo e avaliação de estratégias e técnicas de controle, permitindo tanto uma abordagem monovariável (SISO – Single-input Single-output, uma entrada e uma saída) como multivariável (MIMO – Multiple-input Multiple-output, múltiplas entradas e múltiplas saídas).

A função de transferência que relaciona de forma direta a variação da tensão e mudança de temperatura modelada para o sistema proposto é dada pela equação 5.

$$\frac{T}{E^2} = \frac{1}{120s + 1} \quad [5]$$



estabilizar, o que mostra falta de capacidade de resposta do mesmo.

### 3.2.2. Ajuste do controlador PID

O método aplicado na determinação dos parâmetros do controlador foi o de Ziegler Nichols. Que se baseia na resposta do sistema a uma entrada do tipo degrau. Essa resposta conterá parâmetros como o tempo de atraso, tempo morto e o ganho proporcional que permitirá determinar, através da tabela de Ziegler Nichols (Tabela 1) para regulação de parâmetros, os ganhos do controlador.

Primeiramente foi obtida a curva de reação do sistema em malha aberta para determinação dos parâmetros tempo morto e das constantes de tempo para posterior determinação dos parâmetros do PID e sintonia fina.

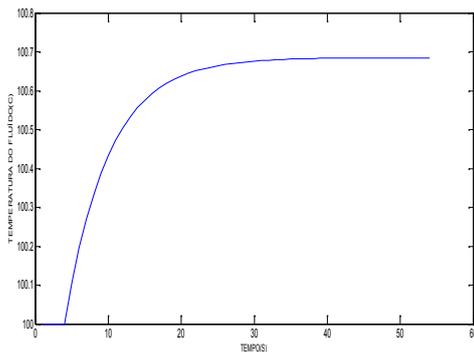


Figura 4: Obtenção da curva de reação do sistema em malha aberta para obtenção das constantes de tempo e tempo morto pelo Met. Ziegler-Nichols.

Os primeiros parâmetros a serem testados no sistema geraram a resposta apresentada na Figura 5. É possível perceber através do gráfico que o sistema com um ganho proporcional  $K_p = 10 \text{ W/}^\circ\text{C}$  e um ganho integral  $K_i = 0,15 \text{ segundos}$ , foi possível observar que não foi obtido um resultado muito satisfatório, uma vez que houve um overshoot muito grande no regime transiente e muitas oscilações em regime permanente, o que não é conveniente para qualquer tipo de processo. Oscila bastante antes de

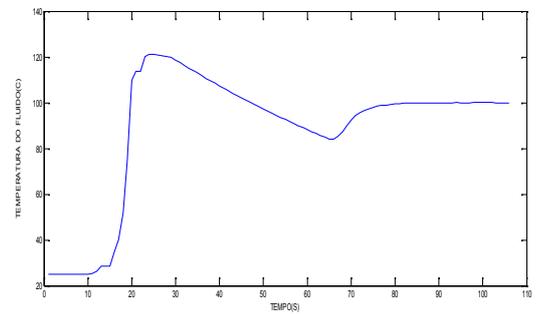


Figura 5: Resposta do sistema aos parâmetros  $K_p=10 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ;  $k_i=0.15 \text{ s}$ ;  $K_d=0$ .

Prosseguindo com a sintonia do controlador novos parâmetros foram implementados e uma nova resposta foi gerada conforme a Figura 6. Foi possível perceber através do gráfico que o sistema com um ganho proporcional  $K_p = 25 \text{ W/}^\circ\text{C}$  e um ganho integral  $K_i = 0,3 \text{ segundos}$ , apresentou um resultado no máximo satisfatório, uma vez que houve redução do overshoot no regime transiente, que era muito grande no primeiro caso analisado, além da atenuação de muitas oscilações em regime permanente, o que já é conveniente para qualquer tipo de processo. Nessa nova resposta podemos perceber que as oscilações se minimizaram, devido a uma redução do ganho integral, mas ainda podemos perceber a presença de overshoot inicial. O controle do sistema se mostra mais estável e com maior capacidade de resposta as perturbações.

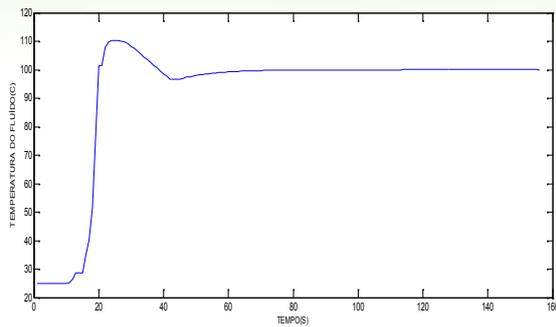


Figura 6: Resposta do sistema aos parâmetros  $K_p=25 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ;  $k_i=0.3 \text{ s}$ ;  $K_d=0$ .

Prosseguindo com a sintonia fina do controlador, através de novos parâmetros, com um ganho proporcional  $K_p = 25 \text{ W/}^\circ\text{C}$  e um ganho integral  $K_i = 0,03$  segundos e  $K_d=0.01$ , foi possível observar que foi obtido um resultado satisfatório, uma vez que houve grande redução do overshoot no regime transiente, em relação ao último caso analisado, além da atenuação de muitas oscilações em regime permanente, o que é conveniente para qualquer tipo de processo. Foi possível produzir uma excelente redução do overshoot da resposta transiente do sistema, reduzindo também muitas oscilações presentes. O ganho derivativo proporcionou uma estabilização mais rápida do sistema, tornando-o mais estável e com uma capacidade de resposta maior as perturbações. Nesse caso foi minimizado ainda mais o ganho integral e acrescentado à presença do ganho derivativo no sistema. Como mostra a Figura 7.

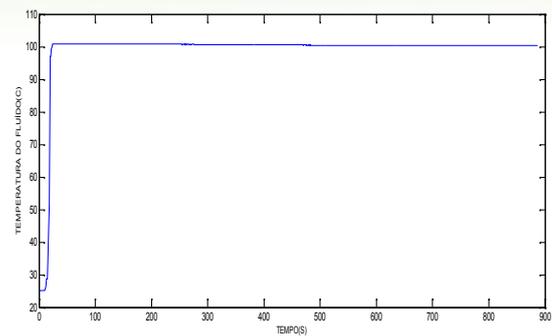


Figura 7: Resposta do sistema aos parâmetros  $K_p=25 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ;  $k_i=0.03 \text{ s}$ ;  $K_d=0.01$ .

### 3.2.3. Respostas da variável manipulada (potência elétrica) à sintonia do PID

Com a sintonia dos controladores PID baseado na metodologia de Ziegler-Nichols, foi obtidos também gráficos de respostas da variável manipulada no sistema que no nosso caso foi a potência elétrica da resistência de aquecimento do fluido térmico. A figura 8 mostra a variação de potência no tempo com os parâmetros primeiramente testados do PID, onde  $K_p = 10 \text{ W/}^\circ\text{C}$  e um ganho integral  $K_i = 0,15$  segundos. Deve-se observar na figura que a potência sofre grande oscilação e isso pode causar danos aos equipamentos do processo, tanto o variador de potência como também a própria resistência elétrica.

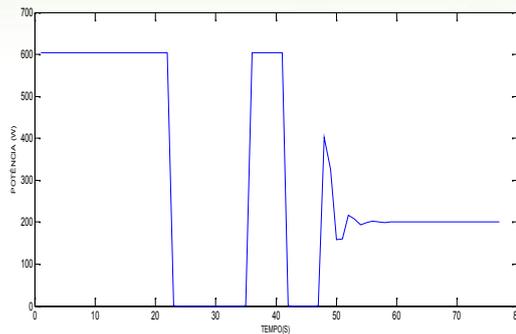


Figura 8: Resposta da variável manipulada ao teste realizado com os seguintes parâmetros:  $K_p = 10 \text{ W/}^\circ\text{C}$  e um ganho integral  $K_i = 0,15$  segundos e  $K_d = 0$ .

Com a sintonia do controlador PDI pode-se chegar a uma resposta melhor do sistema e também a uma melhor resposta da variável manipulada, sem grandes variações em seus valores de potencia evitando assim danos futuros esses equipamentos. A figura 9 mostra a resposta da variável manipulada agora depois de feito a sintonia do controle.

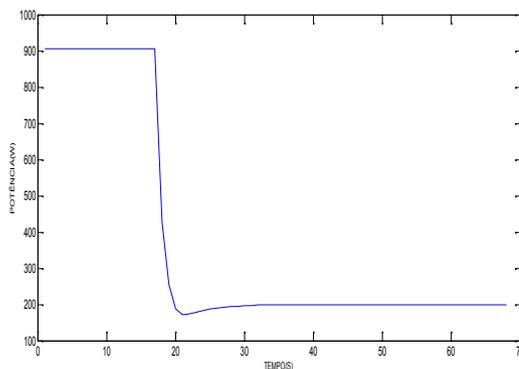


Figura 9: Resposta da variável manipulada ao teste realizado com os seguintes parâmetros:  $K_p = 25 \text{ W/}^\circ\text{C}$ ;  $k_i = 0.03 \text{ s}$ ;  $K_d = 0.01$ .

## 4. CONCLUSÕES

O protótipo que foi montado, instrumentado e automatizado permitiu realizar a reação de transesterificação do biodiesel.

Com o sistema supervisorio fica muito mais fácil interagir com o processo. Melhorando dessa forma o rendimento da produção, devido à capacidade de monitoramento e controle proporcionados pela mesma.

Utilizou-se, neste trabalho, a metodologia simples para o projeto de controladores PID para malhas de controle de temperatura. Estas metodologias também podem ser aplicadas a processos cuja resposta possa ser aproximada por funções de transferência de primeira ordem com ou sem atraso de tempo. O método utilizado no projeto de controladores PID para malhas de controle de temperatura foi o método de Ziegler-Nichols mostraram-se coerente com a inspeção visual que pode ser feita nos dados dos ensaios realizados. Através dos métodos aplicados para o controle do processo foi possível se chegar a resultados de controle de temperatura na planta excelentes.

## 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Petrobras Unidade Sergipe-Alagoas pelo auxílio no desenvolvimento do trabalho.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHOUHAN, A.P. SINGH, SARMA, A.K. **Modern heterogeneous catalysts for biodiesel production: A comprehensive review.** Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.15, p.4378 – 4399, 2011.



CHRISTOFF, P. ***Produção de biodiesel a partir do óleo residual de fritura comercial. Estudo de caso: Graratuba, Litoral Paranaense.*** 2006. Dissertação. Mestrado em sistemas energéticos. Instituto de engenharia do Paraná. Curitiba-Paraná.

MJALLI, F.S.; LEE, K.S.; KIEW, C. Y.; HUSSAIN, M. A. ***Dynamics and control of a biodiesel transesterification reactor,*** Chemical Engineering Technology, 32, 13-26, 2009.

SCHUCHARDT, U., SERCHELI, R., Vargas R. M. ***Transesterification of vegetable oils: a review.*** Journal of Brazilian Chemical Society, v.9, p.199-210, 1998.

WALI, W.A.; HASSAN, K.H.; CULLEN, J. D., SHAW, A.. ***Real time monitoring and intelligent control for novel advanced microwave biodiesel reactor,*** Measurement, 46, 823-839, 2013.