

# ANÁLISE DINÂMICA DA OPERAÇÃO DE UMA UNIDADE PILOTO DE COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

## A. N. Martins

Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Química – Laboratório de Controle e Otimização de Processos. Rua Prof Moraes Rego S/N, Cidade Universitária. CEP: 50670-090 – Recife-PE – Brasil Telefone (0-xx-81) 2126-7274. Fax: (0-xx-81) 2126-7289. [martins\\_laco@yahoo.com.br](mailto:martins_laco@yahoo.com.br)

## A. F. Neto

Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Química – Laboratório de Controle e Otimização de Processos. Rua Prof Moraes Rego S/N, Cidade Universitária. CEP: 50670-090 – Recife-PE – Brasil Telefone (0-xx-81) 2126-7274. Fax: (0-xx-81) 2126-7289. [alberto.falcone@globo.com](mailto:alberto.falcone@globo.com)

## S. Lucena

Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Química – Laboratório de Controle e Otimização de Processos. Rua Prof Moraes Rego S/N, Cidade Universitária. CEP: 50670-090 – Recife-PE – Brasil Telefone (0-xx-81) 2126-7274. Fax: (0-xx-81) 2126-7289. [lucena@ufpe.br](mailto:lucena@ufpe.br)

**Resumo.** O estudo dinâmico de uma planta piloto para produção de ar propanado através de simulação computacional foi efetuado com a finalidade de prever a performance operacional do sistema para utilização em controle de processo. Ar propanado é o nome dado a mistura ar-propano, ou ar-GLP (gas liquefeito de petróleo), que tem características de queima semelhantes ao gás natural (GN). O sistema é dimensionado para escala de laboratório visando quantificar os fenômenos envolvidos no desenvolvimento de um equipamento. Os dados obtidos com a unidade piloto poderão ser transportados para uma unidade industrial. O ar propanado pode ser funcional as indústrias que operam com GN por não requerer grandes modificações nas suas instalações. Em “stand by” é uma alternativa segura as eventuais interrupções do processo produtivo por falta de fornecimento de GN.

Palavras chave: Simulação, ar propanado, combustível, gás natural, propano.

## 1. Introdução

Ar propanado é uma mistura de ar e propano (ou ar e GLP - cujo componente primário é o propano) usada como combustível alternativo que apresenta características de queima e poder calorífico semelhante ao gás natural (GN). Este tipo de combustível é obtido para servir de *backup* para sistemas que queimam gás natural. A mistura é feita por ser o GLP mais denso que o metano (componente primário do GN) e ter um poder calorífico maior. A relação aproximada de diluição do propano requerida é 45.1% ar e 54.9% propano, segundo a literatura comercial, havendo variações. A mistura resultante tem uma densidade relativa de cerca de 1.287 e um poder calorífico de aproximadamente 11.660,00 Kcal/Nm<sup>3</sup> que é compatível com equipamentos queimando a gás natural (Perry, 1973).

O Índice de Wobbe (Kuan-Yun, 1986) é o melhor indicador da semelhança entre o gás natural e a mistura de ar-propano. Este Índice é um número que indica a intercambialidade de gases combustíveis. Ele relaciona características de queima de um gás combustível de uma maneira prática para misturas de gases de queima, ou para obter uma taxa de aquecimento constante. O Índice de Wobbe não se relaciona a fatores técnicos como temperatura de chama, coeficientes de transferência de calor ou gradientes de temperatura. Ele é obtido dividindo o poder calorífico do gás pela raiz quadrada de sua densidade relativa como mostrados nas equações 1 e 2. Se o gás natural e a mistura de ar-propano têm um idêntico índice de Wobbe, eles produzirão uma quantia equivalente de calor e de produtos de combustão requererão a mesma quantia de ar de combustão. Queimadores providos com uma substituição para um Índice de Wobbe mais baixo experimentarão menos mudanças na combustão. A substituição de um gás para um gás com um índice de Wobbe mais alto geralmente modifica as condições da combustão.

$$W_{SUPERIOR} = \frac{\text{Poder Calorífico Superior (volume)}}{\sqrt{\text{Densidade Relativa do ar}}} \quad (1)$$

$$W_{INFERIOR} = \frac{\text{Poder Calorífico Inferior (volume)}}{\sqrt{\text{Densidade Relativa do ar}}} \quad (2)$$

### 1.1. Unidade Piloto de Mistura de Ar-Propano

Para se efetuar a mistura de maneira segura adiciona-se primeiro o GLP no tanque ou misturador, preenche-o 100% e depois se injeta o ar, pois assim não se passa pelos limites de explosividade inferior e superior da mistura, respectivamente nas faixas de 1,1 a 2,2% para o inferior e de 9,0 a 9,5% para o superior, percentual relacionado ao GLP.

Os equipamentos para uma planta de produção de *Ar Propanado* são especificados segundo parâmetros como: Máxima demanda horária de gás, Poder calorífico, Pressão do sistema, exigências especiais da instalação e disponibilidade para fornecimento de GLP. A unidade piloto implementada no Departamento de Engenharia Química-UFPE é composta por duas linhas distintas de processo, com capacidade de trabalhar com até 2 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão, a máxima demanda horária de gás requerida para esta unidade piloto é de 200L/min. A primeira linha é a do misturador, onde é efetuada a mistura para produzir o combustível alternativo a ser queimado. As tubulações de ar e GLP são equipadas com instrumentos de medição como sensores de vazão, pressão e temperatura e elementos de controle como válvulas de controle de vazão e válvulas solenóides. A segunda é a linha da câmara de combustão, onde são efetuados os estudos da razão de mistura e da quantidade energética liberada durante uma combustão feita em uma câmara apropriada para suportar até 21 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão.

A *linha do misturador* mostrada na figura 1 é a parte principal da planta, onde se conduz os gases para o tubo Venturi que tem a função de estabelecer a mistura para utilização e encaminha-la para um queimador que no nosso caso é a Câmara de Combustão. Os principais instrumentos presentes nesta linha estão apresentados pela figura 1 e descritos na tabela 1. Nesta linha a vazão de entrada de propano (GLP) é regulada por uma válvula de controle de vazão. Em seguida o gás passa por um aquecimento e segue para o misturador, esta vazão de gás vaporizado também é regulada por uma válvula de controle na entrada do misturador. Existe uma válvula de alívio por onde passa gás vaporizado que pode acionar caso a pressão na tubulação exceda 2kgf/cm<sup>2</sup>. O GLP é introduzido primeiramente no misturador após é adicionado o ar. A vazão de ar até o misturador também é regulada por uma válvula de controle de vazão.

Na *linha da câmara de combustão* tem-se as tubulações de GLP e ar que vão diretamente para a câmara. Na própria câmara de combustão existem equipamentos que proporcionam o acompanhamento da queima como sensor de temperatura, de pressão e sensor de chama, também há uma válvula de alívio para o caso em que a pressão seja superior a 2kgf/cm<sup>2</sup>. A centelha para a queima é dada por acionamento elétrico (Lee, *et al*, 2001).

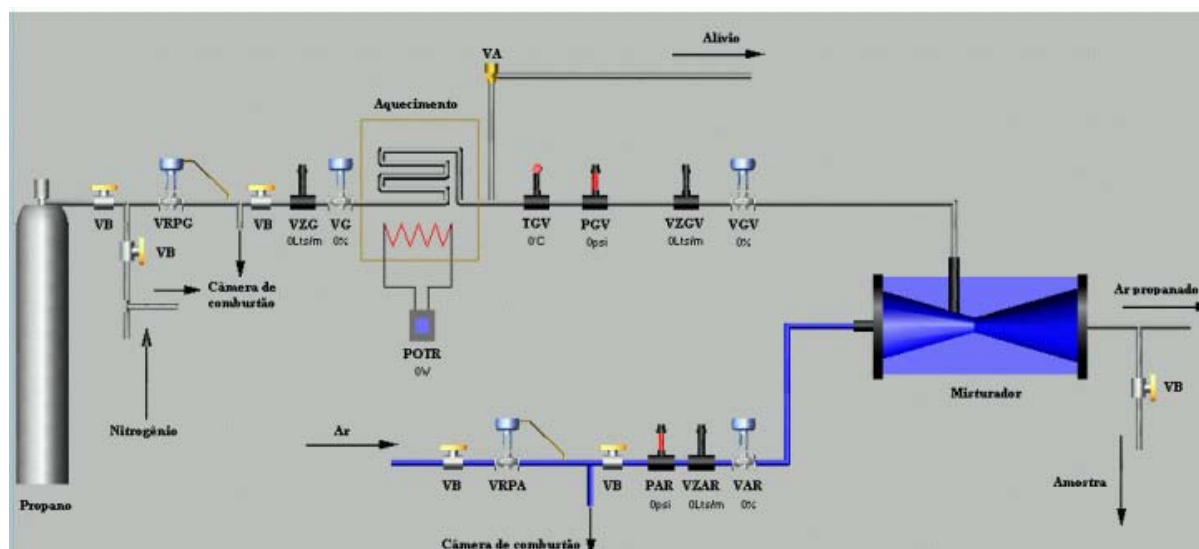


Figura 1. Disposição dos instrumentos na linha do misturador. Tela do programa computacional supervisorio.

Tabela 1. Descrição dos instrumentos envolvidos no controle da linha do misturador:

Linha de Mistura	
<b>1-Linha de gás propano</b>	
VRPG	Válvula redutora de pressão
VZG	Sensor de vazão de propano
VG	Válvula de controle de vazão de gás na entrada
POTR	Regulador de Potência do aquecedor
TGV	Sensor de Temperatura de gás vaporizado
PGV	Sensor de pressão de gás vaporizado
VZGV	Sensor de vazão de gás vaporizado
VGV	Válvula de controle de vazão de gás vaporizado
Nitrogênio	Para limpeza e purga das tubulações
Misturador	Tubo tipo Venturi
<b>2-Linha de ar comprimido</b>	
VRPA	Válvula redutora de pressão
PAR	Sensor de pressão de AR
VZAR	Sensor de vazão de AR

VAR	Válvula de controle de vazão de ar comprimido
-----	---

## 2. Metodologia

A metodologia empregada para o estudo da planta piloto de ar propanado seguiu os seguintes passos:

- Estudo das propriedades da mistura para especificar os parâmetros como pressão do sistema, poder calorífico, máxima demanda horária de gás e exigências de instalação.
- Estudo do processo de mistura adequado e equipamentos apropriados para troca térmica e mistura levando em consideração a demanda de gás, segurança e estabilidade da mistura (Peyrucat, 1993).
- Estudo da instrumentação adequada instalada na unidade de processamento e construção do software em linguagem apropriada para o monitoramento e controle da planta (Considine, 1993; Levine, 1996).
- Simulação computacional com o software MATLAB/Simulink das etapas do processo e o estudo dos resultados destas simulações em comparação ao valor desejado/referência (set point) e os parâmetros do controlador empregado.

## 3. Simulação

A simulação computacional foi efetuada para prever a performance operacional do sistema sendo esta uma ferramenta para a tomada de decisão para automatizar a linha de produção. A linha de mistura foi subdividida em etapas para simulação e estudo do comportamento das variáveis em cada trecho.

Para se efetuar o controle eficiente deve-se medir as variáveis de saída usando os sensores apropriados e assim acionar os elementos finais de controle (Peyrucat, 1993). No processo estudado neste trabalho os sensores são de temperatura, pressão e vazão e os elementos finais de controle são válvulas de controle de vazão como descrito anteriormente pela figura 01 e tabela 01.

Para a simulação computacional do processo foram implementados controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo) (Peyrucat, 1993; Ogata, 1997). O que difere um controlador PID dos outros tipos de controlador é a forma como são relacionados os erros,  $\epsilon(t)$  e o sinal do controlador,  $c(t)$ , tal qual é descrito pela equação 3. O controlador é representado pela função transferência descrita na Equação 4 onde o ganho proporcional  $K_c$ , a taxa integral  $1/\tau_I$  e o tempo derivativo  $\tau_D$  são os parâmetros a serem ajustados e que determinam o desempenho do sistema.

$$c(t) = K_c \epsilon(t) + \frac{K_c}{\tau_I} \int_0^t \epsilon(t) dt + K_c \tau_D \frac{d\epsilon}{dt} + C_s \quad (3)$$

$$PID(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{\tau_I s} + \tau_D s \right) \quad (4)$$

### 3.1 Parâmetros da Simulação

De acordo com a disposição dos instrumentos na linha, conforme mostrado na figura 1, foram especificadas as configurações das malhas de controle. Nos diagramas de bloco destas malhas as funções transferência dos instrumentos e equipamentos são representadas por  $G'(s)$  e  $G''(s)$  que representam funções de primeira e segunda ordem, respectivamente, adotadas para o processo.  $G'(s)$  conforme a equação 5 descreve os sistemas que apresentam capacidade para armazenar massa ou energia e apresentam resistência associada ao fluxo de massa e energia. Desta forma a resposta dinâmica de tanques que têm capacidade de armazenar líquidos ou gases (câmara de combustão e misturador) pode ser modelada com estas funções assim como sensores e válvulas.  $G''(s)$  representou os processos onde a complexidade é maior como no caso de trocadores de calor. A função transferência é representada pela equação 6. As perturbações geradas em cada etapa do processo foram representadas por uma função do tipo degrau e amplitude igual a 1 (um). Na simulação adotamos também  $K_p$ ,  $\tau$ ,  $\xi$  iguais a 1(um).

$$G'(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1} \quad (5)$$

$$G''(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1} \quad (6)$$

## 4. Resultados e Discussões

### 4.1 Simulação - Linha do Misturador

A linha do misturador foi subdividida em cinco etapas específicas e assim fez-se o estudo das malhas de controle isoladamente.

#### 4.1.1. Malha 01

A malha 01 corresponde ao controle da vazão inicial de GLP, representada pela figura 2, que chega ao trocador de calor. Esta malha sofre perturbação de uma válvula reguladora de pressão que regula a pressão de trabalho de GLP na linha.

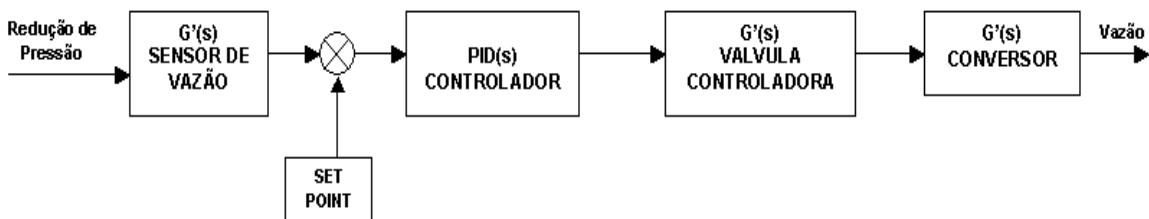


Figura 2. Diagrama de blocos da Malha 01, de controle da vazão inicial de propano.

O diagrama de blocos foi implementado no simulador a partir das funções transferência adotadas. O valor de referência é designado pela variável de saída ( $y_{sp}$ ).

Foi simulada uma variação do valor de referência. Os valores considerados foram de 0,5 a 3 com um incremento de 0,5. Os perfis da vazão de GLP inicial conforme as alterações no valor de referência são mostrados na figura 3. Assim o conjunto de parâmetros do controlador empregado é recomendado pois o controle atinge o valor desejado.

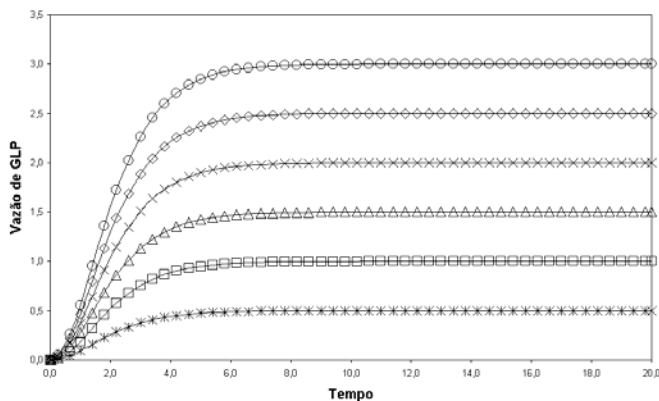


Figura 3. Resposta em relação ao tempo da vazão inicial de GLP com variações do valor de referência ( $y_{sp}$ ), mantendo-se os parâmetros do controlador em  $K_c=0.5$ ,  $1/\tau_I=0.5$  e  $\tau_D=0.0$  (—○—):  $y_{sp}=3.0$ ; (—◇—):  $y_{sp}=2.5$ ; (—x—):  $y_{sp}=2.0$ ; (—△—):  $y_{sp}=1.5$ ; (—□—):  $y_{sp}=1.0$ ; (—\*—):  $y_{sp}=0.5$ .

Simulou-se esta malha adotando diferentes valores para os parâmetros do controlador e os resultados são mostrados na figura 4. Mantendo-se fixo o valor de referência igual a 1 (um). O conjunto de parâmetros,  $K_c=0.2$ ,  $1/\tau_I=0.5$ ,  $\tau_D=0.1$ , estudado para controle da malha 01 é o mais recomendado, pois se consegue estabilizar a vazão inicial de GLP no valor desejado. Um critério de seleção destes parâmetros está sendo implementado, a partir dos dados experimentais que serão coletados da unidade piloto.

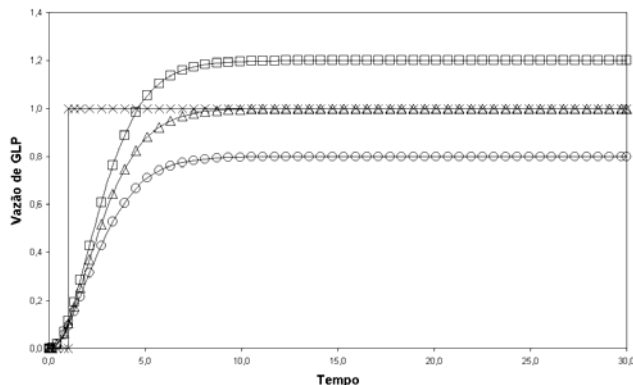


Figura 4. Resposta em relação ao tempo da vazão inicial de GLP com variações nos parâmetros do controlador: (—\*—):  $y_{sp}(\text{valor desejado})=1.0$ ; (—□—):  $K_c=0.2$ ,  $1/\tau_I=0.6$ ,  $\tau_D=0.1$ ; (—△—):  $K_c=0.2$ ,  $1/\tau_I=0.5$ ,  $\tau_D=0.1$ ; (—○—):  $K_c=0.2$ ,  $1/\tau_I=0.4$ ,  $\tau_D=0.1$ .

4.1.2. Malha 02

A malha 02 é proposta para o controle da temperatura de GLP vaporizado e pode ser acompanhada através da figura 5. Esta temperatura é condicionada à temperatura de entrada de GLP na tubulação, e à temperatura da água que troca calor com o gás no aquecimento.  $T_{H2O}$ — Temperatura da água;  $T_{GLP_{in}}$ — Temperatura de GLP na entrada;  $T_{GLP_{out}}$ — Temperatura de GLP na saída.

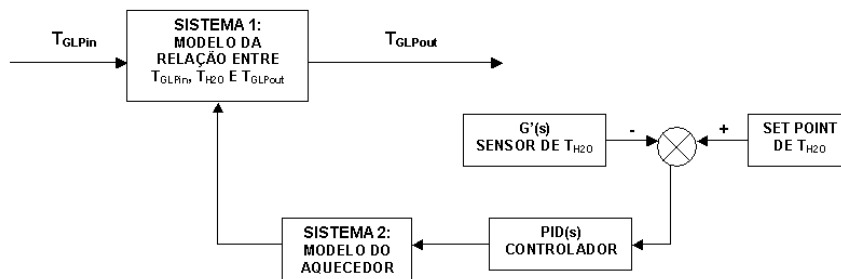


Figura 5. Diagrama de blocos da malha 02 de controle da temperatura de GLP.

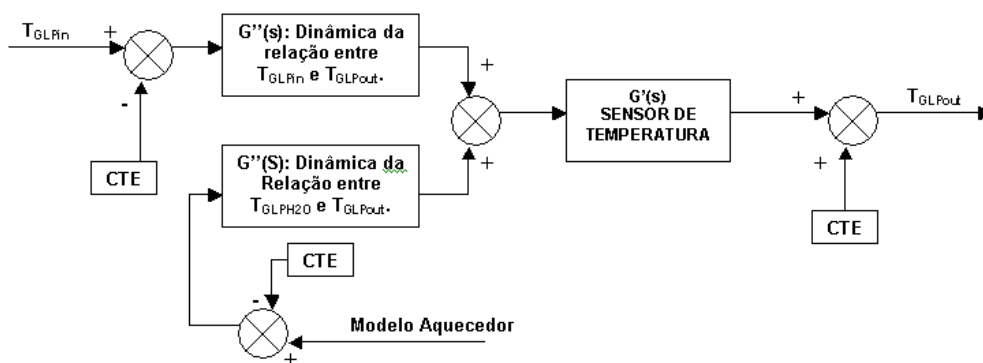


Figura 6. Diagrama de blocos do sistema 01 de relação entre as temperaturas,  $T_{GLP_{in}}$ ,  $T_{GLP_{out}}$ ,  $T_{H2O}$ .

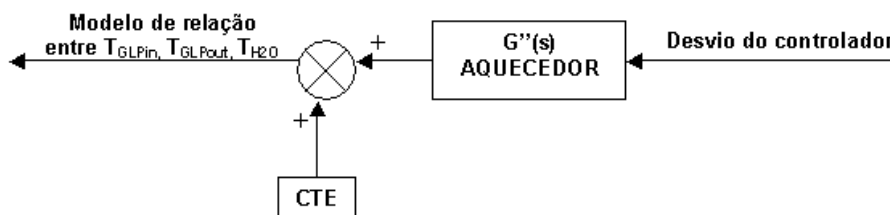
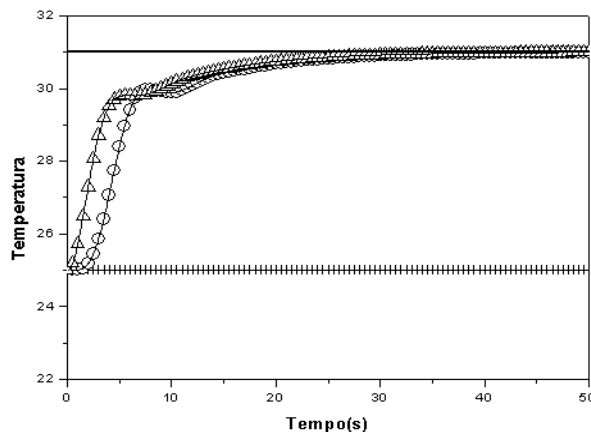


Figura 7. Diagrama de blocos para o sistema 02, do Aquecedor.

O diagrama de blocos do sistema 01 da malha 02 (Figura 6) mostra a temperatura de entrada de GLP ( $T_{GLP_{in}}$ ) no sistema, e relaciona esta temperatura e a temperatura da água de aquecimento ( $T_{H2O}$ ). A resposta do processo corresponde a temperatura do GLP na saída do sistema ( $T_{GLP_{out}}$ ). A perturbação para o sistema 01 correspondeu à temperatura da água de aquecimento na saída do sistema 02 da malha 02.

A temperatura de entrada de GLP ( $T_{GLP_{in}}$ ) adotada para a simulação foi de 25°C. O valor de referência para a temperatura da água ( $T_{H2O}$ ) foi de 31°C. O valor desejado para a temperatura de GLP na saída ( $T_{GLP_{out}}$ ) foi de 31°C. A figura 8 mostra a resposta do sistema frente a uma variação da temperatura da água de aquecimento



**Figura 8.** Resposta em relação ao tempo da temperatura de GLP e da água de aquecimento com  $K_c=0.05$ ,  $1/\tau_i=0.1$  e  $\tau_D=0.0$ . (-Δ-): curva da temperatura da água; (-o-): curva da temperatura de GLP; (-): curva do valor de referência de gás; (-||-): curva da temperatura inicial de gás.

Os perfis da temperatura da água e da saída de GLP, conforme Figura 8, atingem seus valores de referência num intervalo de tempo de 20s, aproximadamente. Desta forma a malha proposta foi satisfatória. Este conjunto de parâmetros do controlador é o mais recomendado.

#### 4.1.3. Malha 03

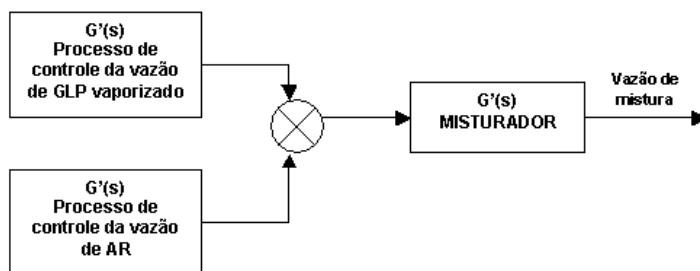
A malha 03 corresponde ao controle da vazão de propano vaporizado. Este controle é executado da mesma forma que para a vazão inicial de propano, conforme estabelecido na malha 01. As malhas de controle são idênticas tendo a malha 03 a vazão de GLP vaporizado como variável de saída e esta assume o mesmo comportamento que encontramos para a malha 01 nas figuras 3 e 4.

#### 4.1.4. Malha 04

A malha 04 corresponde ao controle da vazão de ar comprimido. Este controle é executado da mesma forma que para a vazão inicial de propano, conforme estabelecido na malha 01. A perturbação sofrida pela malha é dada por uma válvula reguladora de pressão. A variação da vazão de ar obedece aos mesmos comportamentos da vazão de GLP na Malha 01, podendo ser vista nas figuras 3 e 4.

#### 4.1.5. Malha 05

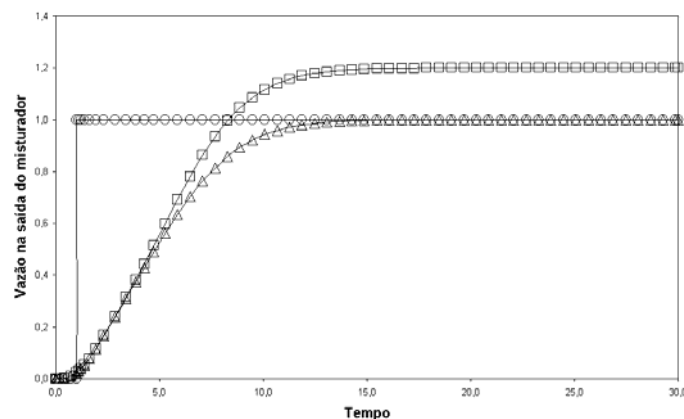
A malha 05 corresponde ao controle da vazão da mistura após o misturador conforme a figura 9.



**Figura 9.** Diagrama de blocos da malha 05 de controle do processo de mistura, converge a saída da malha de controle de propano vaporizado e a malha de controle da vazão de ar para o misturador.

Foram estudadas combinações de parâmetros dos controladores da malha de controle de vazão de GLP vaporizado (Malha 03) e da malha de controle de vazão de ar (Malha 04) para que a vazão na saída do misturador convergisse para o valor desejado. Os perfis de vazão na saída do misturador estão descritos na figura 10.

Nesta malha de controle temos a relação entre duas malhas distintas com dispositivos diferentes. Assim temos os parâmetros do controlador para a linha de GLP (LP) e para a linha de ar (LA). Nas malhas de GLP vaporizado e de ar comprimido o valor de referência é 1(um). O conjunto de parâmetros mais recomendado para os controladores foi (LP:  $K_c=0.1$ ,  $1/\tau_i=0.1$ ,  $\tau_D=0.4$  e LA:  $K_c=0.1$ ,  $1/\tau_i=0.2$ ,  $\tau_D=0.4$ ), pois a variável de saída, a vazão da mistura, convergiu melhor para o valor de referência.



**Figura 10.** Resposta em relação ao tempo da vazão na saída do misturador com variações dos parâmetros do controlador; (—○—):  $y_{sp}$  (valor desejado)=1.0; (—□—): LP:  $K_c=0.1$ ,  $1/\tau_I=0.24$ ,  $\tau_D=0.5$ ; LA:  $K_c=0.1$ ,  $1/\tau_I=0.08$ ,  $\tau_D=0.5$ ; (—▲—): LP:  $K_c=0.1$ ,  $1/\tau_I=0.1$ ,  $\tau_D=0.4$ ; LA:  $K_c=0.1$ ,  $1/\tau_I=0.2$ ,  $\tau_D=0.4$ .

## 5. Conclusão

A disposição dos instrumentos nas linhas do processo não é ideal para o controle, deveríamos ter instrumentos realmente na saída de cada etapa do processo, instrumentos de medição localizados depois do elemento final de controle (válvula de controle de vazão) para se ter realmente um controle eficiente. Em relação aos controladores, a inserção do termo derivativo ( $\tau_D$ ) faz com que a variação da variável de saída seja menor, e também o tempo para se atingir o valor desejado. Assim a confirmação da melhor aplicabilidade do controlador tipo PID nas várias etapas do processo. Quanto menores os parâmetros menores serão as variações, principalmente o ganho, a constante de proporcionalidade ( $K_c$ ). Pudemos perceber que em algumas combinações destes parâmetros temos um controle mais eficiente.

Grande parte das funções transferência adotadas foram de primeira ordem para fins de simulação, pois não envolviam sistemas muito complexos, normalmente sensores e equipamentos onde há conservação de energia. As dinâmicas que relacionam as temperaturas foram consideradas de segunda, pois se tem um processo mais lento. A caracterização das funções transferência a partir de dados experimentais ainda está em estudo.

Os parâmetros utilizados para o controle mostraram-se ser eficientes quando da sua utilização na unidade piloto.

## 6. Agradecimentos

Os resultados apresentados fazem parte do projeto de pesquisa *Desenvolvimento de um sistema para utilização de ar propanado visando atendimento precoce de novos mercados para GN*, Edital CTPETRO-2001 financiado pela FINEP, PETROBRAS e COPERGAS, dentro da RedeGasEnergia. As bolsas de pesquisa foram financiadas pelo CNPq, bolsas de Iniciação Tecnológica. Agradecemos imensamente a estas instituições o apoio técnico e financeiro.

## 7. Referências

- Considine, D. M.;1993. "Process Industrial Instruments & Controls Handbook". McGraw-Hill, 4<sup>th</sup>, New York. <http://www.totalgas.com.br/agipliquigas.htm>
- Kuan-Yun, K: "Principles de Combustion", 1986, Interscience; 1 edition.
- Lee, T. W., Jain, V., and Kozola S., "Measurements of Minimum Ignition Energy By Using Laser Sparks for Hydrocarbon Fuels in Air: Propane, Dodecane, and Jet-A Fuel", *Combustion and Flame*, v125, p. 1321-1328, 2001.
- Levine, W. S., 1996, "The Control Handbook", CRC PRESS
- Ogata, K.; 1997. "Engenharia de Controle Moderno". Rio de Janeiro, Prentice-Hall. International do Brasil.
- Perry, R. H.; Green D.; 1973. "Perry's Chemical Engineers' Handbook", 5 ed. Singapore, McGRAW-HILL
- Peyrucat, J-F.; 1993. "Instrumentation & automatisations industrielles", Paris, Dunod-Tech.

## DYNAMICAL ANALYSIS OF AN OPERATION ALTERNATIVE FUEL PILOT UNIT

### A. N. Martins

Federal University of Pernambuco. Engineering Chemical Department – Control of Process Laboratory de. Address: Rua. Prof Moraes Rego S/N, Cidade Universitária. CEP: 50670-090 – Recife-PE – Brasil Telephone (0-xx-81) 2126-7274. Fax: (0-xx-81) 2126-7289. [martins\\_laco@yahoo.com.br](mailto:martins_laco@yahoo.com.br)

### A. F. Neto

Federal University of Pernambuco. Engineering Chemical Department – Control of Process Laboratory de. Address: Rua. Prof Moraes Rego S/N, Cidade Universitária. CEP: 50670-090 – Recife-PE – Brasil Telephone (0-xx-81) 2126-7274. Fax: (0-xx-81) 2126-7289. [alberto.falcone@globo.com](mailto:alberto.falcone@globo.com)

### S. Lucena

Federal University of Pernambuco. Engineering Chemical Department – Control of Process Laboratory de. Address: Rua. Prof Moraes Rego S/N, Cidade Universitária. CEP: 50670-090 – Recife-PE – Brasil Telephone (0-xx-81) 2126-7274. Fax: (0-xx-81) 2126-7289. [lucena@ufpe.br](mailto:lucena@ufpe.br)

**Abstract:** *The dynamic study of a pilot plant to produce propaned air through computational simulation it was effected to predict the operational performance of the system to be used in process control. Propaned air is the name given to the air-propane or air-LPG mixtures which have combustion characteristics identical to the that of natural gas. In order to quantify the variables involved in the development of the equipment the system was designed at the scale of a laboratory unit. The obtained data with the pilot unit will be used to upgrade it to an industrial one. Propaned air may be very useful for industries which operate with natural gas as they do not need major modifications in their installations. As “stand by” it is a safe alternative for eventual interruptions of the productive process due to a failure of natural gas supply.*

Keywords: *Simulation, propaned air, fuel, natural gas, propane.*