



PIBIC/CNPq/UFCA-2009

IDENTIFICAÇÃO DE UM EBULIDOR DE VAPOR EM MALHA FECHADA

Ronald Ramos Torres¹, Luis Gonzaga Sales Vasconcelos²

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de efetuar a modelagem, simulação, identificação de sistema e estratégia de controle em malha fechada de um processo envolvendo ebulidores de vapor (secadores) em malha fechada. Foram utilizadas as metodologias do controle típico implementadas no software MATLAB, por meio do uso de equações de conservação de massa e energia ainda análises teóricas de evaporadores. A implementação utilizada na sintonia dos controladores foi a proposta por Ziegler-Nichols. Constatou-se a eficiência e importância das estratégias de controle para obtenção de estabilidade no desempenho dos processos como também a versatilidade na presença de ruídos.

Palavras-chave: controle, modelagem, evaporador

IDENTIFICATION OF AN EVAPORATOR OF THE VAPOR INCLOSED LOOP

ABSTRACT

This study aimed to perform the modeling, simulation, system identification and control strategy of a closed loop process involving steam ebullers (dryers) closed loop. Mesh was used in the typical control methods implemented in MATLAB software, using the use of equations of conservation of mass and energy also analyzes theories of evaporators. The implementation used in the tuning of the controllers was proposed by Ziegler-Nichols. It was found to the efficiency and importance of control strategies for achieving stability in the performance of procedures as well as versatility in the presence of noise.

Keywords: control, modeling, evaporator

INTRODUÇÃO

A partir do século XIX vários processos complexos foram iniciados nas indústrias e com isto cresceu a necessidade de um controle, bem como identificação dos sistemas que representassem os diversos processos utilizados. As vantagens fornecidas pela identificação de sistemas tornam-se mais evidentes quando analisados os aspectos econômicos (redução de custos e desperdícios, aumento de rendimentos e –conseqüentemente- dos lucros) e de segurança (redução do contato entre operador e sistema).

Com a crescente disponibilidade de computadores, o uso de modelos matemáticos tem aumentado em praticamente todas as áreas do conhecimento humano. Além disso, tem-se observado uma mudança nos tipos de modelos utilizados. Mais especificamente, tem havido um crescente interesse por representações lineares para caracterizar sistemas e fenômenos reais. Na medida em que ocorrem estas representações lineares, torna-se possível analisar e reproduzir certos fenômenos e comportamentos dinâmicos complexos. De forma geral, é possível agrupar as técnicas de modelagem em duas grandes categorias, a saber: modelagem pela física do processo e modelagem a partir de testes. A segunda categoria é normalmente conhecida por identificação de sistemas (Ljung, 1987). As diferenças entre as duas abordagens são muitas,

¹ Aluno de Curso de Engenharia Química, Unidade Acadêmica de Engenharia Química, UFCA, Campina Grande, PB, E-mail: ronaldramosrtorres@gmail.com

² Engenheiro Químico, Prof. Doutor, Unidade Acadêmica de Engenharia Química, UFCA, Campina Grande, PB, E-mail: vasco@deq.ufcg.edu.br

bem como as diferenças no tipo de modelos obtidos em cada caso. Entretanto, o que provavelmente mais diferencia essas duas abordagens é a quantidade de conhecimento sobre o processo real utilizado na obtenção dos modelos. Na modelagem pela física do processo, o modelo é desenvolvido a partir de toda informação disponível sobre o processo. Por outro lado os métodos de identificação normalmente não pressupõem qualquer conhecimento prévio do sistema, justificando o nome "identificação caixa-preta" (Sjöberg et al., 1996). Ultimamente, há um interesse em desenvolver métodos que permitam incorporar alguma informação que se tenha sobre o sistema durante a sua identificação (Lindskog e Ljung, 1994). Procedimentos com esta característica são denominados métodos de "identificação caixa-cinza" e são especialmente interessantes porque não exigem do usuário um profundo conhecimento "a priori" do processo, mas permitem a utilização de conhecimento prévio. Isso normalmente resulta em modelos melhores e, principalmente, modelos fisicamente mais significativos. Assim, representações que permitirem incorporar informação prévia com maior facilidade serão preferidas na identificação do tipo "caixa-cinza", enquanto outras representações continuarão a ser usadas em problemas de identificação do tipo "caixa-preta".

METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado no Laboratório de Experimentação Numérica de Processos - LENP, ambiente o qual possui toda infra-estrutura necessária para o seu desenvolvimento e realização. Neste laboratório encontra-se disponível o software *MATLAB* que servirá de ferramenta computacional na modelagem e simulação do processo e na montagem do sistema de controle proposto.

As etapas presentes na metodologia foram definidas da seguinte forma:

a) Modelagem do sistema : Construção de um modelo que represente de forma mais apropriada o sistema e as variáveis/parâmetros de interesse, baseado em equações representativas que obedecem os fenômenos inerentes ao problema.

b) Simulação : Execução do modelo sob condições adversas (não linearidades, perturbações etc) para obtenção de dados que deverão ser posteriormente analisados.

c) Identificação de sistema : adequação dos resultados aos modelos representativos do sistema, como funções de transferência, espaço de estado e séries temporais

d) Controle do processo : ajuste do controlador para estabilizar o sistema em condições adversas seguindo o método de *Ziegler-Nichols* que deverão atuar nas variáveis nível e pressão do ebulidor.

Este procedimento foi utilizado como no desenvolvimento do projeto e sua ordem foi decidida em função da obtenção dos dados a partir de simulações em estado estacionário, seguido de perturbações na densidade, temperatura e vazão da alimentação.

Modelagem do sistema

O processo a ser identificado será representado por um modelo matemático rigoroso baseado nos princípios fundamentais de evaporação. O modelo é formado por um sistema de equações diferenciais representando os balanços de massa e de energia e uma equação algébrica constitutiva, representando a relação existente entre as variáveis controladas, variáveis manipuladas e distúrbio.

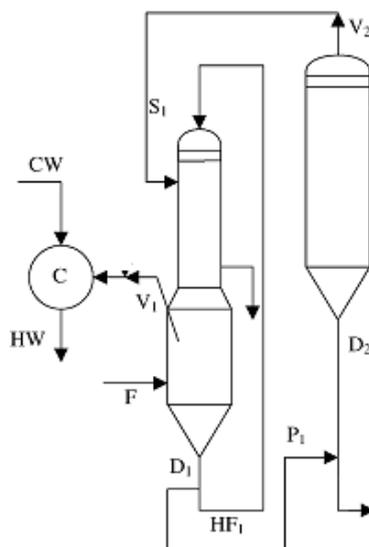


Figura 1. Sistema de dois evaporadores em série.

A figura 1 representa o sistema onde as equações serão aplicadas. A elaboração desta estrutura está baseada na forma geral dos ebulidores que consistem de um sistema onde há a constante formação de vapor (a partir de uma fonte de calor) o qual é utilizado para a movimentação de turbinas, aquecimento etc.

Dentre outras equações no modelo, estão presentes:

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{A_2} \left[Q_{P1} - Q_{P2} - \frac{E_2}{\rho_w} \right] \quad (1)$$

$$\frac{d\rho_2}{dt} = \frac{1}{h_2 A_2} \left[E_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_w} - 1 \right) - Q_{P1} \rho_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{CoT_2} & \left[\frac{1}{V_2 - h_2 A_2} \left(E_2 - i' \dots \dots \left(Q_{P1} - Q_{P2} - \frac{E_2}{\rho_w} \right) \right) \right] \\ & - \frac{1}{CoT_2} \left[CoRho_2 \left(\frac{1}{h_2 A_2} \left(E_2 \left(\frac{\rho_2}{\rho_w} - 1 \right) - Q_{P1} \rho_1 \left(\frac{\rho_2}{\rho_1} - 1 \right) \right) \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Onde:

$$E_2 = \frac{Q_{P1} \rho_1 c_1 T_1 - Q_{P2} \rho_2 c_2 T_2 + i' \dots \dots}{\lambda_{v2}} \quad (4)$$

$$BPE_2 = 102.69 \rho_2 + 128.82 \quad (5)$$

$$\rho_{v2} = \frac{MP_2}{R(273.1 + T_2 - BPE_2)} \quad (6)$$

$$P_2 = 0.133 \exp \left(A - \frac{B}{C + 273.1 + T_2 - BPE_2} \right) \quad (7)$$

$$CoT_2 = \rho_{v2} \left(\frac{B}{(C + 273.1 + T_2 - BPE_2)^2} - \frac{1}{(C + 273.1 + T_2 - BPE_2)} \right) \quad (8)$$

$$CoRho_2 = -102.69 \rho_{v2} \left(\frac{B}{(C + 273.1 + T_2 - BPE_2)^2} - \frac{1}{(C + 273.1 + T_2 - BPE_2)} \right) \quad (9)$$

As constantes M e R são a massa molecular da água e a constante dos gases, respectivamente e A, B e C são as constantes de Antoine para a equação que relaciona pressão de vapor/temperatura para vapor d'água.

As equações 1 a 3 são as principais equações diferenciais utilizadas no sistema, enquanto que as equações 4 a 9 são as correlações utilizadas na determinação de algumas propriedades do sistema, com pressão de vapor e densidade do vapor d'água.

Simulação

Para a obtenção de dados em condição de malha fechada foi feita a modelagem do processo por meio da construção do modelo que representasse o sistema de evaporadores. A figura 2 exibe o modelo construído no software *Simulink*, componente do Matlab, por meio das equações anteriormente citadas. Como os evaporadores estão em série percebe-se a recirculação de informações (como densidade e temperatura da água) entre os mesmos.

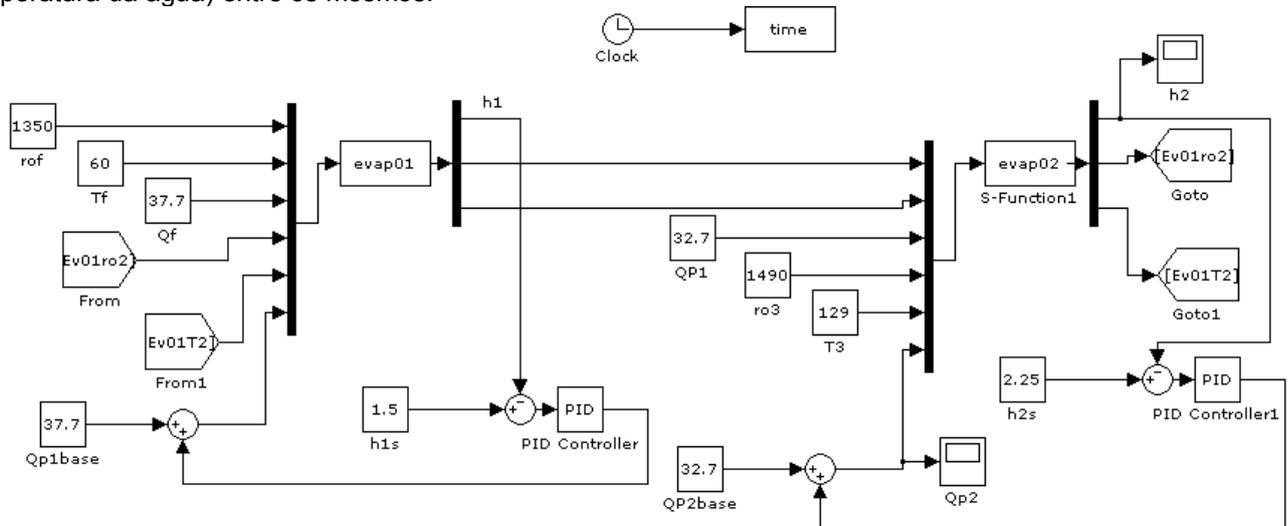


Figura 2. Implementação do modelo no Simulink.

Foram obtidos inicialmente os valores nas condições de estado estacionário e, em seguida aplicados perturbações de modo a se determinar os parâmetros da função de transferência de primeira ordem. Os gráficos abaixo exibem os resultados obtidos na simulação nas condições de estado estacionário.

As equações citadas na modelagem foram implementadas na linguagem de programação do Matlab em paralelo à interface de diagrama de blocos do simulink..

A figura abaixo exibe parte do código contido nos blocos Evap01 e Evap02

```

69 - BPE1=102.69*(ro1/1000)-128.82;
70 - BPE2=102.69*(ro2/1000)-128.82;
71 -
72 - Ts1=T2-BPE2;
73 -
74 - rohf1=(R1+Qf*rof)/Qhf1;
75 - Thf1=(R1*c1*T1+Qf*rof*cf*Tf)/(Qhf1*rohf1*chf1);
76 - ms1=1000*(Qhf1*rohf1*chf1*(Ts1-(Ts1-Thf1)*exp(-UA1/(Qhf1*rohf1*chf1))...
77 - -Thf1)/lambdas1;
78 - E1=(Qf*rof*cf*Tf-Qp1*ro1*c1*T1+ms1*lambdas1)/lambdav1;
79 - mw1=E1;
80 - P1=0.75182*T1-33.957923;
81 - rov1=M*P1/(R*(273.1+T1-BPE1));
82 - CoT1=(V1-A1*h1)*(0.751826*M/(R*(273.1+T1-BPE1))-rov1/(273.1+T1-BPE1));
83 -
84 - dh1dt=(1/A1)*(Qf-Qp1-(E1/row));
85 - dro1dt=(1/(h1*A1))*(E1*((ro1/row)-1)-Qf*rof*((ro1/rof)-1));
86 - dT1dt=(1/CoT1)*((E1-mw1+rov1*(Qf-Qp1-E1/row));
87 - sys=[dh1dt;dro1dt;dT1dt];

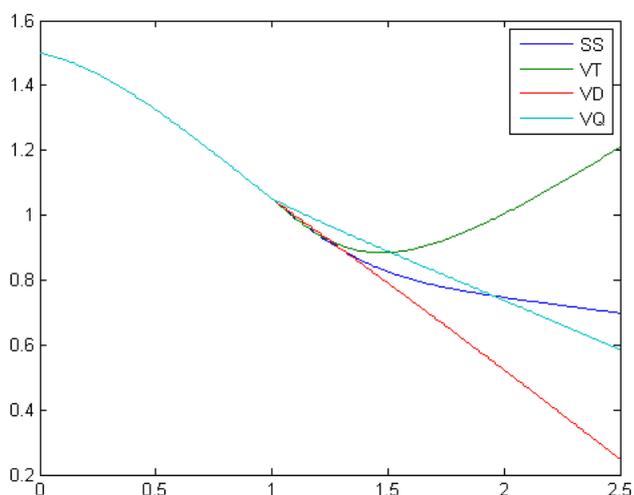
```

Figura 3. Estrutura de programação das equações utilizadas no sistema.

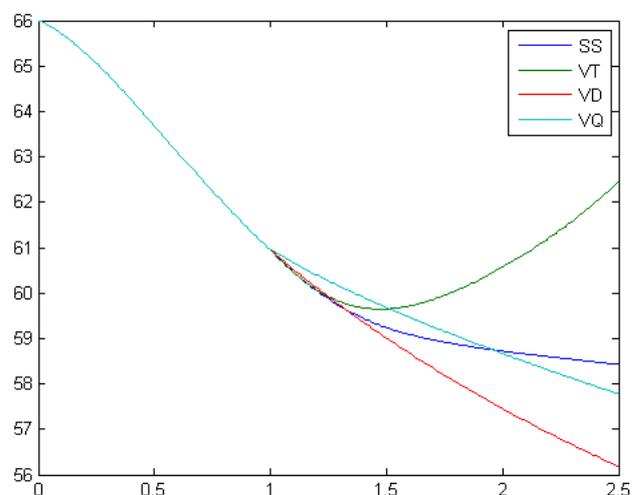
Para este tipo de modelo, Rangaiah sugere perturbações nas variáveis como segue na tabela 2. A figura 3 apresenta o resultado, em termos de variação em relação ao estado estacionário, com relação às perturbações 1, 3 e 5 nos parâmetros de entrada.

Perturbações	Descrição
1	Mudança na vazão de alimentação (Q_F) do valor de 37.7 para 39.7m ³ /h
2	Mudança na vazão de alimentação (Q_F) do valor de 37.7 para 35.7m ³ /h
3	Mudança na densidade da alimentação (ρ_F) do valor de 1.310 para 1.376 g/cm ³
4	Mudança na densidade da alimentação (ρ_F) do valor de 1.310 para 1.245 g/cm ³
5	Mudança na temperatura de alimentação (T_F) do valor de 60 para 66°C
6	Mudança na temperatura de alimentação (T_F) do valor de 60 para 54°C

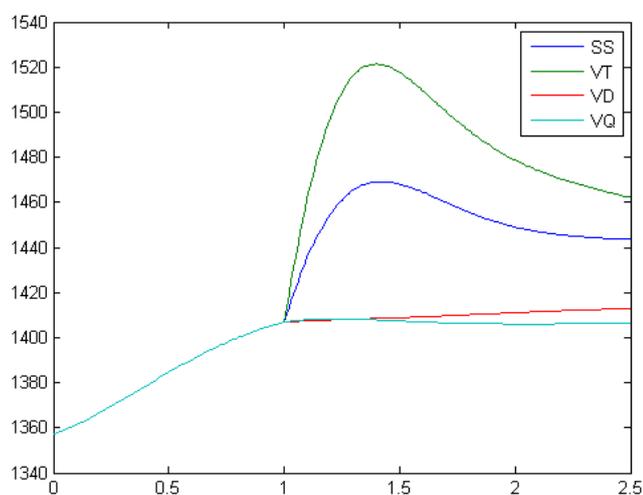
Tabela 2. Variações realizadas no processo e implementadas no Simulink.



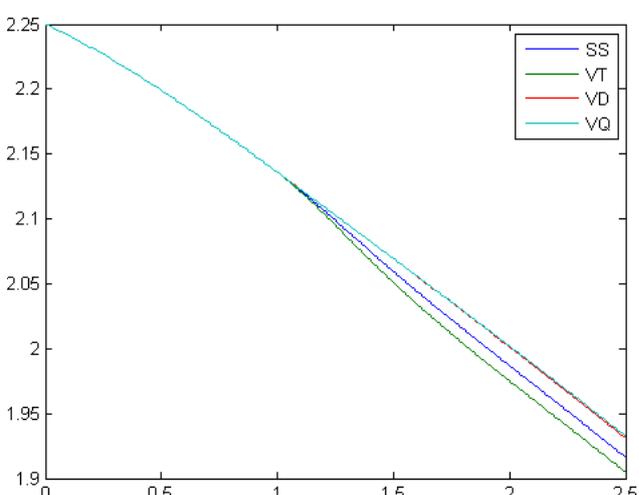
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3. (a) variações no nível do evaporador 1, (b) variações na temperatura do evaporador 1, (c) variações na densidade do evaporador 1 e (d) variações no nível do evaporador 2.

Identificação do sistema :

Na convenção do uso de diagrama de blocos utilizam-se as funções de transferência na representação de um sistema, fazendo-se o uso da variável de Laplace s ao invés da variável no domínio do tempo t . Por meio dos dados obtidos em estado estacionário e em presença das perturbações propostas, construiu-se uma estrutura dos modelos de função de transferência de primeira ordem com tempo morto correlacionando cada uma das saídas (respostas) às entradas e suas variações (sinais de entrada no processo). Para tanto fez-se uso da ferramenta *Ident*, componente do software Matlab, disponibilizado no LEMP. O *Ident* recebe os valores de entrada e saída (em termos de variação com relação ao estado estacionário), e determina os coeficientes da estrutura proposta que melhor se ajustem aos dados fornecidos. Na tabela abaixo tem-se a estrutura do modelo de primeira ordem e os respectivos coeficientes associados a cada variável.

Varição na	Resposta na	K	τ	θ
Densidade	Altura1	0.79554	130	30
Densidade	Temperatura1	20.605	347.3	0
Densidade	Densidade1	597.63	1194.8	0
Densidade	Altura2	-0.30077	1594	30
Temperatura	Altura1	-0.009429	223.63	30
Temperatura	Temperatura1	0.34848	1157.8	17.732
Temperatura	Densidade1	19.868	0.0010909	2.3762E-5
Temperatura	Altura2	-0.0084636	1889	0
Vazão	Altura1	-0.0013522	261.7	0
Vazão	Temperatura1	5.891	1163.4	5.7797
Vazão	Densidade1	238.3	0.001736	0.002587
Vazão	Altura2	-0.087328	1879.2	0

Tabela 3. Coeficientes obtidos por meio da ferramenta *Ident*.

Controle do processo

Com as funções de transferência obtidas na etapa de identificação de sistemas, construiu-se uma estrutura de controle conforme a figura abaixo onde se procurou determinar os parâmetros do bloco PID.

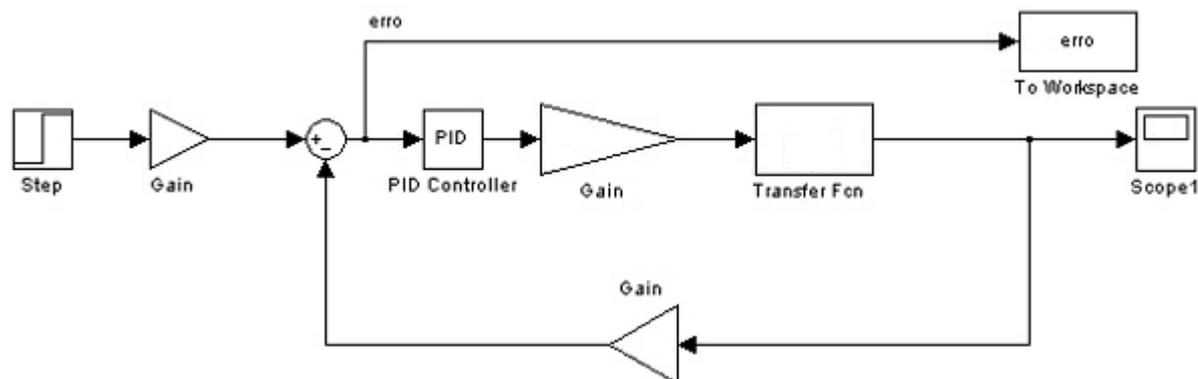


Figura 4. Estrutura para sintonia dos controladores.

Com os dados das funções de transferência em mãos, partiu-se para a metodologia de sintonia de controladores de Ziegler-Nichols, que consiste em :

$$\text{Dado um sistema na forma } U(s) = \left(K_p + \frac{K_p}{T_i} \frac{1}{s} + K_p T_d s \right) E(s) \quad (10)$$

Termo	Descrição
E(s)	sinal de entrada no controlador PID
U(s)	sinal de saída do controlador PID
K _p	ganho proporcional
K _p /T _i	tempo integral
K _p T _d	ganho derivativo

Tabela 4. Parâmetros e variáveis presentes no controlador PID;

A função de transferência de primeira ordem possui a forma :

$$Gp(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (11)$$

com K, θ e τ conhecidos.

Por meio das correlações tabeladas são obtidas as variáveis desconhecidas e então configura-se estes parâmetros no controlador.

Controlador	P	PI	PID
Parâmetros	$K_p = \frac{\tau}{\theta}$	$K_p = 0.9 \frac{\tau}{\theta}; \frac{T_i}{\tau} = 3.33 \left(\frac{\theta}{\tau} \right)$	$K_p = 1.2 \frac{\tau}{\theta}; \frac{T_i}{\tau} = 2 \frac{\theta}{\tau}; \frac{T_d}{\tau} = 0.5 \frac{\theta}{\tau}$

Obtidos os parâmetros, os mesmo foram modificados no bloco PID, observando minuciosamente se havia a estabilidade no parâmetro h.

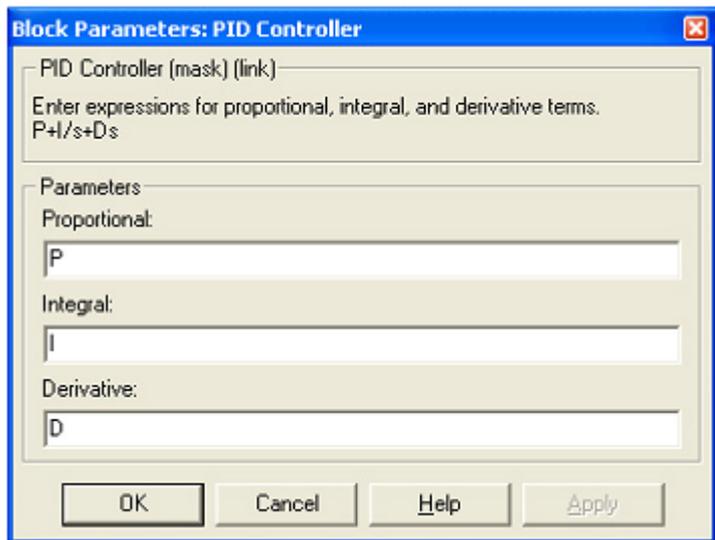
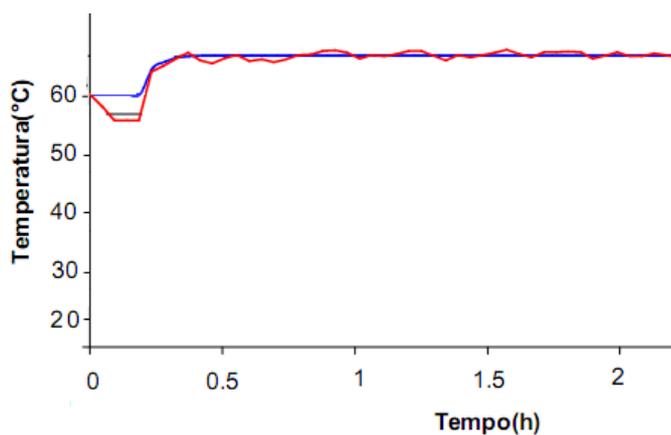


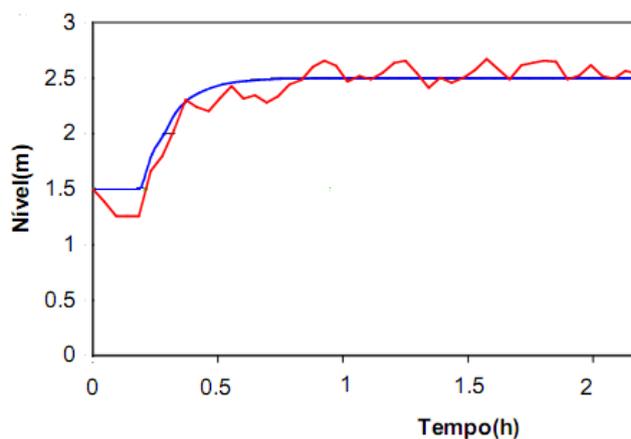
Figura 5. Entrada dos dados no bloco PID no Simulink.

Com os parâmetros especificados, pôde-se efetuar o controle sobre o nível do segundo evaporador seguindo o método de sintonia de controladores de Ziegler-Nichols.

Os gráficos abaixo exibem os resultados com entradas em forma de em comparação com o ruído para alguns das variáveis controladas no problema.



(a)



(b)

Figura 5. Resultados da estratégia de controle para (a) temperatura na saída do evaporador 2 e para (b) o nível no interior do evaporador 1.

CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa experimental, onde se analisou uma abordagem de modelagem, simulação e controle de um sistema de dois evaporadores constata-se :

- A precisão dos resultados obtidos vai de acordo com a implementação o com o número de equações e coeficientes(aproximações) utilizados, visto que o que se realizou neste trabalho foi uma aproximação de modelos reais, cujo estudo e obtenção de parâmetros normalmente apresentam inviabilidades técnico-econômicas.
- É possível obter estabilidade em uma malha de um processo por meio de métodos de sintonia presentes na literatura.A obtenção dos dados em condições de presença de ruídos, com posterior determinação de parâmetros e sintonia de controladores comprova a afirmação anterior.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa de Iniciação Científica e ao professor Luis Gonzaga pela oportunidade e paciência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 3 ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hal do Brasil, 1998.

Sintonia de controladores PID Disponível em:

http://www.ee.pucrs.br/~gacs/new/disciplinas/psc/lista_exercicios/formulario2.pdf acessado em 20/06/09

LUYBEN ,W.L. LUYBEN, M.L. **Essentials of Process Control** , , 1997, McGraw-Hill

SEBORG, Dale E.; MELLICHAMP, Duncan A. **Process Dynamics and Control** , 2004, Wiley

RANGAIAH, G.P., SAHA, P.; Tadé M.O.; **Nonlinear model predictive control of an industrial four-stage evaporator system via simulation**; Chemical Engineering Journal 87 (2002) 285–299