UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

RELATÓRIO DA 05º EXPERIÊNCIA
CONTROLE NO ESPAÇO DE ESTADOS:
OBSERVADORES DE ESTADO

Grupo 02

Aluno 1 - Alexandre Luz Xavier da Costa 2016007810

Aluno 2 - Anderson Henrique de Araújo Dias – 20160153697

Aluno 3 - Higo Bessa Magalhães – 20160153928

Aluno 4 - Jaime Cristalino Jales Dantas - 2016008362

Natal-RN

2016

CONTROLE NO ESPAÇO DE ESTADOS: OBSERVADORES DE ESTADO

Quarto Relatório Parcial apresentado à disciplina Laboratorial de Sistemas de Controle, correspondente à avaliação da 3º unidade do semestre 2016.2 do 8º período dos cursos de Engenharia de Computação e Engenharia Mecatrônica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sob orientação do **Prof. Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo.**

Professor: Fábio Meneghetti Ugulino de Araújo.

Natal-RN

2016

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

V	*Tensão*
s	*Segundos*
cm	*Centímetros*
PV	*Variável de Processos*
MV	*Variável Manipulada*
MF	*Malha Fechada*
SP	*Set-Point, Resposta Desejada*
K_p	*Constante Proporcional*
e_{ss}	*Erro Atuante Estacionário*
P	*Proporcional*
Mn	*Máximo Sobre Sinal Percentual*
Tp	*Tempo de Subida*
Tp	*Tempo de Pico*
Ts	*Tempo de Acomodação*
Wn	*Frequência natural de oscilação*
ξ	*Coeficiente de amortecimento*
EDO	*Equações Diferenciais Ordinais*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistemas de tanques Quanser. 6
Figura 2 - Sistema de Segunda Ordem 8
Figura 3 - Resposta ao Degrau. 9
Figura 4 - Diagrama de Bloco de Sistema de 2ª Ordem 11
Figura 5 - Diagrama de Blocos de um Sistema de 2ª Ordem com Controlador 11
Figura 6 - Representação gráfica de um sinal degrau. 15
Figura 7 - Seleção de modo dos níveis observados. 16
Figura 8 - Seleção do Modo Observador de Estados 16
Figura 9 - Valores dos Ganhos para Pólos Desejados. 17
Figura 10 - Interface de Leitura 17

SUMÁRIO

Pág.

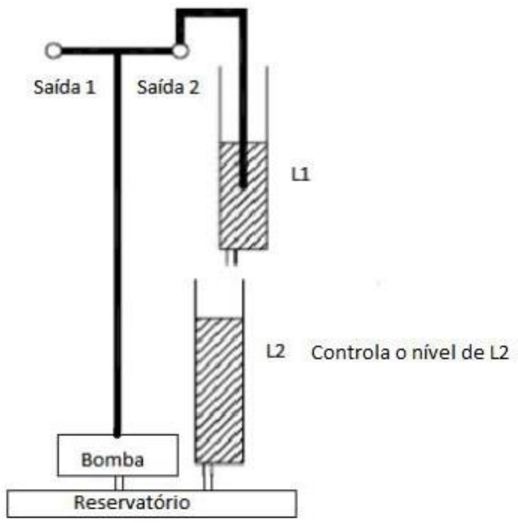
1 INTRODUÇÃO **6**
2 REFERENCIAL TEÓRICO **7**
2.1 Conceito 7
2.2 Sistemas Dinâmicos de 2ª Ordem 7
2.3 Ações de Controle 10
2.3.1. Controlador Proporcional (P) **11**
2.4 Descrição por Variáveis de Estado 12
2.4.1. Estabilidade **12**
2.4.2. Observabilidade **12**
2.5 Sistema Discreto no Tempo 13
2.6 Observador de Estados 13
3 METODOLOGIA **15**
3.1 Software de Controle 15
3.1.1 Interface de Leitura **17**
4 DESENVOLVIMENTO **18**
5 CONCLUSÃO **19**
6 REFERÊNCIAS **20**

1 INTRODUÇÃO

O sistema de tanques da Quanser pode ser utilizado e controlado em até três configurações distintas. A configuração mais simplista foi usada na experiência I - Introdução ao Laboratório de Controle e na experiência II - Controle de Sistemas Dinâmicos: Sistema de Primeira Ordem.

Já para a segunda unidade da disciplina, a experiência III - Controle de Sistemas Dinâmicos: Sistema de Segunda Ordem e na experiência IV: Controle em Cascata, foi utilizada a configuração da Figura 1. Essa mesma configuração será utilizada na experiência atual onde o sistema terá o controle em malha fechada por meio do controlador do tipo P.

Figura 1 - Sistemas de tanques Quanser.



Em diversos sistemas não é possível observar todos os estados do processo, medindo-se apenas a saída do sistema, em outros pode-se evitar o custo e manutenção do uso de sensores, logo, usa-se apenas sensores na saída.

Nestes casos é importante o uso de observadores de estado, que consiste em utilizar o erro da estimativa da saída, que é facilmente calculada, para obter estimativas dos estados não medidos. Essa estimação é realizada a partir do modelo do sistema e de valores de polos desejados que determinarão a dinâmica da correção de erro da estimativa.

No sistema de tanques da Quanser pode-se ler os níveis dos 2 tanques, entretanto para a experiência realizada será utilizado o valor do nível do tanque 1 apenas para avaliação da corretude da estimação e da escolha dos polos, sendo omitido o seu valor para o cálculo da estimação dos níveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Conceito

Quando se trata de sistemas de controle de 2ª ordem, a definição de estabilidade requer atenção, uma vez que indica como um sistema irá agir de acordo com um sinal de entrada. Um sistema de controle de qualidade deve garantir que o processo tenderá a um valor estável e finito, dessa forma o sistema estará prevenido de uma saída que possa causar danos ou que nunca chega a um de SP.

Diz-se que um sistema é estável quando sua saída é prevista para toda e qualquer entrada limitada. Outro ponto importante é o erro atuante estacionário, isto é, dada uma entrada do tipo degrau o erro atuante estacionário é a diferença entre o SP e o sinal realimentado. Muitas vezes o sinal realimentado é o próprio valor de saída, devido a sensores que possuem função de transferência de valor unitário.

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + G(0) * H(0)}$$

Onde $G(0)$*$H(0)$ determina o valor do erro atuante estacionário. Portanto, para uma entrada do tipo degrau, haverá um valor de erro que diminuirá a medida que o valor de $G(0)$*$H(0)$ aumenta, isso pode ser realizado aplicando um ganho constante na entrada do sistema. Quanto maior o valor do ganho, menor o valor do e_{ss}.

2.2 Sistemas Dinâmicos de 2ª Ordem

A análise de sistemas de controle é dada pelas de equações que descrevam o comportamento dinâmico desses sistemas ao longo do tempo. Em casos de sistemas lineares invariantes no tempo, é conveniente utilizar a função de transferência do sistema, onde esta é uma relação entre a função resposta e função excitação, com condições iniciais iguais a zero.

A ordem de um sistema dinâmico é definida pela potência do denominador, ou seja, se a maior potência de s no denominador for 1, o sistema é de primeira ordem. Se a 8 potência de s for n, o sistema será de n-ésima ordem. Além disso, a função de transferência é uma propriedade independente da entrada ou função de excitação e não guarda qualquer característica física do sistema, o que dá certa flexibilidade ao mesmo, fazendo com que possa ser utilizada em diversos sistemas.

Considere a seguinte equação diferencial de segunda ordem:

$$ac(t) + bc(t) \ddot{+} dc(\dot{t}) = er(t)$$

Definido:

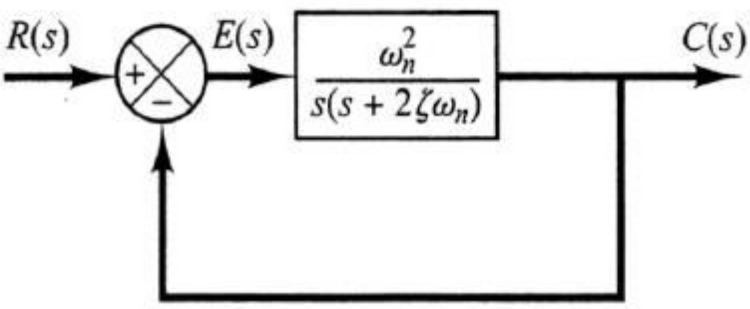
$$\frac{a}{b} = b\boldsymbol{\xi}\, w_n \quad ;\frac{d}{a} = w_n^2 \quad ; \frac{e}{a} = k$$

Aplicando Laplace com condições iniciais nulas:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{k}{s^2 + 2\boldsymbol{\xi} w_n + w_n^2}$$

Admitindo $k = w_n^2$

Figura 2 - Sistema de Segunda Ordem



Observa-se que a função de transferência de malha fechada de um sistema de controle de segunda ordem tem a forma:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\boldsymbol{\xi} w_n + w_n^2}$$

Tem-se os polos $s^2 + 2\boldsymbol{\xi} w_n + w_n^2 = 0$

Isolando S tem-se que as raízes da equação característica, ou polos da relação de controle são:

$$S_{1,2} = -\xi w_n \pm w_n\sqrt{\xi^2 - 1}$$

Onde ξ é o fator de amortecimento, W_n é a frequência natural (frequência de oscilação do sistema sem amortecimento) e K é o ganho do sistema, tem-se:

$$C(\ddot{t}) + 2W_n\xi c(\dot{t}) + W_n d(t) = kr(t)$$

Os parâmetros de ξ e W_n são muito importantes na caracterização da resposta de um sistema de segunda ordem.

Sabendo que ωd é a frequência do sistema e é dado por:

$$W_d = W_n\sqrt{1 - \xi^2}$$

Algumas observações podem ser feita a respeito de ξ

Quando $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{0}$ não há amortecimento. Nesse caso $W_d = W_n$ e a resposta oscila com frequência natural W_n.

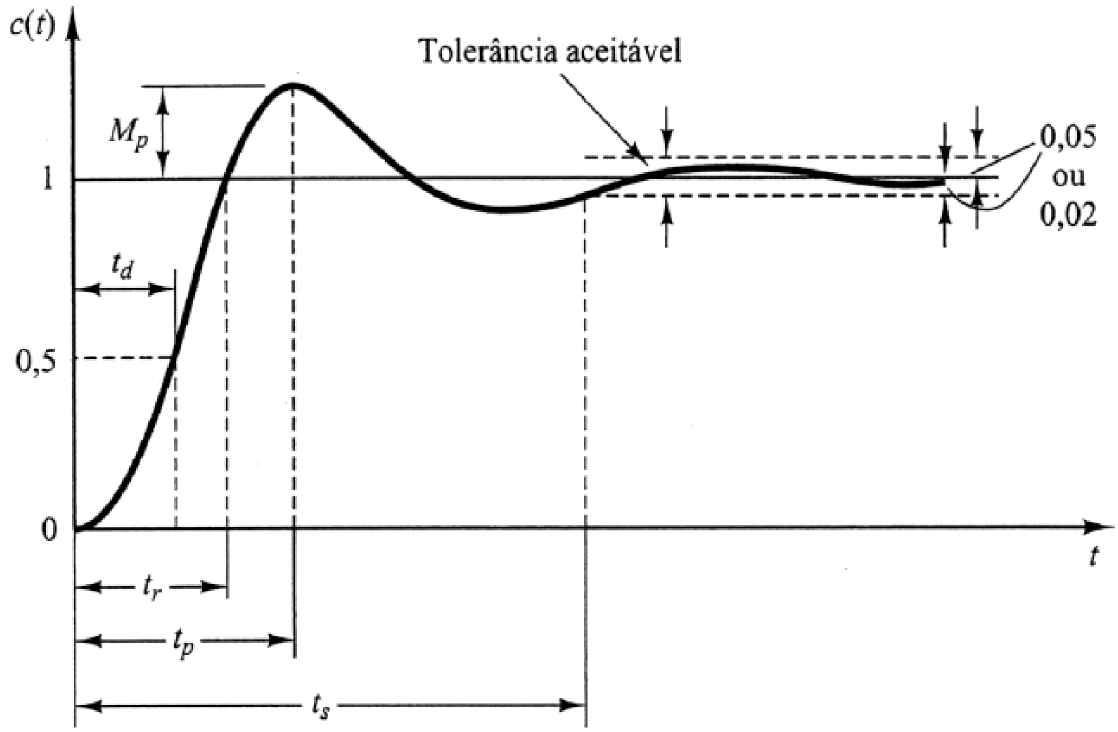
Quando $\mathbf{0} < \boldsymbol{\xi} < 1$ a oscilação vai sendo gradativamente amortecida, caracterizando assim o SOBREAMORTECIMENTO.

Quando $\boldsymbol{\xi} = \mathbf{1}$ ocorre a transição para o desaparecimento da oscilação e tem-se assim o AMORTECIMENTO CRITICO.

Quando $\boldsymbol{\xi} > 1$ não ocorre oscilação na resposta, caracterizando o SUPERAMORTECIMENTO.

A fim de analisar a resposta transitória para um sistema de controle de 2ª ordem com entrada degrau ilustrada, tem-se as observações:

Figura 3 - Resposta ao Degrau.



Onde:

M_p– SOBRE-SINAL PERCENTUAL, é o máximo valor de pico da curva de resposta, medido a partir do valor unitário. Influenciado apenas por ξ.

$$M_p(\%) = 100e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}}$$

t_r − TEMPO DE SUBIDA, é o tempo para a resposta passar de 0% a 100% do seu valor final.

$$t_r = \pi - \beta W_d$$

Onde $\beta = tg^{-1} \frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}$

t_p − TEMPO DE PICO, é instante de tempo em que a resposta atinge o primeiro pico do sobre-sinal.

$$t_p = \pi W_d$$

t_s − TEMPO DE ACOMODAÇÃO, é o tempo necessário para a curva de resposta alcançar e permanecer dentro de uma faixa em torno do valor final.
Faixa de acomodação de ±2% e ±5% são os valores usuais para o tempo de acomodação, nesse experimento além desses valores, será abordado também ±7 % e ±10%.

$t_s = \frac{4}{W_n\xi}$, para o critério de 2%.
$t_s = \frac{3}{W_n\xi}$, para o critério de 5%.

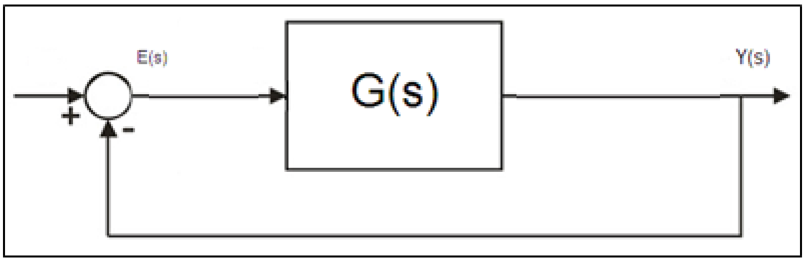
2.3 Ações de Controle

Quando em sistema realimentado, ações de controles são implementadas em controladores, fazendo com que a saída do processo seja mais próxima do valor desejado SP que é previamente definido.

Ao comparar a saída com o SP obtêm-se um erro que pode ser utilizado em várias ações de controle, onde cabe ao engenheiro escolher a melhor para cada aplicação.

As ações de controle mais implementadas em controladores industriais são: proporcional, integral, derivativa e combinações destas três. Para o melhor entendimento destas ações, será utilizado um sistema de 2ª ordem, esquematizado de acordo com a figura abaixo:

Figura 4 - Diagrama de Bloco de Sistema de 2ª Ordem



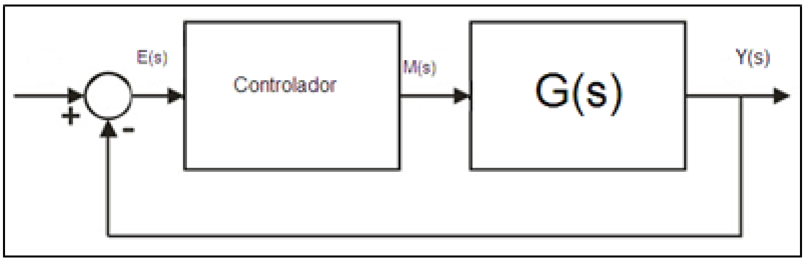
Onde:

$$E(s) = SP - Y(s)$$

$$Y(s) = G(s) * E(s)$$

Aplicar o sinal de erro à entrada do sistema implica que foi imposta uma ação de controle ao sistema do tipo proporcional com ganho k_p = 1, o que implica:

Figura 5 - Diagrama de Blocos de um Sistema de 2ª Ordem com Controlador



2.3.1. Controlador Proporcional (P)

Para um controlador proporcional, a relação entre sinal de saída $M(s)$ e erro que atua $E(s)$ é dada por:

$$M(s) = K_p E(s)$$

O controle proporcional pode ser visto como uma relação proporcional entre k_p e o ganho ajustável, isso é, com o aumento do valor do k_p o erro enviado ao sistema é amplificado, consequentemente o erro de regime diminui. Entretanto, diminuir o erro de regime não significa que será eliminado. Para que isso ocorra, o valor do k_p deve ser muito alto, o que pode levar o sistema se fragilizar no que diz respeito à estabilidade.

2.4 Descrição por Variáveis de Estado

A descrição de um sistema por variáveis de estado é aplicável a sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas, que podem ser lineares ou não-lineares, variantes ou invariantes no tempo e com condições iniciais não-nulas.

O estado de um sistema no instante t_0 é a quantidade de informação naquele instante que, junto à entrada $u(t)$ em $t \geq t_0$, determina o comportamento do sistema para todo $t \geq t_0$. O sistema pode ser descrito da seguinte forma:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (equação\ de\ estado)$$
$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (equação\ de\ saída)$$

2.4.1. Estabilidade

Teorema: Um sistema é estável se quando $u(t) = 0$, para todo $x(0)$, temos que $\lim_{n\to\infty} x(t) = 0$.

Outra forma de verificar a estabilidade é conferindo se todos os autovalores da matriz A apresentam parte real negativa.

Corolário: Um sistema é estável se todos os autovalores da matriz A apresentam parte real negativa.

2.4.2. Observabilidade

Definição: O sistema (A, B, C, D) é observável se para todo $x(0)$, o conhecimento da entrada $u(t)$e da saída $y(t)$ em um tempo finito é suficiente para determinar $x(t)$.

Teorema: O sistema (A, B, C, D) é observável se e somente se o posto da matriz de observabilidade $\boldsymbol{V}$=[$\boldsymbol{C}\ \boldsymbol{CA}\ \boldsymbol{CA2}\ldots\boldsymbol{CAn}-\mathbf{1}$] igual a n.

2.5 Sistema Discreto no Tempo

Considere um sistema discreto linear e invariante no tempo descrito em variáveis de estado:

$$X(k+1) = GX(k) + Hu(k)$$

$$Y(k) = CX(k) + Du(k)$$

A representação no domínio discreto pode ser obtida a partir da representação contínua. Fazendo-se

$$G(T) = e^{AT}$$

$$H(T) = \int_0^T e^{At} B dt = \left(\int_0^T e^{At} dt\right) * B$$

2.6 Observador de Estados

A dinâmica do observador de estados é dada por:

$$\hat{x}(k+1) = G\hat{x}(k) + L\big(y(k) - \hat{y}(k)\big) + Hu(k)$$

$$\hat{y}(k) = C\hat{x}(k)$$

A dinâmica do erro e estimação dos estados é descrita então por:

$$\tilde{x}(k+1) = x(k+1) - \hat{x}(k+1)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\hat{x}(k+1) = Gx(k) + Hu(k) - \left[G\hat{x}(k) + L\big(y(k) - \hat{y}(k)\big) + Hu(k)\right]$$

$$\hat{x}(k+1) = (G - LC)\tilde{x}$$

Vale observar que $(G - LC)$ influencia na dinâmica do erro de estimativa e $\tilde{x}$ é o erro de estimativa.

O projeto de observadores de estado consiste em determinar L para que $G - LC$ tenha pólos desejados.

Utilizando-se a formula de Ackermann, tem-se:

$$L = q_l(G) * W_0^{-1}[0\ 0 \dots 1]^T$$

2.3 Sistema de Tanques Acoplados Quanser

Com o uso de um computador e uma placa de aquisição de dados pode ocorrer o controle dos níveis dos tanques acoplados em laboratório, de modo que o computador enviasse sinais elétricos ao modulo de potência, que por sua vez multiplica a tensão por uma variável acionando a bomba.

Os componentes deste sistema de tanques são:

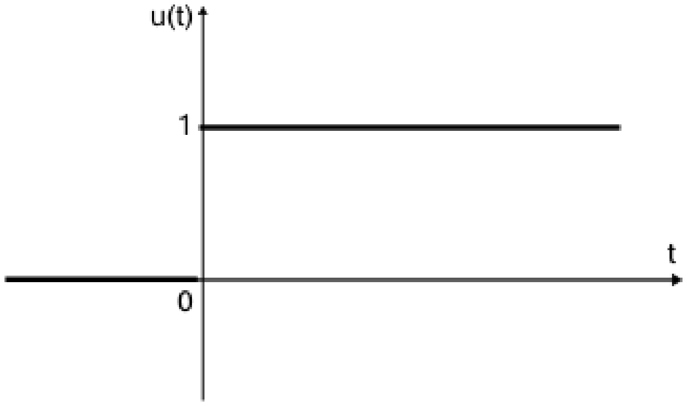
I. 2 Tanques acoplados da Quanser
II. 2 Sensores de nível
III. 1 Bomba
IV. 1 Reservatório
V. Módulo de potência VoltPAQ-X1
VI. Placa de aquisição de dados MultQ da Quanser
VII. Computador

2.4 Sinais de Entrada na Planta

Dentre os sinais utilizados nos experimentos anteriores para o controle da planta temos: sinal senoidal, quadrado, degrau, tipo dente de serra e aleatório. Entretanto, para o experimento referente a este relatório utilizou-se apenas o sinal degrau como entrada. O motivo para se usar apenas esse sinal é que na prática se usa apenas o degrau como sinal de controle devido a sua estabilidade e melhor manipulação.

Os outros sinais utilizados anteriormente foram apenas de caráter ilustrativo, para mostrar o comportamento da planta com um sinal que mais se assemelhava as formas de ondas senoidais, quadradas, tipo dente de serra e aleatória.

Figura 6 - Representação gráfica de um sinal degrau.



3 METODOLOGIA

Neste momento, o projeto se adaptou ao desenvolvimento do observador de estados. Em sua interface gráfica o usuário terá esta nova opção de observar o nível do observador 1 e 2, de forma que o software receba os parâmetros dos pólos desejados e plote em tempo real a resposta da planta.

As principais alterações para elaboração deste experimento foram:

I. Nova seleção dos observadores de estados pelo usuário;
II. Plotagem em tempo real dos níveis de ambos os observadores;
III. Campo para o preenchimento dos pólos desejados e observação dos valores dos ganhos.

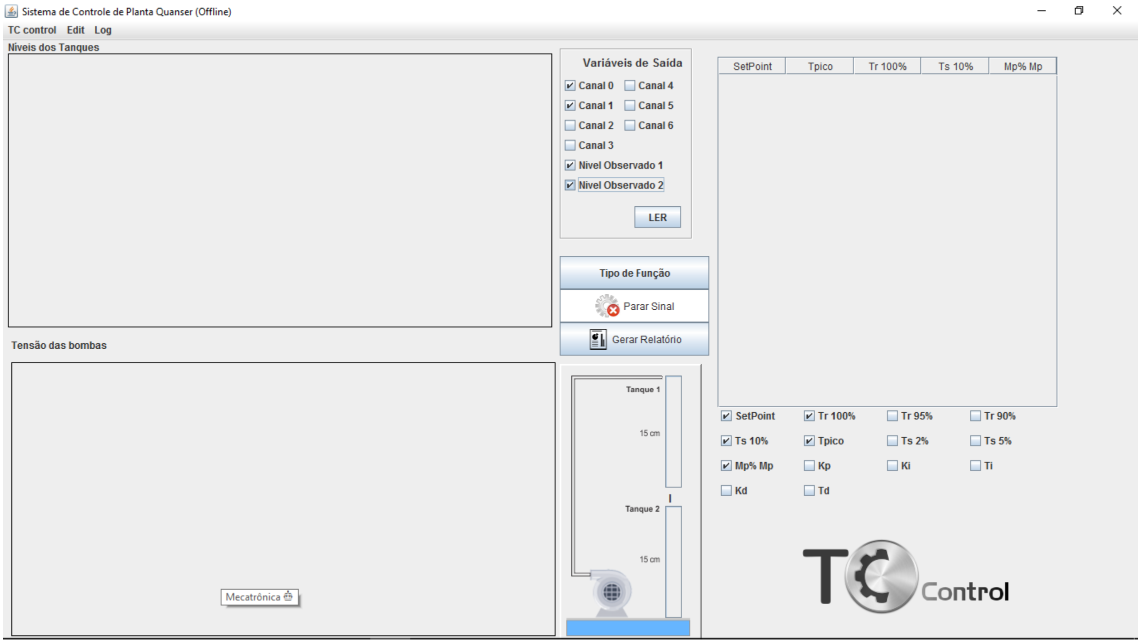
3.1 Software de Controle

São solicitados parâmetros ao usuário em busca de um funcionamento aprimorado, estas variáveis e suas alterações no sistema são plotados em gráficos no software:

I. Implementação do observador de estados em software, tendo em teste apenas o controlador do tipo P.
II. Inserção dos pólos pelo usuário para observação do comportamento da planta.
III. Plotagem em tempo real do nível observado para análise.

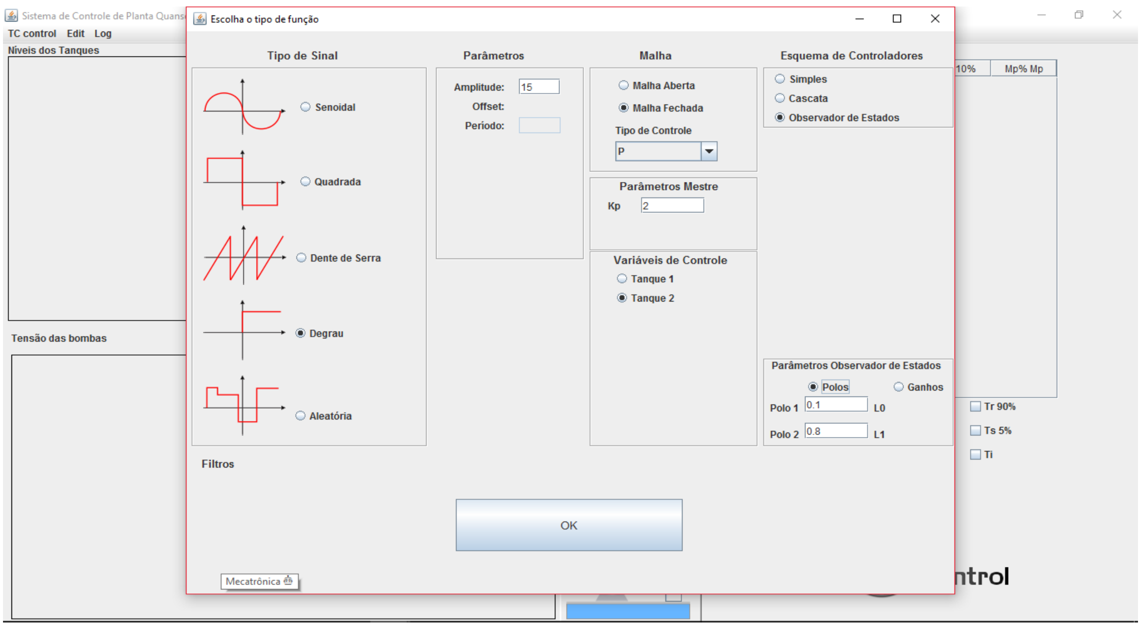
O usuário poderá selecionar dentre as variáveis de saída o Nível Observador 1 e/ou 2, para acompanhar em tempo real o comportamento da planta referente ao parâmetros dos pólos utilizados.

Figura 7 - Seleção de modo dos níveis observados.



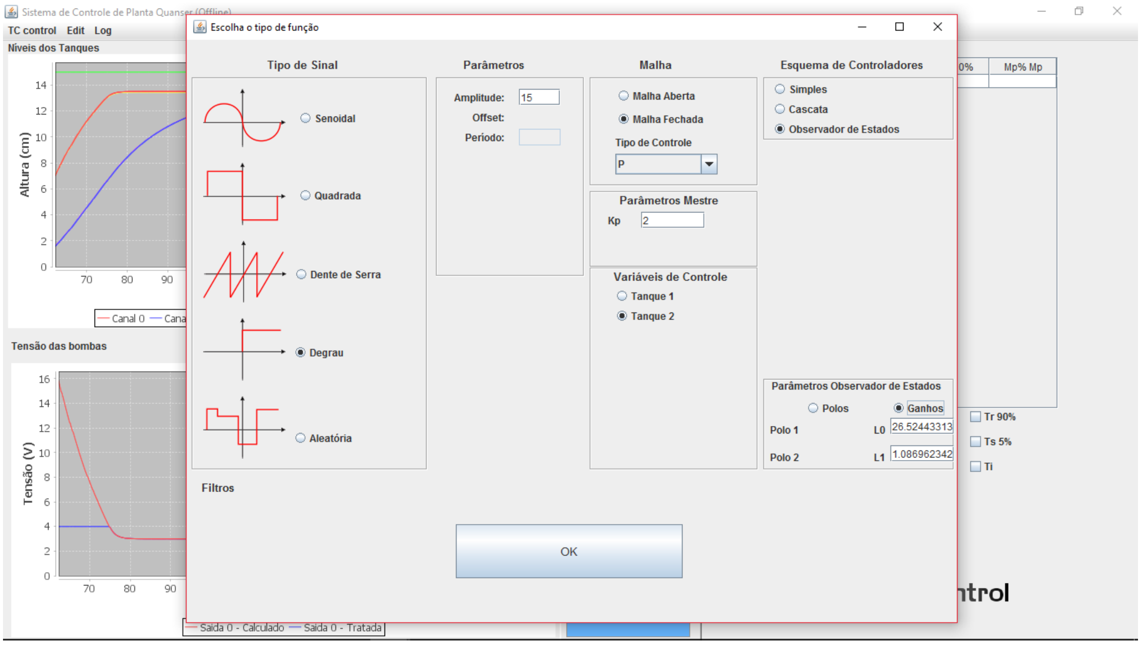
É possivel selecionar dentre os Esquemas de Controle o modo de Observador de Estados, tendo assim a aparição de um campo a ser preenchido com os pólos desejados.

Figura 8 - Seleção do Modo Observador de Estados.



O usuário poderá observar os valores dos ganhos estimados pelo software após o inicio da simulação ou uso em planta.

Figura 9 - Valores dos Ganhos para Pólos Desejados.

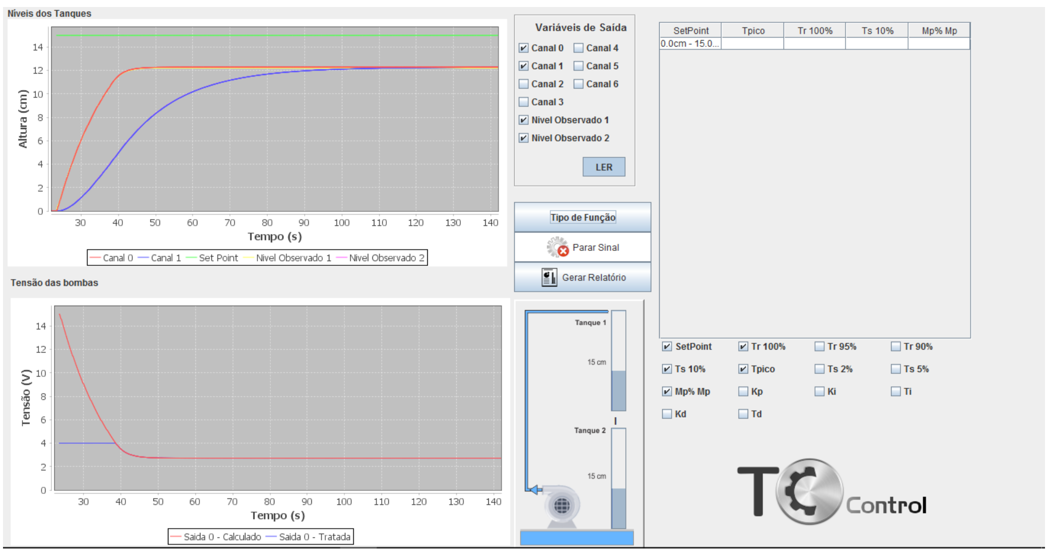


O relatório conta com os dados, gráficos e parâmetros inseridos seguem em anexo neste relatório, podendo ser visto em detalhe os valores obtidos e observados.

3.1.1 Interface de Leitura

O usuário acompanha os gráficos de níveis, contando agora com os níveis observados, como também a tensão gerada na bomba e o SP.

Figura 10 - Interface de Leitura



4 DESENVOLVIMENTO

Conhecendo-se as EDOs que descrevem as dinâmicas dos tanques 1 e 2:

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} * \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} * L_1 + \frac{K_m}{A_1} V_p$$

E

$$\dot{L}_2 = \frac{a_2}{A_2} * \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} * L_2 + \frac{a_1}{A_2} * \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} * L_1$$

Onde:

- $A_1 = A_2 = 15{,}5179;$
- $L_{20} = 15;\ L_{10} = \frac{a_2^2}{a_1^2} * L_{20};$
- $a_1 = 0{,}17813919765;$
- $a_2 = a_1\ (Orifíco\ Médio);$
- $g = 980\ cm/s^2;$

Foi encontrada a seguinte representação em espaço de estados onde $L_1\ e\ L_2$:

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{L_1} \\ \dot{L_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{A_1} * \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} & 0 \\ \frac{a_1}{A_2} * \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} & -\frac{a_2}{A_1} * \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_m}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} * V_p$$

Onde

$$A = \begin{bmatrix} -0.0656 & 0 \\ 0.0656 & -0.0656 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{L_1} \\ \dot{L_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-0.0656t} & 0 \\ (0.0656t)(-0.0656^{t}) & e^{-0.0656t} \end{bmatrix}$$

A representação no domínio discreto pode ser obtida a partir da representação contínua fazendo-se:

$$G(T) = e^{AT}$$

$$H(T) = \int_0^T e^{AT} B dt = \left(\int_0^T e^{AT} dt \right) B$$

Logo,

$$G(T) = \begin{bmatrix} 0.9935 & 0 \\ 0.0065 & 0.9935 \end{bmatrix}$$

$$H(T) = \begin{bmatrix} 0.0295 \\ 0.0001 \end{bmatrix}$$

5 CONCLUSÃO

Os testes em anexo foram realizados com os sinais de entrada Degrau para o sistema em malha fechada com controlador P, k_p = 1 e *SP* do tanque 2 igual a 15 cm. Foram variados os valores dos polos e então foram registradas as estimativas correspondentes.

Comparando os gráficos, observa-se que possuem certo comportamento semelhante e que uma pequena diferença no valor dos polos já faz com que as estimativas dos testes venham ou não apresentar menor oscilação que o teste anterior.

Por fim, o estudo e implementação do observador de estados nessa experiência foi bastante importante para entender o seu funcionamento e para compreender a sua importância na estimação de estados não medidos. Além disso foi possível comprovar propriedades já conhecidas.

6 REFERÊNCIAS

OGATA, K. : Engenharia de Controle Moderno { 4o Edi_c~ao, 2003, Prentice-Hall. (OGATA, 2003).

BAZANELLA, A.S. e SILVA JR, J.M.G. Sistemas de Controle: Princípios e Métodos de Projeto. Editora UFRGS, 2005.

APOSTILA DA DISCIPLINA DCA0206

http://www.dca.ufrn.br/~meneghet/FTP/Controle/scv20071.pdf

Capa

De

Anexos

Obs: Seguem aqui os relatórios gerados via software para todos os pólos inseridos pelo usuário.