

Gabarito de Atividade Prática



**Modelagem e
Controle de Sistemas**

CRITÉRIOS DE CORREÇÃO – AULA PRÁTICA 1

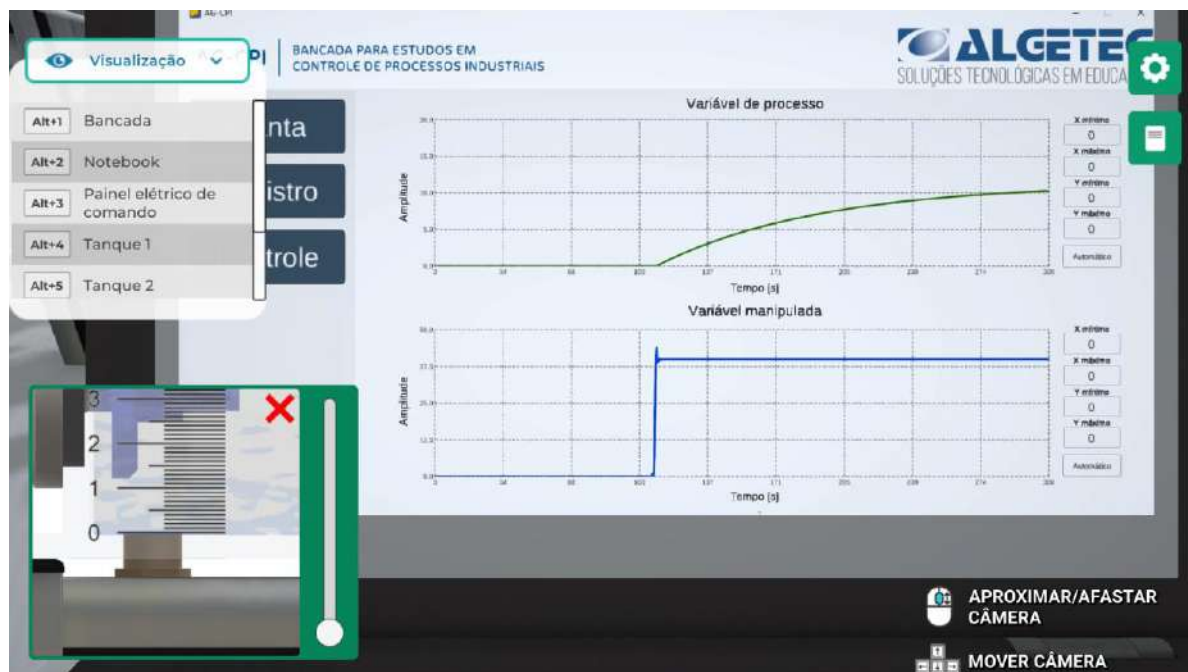
Os resultados a serem entregues devem conter uma documentação detalhada de todas as etapas realizadas, incluindo capturas de tela que ilustrem cada fase do experimento. O aluno deverá responder a uma série de questionamentos específicos relacionados à prática, como a determinação do nível no tanque antes e depois da aplicação do degrau, o cálculo do ganho da malha, e a dedução da constante de tempo do sistema. Além disso, será exigido que o aluno escreva a função de transferência no domínio do tempo para a malha de nível analisada.

Descrição detalhada de cada etapa realizada durante a prática, seguindo o roteiro fornecido:

- Acesso e ambientação ao laboratório virtual; fechamento das válvulas e preparação do sistema; Inicialização do sistema (ligar notebook, habilitar a bomba); inserção do degrau de entrada e observação dos resultados; análise dos gráficos gerados.
- Prints das telas: inclua capturas de tela de cada etapa importante, destacando as ações realizadas e os resultados observados. Esses prints devem estar acompanhados de uma breve legenda explicativa.

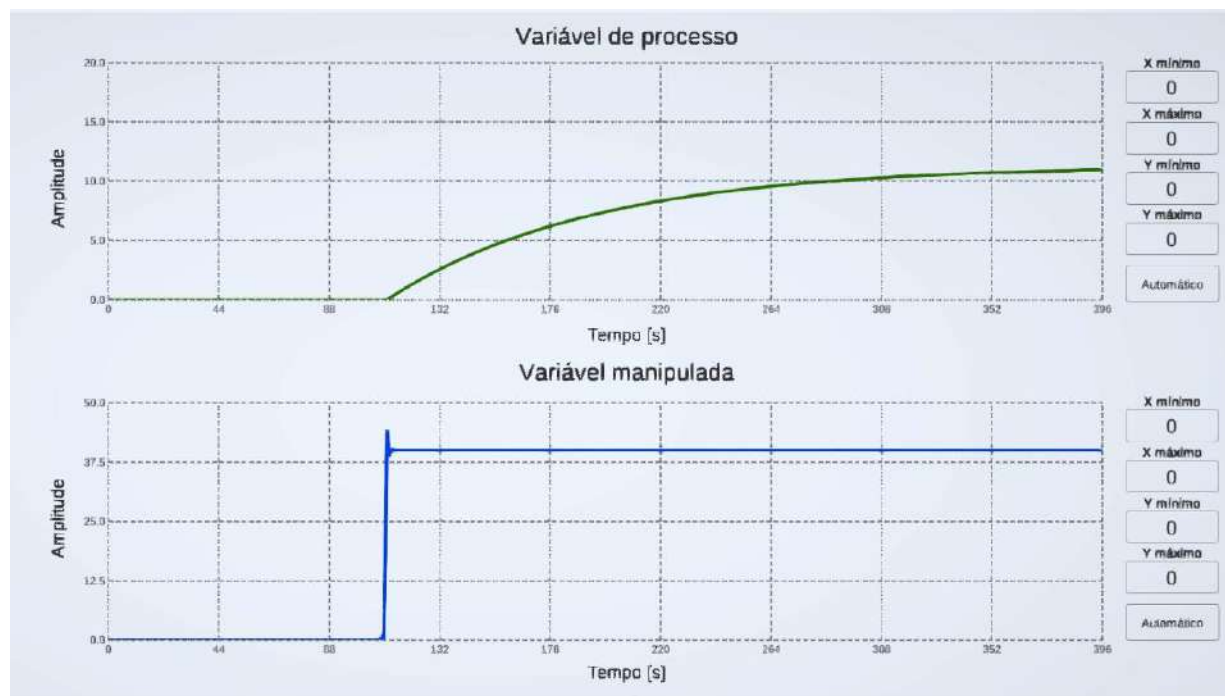
A Figura 1 ilustra o print durante uma coleta para um degrau de 40%.

Figura 1 – Visualização do nível do tanque 1 no simulador Algetec.



As respostas aos questionamentos propostos irão depender do degrau inserido pelo estudante. Supondo um ensaio com degrau de 40%, em regime permanente, obtém-se a resposta mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Visualização do nível do tanque 1 em regime permanente.



Para essa situação, podemos observar que:

1. Antes do degrau ser aplicado no atuador, qual o valor do nível no tanque?

O valor do nível no tanque antes do degrau ser aplicado era de 0 (o gráfico de variável de processo mostra que a amplitude é zero antes de qualquer mudança na variável manipulada).

2. Qual foi o degrau aplicado na bomba? Qual foi o valor do nível em regime permanente para esse degrau? Qual é o ganho da malha de nível (Lembrando que se você utilizar 20% do valor deve colocar no cálculo 0,2).

O degrau aplicado na bomba foi de aproximadamente 37,5 unidades (pode-se observar isso no gráfico da variável manipulada, onde a amplitude passa de 0 para aproximadamente 37,5). O valor do nível em regime permanente para esse degrau foi aproximadamente 12 unidades (no gráfico da variável de processo, a curva se estabiliza em torno de 12). O ganho da malha de nível é calculado como a razão entre a mudança na variável de processo (nível) e a mudança na variável manipulada (bomba). Assim, $K = 12/37,5 \approx 0,32$.

3. Qual a diferença de tempo entre o instante que o degrau foi aplicado e o valor em que a variável do processo começou a ser modificada?

O degrau foi aplicado por volta de 50 segundos (observando o gráfico da variável manipulada). A variável do processo começou a se modificar em torno de 52 segundos. Portanto, a diferença de tempo é de aproximadamente 2 segundos.

4. Qual a constante de tempo que pode ser encontrada ao analisar o gráfico da variável de processo?

A constante de tempo (τ) pode ser estimada observando o tempo que a variável de processo leva para atingir aproximadamente 63% do valor final em regime permanente. Como o valor final em regime permanente é cerca de 12 unidades, 63% desse valor é aproximadamente 7,56. Analisando o gráfico, a variável de processo atinge esse valor por volta de 150 segundos, então a constante de tempo (τ) é aproximadamente 100 segundos.

5. Escreva qual é a função transferência no domínio do tempo para a malha de nível

Com base nas respostas anteriores e considerando um sistema de primeira ordem, a função de transferência no domínio de Laplace é dada por: $G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} = \frac{0,32}{100s + 1}$. No domínio do tempo, isso corresponde à resposta ao degrau: $y(t) = K \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = 0,32 \left(1 - e^{-\frac{t}{100}}\right)$.

Como conclusão, deve ser apresentado um resumo dos principais aprendizados da prática, os comentários sobre a importância do controle de sistemas e da identificação de sua função de transferência no contexto da engenharia e uma reflexão sobre a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos e sobre a utilização de ambientes virtuais no processo de aprendizagem.

CRITÉRIOS DE CORREÇÃO – AULA PRÁTICA 2

Nessa aula prática, o aluno deve obter o diagrama de Bode e avaliar as margens de ganho e de fase de um determinado sistema. Com a margem de ganho obtida, ele será levado a obter a resposta marginalmente estável do sistema em malha fechada. Assim, ele poderá concluir sobre a relação entre a margem de ganho e a estabilidade de um determinado sistema.

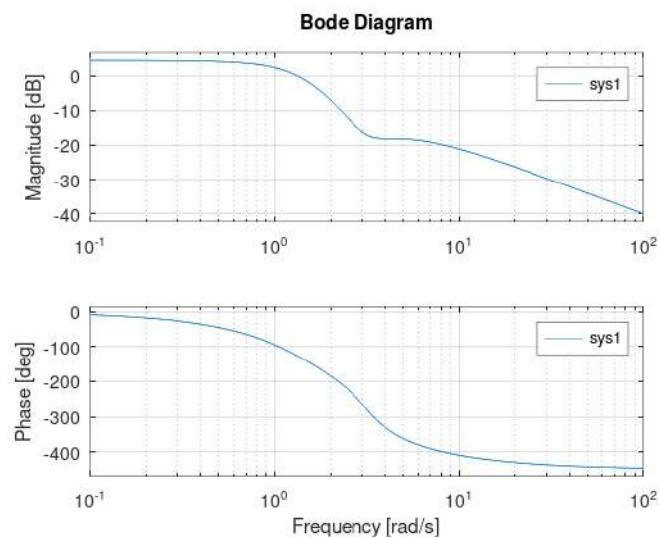
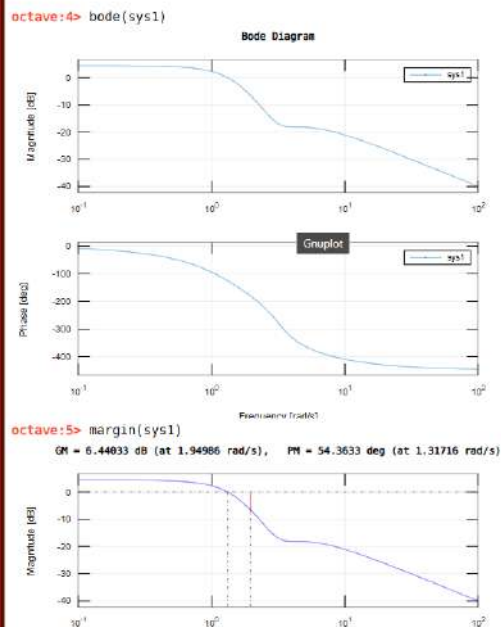
Descrição detalhada de cada etapa realizada durante a prática, seguindo o roteiro fornecido:

- Descrição detalhada dos passos seguidos durante a prática, incluindo as etapas de aplicação das funções no Octave para a obtenção dos gráficos.
- Prints das telas: inclua capturas de tela de cada etapa importante, destacando as ações realizadas e os resultados observados. Esses prints devem estar acompanhados de uma breve legenda explicativa.

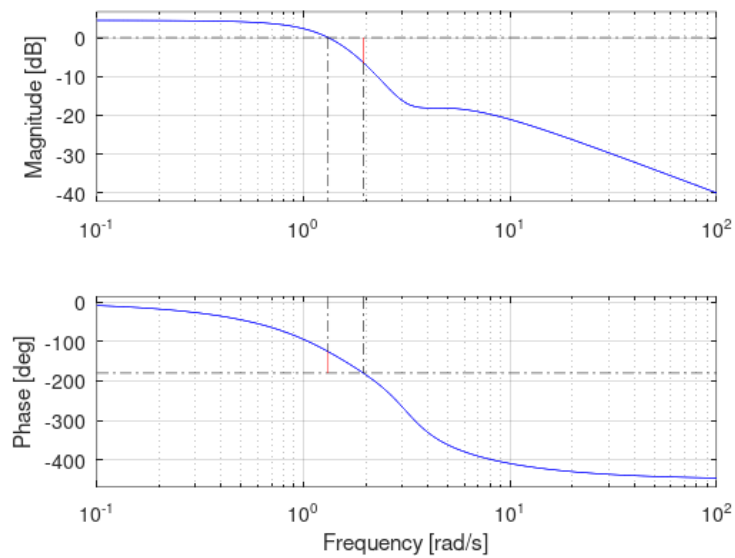
Declarando o sistema no Octave:

```
octave:1> num = [1 -2 10];  
den = [1 5 8 6];  
sys1 = tf(num,den)  
  
Transfer function 'sys1' from input 'u1' to output 'y1':  
  
      s^2 - 2 s + 10  
y1:  -----  
      s^3 + 5 s^2 + 8 s + 6  
  
Continuous-time model.
```

Utilizando os comandos bode e margin para se obter os diagramas de Bode, margem de ganho e fase:

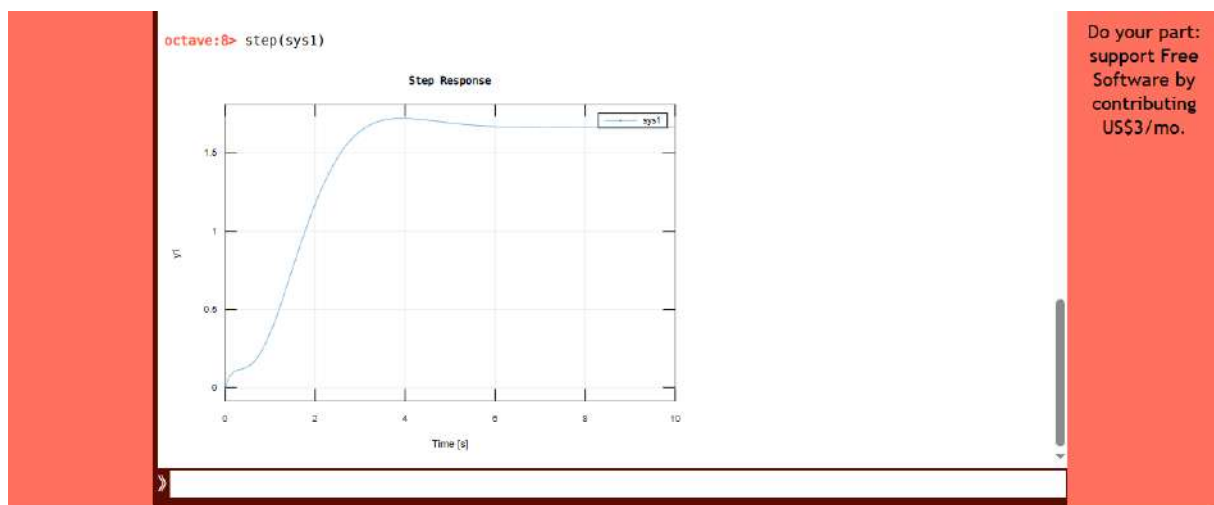


GM = 6.44033 dB (at 1.94986 rad/s), PM = 54.3633 deg (at 1.31716 rad/s)



A margem de ganho é de 6.44033 dB e a margem de fase de 54,5633°. Como a margem de ganho é positiva, o sistema é estável.

A estabilidade é comprovada com a resposta ao degrau:



Multiplicando a função de transferência do sistema pela margem de ganho e colocando o sistema em malha fechada:

```

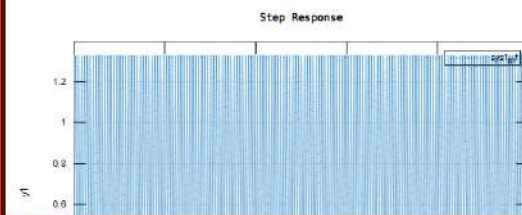
octave:9> g_mg = 10^(6.44033/20)
g_mg = 2.0990
octave:10> sys1_g = sys1*g_mg
Transfer function 'sys1_g' from input 'u1' to output ...
      2.099 s^2 - 4.198 s + 20.99
y1:  -----
      s^3 + 5 s^2 + 8 s + 6
Continuous-time model.

```

```

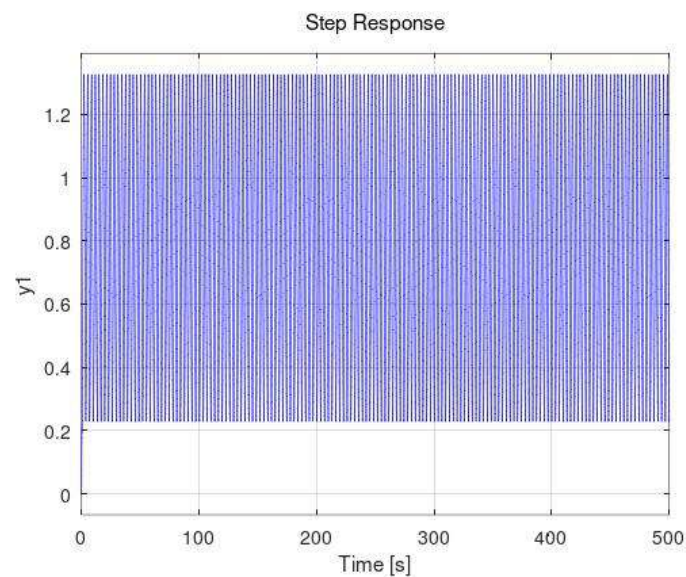
octave:11> sys1_g_mf = feedback(sys1_g,1)
Transfer function 'sys1_g_mf' from input 'u1' to output ...
      2.099 s^2 - 4.198 s + 20.99
y1:  -----
      s^3 + 7.099 s^2 + 3.802 s + 26.99
Continuous-time model.
octave:12> step(sys1_g_mf)

```



Do your part:
support Free
Software by
contributing
US\$3/mo.

A resposta ao degrau do sistema marginalmente estável é a seguinte:



Após as simulações se conclui que um aumento de ganho no sistema superior a margem de ganho torna o sistema instável.

CRITÉRIOS DE CORREÇÃO – AULA PRÁTICA 3

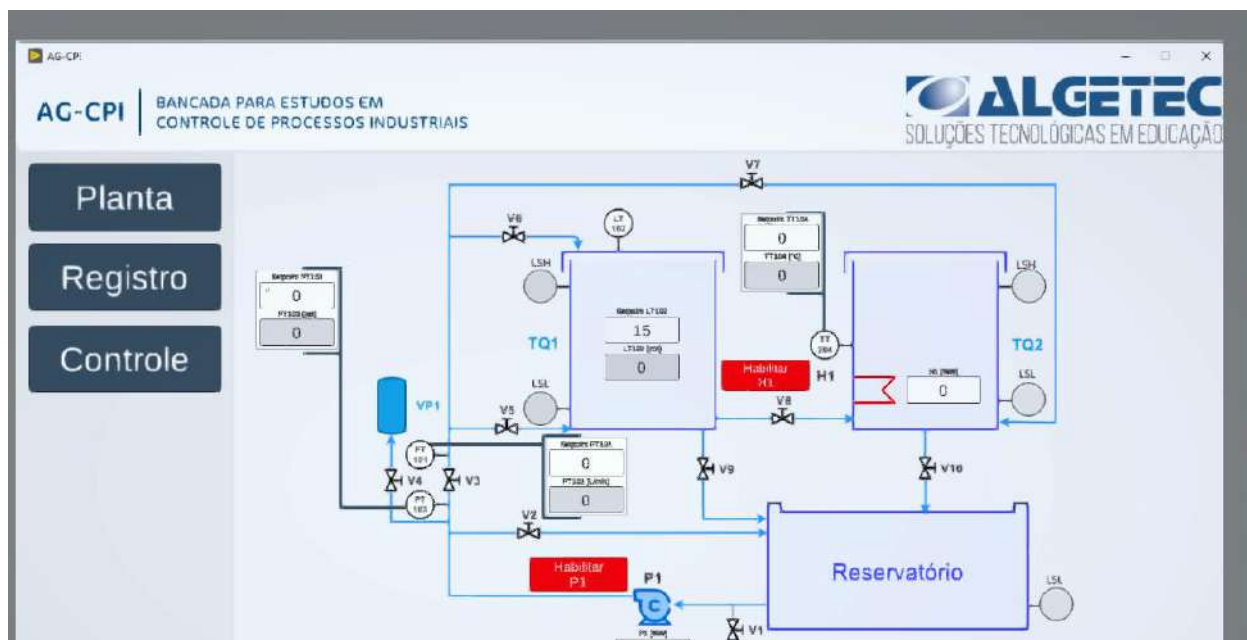
Nessa aula prática, o aluno deve realizar a sintonia de um controlador PID utilizando o método de Ziegler-Nichols. Durante o experimento, o aluno deverá ajustar os parâmetros do controlador PID para uma malha de controle de nível e observar como cada técnica impacta o desempenho do sistema, analisando aspectos como estabilidade, tempo de resposta e overshoot. Durante a prática, será necessário seguir um roteiro pré-estabelecido, envolvendo a ambientação no laboratório virtual Algetec, a manipulação de componentes simulados, e a análise dos resultados obtidos.

Descrição detalhada de cada etapa realizada durante a prática, seguindo o roteiro fornecido:

- Descrição detalhada dos passos seguidos durante a prática, incluindo as etapas de aplicação do método de Ziegler-Nichols para a sintonia do controlador PID.
- Prints das telas: inclua capturas de tela de cada etapa importante, destacando as ações realizadas e os resultados observados. Esses prints devem estar acompanhados de uma breve legenda explicativa.

A Figura 1 ilustra o print durante a inserção do setpoint para 15cm.

Figura 1 – Alteração de valor de setpoint no simulador Algetec.



Sabendo que a função de transferência da malha de nível é dada por:

$$g(t) = 28,2(1 - e^{-(t-1)/86})$$

Nesta função: $K=28$, $\tau=86$ (constante de tempo) e $\theta=1$ (atraso). De acordo com o método de Ziegler-Nichols para uma função de transferência de primeira ordem com atraso, obtém-se os parâmetros da Figura 2.

Figura 2 – Visualização do nível do tanque 1 em regime permanente.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	3,05	-	-
PI	2,75	3,3	-
PID	3,66	2,0	0,5

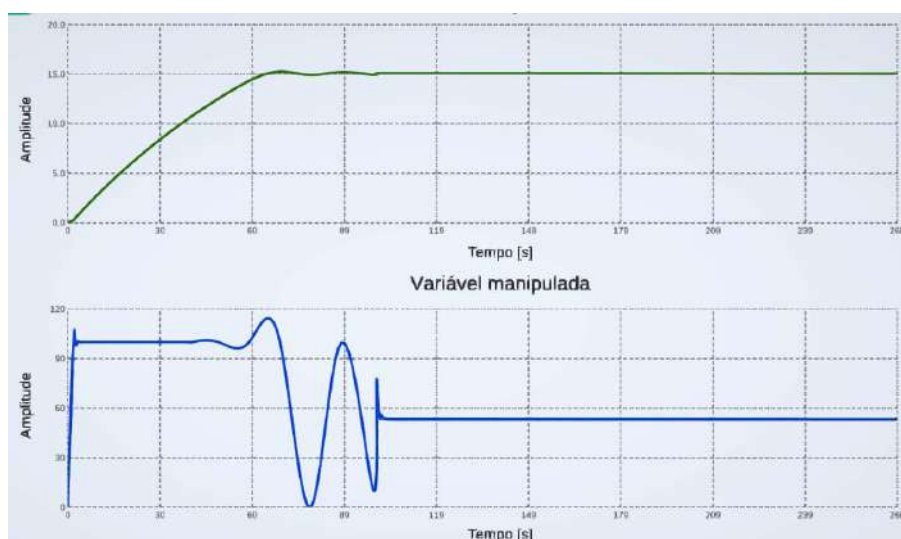
A Figura 3 ilustra o print da inserção dos parâmetros do controlador PID.

Figura 3 – Parâmetros do controlador PID no simulador Algetec.



A Figura 4 ilustra o print da resposta do controlador PID.

Figura 4 – Resposta do controlador PID no simulador Algetec.



Para essa situação, podemos observar que:

1. Quais foram o tempo de subida, sobressinal e erro de regime permanente encontrado na sintonia de PID utilizada nesta prática?

A Figura 4 apresenta dois gráficos. O gráfico superior mostra a resposta da variável controlada (amplitude) ao longo do tempo, com um aumento inicial seguido por uma estabilização próxima ao setpoint de 15 cm. O gráfico inferior mostra a variável manipulada (amplitude) ao longo do tempo, com oscilações significativas antes de estabilizar em torno de um valor constante. O tempo de subida é o tempo necessário para a variável controlada (verde) subir de 0 até o valor do setpoint (15 cm). Observando o gráfico superior, o tempo de subida é aproximadamente 89 segundos, o ponto em que a curva atinge pela primeira vez o valor próximo de 15 cm.

O sobressinal é identificado pela quantidade que a variável controlada excede o valor do setpoint antes de se estabilizar. No gráfico superior, a curva verde atinge ligeiramente acima de 15 cm antes de se estabilizar, indicando a presença de um pequeno sobressinal, embora ele seja mínimo. O erro de regime permanente é a diferença entre o valor final da variável controlada e o setpoint após a estabilização do sistema. No gráfico superior, após cerca de 143 segundos, a variável controlada se estabiliza muito próximo de 15 cm, indicando um erro de regime permanente muito pequeno, praticamente desprezível. Esses resultados indicam uma boa sintonia do controlador PID, com uma resposta relativamente rápida, controle efetivo do sobressinal, e um erro de regime permanente praticamente nulo.

2. Discorra em que implicaria as alterações dos parâmetros K_p , T_i e T_d .

As alterações nos parâmetros K_p , T_i e T_d de um controlador PID têm implicações diretas sobre o comportamento do sistema de controle. Cada parâmetro desempenha um papel específico na resposta do sistema, e mudanças neles podem afetar a estabilidade, o tempo de resposta, o sobressinal, e o erro de regime permanente. Aqui está uma análise de como as alterações em cada um desses parâmetros impactariam o desempenho do sistema:

1. Ganho Proporcional (K_p): O ganho proporcional determina a força da ação de controle em resposta ao erro instantâneo (a diferença entre o valor desejado e o valor medido). O aumento de K_p implicaria na elevação da reatividade do sistema, fazendo com que ele responda mais rapidamente às mudanças. Isso tende a reduzir o tempo de subida. No entanto, um K_p muito alto pode levar a um aumento do sobressinal e a possíveis oscilações, o que pode comprometer a estabilidade do sistema. Se K_p for excessivamente alto, o sistema pode se tornar instável, resultando em oscilações contínuas ou até mesmo em comportamento divergente. A diminuição de K_p reduziria a reatividade do sistema, o que pode aumentar o tempo de subida e o tempo de estabilização. Um K_p muito baixo pode resultar em um sistema lento, com um erro de regime permanente maior, pois a força da correção será insuficiente para eliminar completamente o erro.

2. Tempo Integrativo (T_i): o tempo integrativo é responsável por eliminar o erro de regime permanente ao longo do tempo, somando o erro ao longo do tempo e aplicando uma correção proporcional ao

valor acumulado. O aumento de T_i reduziria o efeito da integral, o que pode resultar em um sistema mais estável, mas com maior erro de regime permanente. O tempo para corrigir o erro de regime permanente aumenta, e a resposta do sistema se torna mais lenta. Já a redução de T_i provocaria o aumento o efeito da integral, acelerando a correção do erro de regime permanente. Contudo, uma diminuição muito grande pode introduzir um sobressinal significativo e oscilações, especialmente em sistemas com dinâmica lenta.

3. Tempo Derivativo (T_d): o tempo derivativo antecipa as futuras tendências de erro ao considerar a taxa de variação do erro. Ele ajuda a suavizar a resposta do sistema, reduzindo o sobressinal e melhorando a estabilidade. O aumento de T_d pode melhorar a resposta do sistema a transientes, reduzindo o sobressinal e amortecendo as oscilações. Um T_d muito alto pode fazer o sistema se tornar excessivamente sensível a ruídos, resultando em uma ação de controle instável e errática. A diminuição de T_d reduziria a influência da derivada, o que pode resultar em uma resposta mais rápida, mas com maior sobressinal e potencialmente mais oscilações. Se T_d for muito pequeno, o sistema pode se comportar de maneira semelhante a um controlador PI, perdendo a capacidade de prever e corrigir rapidamente mudanças na tendência do erro.

Como conclusão, deve ser apresentado um resumo dos principais aprendizados da prática, os comentários sobre a importância do controle de sistemas e os principais aprendizados adquiridos durante a prática. Deve realizar uma breve reflexão sobre a importância da correta sintonia de controladores PID em sistemas industriais.

CRITÉRIOS DE CORREÇÃO – AULA PRÁTICA 4

Nessa aula prática, o aluno deve realizar a sintonia de um controlador P, um controlador PI e um controlador PID utilizando o primeiro método de Ziegler-Nichols. Durante o experimento, o aluno deverá ajustar os parâmetros do controlador PID para uma malha de controle de nível e observar como cada técnica impacta o desempenho do sistema, analisando aspectos como estabilidade, tempo de resposta e overshoot.

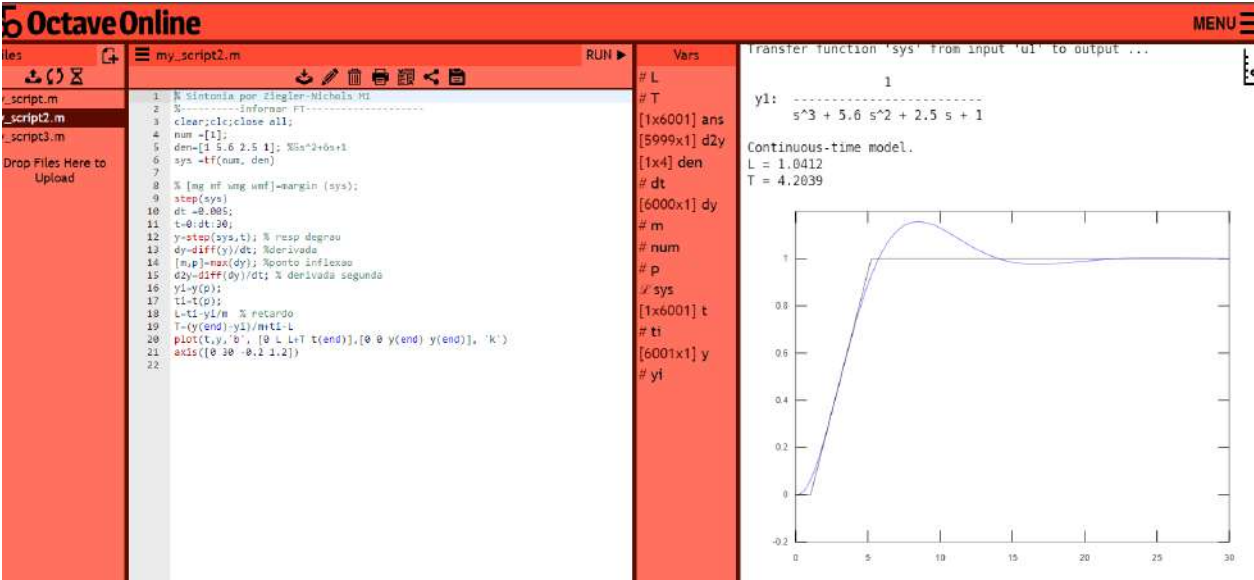
Descrição detalhada de cada etapa realizada durante a prática, seguindo o roteiro fornecido:

- Descrição detalhada dos passos seguidos durante a prática, incluindo as etapas de aplicação do método de Ziegler-Nichols para a sintonia do controlador PID.
- Prints das telas: inclua capturas de tela de cada etapa importante, destacando as ações realizadas e os resultados observados. Esses prints devem estar acompanhados de uma breve legenda explicativa.

A Figura 1 ilustra o print para estimar o valor do atraso L e a constante de tempo do sistema T . O código implementa uma análise da resposta ao degrau de uma função de transferência, com o

objetivo de calcular parâmetros críticos como o tempo de atraso (L) e a constante de tempo (T) para a sintonia de controladores utilizando o primeiro método de Ziegler-Nichols. Inicialmente, o código define a função de transferência utilizando os vetores 'num' e 'den', que representam os coeficientes do numerador e do denominador, respectivamente. A função de transferência é então criada no domínio contínuo usando o comando 'sys = tf(num, den)'. A seguir, o código calcula a resposta ao degrau do sistema usando a função 'step(sys)'. O intervalo de tempo ('dt') entre cada ponto da simulação é definido, e um vetor de tempo ('t') é criado para a simulação. Para identificar os parâmetros críticos, o código calcula a primeira ('dy') e a segunda derivada ('d2y') da resposta ao degrau, sendo o ponto de inflexão determinado pela derivada máxima da resposta. Com o ponto de inflexão identificado, o código calcula o tempo de atraso (L) e a constante de tempo (T) usando as equações do método de Ziegler-Nichols. Esses parâmetros são fundamentais para a posterior sintonia de controladores P, PI e PID.

Figura 1 – Etapa para o cálculo de L e T.



Após obter o valor de L e T, utiliza-se a Tabela 1 para o cálculo dos parâmetros do controlador.

Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols pelo primeiro método.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L} = 4.0374$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L} = 3.6337$	$\frac{L}{0,3} = 3.4707$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L} = 4.8449$	$2L = 2.0824$	$0,5L = 0.5206$

Para controlador P: Ganho $K_p=4.0374$;

Para controlador PI: Ganho $K_p=3.6337$ e $K_i=K_p/T_i=1.0470$;

Para controlador PID: Ganho $K_p=4.8449$, $K_i=K_p/T_i=2.3266$ e $K_d=K_p \cdot T_d=2.5223$.

O script final utilizado está descrito a seguir:

```
clear;clc;close all;
num =[1];
den=[1 5.6 2.5 1]; %5s^2+6s+1
sys =tf(num, den)
dt =0.005;
t=0:dt:60; %vetor tempo
y=step(sys,t); % resp degrau

% Controlador P
Kp=4.0374;
Ki=0;
Kd=0;
G1=pid(Kp,Ki,Kd)
H=[1];
M1=feedback(sys*G1,H)
y1=step(M1,t);

% Controlador PI
Kp=3.6337 ;
Ki=1.0470;
Kd=0;
G2=pid(Kp,Ki,Kd)
H=[1];
M2=feedback(sys*G2,H)
y2=step(M2,t);

% Controlador PID
Kp=4.8449;
Ki=2.3266 ;
Kd=2.5223;
G3=pid(Kp,Ki,Kd)
H=[1];
M3=feedback(sys*G3,H)
y3=step(M3,t);
```

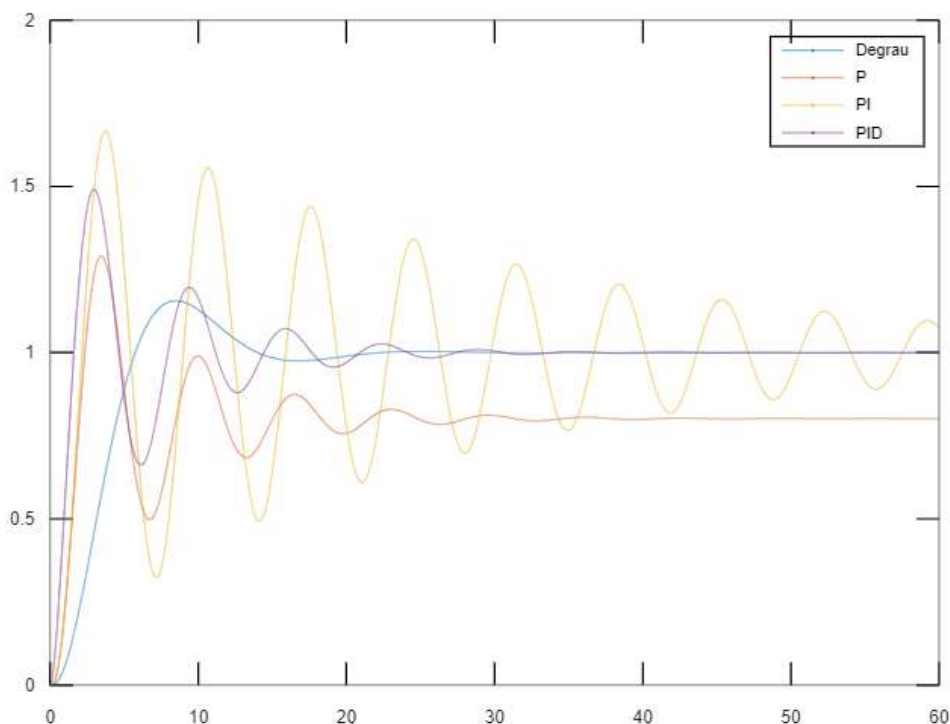
```

%Plotagem
figure(1)
plot(t,y) %Resp. degrau
hold on;
plot(t,y1) %Controlador P
hold on;
plot(t,y2) %Controlador PI
hold on;
plot(t,y3) %Controlador PID
legend('Degrau','P','PI','PID')

```

A resposta gráfica obtida pode ser observada na Figura 2. A figura mostra a resposta ao degrau de um sistema controlado por diferentes tipos de controladores: P (Proporcional), PI (Proporcional-Integral), e PID (Proporcional-Integral-Derivativo). A linha azul representa a resposta ao degrau sem controle, ou seja, a resposta natural do sistema.

Figura 2 – Resposta ao degrau e dos controladores P, PI e PID.

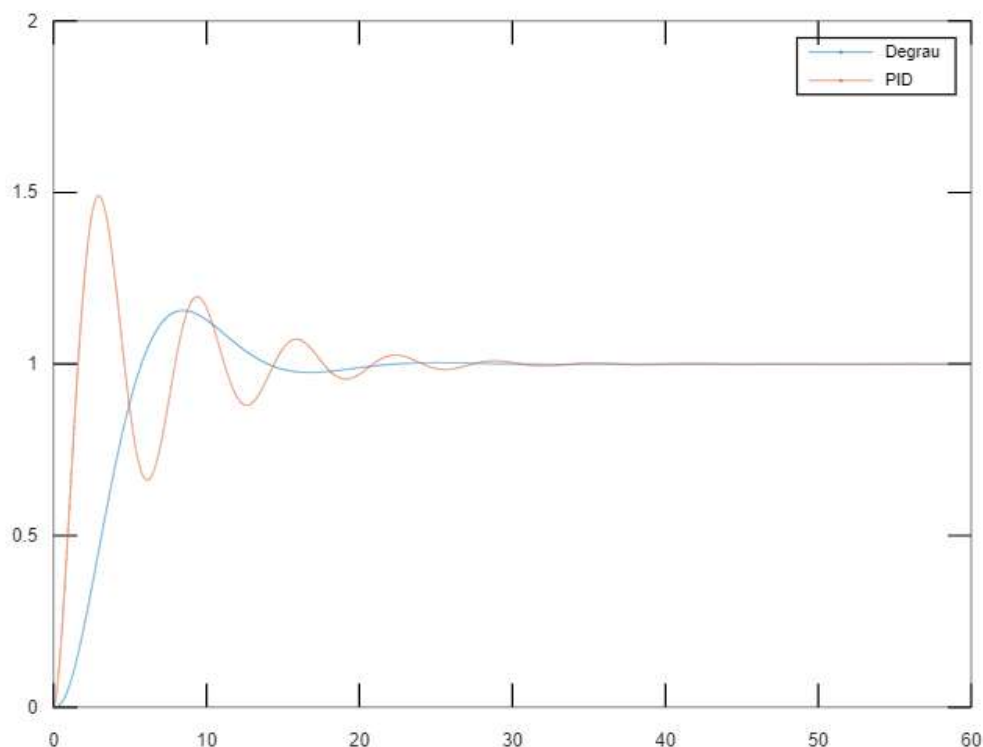


A resposta natural do sistema, sem controle adicional, estabiliza em torno de 1, mas apresenta um certo tempo de estabilização e não possui oscilação. O controlador P (Linha Laranja) introduz uma oscilação significativa no sistema. Essa oscilação é característica de um controlador P, que reage fortemente ao erro instantâneo, mas pode causar overshoot e oscilações antes de estabilizar. O controlador PI (Linha Amarela) também apresenta oscilação, mas com amplitude ligeiramente maior

que a do controlador P. O controlador PI adiciona a componente integral, o que pode ajudar a eliminar o erro em regime permanente, mas tende a aumentar a oscilação do sistema.

O controlador PID (Linha Roxa) combina as ações P, I e D, e geralmente deve produzir uma resposta com menos overshoot e uma estabilização mais rápida. No gráfico, o controlador PID apresenta oscilações, mas com menor amplitude em comparação com o PI, o que indica uma tentativa de suavizar a resposta, ainda que não elimine completamente as oscilações. A Figura 3 ilustra a resposta do controlador PID.

Figura 3 – Resposta ao degrau e do controlador PID.



Após essas etapas, responda:

1. Quais foram o tempo de subida, sobressinal e erro de regime permanente encontrado em cada sintonia de controladores utilizada nesta prática?

Controlador P:

- Tempo de subida: ocorre por volta de 5 a 10 segundos, onde a resposta inicialmente ultrapassa o valor de referência (1).
- Sobressinal: há um sobressinal significativo, cerca de 50% ou mais, devido à oscilação inicial que ultrapassa o valor de referência.
- Erro de regime permanente: o sistema se estabiliza abaixo de 1, indicando erro de regime permanente.

Controlador PI:

- Tempo de subida: um pouco mais lento do que o controlador P, entre 10 e 15 segundos.

- Sobressinal: o maior sobressinal entre os controladores, chegando a mais de 50%, com oscilações prolongadas.
- Erro de regime permanente: o erro de regime permanente é pequeno ou inexistente, pois o controlador PI visa eliminar o erro em regime permanente.

Controlador PID:

- Tempo de subida: rápido, similar ao do controlador P, por volta de 5 a 10 segundos.
- Sobressinal: menor do que no PI, provavelmente em torno de 30-40%, com oscilações mais amortecidas.
- Erro de regime permanente: o erro de regime permanente é mínimo ou inexistente, indicando uma boa performance em termos de precisão.

2. Discorra como poderíamos reduzir o sobressinal do controlador PID.

Reduzir o sobressinal de um controlador PID é um objetivo comum em projetos de controle, especialmente quando é importante evitar grandes oscilações ao redor do valor de referência. Existem várias técnicas que podem ser empregadas para minimizar o sobressinal em um sistema controlado por PID:

- Reduzir o ganho proporcional (K_p): o ganho proporcional é responsável pela reação imediata ao erro. Um valor muito alto de K_p pode causar um sobressinal significativo, pois o controlador reage de forma muito agressiva às mudanças no erro. Reduzindo K_p , o sistema tende a reagir de forma mais suave, o que pode reduzir o sobressinal, embora o tempo de subida possa aumentar.
- Aumentar o ganho derivativo (K_d): o termo derivativo ajuda a prever a tendência de mudança no erro e age para amortecer as oscilações. Aumentar K_d pode ajudar a reduzir o sobressinal ao introduzir uma resistência maior contra mudanças rápidas no erro. No entanto, valores muito altos de K_d podem introduzir ruídos no sistema.
- Ajustar o ganho integral (K_i): o termo integral é responsável por eliminar o erro em regime permanente, mas pode contribuir para o aumento do sobressinal se for muito agressivo. Reduzir K_i pode ajudar a minimizar o sobressinal, embora isso possa comprometer a eliminação completa do erro em regime permanente.

Como conclusão, deve ser apresentado um resumo dos principais aprendizados da prática, os comentários sobre a importância do controle de sistemas e os principais aprendizados adquiridos durante a prática. Deve realizar uma breve reflexão sobre a importância da correta sintonia de controladores PID em sistemas industriais.

CRITÉRIOS	PESO
Organização da Atividade ✓ Atendimento a todas as ações solicitadas na atividade. ✓ Apresentação visual. ✓ Clareza na apresentação visual e estrutural.	10%
Execução da Proposta ✓ Realização precisa e adequada das técnicas e métodos requeridos para a atividade prática. ✓ Aderência aos procedimentos e diretrizes especificados no roteiro.	15%
Linguagem e Comunicação ✓ Clareza na comunicação das ideias e justificativas para as escolhas feitas durante a execução da proposta (quando se aplicar). ✓ Emprego adequado de terminologia técnica. ✓ Norma padrão, ortografia, aspectos redacionais, coesão e coerência.	10%
Atendimento à proposta da Atividade Prática ✓ Cumprimento do objetivo solicitado na proposta. ✓ Inovação e criatividade na abordagem prática. ✓ Presença de introdução, desenvolvimento e considerações finais, conforme indicado em todas as propostas (quando se aplicar).	40%
Resolução e Nitidez da Imagem ✓ Qualidade técnica das imagens apresentadas, com atenção à resolução e nitidez. ✓ Atendimento às normas da ABNT para apresentação de imagens.	10%
Referência e documentação ✓ Presença de citações de autores e obras no decorrer do trabalho (quando se aplicar). ✓ Presença de lista de referências bibliográficas completa (quando se aplicar). ✓ Inclusão de referências adequadas para técnicas utilizadas, citações relevantes na área de prática e documentação visual detalhada (fotografias, esboços, etc.), quando for o caso.	15%
TOTAL	100%

CRITÉRIOS DE CORREÇÃO

Prezado(a) tutor(a),

Você deve consultar a pontuação do semestre e do curso para calcular os pontos em relação à porcentagem de cada item. Lembre-se de que você deverá esclarecer as dúvidas dos alunos, após a correção realizada, se necessário. A Atividade Prática é um trabalho original e, portanto, não poderá haver trabalhos idênticos aos de outros alunos ou com reprodução de materiais extraídos da internet. Os trabalhos plagiados serão invalidados, sendo os alunos reprovados na atividade. A prática do plágio constitui crime, com pena prevista em lei (Lei n.º 9.610), e deve ser evitada no âmbito acadêmico.

Um excelente trabalho!
Equipe de Professores