

<i>Inatel</i>	Projeto #1	Turma: C213 L1/L2	Data: 15/04/25
	C213 – Sistemas Embarcados		
Docente: Samuel Baraldi Mafra		PED: Igor Gonçalves de Souza	
Objetivo: Apresentar a proposta para o primeiro Projeto Prático da disciplina.			
Integrante 1:		Matrícula:	
Integrante 2:		Matrícula:	

Projeto Prático de Sistemas Embarcados
Identificação de Processos e Sintonia de Controladores PID
Sistema de Controle Distribuído para Branqueamento Térmico de Glicerina

1 Controle de Processos Industriais - contextos e importância

Um processo industrial é caracterizado por uma série de operações com o objetivo de fabricar algum bem ou material, com segurança aplicada ao monitoramento e controle das variáveis do processo. O controle de processos é uma disciplina fundamental na engenharia, com aplicações desde a indústria química até sistemas de transporte e automação predial. A capacidade de monitorar e ajustar variáveis de um sistema garante eficiência operacional e otimização de resultados.

A modelagem destes processos define representações matemáticas e permite uma compreensão mais profunda do seu comportamento, facilitando análise de suas dinâmicas. Modelos precisos são essenciais para a simulação e projeto de controladores, garantindo a possibilidade de diferentes estratégias de controle antes de implementá-las na prática.

2 Modelagem Matemática de Processos

O modelo matemático de um processo é uma Função de Transferência $H(s)$ no domínio de Laplace que relaciona os sinais de saída $V_o(s)$ ou $PV(s)$ e de entrada $V_i(s)$ ou $SP(s)$ e descreve características do sistema prevendo parâmetros como estabilidade e erro.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{PV(s)}{SP(s)}$$

A resposta de um processo a um determinado estímulo de entrada pode ser dividida em **resposta transitória** - estado inicial, na qual o sinal varia rapidamente no tempo e tende à um estado final chamado de **resposta estacionária** ou **permanente**, regime no qual o comportamento da saída varia pouco com o tempo. A amplitude em regime permanente - Valor Final ou VF, é calculada pelo Teorema do Valor Final como em 1, utilizando a referência de entrada e a Função de Transferência do Sistema.

$$VF = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot SP(s) \cdot H(s) \quad (1)$$

Nos instantes iniciais de resposta, a curva apresenta variações mais rápidas que tendem a amortecer no tempo. O **Tempo de Subida - t_r** , infere o intervalo necessário para que a amplitude varie de 10% a 90% do Valor Final, enquanto o **Tempo de Acomodação - t_s** , é o intervalo para o regime estacionário.

3 Resposta Típica de Sistemas de Primeira Ordem

Circuitos RC, sistemas térmicos, hidráulicos ou semelhantes representam um Sistema de Primeira Ordem, com Função de Transferência na forma canônica dada pela Equação 2, em que k é o **Ganho Estático** em malha aberta e τ , a **Constante de Tempo**.

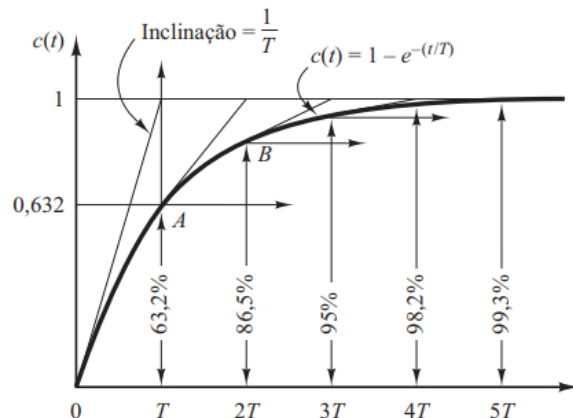
$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{PV(s)}{SP(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \quad (2)$$

A classe `tf` do MATLAB e o método `control.tf()` do Python modelam uma Função de Transferência:

```
>> sys = tf(k, [tau 1]) ou  
sys = control.tf(k, [tau, 1])
```

O Gráfico da Figura 1 apresenta o comportamento típico de um Sistema de Primeira Ordem para uma entrada Degrau. Após uma constante de tempo, em $T = \tau$, a resposta do sistema varia de 0 a 63.21% do Valor Final. Após duas constantes de tempo, em $T = 2\tau$, atinge 86.47%. Segundo o **Critério dos 2%**, um Sistema de Controle atinge o regime permanente em 98% do seu Valor Final. Assim, para Sistemas de Primeira Ordem, $t_s \cong 4\tau$.

Figura 1: Resposta Típica de Sistemas de Primeira Ordem para uma entrada Degrau.



4 Resposta Típica de Sistemas de Segunda Ordem

Circuitos RLC e a grande maioria dos Algoritmos de Controle representam um Sistema de Segunda Ordem, com Função de Transferência na forma canônica dada pela Equação 3, em que ω_n é a **Frequência de Oscilação** e ξ , o **Fator de Amortecimento**.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{PV(s)}{SP(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (3)$$

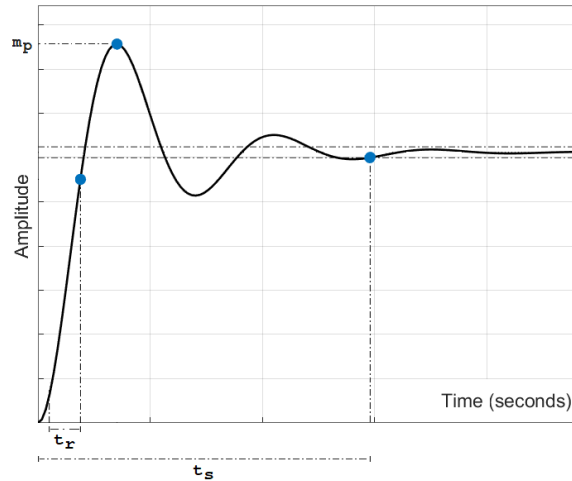
A classe `tf` do MATLAB e o método `control.tf()` do Python modelam uma Função de Transferência:

```
>> sys = tf(wn^2, [1 2*xi*wn wn^2]) ou  
sys = control.tf(wn**2, [1, 2*xi*wn, wn**2])
```

O Gráfico da Figura 2 apresenta o comportamento típico de um Sistema de Segunda Ordem para uma entrada do tipo Degrau. Como característica, a curva de resposta apresenta oscilações em torno do Valor Final, com amplitudes reduzidas no tempo em razão do

amortecimento do sistema. As oscilações são caracterizadas por uma Amplitude de Pico - a maior amplitude da curva de resposta, definida como **Máximo Pico** ou m_p . Essa amplitude representa uma porcentagem do Valor Final da resposta por um fator de *overshoot*.

Figura 2: Resposta Típica de Sistemas de Segunda Ordem para uma entrada Degrau.



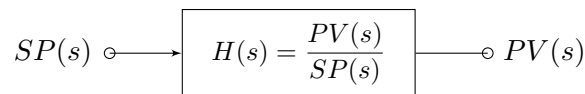
5 Malhas de Controle

As malhas de operação para sistemas de controle referem-se à maneira como os sinais são interpretados e regulados pelo processo. Existem diferentes tipos de malhas utilizadas, a depender de parâmetros como estabilidade, precisão e velocidade de resposta.

5.1 Malha Aberta

O esquema da Figura 3 opera em Malha Aberta, modelo no qual o sinal de saída não exerce ação de controle, ou seja, a amplitude da saída não é medida nem comparada com a entrada. A referência para o sistema é o próprio $SP(s)$.

Figura 3: Sistema de Controle com operação em Malha Aberta.



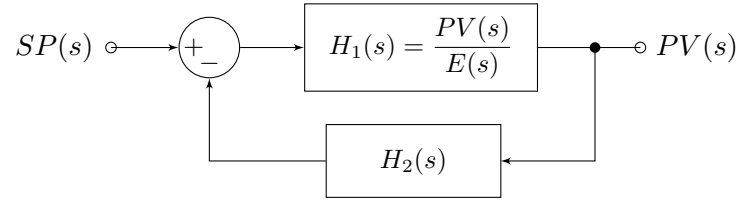
5.2 Malha Fechada

Um Sistema de Controle em Malha Fechada estabelece uma relação de comparação entre as amplitudes de saída e entrada, utilizando essa comparação como meio de controle. O esquema da Figura 4 opera com sistema em Malha Fechada, em que $H_1(s)$ é a **Malha de Controle** e $H_2(s)$, a de **Realimentação**.

Neste caso, a referência para o sistema é o erro do processo, com $E(s) = SP(s) \pm PV(s)$, a depender do ganho de realimentação. A Função de Transferência equivalente em 4 relaciona os sinais de entrada e saída em Malha Fechada, em que o sinal do denominador é oposto à realimentação de $PV(s)$.

$$H(s) = \frac{PV(s)}{SP(s)} = \frac{H_1(s)}{1 \mp H_1(s) \cdot H_2(s)} \quad (4)$$

Figura 4: Sistema de Controle com operação em Malha Fechada.



A função `feedback()` do MATLAB e o método `control.feedback()` do Python modelam o sistema com operação em malha fechada, com funções de transferência das malhas de controle e realimentação. Os exemplos a seguir consideram realimentação padrão.

```
>> sys_fechada = feedback(sys, 1) ou  
sys_fechada = control.feedback(sys)
```

6 Atraso de Transporte

O Atraso de Transporte, ou tempo morto, corresponde a um tempo θ em que o sistema demora para responder ao estímulo de entrada. Em sistemas dinâmicos, o Atraso de Transporte pode afetar o processo com possíveis instabilidades ou dificuldades na sintonia do controlador, principalmente para operação em malha fechada.

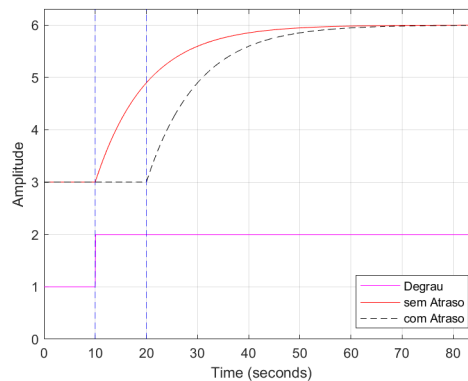
Esse atraso pode ser encontrado em sistemas térmicos, hidráulicos e pneumáticos causado por fatores como inércia ou a distância física entre a origem e o ponto de controle, por exemplo, no tempo para transportar fluido em uma tubulação. Com o desenvolvimento de sistemas de controle via redes, sensores e controladores passam a se conectar remotamente seguindo protocolos de comunicação sujeitos a atrasos de processamento e propagação de sinais.

Um Sistema de Primeira Ordem com Atraso de Transporte (FOPDT - *First Order Plus Dead Time*) tem como modelo a Função de Transferência em 5, em que a parcela irracional $e^{-\theta s}$ representa o atraso aplicado à um sistema puro de tempo. Notoriamente, o Atraso de Transporte existe independente da ordem do sistema.

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{PV(s)}{SP(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \cdot e^{-\theta s} \quad (5)$$

A Figura 5 compara sistemas com atraso para $\theta = 10$. O Atraso desloca a curva de resposta no tempo, sem modificação nas amplitudes. Para qualquer instante, $t_0 = t + \theta$.

Figura 5: Apresentação de Sistemas FOPDT com $\theta = 10$.



No MATLAB, a propriedade `'InputDelay'` da classe `tf` define Sistemas com Atraso de Transporte. Essa propriedade não existe no pacote `control` do Python, sendo necessária uma aproximação para modelos com atraso.

```
>> sys = tf(k, [tau 1], 'InputDelay', theta)
```

6.1 Aproximação de Padé

A aproximação de Padé é uma técnica matemática utilizada para aproximar funções irracionais por meio de frações racionais, ou seja, pela razão de dois polinômios num e den como em 6 resultantes de uma aproximação $Q_N(s)$ dada por 7.

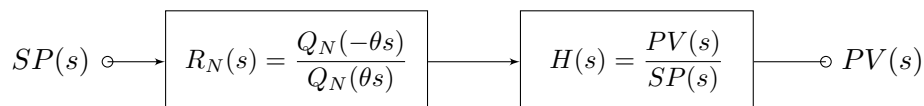
$$R_N(s) = \frac{\text{num}}{\text{den}} = \frac{Q_N(-F(s))}{Q_N(F(s))} \quad (6)$$

Seja $R_N(s)$ a aproximação racional por Padé da irracional $F(s)$. A aproximação $R_N(s)$ garante a igualdade das funções em torno do ponto $s = 0$ ($t \rightarrow \infty$) para o valor inicial e para as derivadas de N primeiras ordens, em que N é a ordem de $R_N(s)$ e $Q_N(s)$ e o grau dos polinômios num e den.

$$Q_N(F(s)) = \sum_{j=0}^N \frac{(N+j)!}{j!(N-j)!} \cdot F(s)^{N-j} \quad (7)$$

A função `pade(T, N)` do MATLAB e o método `control.pade(T, N)` do Python realizam a aproximação de Padé de N -ésima ordem para um atraso $T = \theta$, retornando os polinômios num e den. Como resultante, a malha de controle do modelo *FOPDT* é um sistema puro em série com a aproximação racional da parcela $e^{-\theta s}$, demonstrado em 6. A função `series(sys1, sys2)` do MATLAB e o método `control.series(sys1, sys2)` do Python estabelecem a conexão série entre as Funções de Transferência.

Figura 6: Modelo resultante do Sistema com Aproximação de Padé.

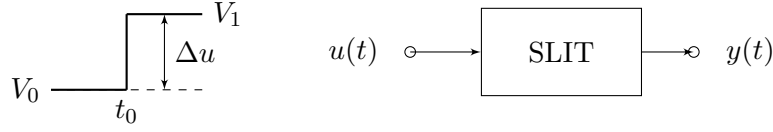


```
>> [num, den] = pade(theta, N)
>> sys = series(tf(k, [tau 1]), tf(num, den)) ou
sys = ctrl.series(
    ctrl.tf(k, [tau, 1]),           # Sistema Puro.
    ctrl.tf(*ctrl.pade(theta, N))) # Aproximação de Padé.
```

7 Ensaio da Curva de Reação e Métodos de Identificação de Processos

O Ensaio da Curva de Reação é um experimento para caracterizar a dinâmica de um processo pela resposta em malha aberta a mudança de um sinal de referência, normalmente do tipo Degrau. O procedimento consiste em amostrar amplitudes da saída do sistema ao longo do tempo e analisar a curva resultante por métodos de identificação, como Smith e Sundaresan, a fim de descrever características e levantar a Função de Transferência do modelo.

Figura 7: Modelo de Sistema para Ensaio da Curva de Reação.



7.1 Identificação de Sistemas

Identificação é o processo de modelagem matemática descrito na Seção 2 que caracteriza o comportamento de sistemas dinâmicos a partir de dados experimentais pelo Ensaio da Curva de Reação. As etapas visam ajustar um modelo, validar sua precisão e representar o sistema de forma que facilite o controle e análises de estabilidade.

Os métodos de Smith e Sundaresan são técnicas de Identificação de Sistemas que ajustam modelos FOPDT a partir das amostras, estimando os parâmetros k , τ e θ a partir da resposta a um Degrau de amplitude Δu .

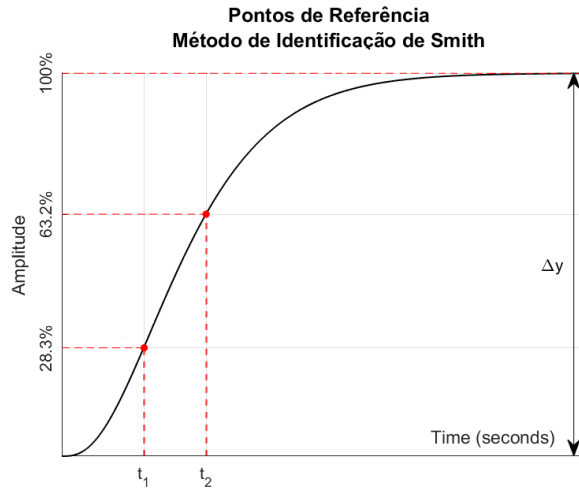
$$H(s) = \frac{PV(s)}{SP(s)} = \frac{k}{\tau s + 1} \cdot e^{-\theta s}, \text{ com } k = \frac{\Delta y}{\Delta u} \text{ e } \Delta u = V_1 - V_0$$

7.1.1 Método de Identificação de Smith

A partir da curva de resposta ao Degrau, o método de Smith - proposto por Cecil L. Smith em 1972, traça uma linha tangente na inflexão da curva entre as amostras de amplitude 28.3% e 63.2% do Valor Final [1]. As referências de tempo para essas amplitudes são utilizadas para determinar os parâmetros do sistema de primeira ordem, proporcionando uma aproximação adequada para sistemas com atraso de mais baixa ordem.

$$\tau = 1.5 \cdot (t_2 - t_1) \quad \theta = t_2 - \tau$$

Figura 8: Proposta para o Método de Identificação de Smith [1].



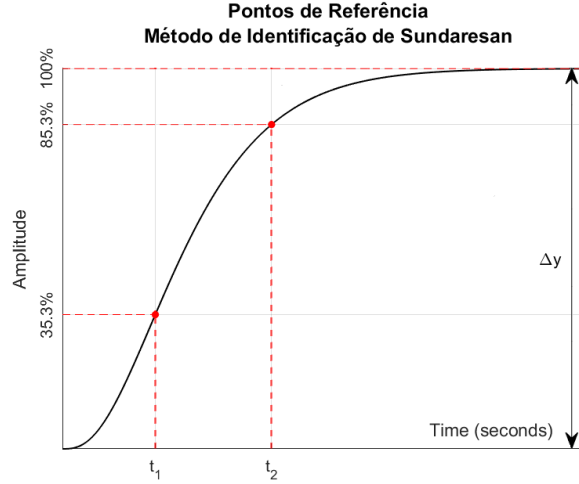
7.1.2 Método de Identificação de Sundaresan

O método de Sundaresan - proposto por K. R. Sundaresan & P. R. Krishnaswamy em 1978, oferece uma forma de identificar os parâmetros do sistema sem depender de tangen-

tes, considerando as amostras de amplitude 35.3% e 85.3% de sua resposta final [2]. Essa não dependência caracteriza o modelo de Sundaresan como mais adequado para amostras com maior presença de ruído. As referências de tempo para essas amplitudes são utilizadas para caracterizar o sistema de primeira ordem, proporcionando uma aproximação para sistemas com atraso.

$$\tau = \frac{2}{3} \cdot (t_2 - t_1) \quad \theta = 1.3t_1 - 0.29t_2$$

Figura 9: Proposta para o Método de Identificação de Sundaresan [2].



7.2 Métricas de Avaliação de Identificação

Sejam $y(t)$ e $\hat{y}(t)$ as n amostras de saída dos processos experimental e identificado, respectivamente. O Erro Quadrático Médio (EQM ou RMSE, do inglês *Root Mean Square Error*) é uma métrica de avaliação de erro do processo de identificação que considera a diferença quadrática entre as amostras, afim de evitar que erros opostos e de mesma magnitude se anulem e enfatizar erros de maior magnitude. O método que melhor se ajusta ao processo experimental possui o menor EQM, indicando que os pontos identificados têm melhor aproximação aos dados amostrados.

$$EQM = RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\hat{y}_i(t) - y_i(t)]^2}{n}}$$

8 Controladores PID - proposta e sintonia

O Algoritmo de Controle PID é uma das abordagens mais comuns na área de controle, combinando três ações principais para regular a saída de um sistema em relação a uma referência desejada: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativa (D).

A parametrização se dá pelo modelo do Ensaio da Curva de Reação, com Função de Transferência modelada por 5, em que a razão θ/τ entre o Atraso de Transporte e a Constante de Tempo é conhecida como **Fator de Incontrolabilidade**. Quanto maior esse fator, mais difícil se torna controlar o processo.

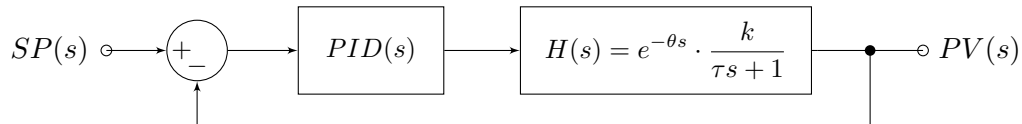
A sintonia de um Controlador PID é a etapa de cálculo dos parâmetros da Função de Transferência do Controlador em 8: **Ganho Proporcional** K_p , **Tempo de Integral** T_i e

Tempo de Derivada T_d . Os métodos de sintonia são definidos por um critério de desempenho desejado para a malha, como um menor *overshoot* ou menor tempo de subida.

$$PID(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) = \frac{K_p T_d \cdot s^2 + K_p \cdot s + K_p/T_i}{s} \quad (8)$$

O Controlador PID opera na Malha de Controle do Sistema em Malha Fechada, alterando a ação de controle gerada pelo erro atuante no sistema.

Figura 10: Sistema com Controle PID.



8.1 Método de Ziegler Nichols Malha Aberta - Curva de Reação

O Método Ziegler Nichols Malha Aberta é definido a partir das características do Ensaio da Curva de Reação. O Sistema em Malha Fechada apresenta uma taxa de decaimento de pelo menos $1/4$. As regras de sintonia são como na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros do PID para a Sintonia por ZN Curva de Reação [3].

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{1.2\tau}{k \cdot \theta}$	2θ	$\frac{\theta}{2}$

8.2 Método do Modelo Interno - IMC

Neste método, o Controlador possui um Modelo Interno que utiliza a Função de Transferência do processo para determinar o ajuste dos parâmetros do PID, propondo a sintonia por um parâmetro ajustável λ , o qual determina a velocidade da resposta do sistema. Valores menores de λ deixam o sistema mais rápido, porém mais sensível às perturbações, com $t_s = 4\lambda$. As regras de sintonia são como na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros do PID para Sintonia pelo Método do Modelo Interno [4].

Controlador	K_p	T_i	T_d	Critério Desempenho
PID	$\frac{2\tau + \theta}{k \cdot (2\lambda + \theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau \cdot \theta}{2\tau + \theta}$	$\frac{\lambda}{\theta} > 0.8$

8.3 Método CHR

O Método CHR estabelece dois critérios de desempenho para o sistema considerando o problema servo (mudança de valor do *Setpoint*): resposta mais rápida sem *overshoot* ou resposta mais rápida com 20% de *overshoot*. As regras de sintonia são como nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3: Parâmetros do PID para a Sintonia sem sobrevalor [5].

Controle	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{0.6\tau}{k \cdot \theta}$	τ	$\frac{\theta}{2}$

Tabela 4: Parâmetros do PID para a Sintonia com 20% de sobrevalor [5].

Controle	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{0.95\tau}{k \cdot \theta}$	1.357τ	0.473θ

8.4 Método Cohen e Coon

O Método de Cohen e Coon foi proposto para Sintonia de Sistemas com Atraso de Transporte mais elevados, quando o processo possui Fator de Incontrolabilidade maior que 0.3. Assim como o Método de Ziegler Nichols, o modelo é resultado do Ensaio da Curva de Reação. As regras de sintonia são como na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros do PID para a Sintonia pelo Método de Cohen e Coon [6].

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{\tau}{k \cdot \theta} \left(\frac{16\tau + 3\theta}{12\tau} \right)$	$\theta \cdot \frac{32 + 6\theta/\tau}{13 + 8\theta/\tau}$	$\frac{4\theta}{11 + 2\theta/\tau}$

8.5 Método ITAE

O ITAE é um Índice de Desempenho baseado na minimização do erro, resultado da Integral da Multiplicação do Erro Absoluto pelo Tempo (*ITAE – Integral of Time multiplied by Absolute Error*). Um Sistema com Controle ITAE reduz grandes erros iniciais, assim como erros posteriores ocorridos na resposta transitória, tornando as oscilações bem amortecidas e reduzindo consideravelmente o *overshoot*.

As regras para Sintonia ITAE apresentadas na Tabela 6 são regidas por seis constantes, com $A = 0.965$, $B = -0.85$, $C = 0.796$, $D = -0.147$, $E = 0.308$ e $F = 0.929$.

Tabela 6: Parâmetros do PID para a Sintonia ITAE [7].

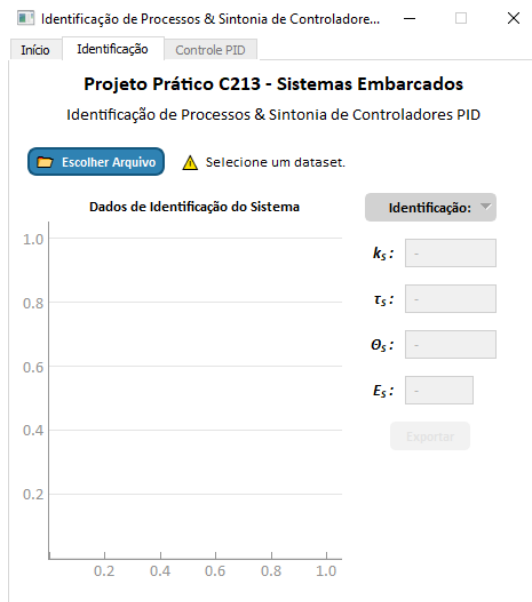
Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{A}{k} \cdot \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^B$	$\frac{\tau}{C + D \cdot (\theta/\tau)}$	$\tau \cdot E \cdot \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^F$

9 Sistemas de Supervisão e Interface Homem-Máquina

Os sistemas de supervisão e as Interfaces Homem-Máquina (IHM) permitem o monitoramento, controle e gestão de processos em tempo real. Um sistema de supervisão é uma solução computacional que coleta dados de sensores e outros dispositivos, apresentando informações de forma organizada e acessível. Já a IHM é a interface através da qual operadores interagem com o sistema, visualizando dados e enviando comandos. Esses sistemas são essenciais para garantir eficiência, segurança e tomada de decisões assertivas em ambientes de produção.

A IHM multi-abas das Figuras 11a e 11b apresenta uma interface exemplo para sistemas com Controle PID, permitindo diversas interações do usuário. Na segunda tela, é possível selecionar um conjunto de dados base para o processo aplicado, realizar a identificação pelos Métodos de Smith e Sundaresan e verificar os resultados. Na terceira tela, há duas seleções para definir a forma de Sintonia do Controlador PID.

(a) Aba 'Identificação' para verificação de conjuntos de dados.



(b) Aba 'Controle PID' para parametrização do Controlador e métricas de resposta.

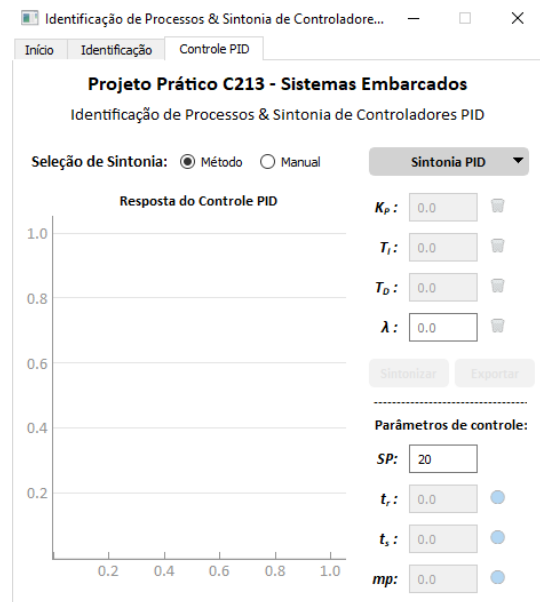


Figura 11: Descrição da aplicação da IHM para sistemas com Controle PID.

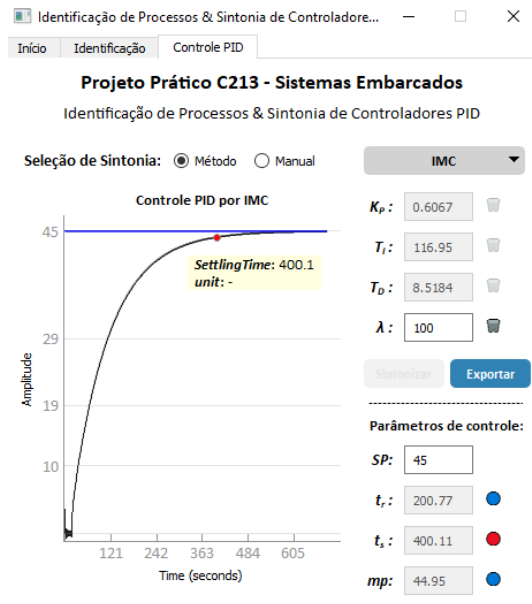
- O conjunto de dados selecionado em 11a é verificado como válido e apresenta o resultado para o Método de Identificação com menor EQM. É possível selecionar os dados de qualquer método em uma lista suspensa. A seleção de dados libera o acesso à aba 11b;
- Em 11b, a opção 'Método' permite que o usuário selecione um entre os Métodos Clássicos de Sintonia descritos na Seção 8. Nessa situação, os parâmetros K_p , T_i e T_d são calculados e não podem ser editados. Apenas é permitida entrada para o parâmetro λ caso seja selecionado o Método IMC;
- Em 11b, se selecionada a opção 'Manual', os valores dos parâmetros K_p , T_i e T_d podem ser editados, enquanto a seleção de Métodos Clássicos e edição para λ são bloqueadas. Há ícones que permitem limpeza dos valores digitados neste modo.

Há dois botões de ação no sistema. Se habilitada a opção 'Manual', o botão 'Sintonizar' realiza o Controle PID com parâmetros manuais, previamente verificando a estabilidade do processo para o conjunto de valores. Após a sintonia, por qualquer forma válida, o botão 'Exportar' salva o gráfico como uma imagem, permitindo acesso futuro aos dados.

Na seção 'Controle', um campo de entrada permite ao usuário definir o valor para o *SetPoint* considerando uma entrada do tipo Degrau. O valor inicial para o *SetPoint* é o mesmo do conjunto de dados do processo analisado, selecionado em 11a. A seguir, demais campos parametrizam os pontos de interesse da curva de resposta: tempos de subida e acomodação e índice de *overshoot*. As interações do sistema permitem marcar pontos com descrição de dados no gráfico.

As Figuras 12a e 12b apresentam o funcionamento da interface para as duas opções de seleção da forma de Sintonia, por Métodos ou Manual, respectivamente, além de alteração do *SetPoint* e indicação dos pontos e valores de referência. Se o conjunto de dados possuir metadados de unidades de medida ou grandezas, as métricas são incluídas na figura e *labels*.

(a) Funcionamento da Interface para seleção de Métodos Clássicos de Sintonia.



(b) Funcionamento da Interface para seleção de parâmetros manuais.

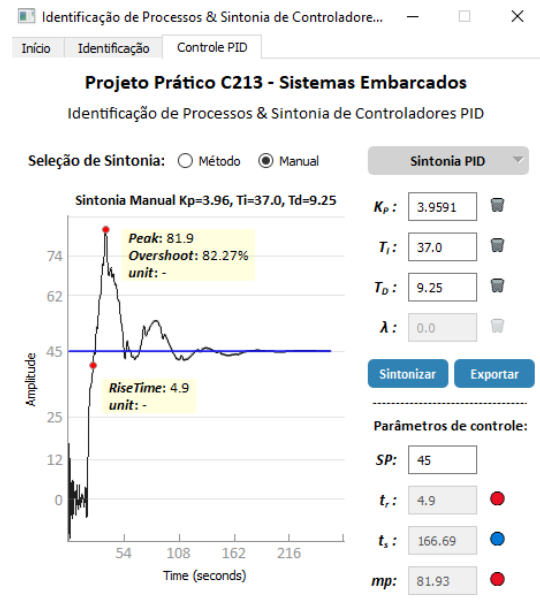


Figura 12: Detalhamento das situações de aplicação da interface.

10 Sistema de Controle Distribuído para Branqueamento Térmico de Glicerina

O branqueamento de glicerina é um tipo de processo industrial utilizado para purificar a glicerina bruta, removendo impurezas, metais pesados e outras substâncias indesejadas. Esse processo é essencial para obter glicerina de alta pureza, matéria-prima para indústrias como a farmacêutica, cosmética, alimentícia e química.

Uma das formas de tratamento é o branqueamento térmico da glicerina. Esse procedimento pode ser feito em um reator de mistura com agitador como o da Figura 13, em que a porcentagem de redução de cor da glicerina está diretamente relacionada à quantidade de calor liberada no reator. A temperatura da glicerina bruta no reator deve ser mantida o mais baixa possível para minimizar o aumento da matéria gordurosa da operação de aquecimento, mas alta o suficiente para produzir o produto final desejado [8]. O controle preciso da temperatura, tempo de adsorção e fluxo de filtração é fundamental para garantir a eficiência do branqueamento. A capacidade de ajustar e manter essas condições em níveis adequados não só melhora a qualidade da glicerina, mas também otimiza o consumo de insumos e energia, garantindo um processo mais seguro e econômico.

No processo de branqueamento de glicerina representado em 13, a glicerina bruta e o agente adsorvente, como carvão ativado ou argilas ativadas, são introduzidos no tanque. Para otimizar a eficiência do processo, a mistura é aquecida por um sistema interno, cuja temperatura é monitorada por um detector de temperatura por resistência (RTD). Esse sensor envia os dados para um controlador de temperatura (TIC), que compara a temperatura real com o *SetPoint* e ajusta a potência do aquecedor por meio de um controlador de potência AC,

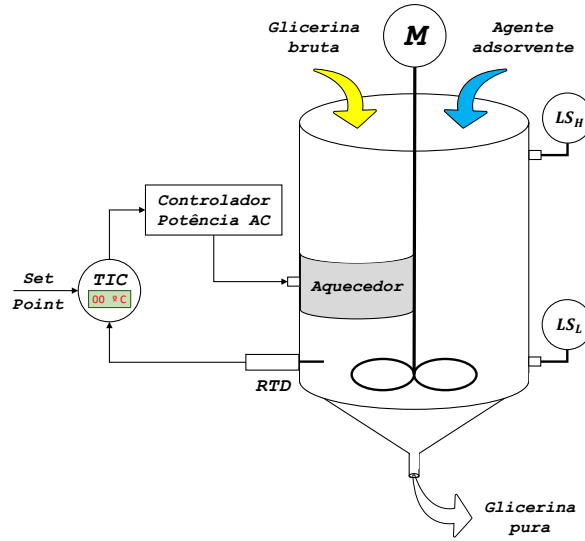


Figura 13: Diagrama ilustrativo do Reator de Mistura com Agitador para Branqueamento Térmico da Glicerina [8].

garantindo que a temperatura permaneça dentro do ideal para o processo de adsorção [8].

Além do controle de temperatura, o tanque conta com um sistema de agitação acionado por um motor (M), que movimenta uma hélice interna. Sensores de nível (LS) monitoram a quantidade de líquido dentro do tanque para evitar transbordamento (H) ou funcionamento inadequado devido a níveis insuficientes (L). Esse mecanismo assegura a homogeneização da mistura, aumentando o contato entre a glicerina e o agente adsorvente e acelerando a remoção das impurezas. A glicerina é coletada do tanque e segue para as próximas etapas de produção.

Projeto

Baseado nas ideias apresentadas por Kamaruddin et. al. em [8], bem como a necessidade do controle de temperatura no processo de branqueamento térmico da glicerina descrita na Seção 10, as etapas seguintes visam projetar um Sistema de Controle PID para o sistema de aquecimento AC do reator diagramado em 13. O objetivo é ajustar os parâmetros do controlador PID para obter o melhor desempenho de controle com a escolha adequada dos parâmetros K_p , T_i e T_d . O desempenho do sistema controlado deve ser avaliado em tempo de subida e acomodação e índices de *overshoot* percentual.

1. Identifique o conjunto de dados para seu grupo, resultantes de Ensaio simulados da Curva de Reação, nomeado por 'Dataset_GrupoX';
2. Escolha entre os Método de Identificação da Planta - Smith ou Sundaresan, e determine os valores de k , τ e θ para levantar a Função de Transferência do modelo de acordo com a resposta típica. **Justifique a escolha do método e do modelo;**
3. Compare a resposta original em relação à estimada e verifique se a aproximação foi satisfatória. Se necessário, realize o ajuste fino dos parâmetros, expondo o reflexo das alterações na resposta do sistema;
4. Plote as respostas do Sistema em Malha Aberta e Fechada e comente sobre as diferenças nos Tempos de subida e de acomodação e no erro do processo;

5. Sintonize um Controlador PID de acordo com os métodos especificados para seu grupo na Tabela 7 e verifique o comportamento do sistema controlado. Para a Sintonia IMC, a escolha de λ é livre de acordo com o desempenho desejado. **Justifique o valor escolhido para o parâmetro.**

Tabela 7: Divisão de grupos, métodos de sintonia e análise de desempenho.

	Métodos	Desempenho
Grupo 1	Técnicas 1 e 4	(b) Menor índice de <i>overshoot</i>
Grupo 2	Técnicas 1 e 5	(a) Menor tempo de resposta
Grupo 3	Técnicas 4 e 5	(b) Menor índice de <i>overshoot</i>
Grupo 4	Técnicas 2 e 3	(a) Menor tempo de resposta
Grupo 5	Técnicas 2 e 6	(b) Menor índice de <i>overshoot</i>
Grupo 6	Técnicas 3 e 6	(a) Menor tempo de resposta
Grupo 7	Técnicas 1 e 4	(b) Menor índice de <i>overshoot</i>
Grupo 8	Técnicas 4 e 5	(a) Menor tempo de resposta
Grupo 9	Técnicas 2 e 3	(b) Menor índice de <i>overshoot</i>
Grupo 10	Técnicas 2 e 6	(a) Menor tempo de resposta

Tabela 8: Parâmetros do PID para os métodos de Sintonia especificados.

Técnica	Método	K_p	T_i	T_d
1	Ziegler Nichols Malha Aberta			
2	IMC			
3	CHR sem Sobrevalor			
4	CHR com Sobrevalor			
5	Cohen e Coon			
6	ITAE			

6. De acordo com o desempenho especificado para seu grupo na Tabela 7, explique, entre os métodos aplicados, qual apresenta: **(a)** tempo de resposta mais rápido ou **(b)** menores

índices de *overshoot*. **Justifique porquê este método se adequa melhor a este critério de desempenho.**

7. Crie uma interface que permita ao usuário definir os parâmetros do PID e do *Set-Point*. Utilize como referência o exemplo da Figura 11 e os funcionamentos detalhados em 12a e 12b. Opcionalmente, personalize a interface com outras métricas que julgar interessantes (possibilidade de nota extra).

Observação 1: a interface pode ser desenvolvida em qualquer ambiente. No MATLAB, utilize o AppDesigner. No python, pacotes como Tkinter, PyQt/PySide, Kivy, entre outros, podem ser utilizados. A interface exemplo da Figura 11 foi desenvolvida com o PyQt5 juntamente com a IDE Qt Designer.

Observação 2: atente-se às possibilidades de modificação que a interface fornece ao usuário. **Alguns parâmetros jamais podem ser alterados.**

Considerações

- O projeto pode ser feito em Python ou em MATLAB R2019a ou superior;
- A entrega do trabalho deve ser feita via GitHub. O repositório deve conter um *readme* detalhando a proposta da aplicação e todos os arquivos referência para o trabalho. **Todos os integrantes do grupo devem realizar *commits* significativos no repositório, indicando sua participação no desenvolvimento do trabalho;**
- A disposição do diretório é livre, importando o *dataset* e organizando pastas e arquivos de forma adequada;
- Trabalhe com `help` ou `lookfor` do MATLAB como auxílio em caso de dúvidas na utilização de funções e comandos;
- Todos os gráficos devem ser salvos para garantia da resolução.

Referências

- [1] Cecil L. Smith. *Process Control and Instrumentation Technology*. Addison-Wesley, 1972.
- [2] K. R. Sundaresan e C. Krishnaswamy. “Estimation of time delay, time constant and transfer function model from process step response”. Em: *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 17.2 (1978), pp. 236–241.
- [3] J G Ziegler e N B Nichols. “Optimum settings for automatic controllers”. Em: *J. Dyn. Syst. Meas. Control* 115.2B (jun. de 1993), pp. 220–222.
- [4] Daniel E Rivera, Manfred Morari e Sigurd Skogestad. “Internal model control: PID controller design”. Em: *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 25.1 (jan. de 1986), pp. 252–265.
- [5] Kun Li Chien, J A Hrones e J B Reswick. “On the automatic control of generalized passive systems”. Em: *Journal of Fluids Engineering* 74.2 (fev. de 1952), pp. 175–183.
- [6] G H Cohen e G A Coon. “Theoretical consideration of retarded control”. Em: *Journal of Fluids Engineering* 75.5 (jul. de 1953), pp. 827–834.
- [7] Dunstan Graham e R C Lathrop. “The synthesis of “optimum” transient response: Criteria and standard forms”. Em: *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.* 72.5 (nov. de 1953), pp. 273–288.
- [8] N. Kamaruddin, Z. Janin, Z. Yusuf e M. N. Taib. “PID controller tuning for glycerin bleaching process using well-known tuning formulas- a simulation study”. Em: *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*. 2009, pp. 1682–1686. DOI: 10.1109/IECON.2009.5414748.