



Características Dinâmicas dos Processos Industriais

Controle de Processos Industriais (CPI)

Departamento de Engenharia de Controle e Automação
Instituto de Ciência e Tecnologia – UNESP – Campus Sorocaba

Prof. Dr. Dhiego Fernandes Carvalho

dhiego.fernandes@unesp.br

Objetivos

- Compreender a natureza multivariável dos processos industriais.
- Entender a importância e o impacto dos atrasos temporais.
- Aprender sobre a ordem dos processos.
- Compreender o comportamento não linear.
- Compreender a dinâmica de múltiplas escalas temporais.
- Entender o impacto das perturbações.
- Compreender a instabilidade dos processos industriais.
- Aprender o que é a resposta transitória e permanente de processos industriais.

Índice

- Introdução
- Natureza Multivariável
- Atrasos
- Ordem do Processo
- Comportamento não linear
- Dinâmica de Múltiplas Escalas Temporais
- Perturbações
- Instabilidade
- Resposta Transitória e Permanente
- Conclusões

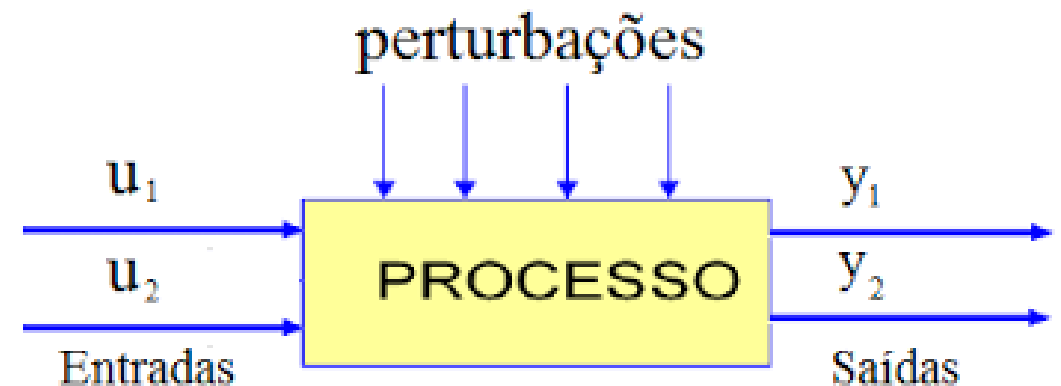
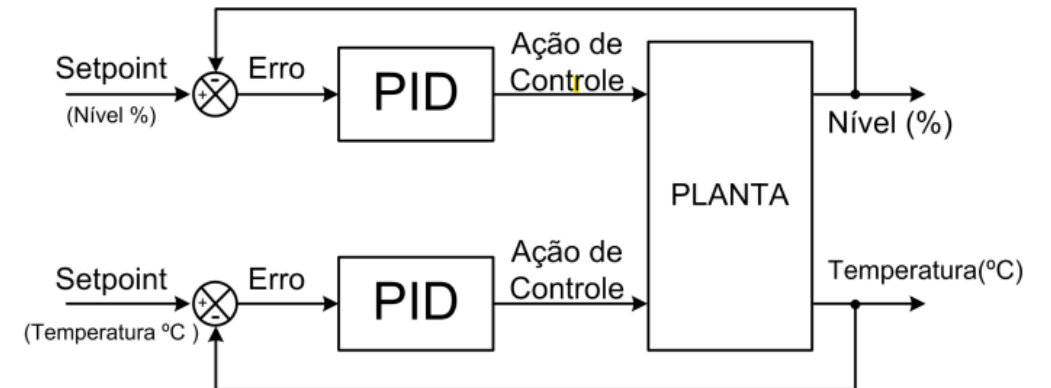
Introdução

- Processos industriais são inerentemente complexos, envolvendo uma série de variáveis interconectadas que mudam com o tempo.
- É essencial compreender essas características dinâmicas para operar, controlar e otimizar efetivamente esses sistemas.



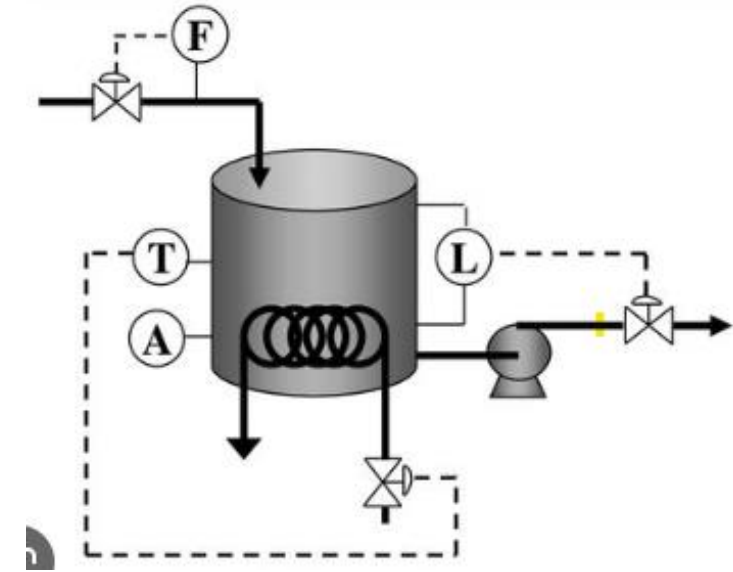
Natureza Multivariável

- A natureza multivariável dos processos industriais refere-se ao fato de que, em um processo industrial, normalmente existem várias variáveis de entrada e saída que estão interconectadas.
- Isso significa que a mudança em uma variável pode afetar várias outras.



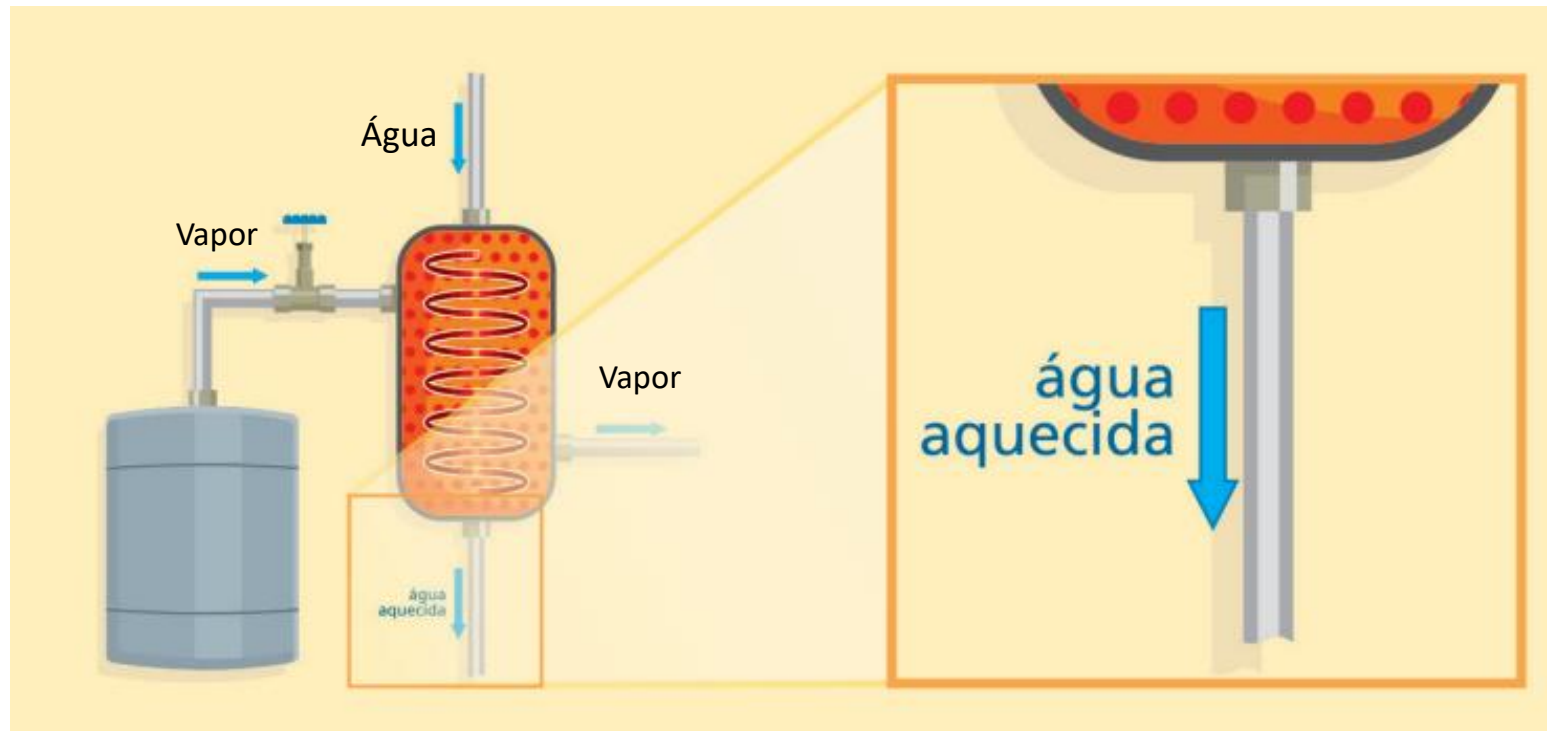
Natureza Multivariável

- Por exemplo, considere o processo de fabricação de cerveja.
- Neste processo, as variáveis de entrada podem incluir coisas como a quantidade de ingredientes, a temperatura e o tempo de fermentação, e a pressão sob a qual a fermentação ocorre.
- As variáveis de saída podem incluir a taxa de produção de cerveja, a concentração de álcool, a cor e o sabor da cerveja.



Atrasos

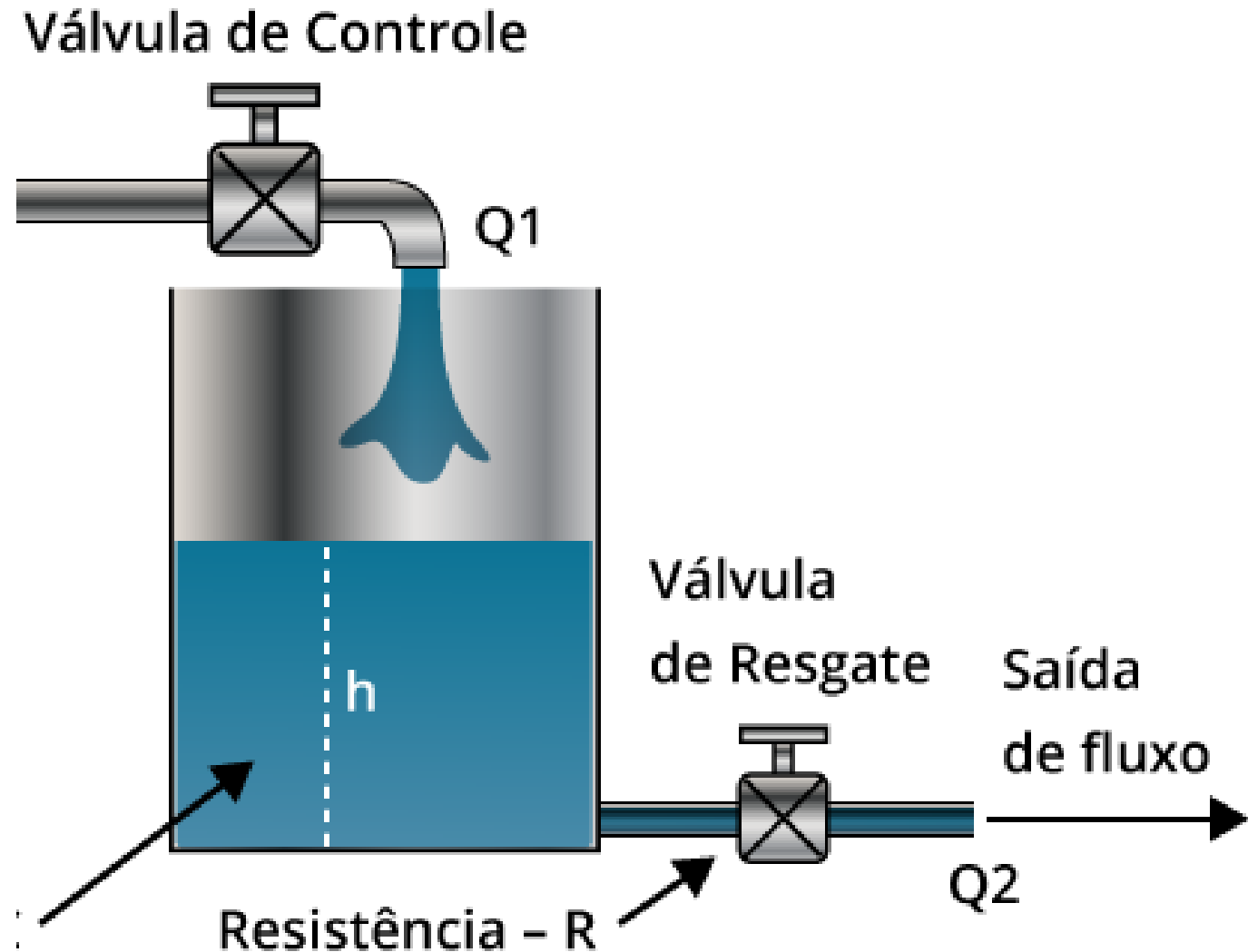
- O atraso se refere ao tempo que leva para uma ação ou perturbação ter um efeito observável no sistema.
- O atraso pode ser devido ao tempo de transporte de materiais ou sinais, o tempo de reação de componentes físicos, ou atrasos inerentes na resposta de processos químicos ou biológicos.



Neste caso, a água para começar a aquecer demora um certo tempo.

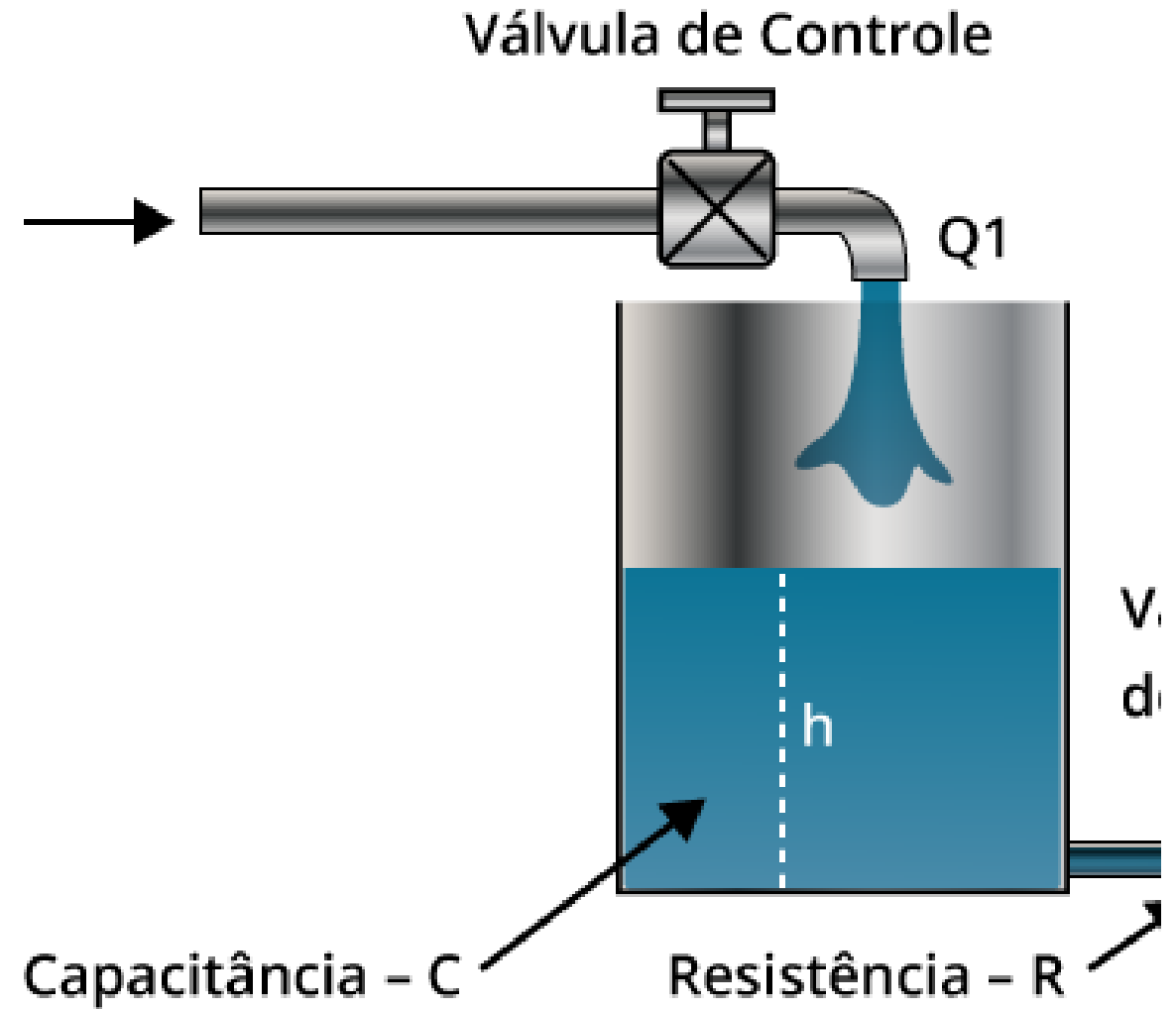
Atrasos por tempo de transporte (resistência)

- Ocorre quando há um atraso devido ao tempo necessário para que um sinal ou material se mova de um ponto a outro em um sistema.
- A resistência seria a dificuldade que o fluido enfrenta ao se mover através do tubo, que poderia ser influenciada pelo seu diâmetro, seu comprimento, a viscosidade do fluido, etc.

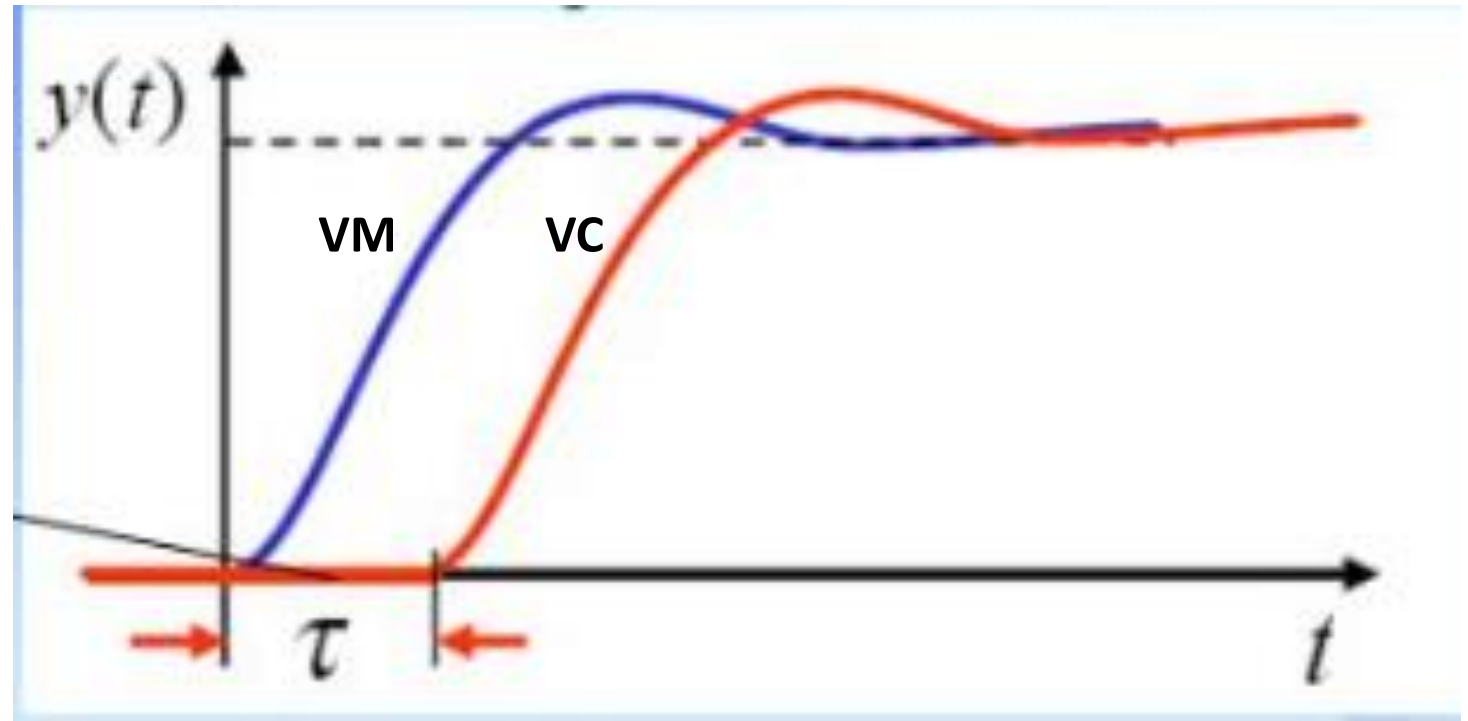


Atraso de Tempo de Processamento (capacitância)

- Refere-se a capacidade de um sistema poder armazenar e liberar energia.
- Neste caso, o atraso de tempo de processamento, é dado pelo tamanho do reservatório.



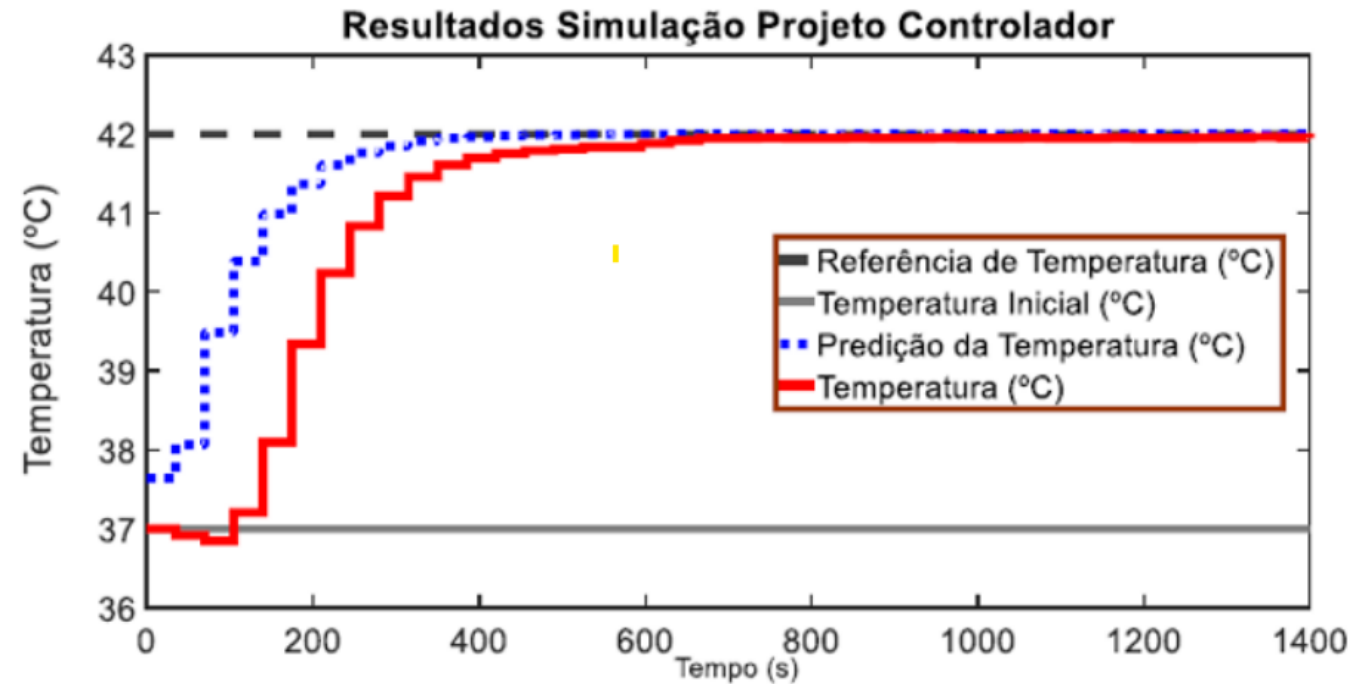
Tempo Morto



Tempo Morto

- É o intervalo de tempo entre uma mudança em um estímulo (Variável Manipulada - VM) e o início de uma resposta (Variável Controlada - VC) em um sistema.

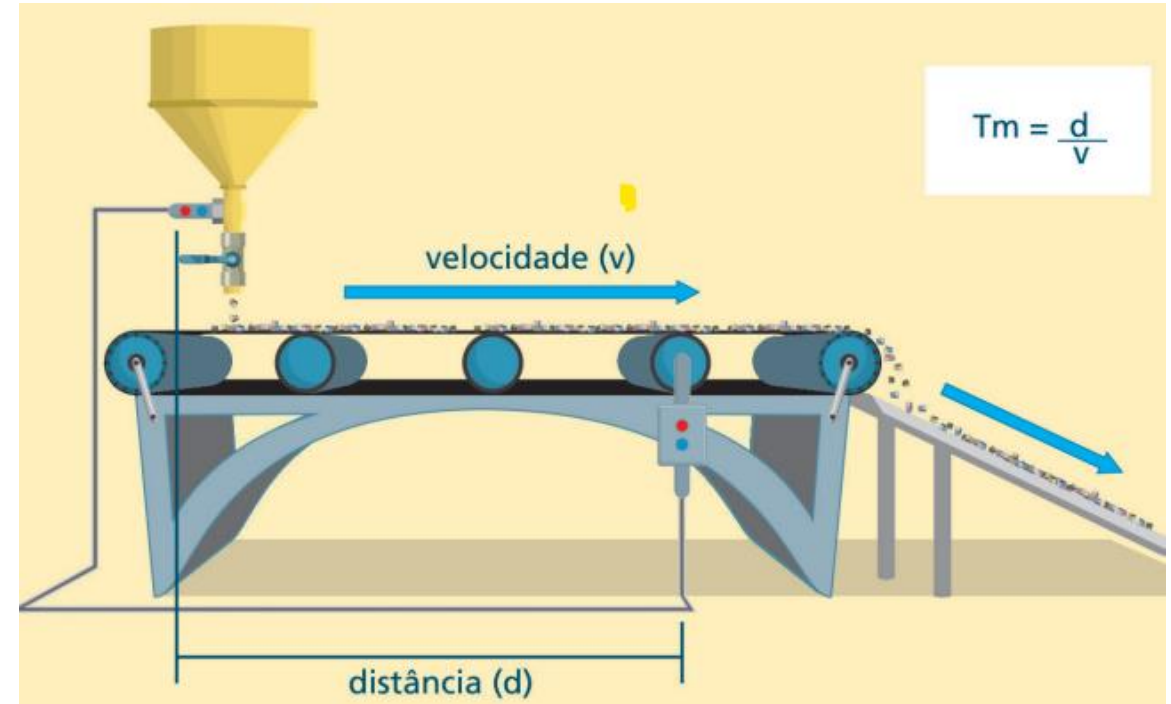
Atrasos



- Raramente a capacitância e resistência ocorrem sozinhas em um processo, então são poucos os que não tem tempo morto.

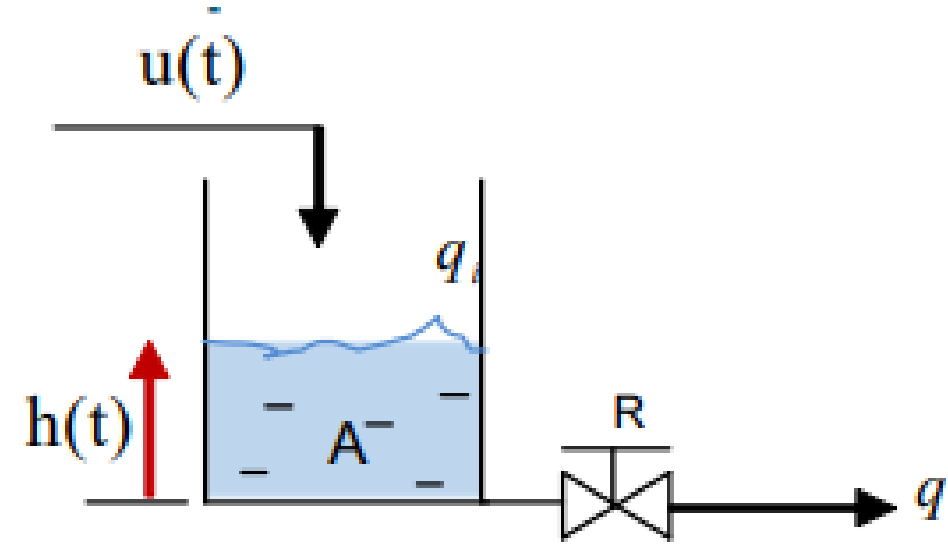
Atrasos

- Em um sistema de controle de velocidade de uma esteira transportadora.
 - **Resistência:** a força de atrito que atua contra o movimento da esteira.
 - **Capacitância:** a inércia da esteira, que é a tendência da esteira de resistir a mudanças em sua velocidade.
 - **Tempo Morto:** o tempo necessário para o controlador de velocidade registrar uma mudança na velocidade da esteira.

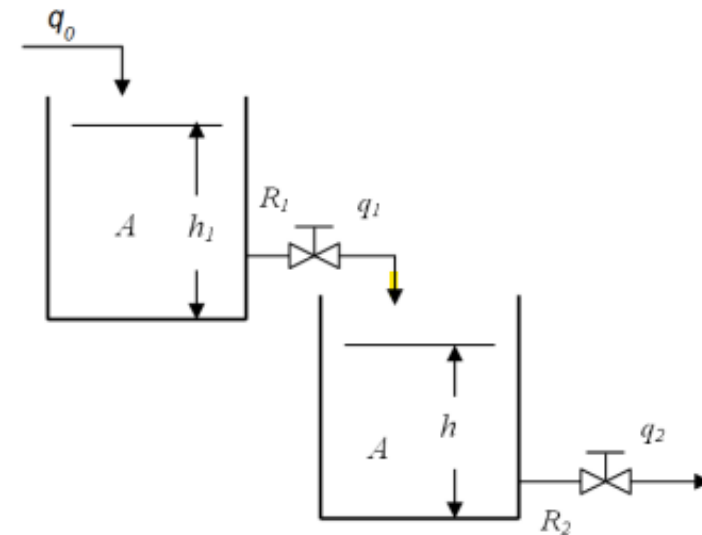


Ordem dos Processos

- A "ordem" de um processo se refere ao número de componentes de armazenamento de energia independentes, como capacidades ou inércias, que estão presentes no sistema.



Processo de Primeira Ordem



Processo de Segunda Ordem

Ordem dos Processos

- Esses processos são geralmente representados matematicamente por equações diferenciais ordinárias de primeira, segunda ordem, ou de ordem superiores.

$$\frac{dy}{dx} + p(x)y = q(x)$$

Eq. Diferencial de Primeira Ordem

$$P(x) \frac{d^2y}{dx^2} + Q(x) \frac{dy}{dx} + R(x)y = 0$$

Eq. Diferencial de Segunda Ordem

Processo de Primeira Ordem

- É caracterizado por uma única constante de tempo. Isso significa que o sistema tem uma única capacidade de armazenamento de energia.
- A equação geral para um processo de primeira ordem é:

$$\frac{dy}{dt} + \left(\frac{1}{\tau}\right)y = K_p * u \quad \xrightarrow[\text{Função de Transferência}]{} \quad G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1}$$

Onde:

- y é a variável de saída
- u é a variável de entrada
- τ é a constante de tempo do processo (quanto maior o valor de τ , mais lento é o sistema)
- K_p é o ganho do processo (o valor final que a saída atingirá para uma entrada em degrau unitário)

Processo de Primeira Ordem

- **Processo de Primeira Ordem:**

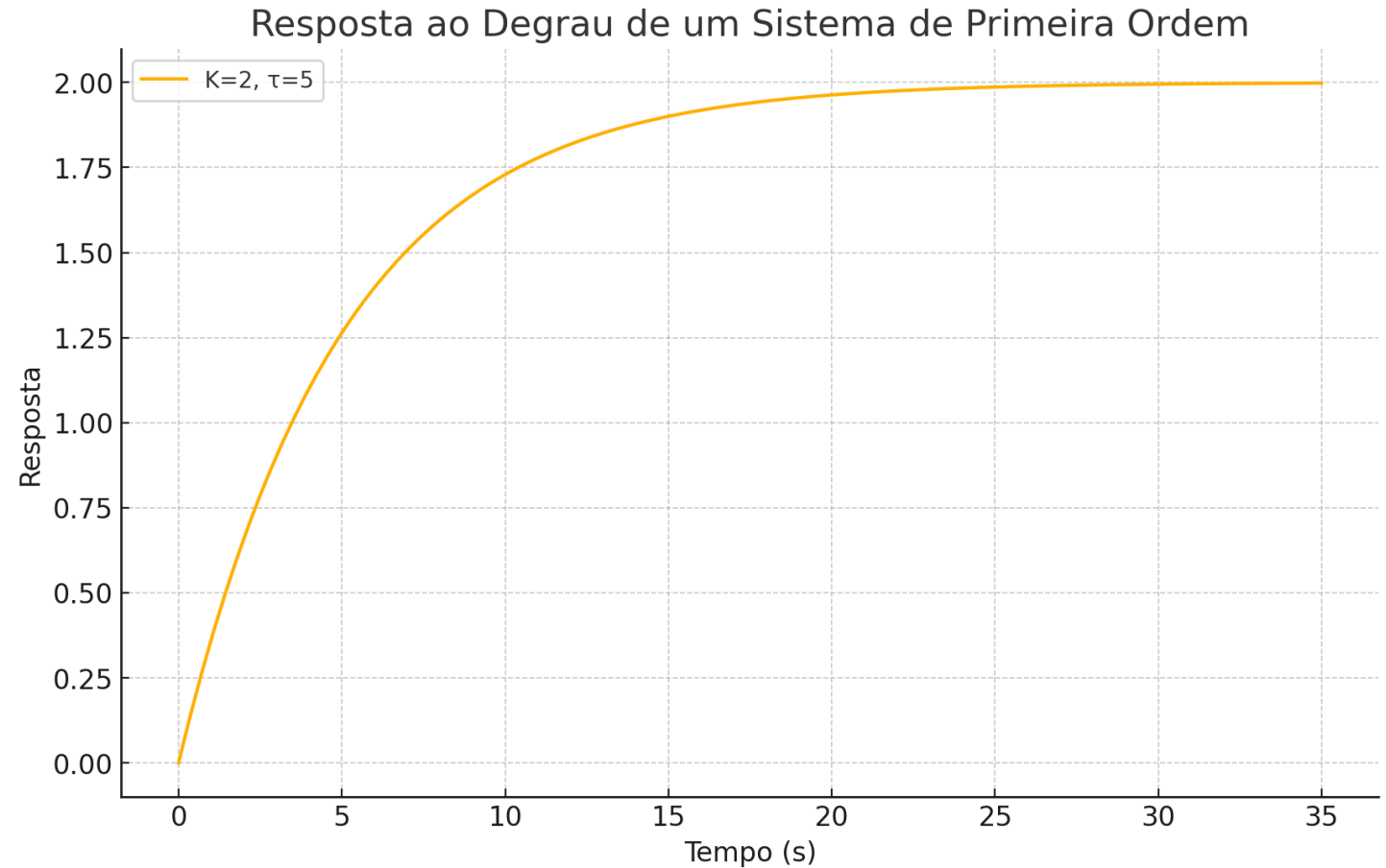
$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{\tau s + 1}$$

- **Sendo:**

$$\tau = 5 \text{ e } K = 2$$

- **Resposta Degrau:**

$$u(t) = 1 \text{ para } t \geq 0 \rightarrow U(s) = \frac{1}{s}$$



Processo de Primeira Ordem

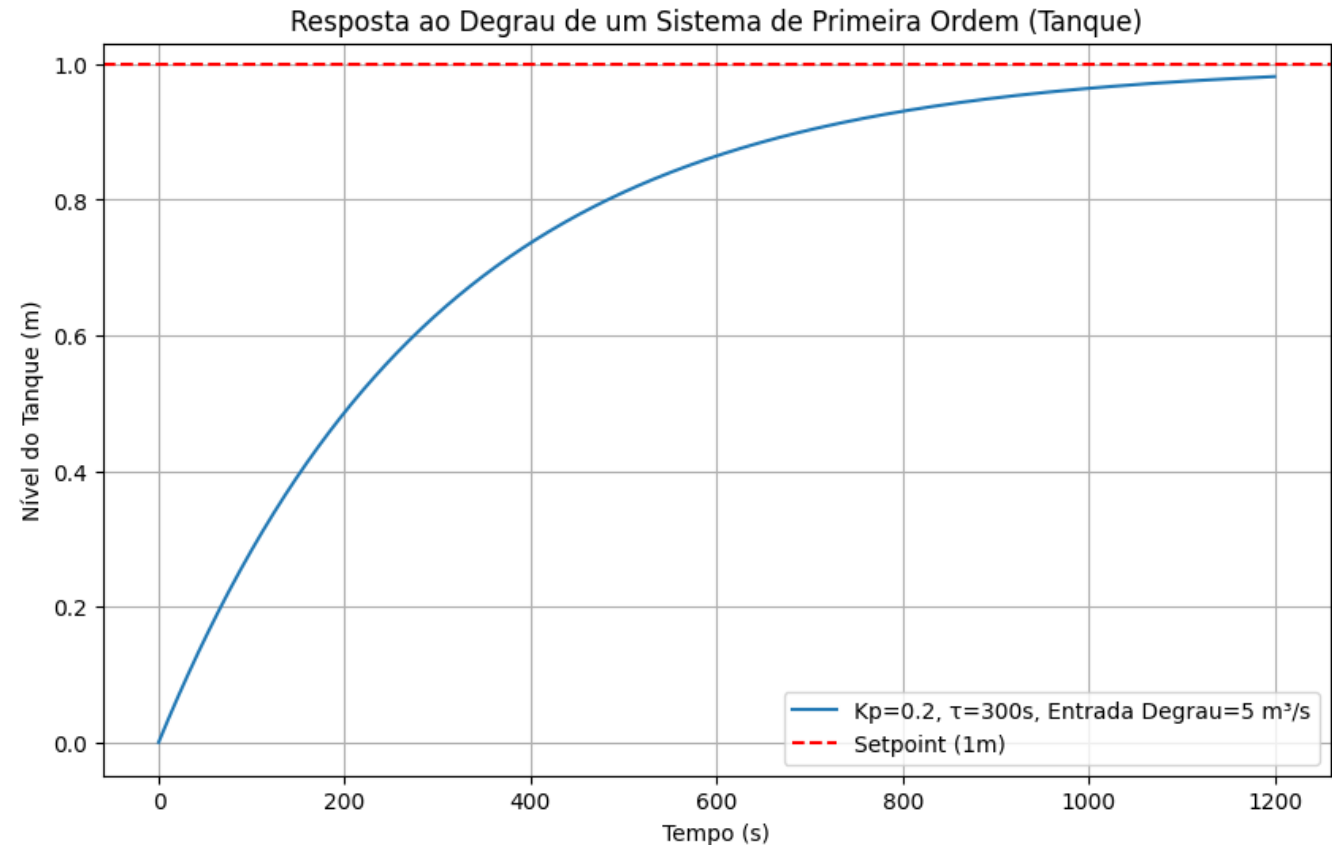
- Exemplo de controle de água de um tanque:
 - Entrada do sistema ($u(t) = 5 \text{ m}^3/\text{s}$):** é a taxa de fluxo de água que entra no tanque.
 - Ganho do sistema ($K = 0,2 \text{ m}$):** é o aumento no nível da água a que entra no tanque
 - Constante de tempo ($\tau = 300\text{s}$):** é o tempo necessário para o nível de água atingir 63,2% do seu valor final após uma mudança na taxa de fluxo de água.

Resposta da Função de Transferência

$$Y(s) = G(s)U(s) = \frac{0,2}{300s+1} \cdot \frac{5}{s} = \frac{1}{300s^2+s}$$

Resposta do Sistema em Função do tempo

$$y(t) = K_p \left(1 - e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)} \right) \times u(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{300}\right)}$$



Processo de Segunda Ordem

- É caracterizado por duas constantes de tempo ou por uma constante de tempo e um termo de amortecimento. Isso significa que o sistema tem duas capacidades independentes de armazenamento de energia.
- A equação geral para um processo de segunda ordem é:

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\zeta\omega_n * \left(\frac{dy}{dt}\right) + \omega_n^2 * y = K_p * u$$



Função de
Transferência

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

onde:

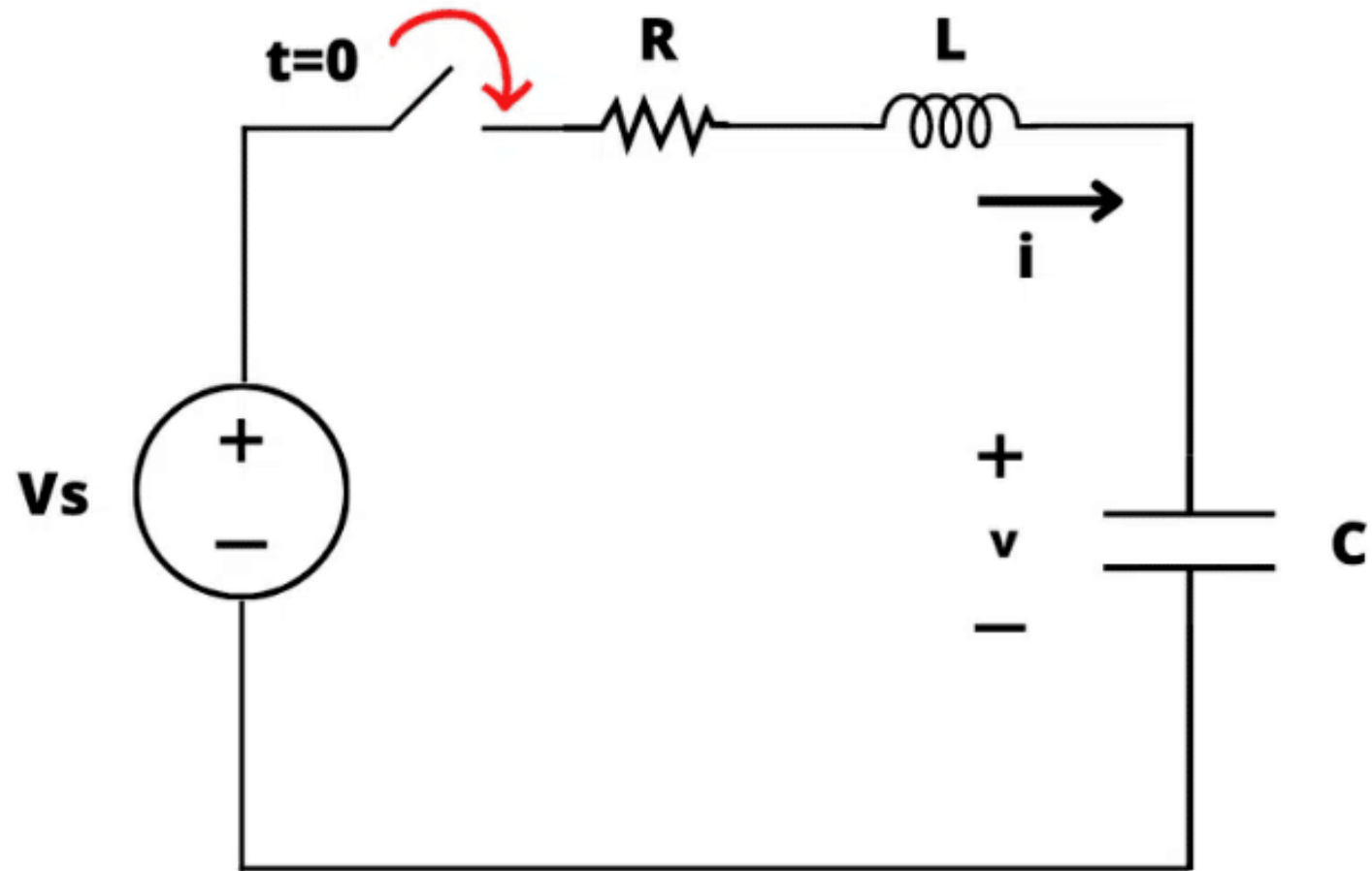
1. y é a variável de saída
2. u é a variável de entrada
3. ω_n é a frequência natural do sistema
4. ζ é o coeficiente de amortecimento
5. K_p é o ganho do processo

Processo de Segunda Ordem

- Um circuito RLC série é um sistema de segunda ordem. Ele consiste em um resistor (R), um indutor (L) e um capacitor (C) conectados em série. A sua equação diferencial:

$$L \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{C} q(t) = u(t)$$

- Onde:
 - L é a indutância do indutor,
 - R é a resistência do resistor,
 - C é a reatância capacitiva do capacitor,
 - $q(t)$ é a carga do capacitor, e
 - $u(t)$ é a tensão aplicada ao circuito.



Processo de Segunda Ordem

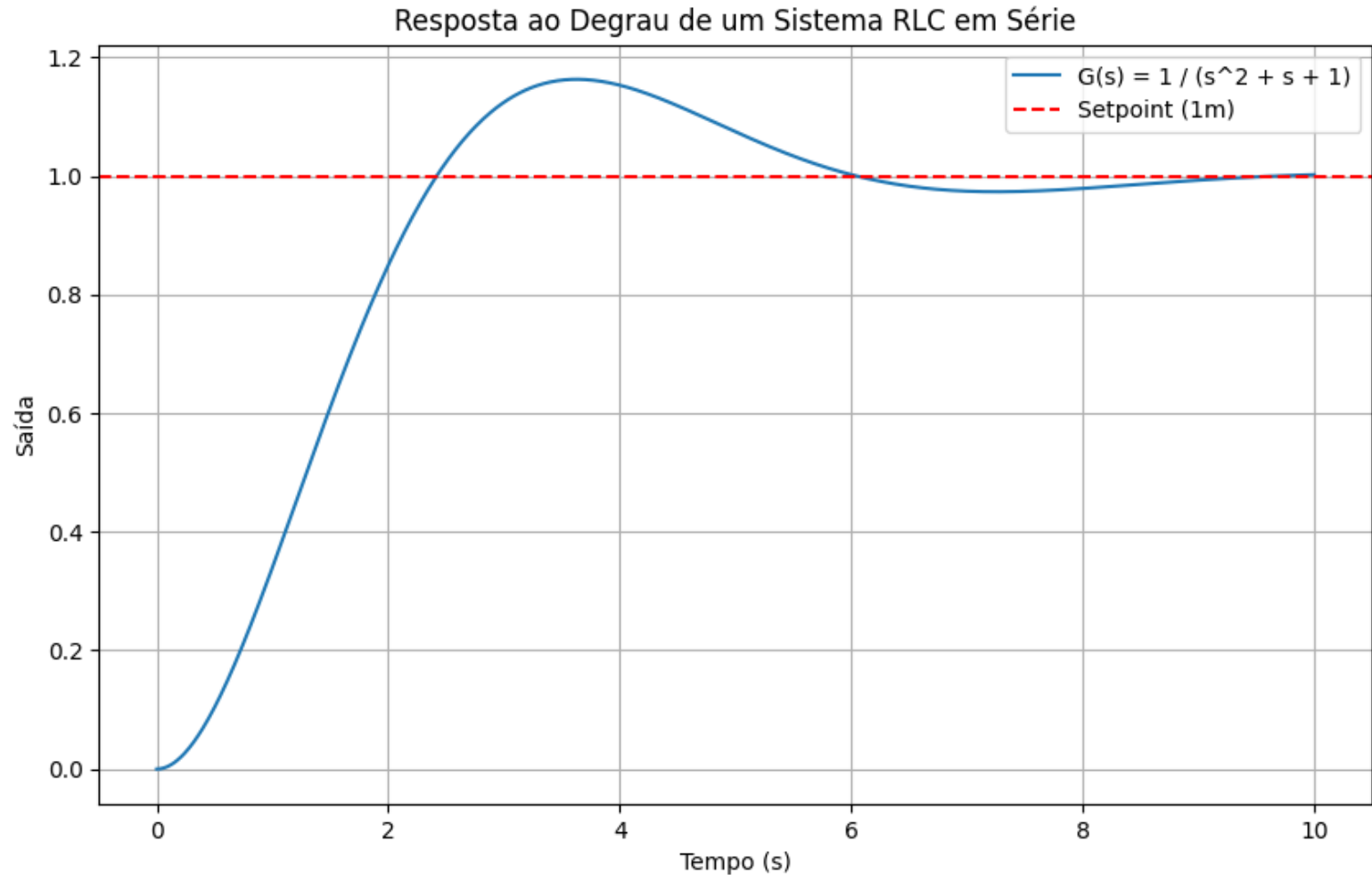
- Função do Sistema em Função do Tempo de um Circuito RLC:

$$\frac{y(t)}{u(t)} = L \frac{d^2 q(t)}{dt^2} + R \frac{dq(t)}{dt} + \frac{1}{C} q(t)$$

- Função de Transferência:

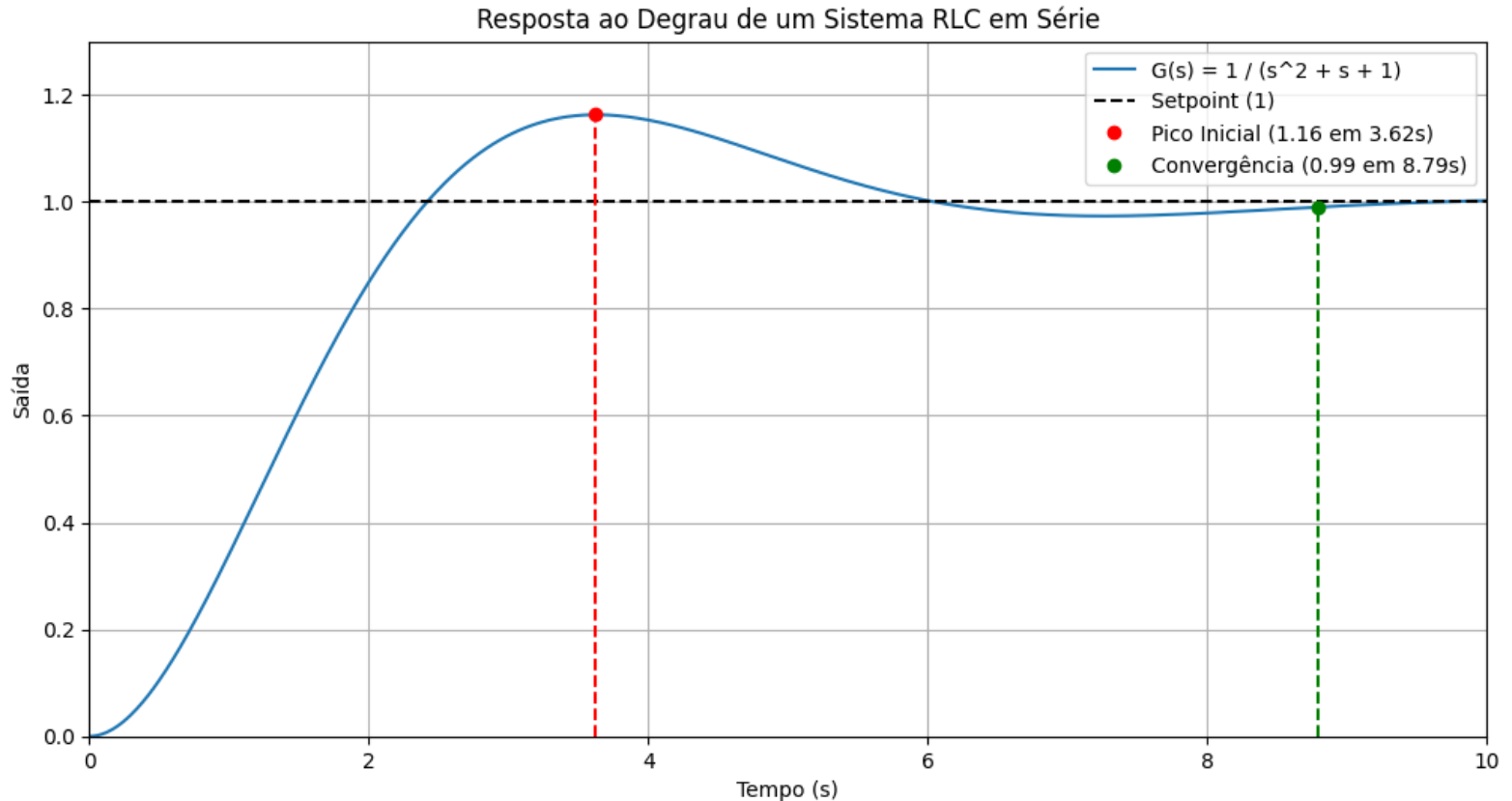
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s^2 + s + 1}$$

- Um circuito RLC com $L=1$ Henry, $R=1$ Ohm, $C=1$ Farad. Aplica-se uma entrada degrau de 1 volt. Isso resulta em um sistema subamortecido ($\zeta=0.5$).



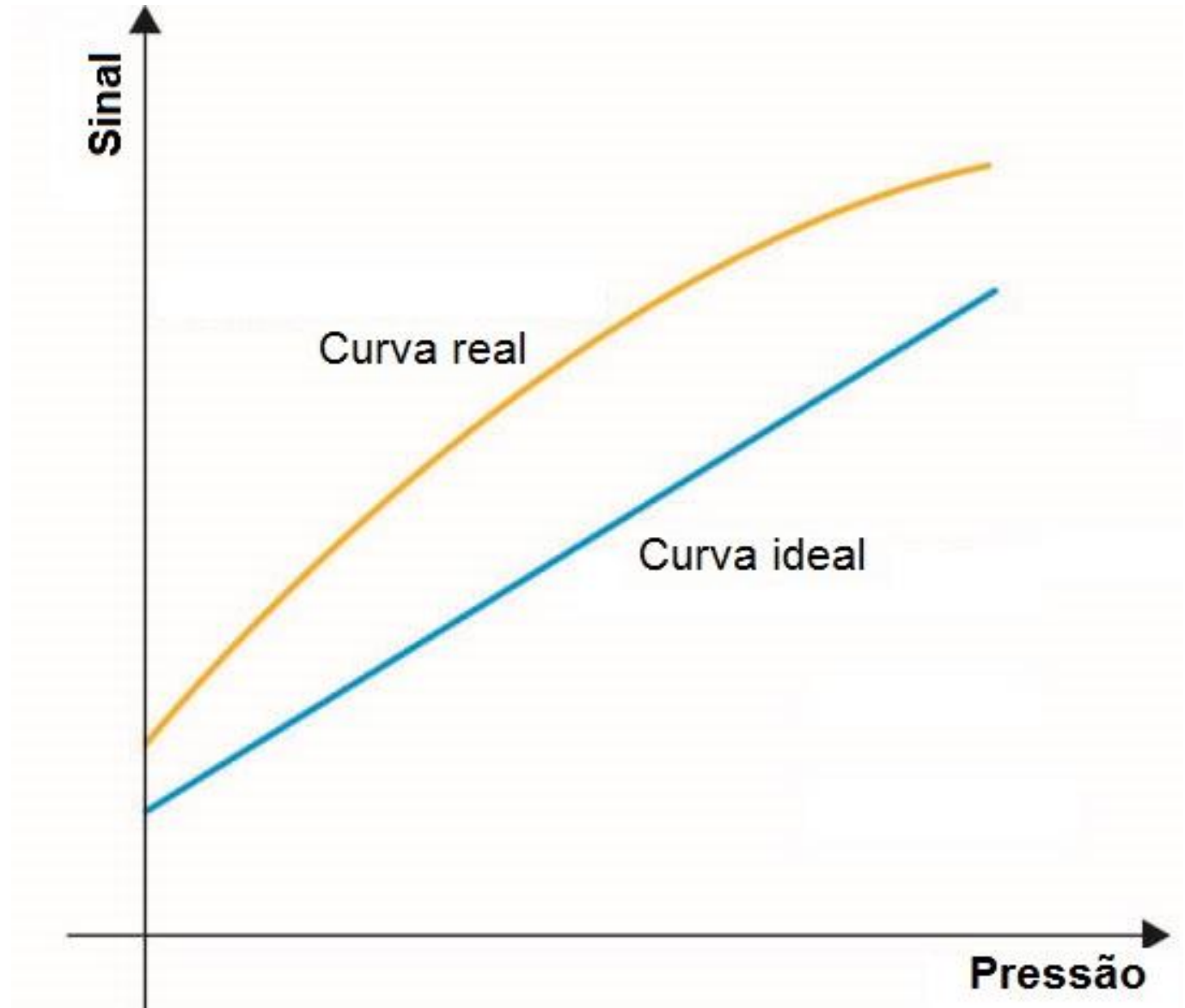
Processo de Segunda Ordem

1. **Oscilações:** O sistema exibe um comportamento oscilatório. Isso é característico de sistemas subamortecidos ($\zeta < 1$).
2. **Pico Inicial:** O primeiro pico ocorre quando o sistema atinge seu valor máximo pela primeira vez após a aplicação do degrau.
3. **Convergência:** Com o passar do tempo, as oscilações diminuem de amplitude e o sistema se estabiliza.
4. **Decaimento Exponencial:** A amplitude das oscilações diminui exponencialmente com o tempo.



Comportamento Não Linear

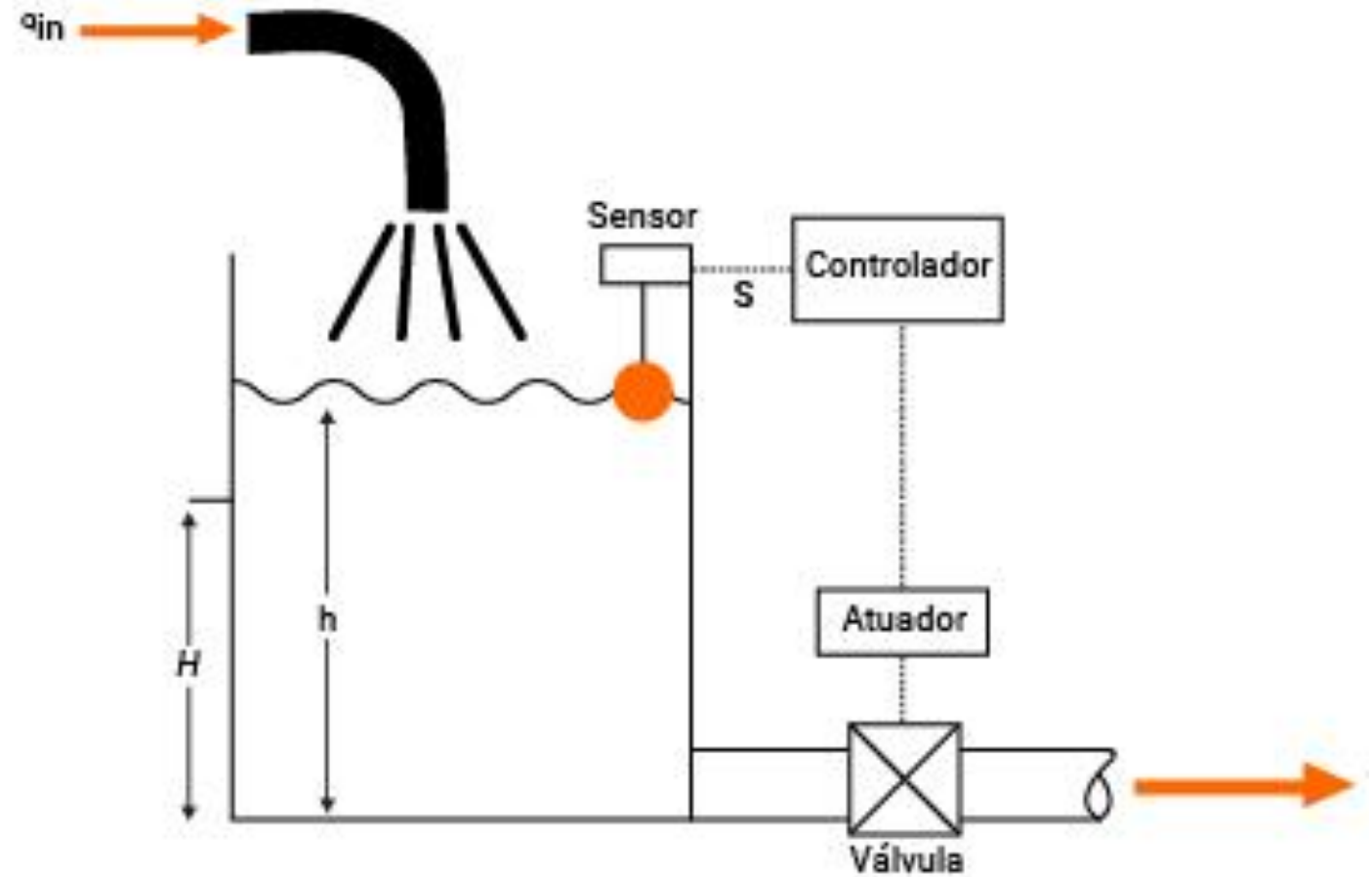
- Os processos industriais são frequentemente modelados como sistemas lineares para simplificar análises e projetos de controle.
- Muitos processos industriais reais são, de fato, não lineares.
- A linearidade implica que o sistema obedece ao princípio da superposição, ou seja, a saída para a soma de duas entradas é a soma das saídas correspondentes. Sistemas não lineares não cumprem esse princípio.



Comportamento Não Linear

- O nível da água no tanque aumenta exponencialmente até atingir um estado estável.
- Esse estado estável é igual ao ganho do sistema multiplicado pela entrada, que neste caso é $0,2m/m^3 \times 5m^3/s = 1m$.

Controle automático



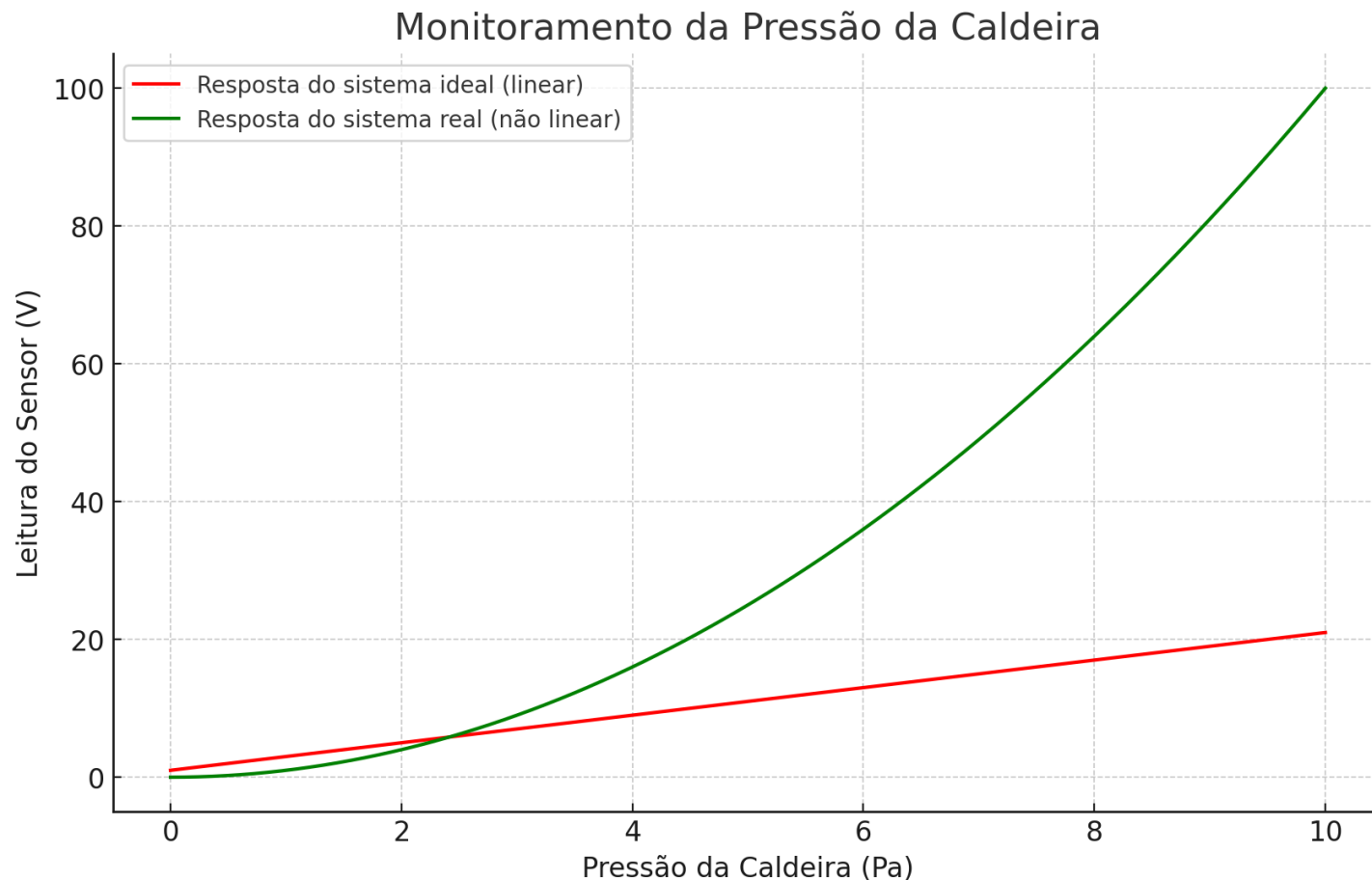
Relações de Entrada-Saída Não Proporcionais

- Em um cenário ideal, a relação entre a pressão na caldeira e o sinal de saída do sensor seria perfeitamente linear.
- Uma equação linear da forma:

$$V = m \cdot P_a + b$$

Onde:

- P_a é a pressão da caldeira.
- m é o ganho do sensor (ou a sensibilidade à pressão), com valor igual 2 e
- b é o viés do sensor, com valor igual a 1, e
- V é a leitura do sensor .



Comportamento Não Linear

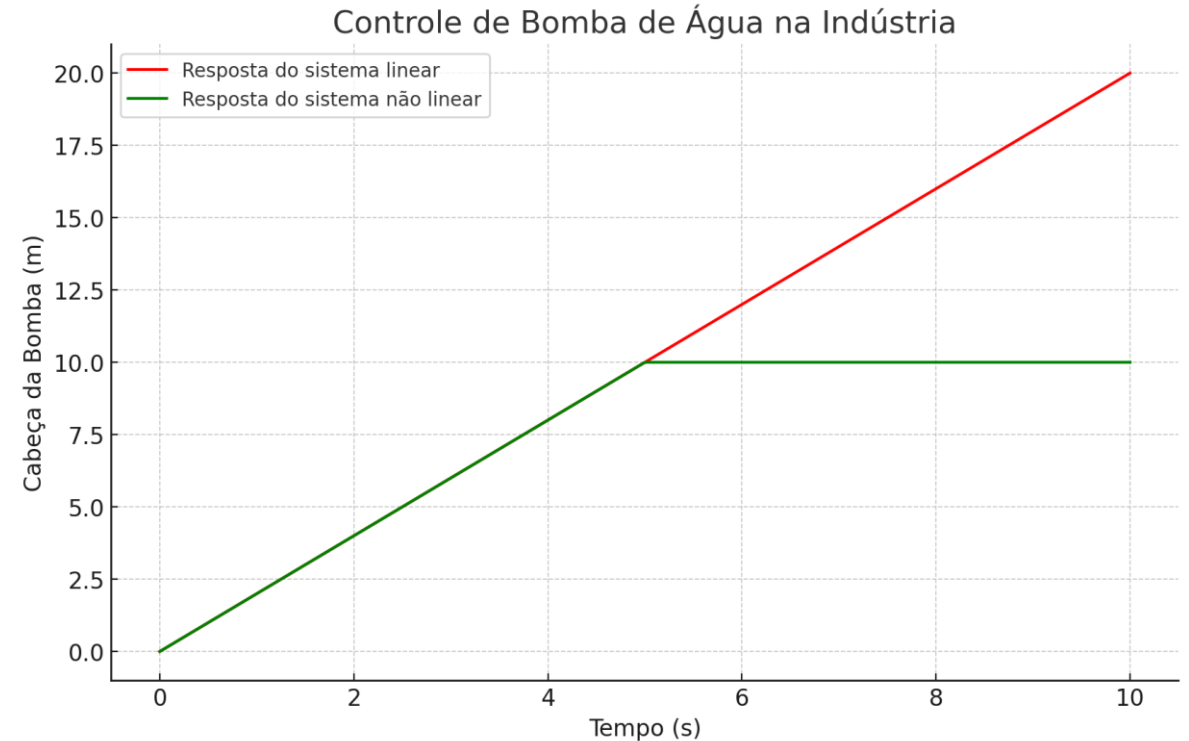
- Quando a bomba atinge sua capacidade máxima, ela não pode bombear a água a uma altura maior, mesmo se a velocidade da bomba aumentar.
- Se definirmos o ganho proporcional como $Kp = 2$, a equação que descreve a resposta do sistema é:

$$H(t) = Kp \cdot V(t)$$

Onde:

- $H(t)$ é a cabeça da bomba,
- $V(t)$ é a velocidade da bomba e
- t é o tempo.

Ponto de Operação e Saturação

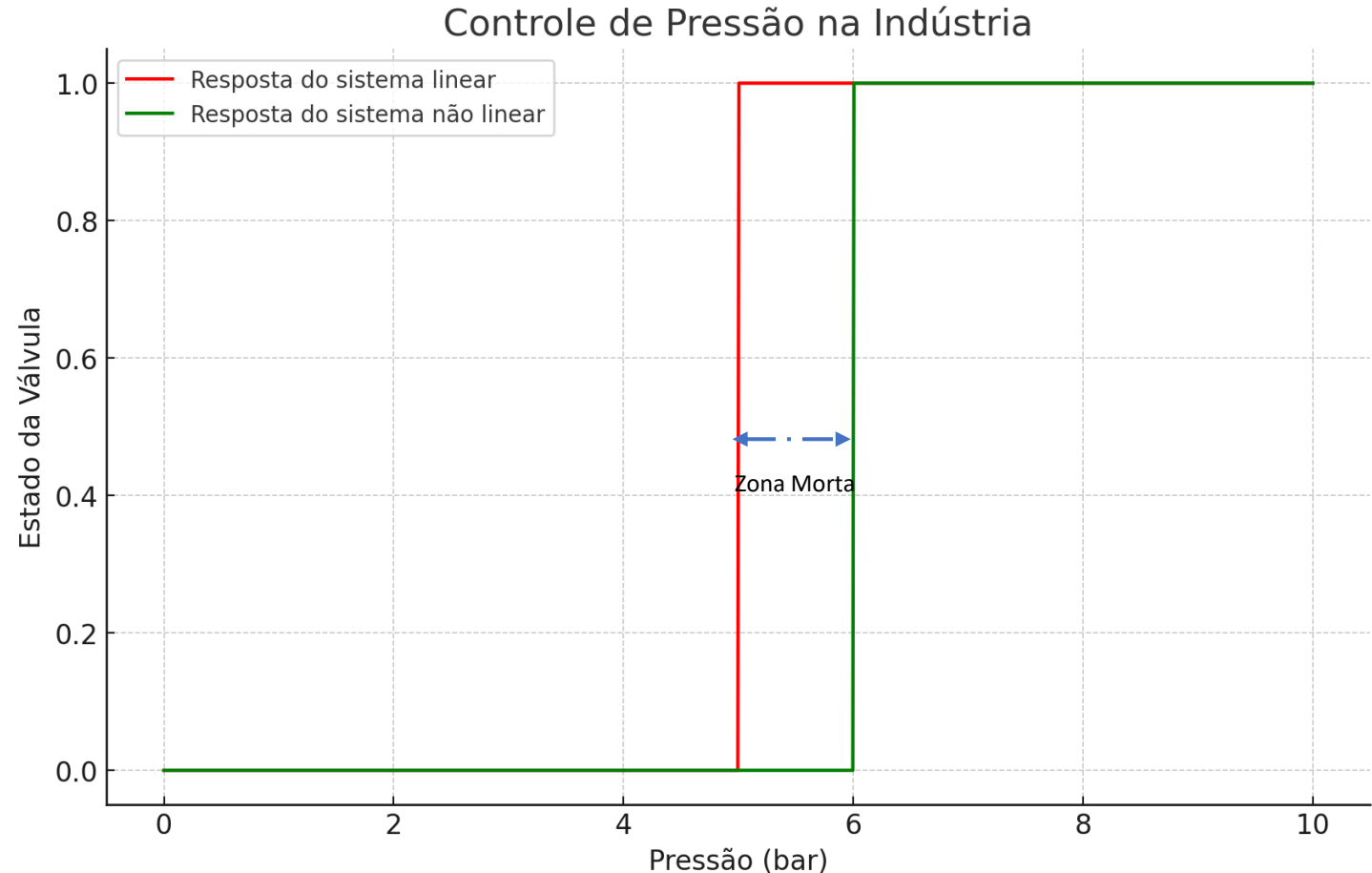


$$H(t) = \begin{cases} Kp \cdot V(t), & \text{se } Kp \cdot V(t) \leq H_{max} \\ H_{max}, & \text{se } Kp \cdot V(t) > H_{max} \end{cases}$$

H_{max} é a altura máxima que a bomba pode bombear a água.

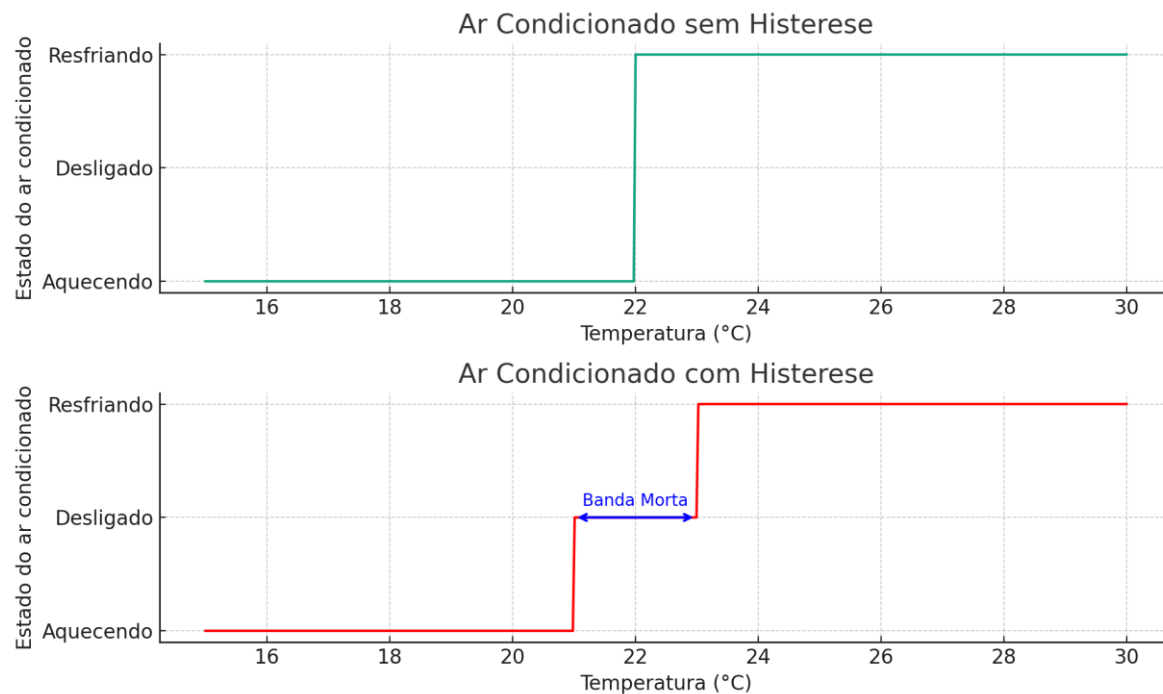
Comportamento Não Linear

- Em um controlador de pressão com histerese, a saída não muda imediatamente quando a pressão medida cruza o ponto de ajuste.
- Em vez disso, o controlador tem uma "zona morta" em torno do ponto de ajuste, e a saída só muda quando a pressão sai dessa zona.



Exemplo do Ar Condicionado

Ponto de Referência = 22°C , Banda de Zona Morta = 2°C (21°C a 23°C)



Sensibilidade às condições iniciais

- Isso ocorre porque os sistemas não lineares podem amplificar e propagar pequenas perturbações ao longo do tempo.
- Exemplo: em processos químicos industriais, como reatores químicos, pequenas variações nas condições iniciais, podem levar a resultados finais significativamente diferentes.

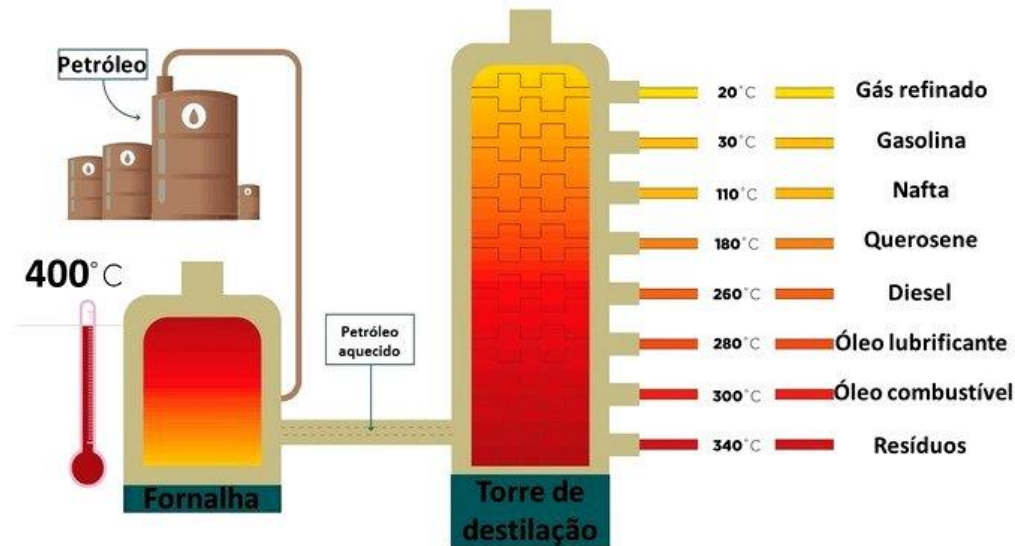


Dinâmicas de Múltiplas Escalas Temporais

- Essencialmente, isso significa que diferentes partes do sistema ou processo podem operar ou mudar em diferentes escalas de tempo.
- Este fenômeno pode apresentar desafios significativos para o controle do processo. Isso ocorre porque os controladores que são projetados para responder rapidamente às mudanças podem ser muito sensíveis às flutuações de curto prazo e podem acabar causando instabilidade.

Refino de petróleo

- As reações químicas que quebram os hidrocarbonetos de cadeia longa em hidrocarbonetos de cadeia mais curta ocorrem em escalas de tempo muito curtas, da ordem de segundos.
- Da mesma forma, o processo de destilação, onde os diferentes componentes do petróleo são separados com base em seus pontos de ebulição, também ocorre em uma escala de tempo mais longa.



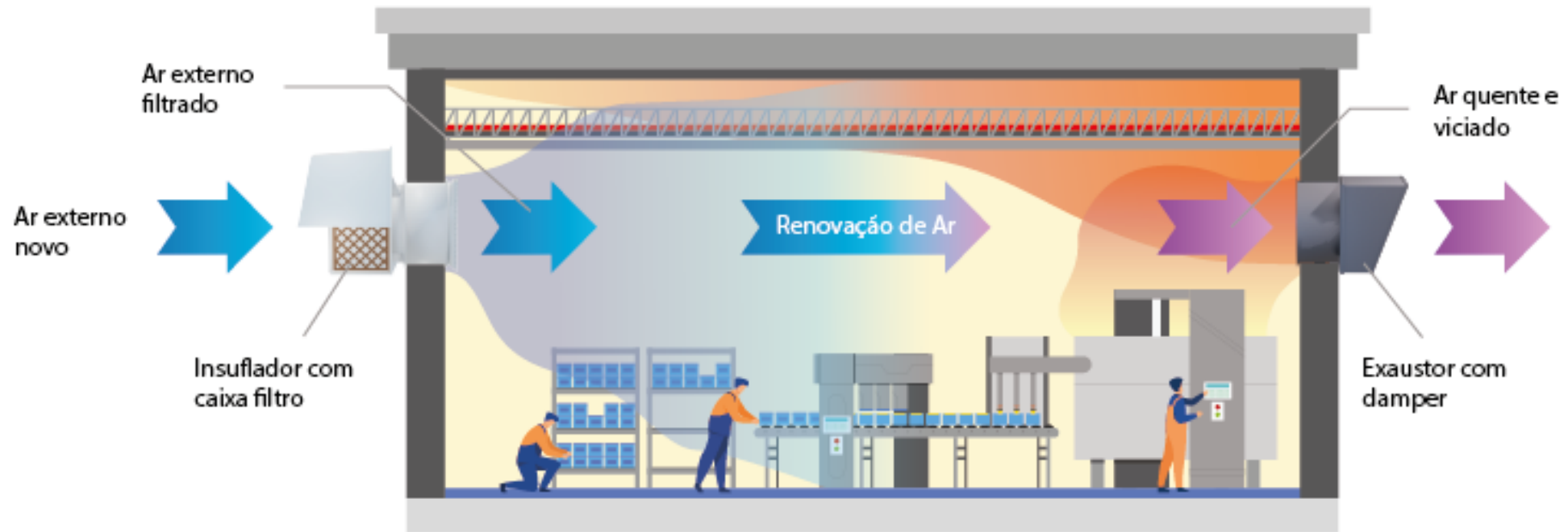
Perturbações

- As perturbações são eventos ou alterações imprevistas que afetam os processos industriais e podem ter impacto negativo em sua operação e desempenho.
- Podem ocorrer tanto internamente, quanto externamente, devido a fatores ambientais, variações nas matérias-primas, falhas de equipamentos, entre outros.



Perturbações Externas

- Variação na temperatura ambiente. Imagine um processo de fermentação em que a temperatura da sala de produção varia ao longo do dia, afetando a taxa de crescimento microbiano e, conseqüentemente, o tempo de produção.



Perturbações nas Matérias-Primas

- Flutuação na qualidade das matérias-primas. Em uma indústria de alimentos, as características nutricionais das safras agrícolas podem variar, afetando o teor de nutrientes do produto final.



Perturbações na Demanda

- Aumento súbito na demanda por um produto. Uma empresa que produz ventiladores pode ter uma demanda inesperadamente alta durante uma onda de calor, o que pode levar a problemas de abastecimento e atrasos na entrega.



Perturbações em Equipamentos

- Falha em uma bomba de líquido em um sistema de refrigeração industrial. Isso pode levar a flutuações na temperatura e prejudicar a eficiência de outros componentes do processo.



Perturbações de Processo

- Alteração na configuração das etapas de produção. Uma mudança nos parâmetros de controle em um processo químico pode levar a resultados indesejados e afetar a eficiência da produção. Ex: uma fábrica que fabrica diferentes sabores de yogurt.



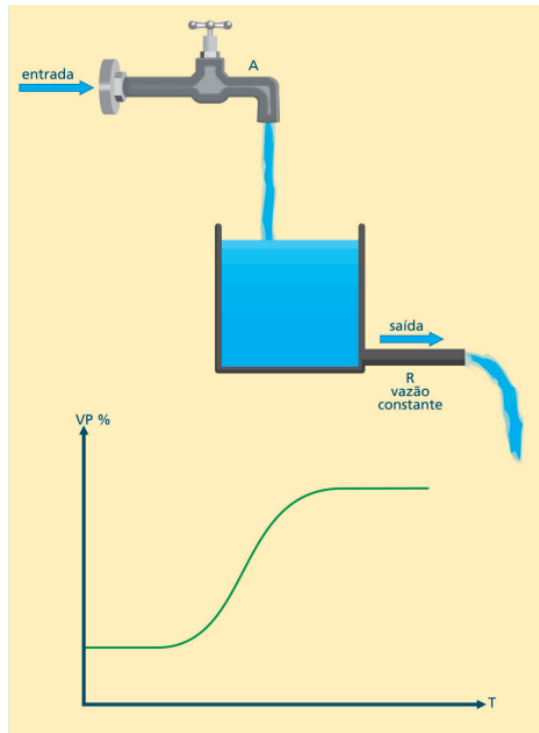
Instabilidade

- A instabilidade pode ocorrer devido a diversos fatores, como ganhos inadequados nos controladores, resposta inadequada a perturbações, atrasos excessivos nos tempos de resposta, comportamento não linear, acoplamento entre variáveis ou inadequação dos sistemas de controle utilizados.

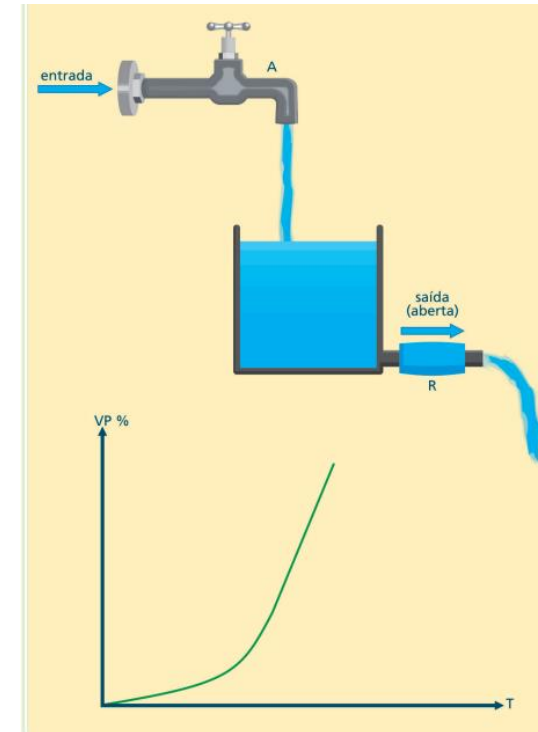


Instabilidade

- A instabilidade de um processo pode ser dada pela sua incapacidade de se autorregular.



Processo estável



Processo instável

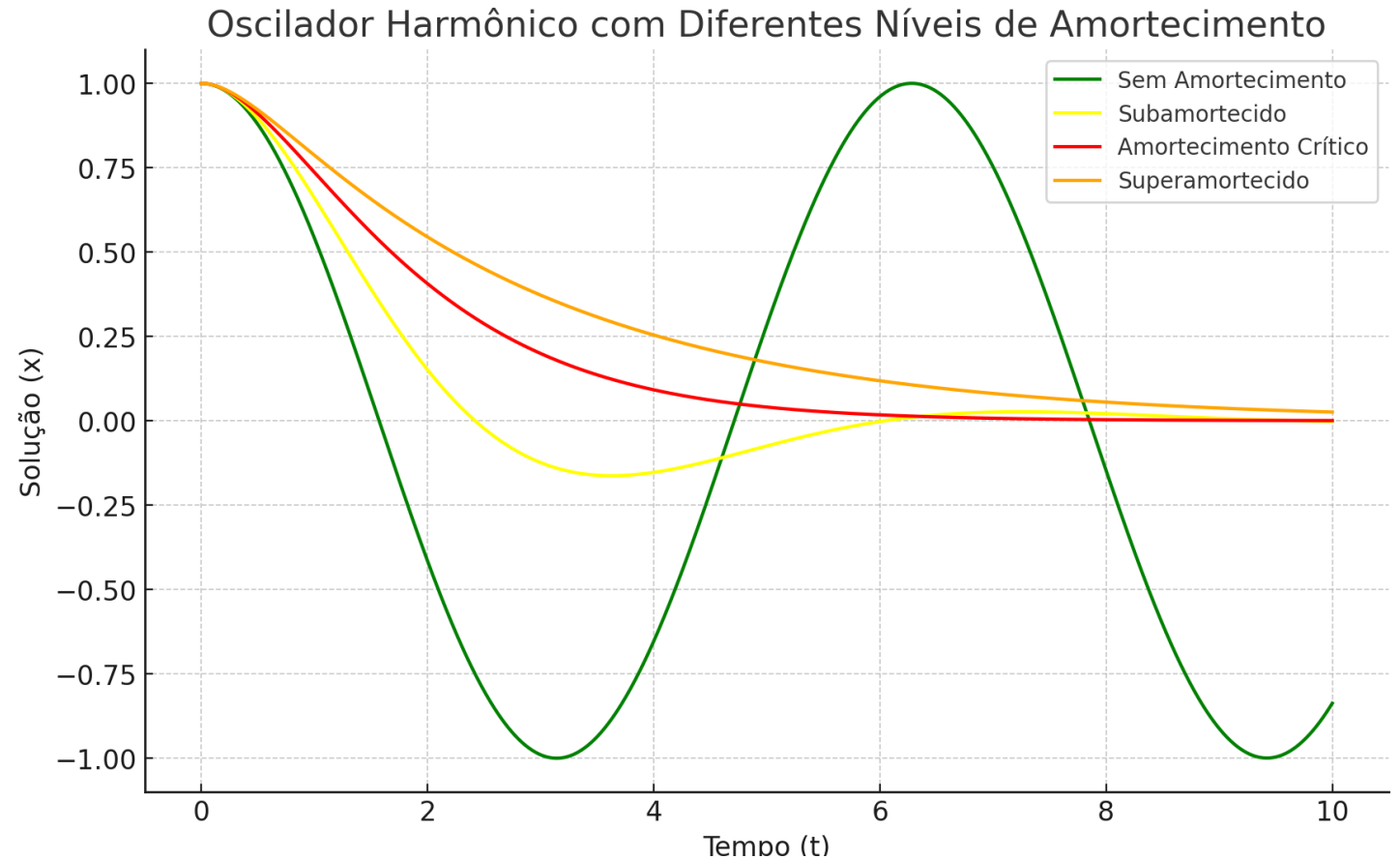
Instabilidade

- Vamos considerar um oscilador harmônico cuja equação diferencial é dada por:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\zeta\omega_n \frac{dx}{dt} + \omega_n^2 x = 0$$

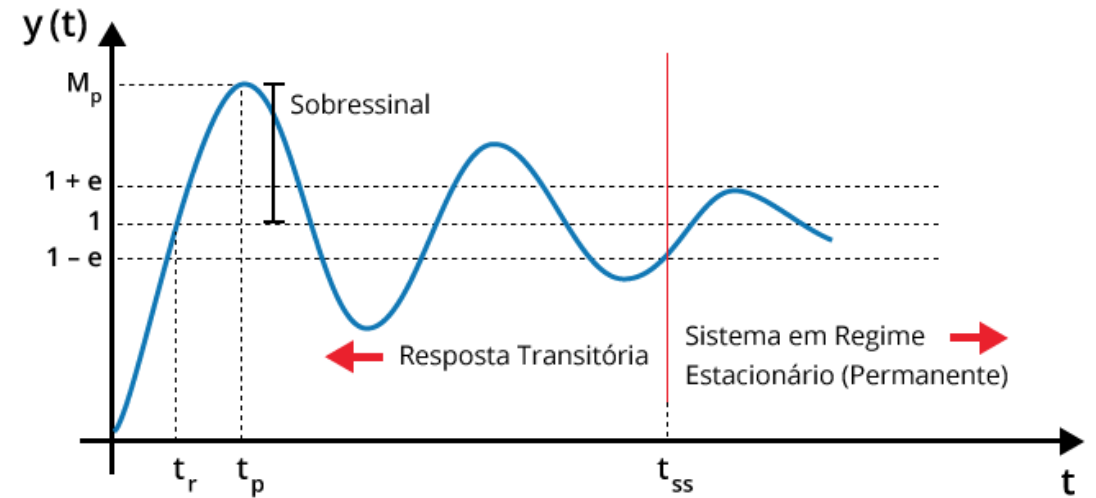
- Onde ω_n é a frequência natural não amortecida e ζ é a razão de amortecimento. De acordo com o valor de ζ , temos diferentes comportamentos:

1. $\zeta = 0$: sem amortecimento
2. $0 < \zeta < 1$: subamortecimento.
3. $\zeta = 1$: amortecimento crítico.
4. $\zeta > 1$: superamortecimento.



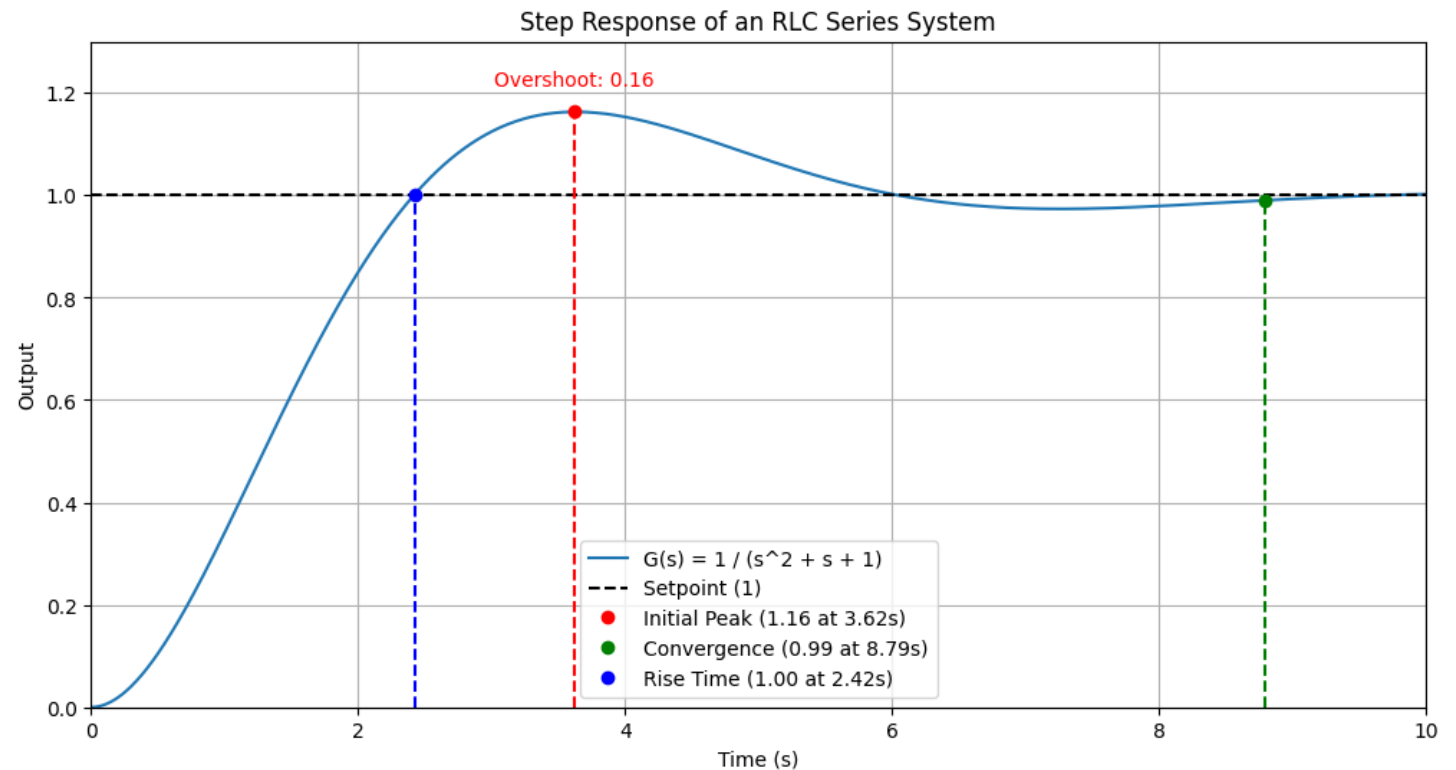
Resposta em Regime Transitório

- A resposta em regime transitório é a parte inicial da resposta do sistema que ocorre imediatamente após uma mudança na entrada e que dura até o sistema atingir um estado estável.
- Durante a fase transitória, o sistema está se ajustando à nova condição de entrada, e sua saída pode oscilar, aumentar ou diminuir até se estabilizar.



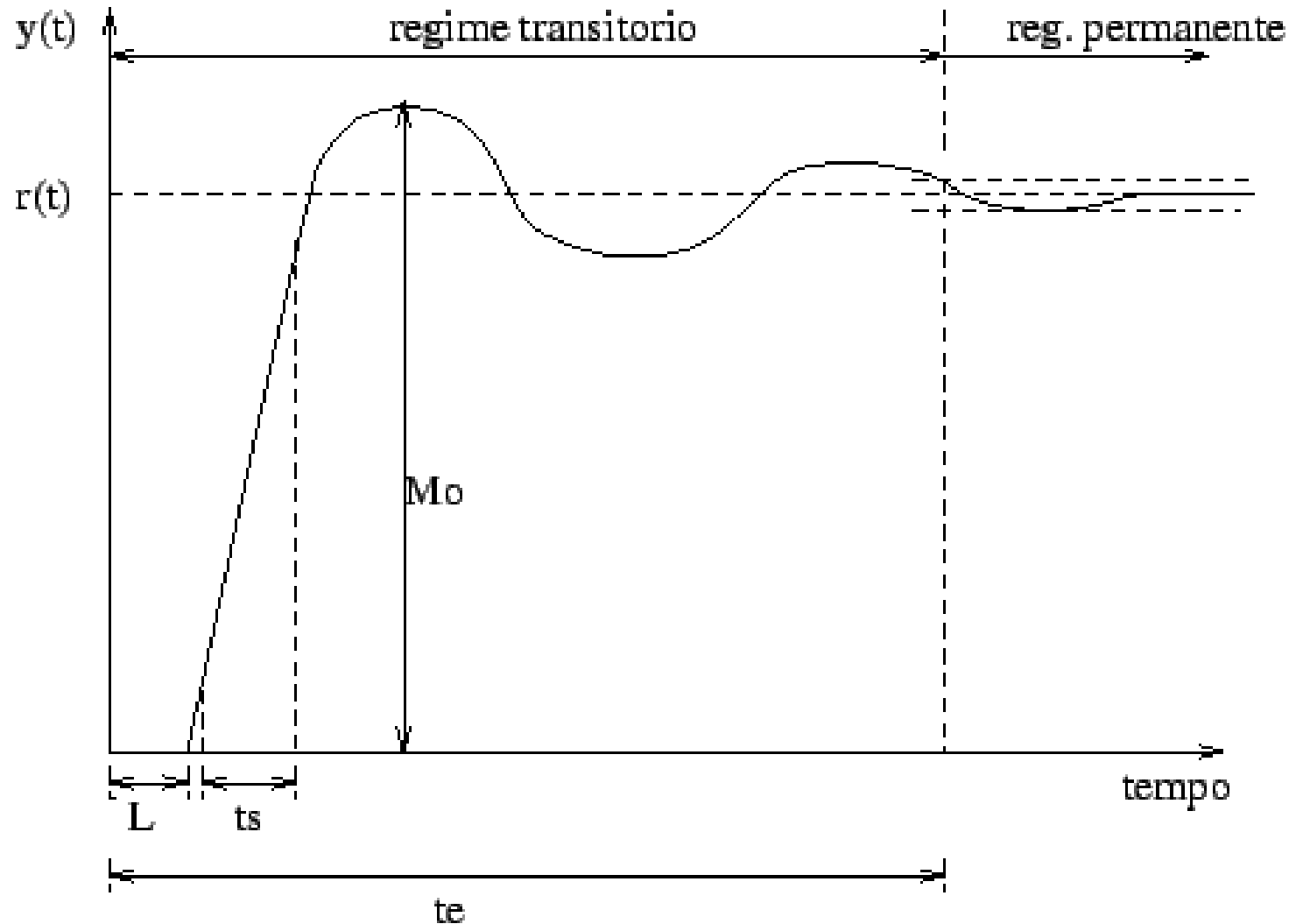
Características da Resposta em Regime Transitório

- **Oscilações:** Em sistemas subamortecidos, a resposta pode oscilar antes de se estabilizar.
- **Tempo de Subida:** tempo que leva para a resposta do sistema atingir o setpoint pela primeira vez.
- **Tempo de Acomodação (convergência):** O tempo necessário para a resposta permanecer dentro do erro de regime permanente.
- **Sobressinal (Pico inicial):** A quantidade pela qual a resposta excede o valor final desejado.
- **Amortecimento:** A redução gradual das oscilações na resposta transitória.



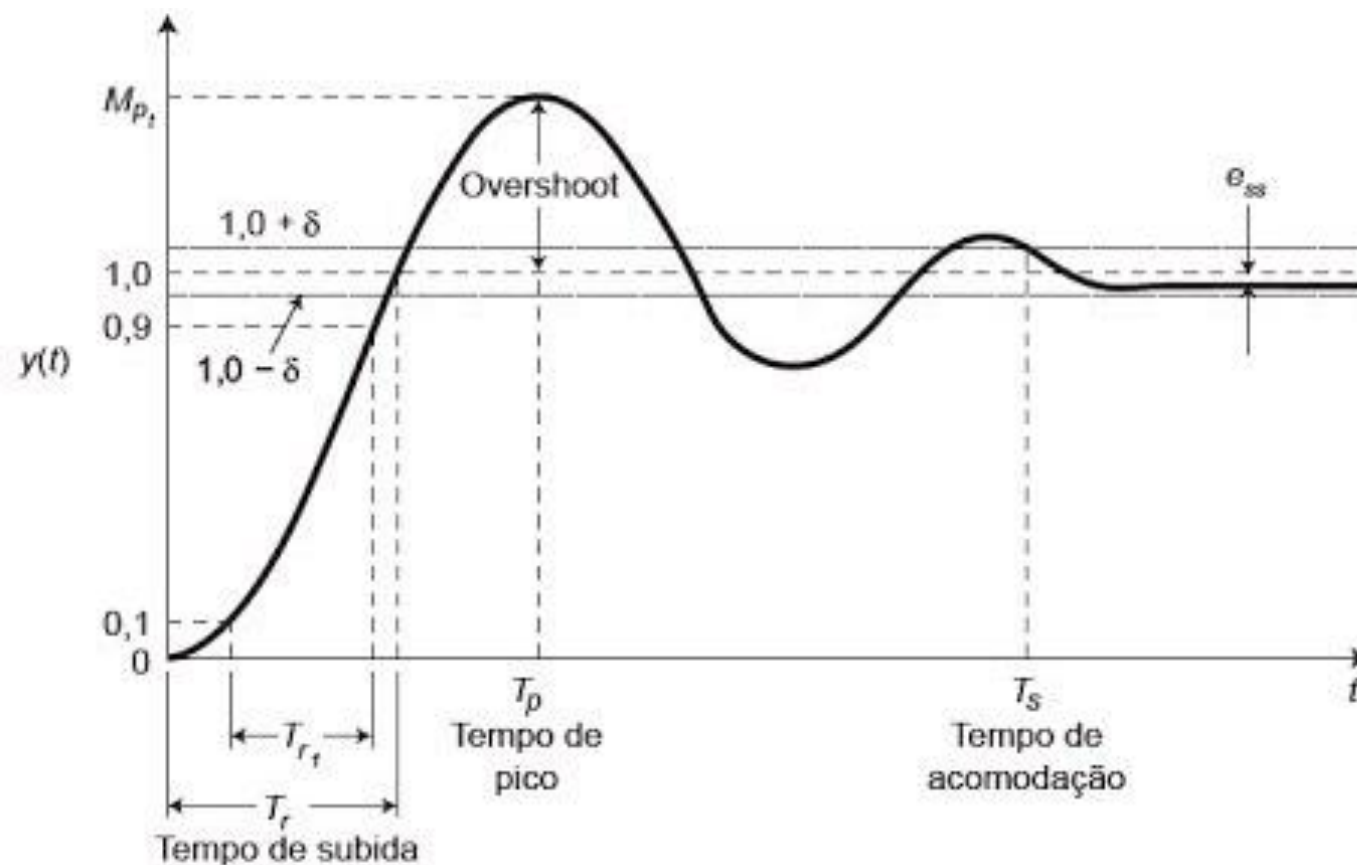
Resposta em Regime Permanente

- A resposta em regime permanente é a parte da resposta do sistema que permanece depois que a resposta em regime transitório terminou e o sistema atingiu um estado estável.
- Esta parte da resposta é a saída final do sistema, que deve permanecer constante ou variar de forma previsível sem oscilações significativas.



Características da Resposta em Regime Permanente

- **Valor de Estado Estacionário:** O valor final constante que a resposta alcança.
- **Erro em Regime Permanente (e_{ss}):** A diferença entre a saída final do sistema e o valor desejado da saída, que idealmente deve ser zero em sistemas bem projetados.
- **Estabilidade:** A capacidade do sistema de retornar ao estado estacionário após pequenas perturbações.



Conclusões

- Nesta aula, foram exploradas as Características Dinâmicas dos Processos Industriais, destacando como elas influenciam a saída dos processos industriais.
- Foram discutidos aspectos cruciais como a Natureza Multivariável, o Impacto dos Atrasos, a Ordem do Processo, o Comportamento Não Linear, a Dinâmica de Múltiplas Escalas Temporais, as Perturbações, a Instabilidade e as Respostas Transitória e Permanente.
- Ao compreender essas características dinâmicas, é possível analisar e projetar controles de processos industriais de forma mais eficaz.
- Cada um desses elementos desempenha um papel vital no comportamento do sistema, afetando diretamente as estratégias de controle e otimização.
- Com esse conhecimento, os profissionais estão mais bem preparados para enfrentar os desafios no design e na operação de sistemas de controle industrial.

DÚVIDAS?

Exercícios

- Para se familiarizar com o Google Colab, [acesse o código](#) utilizado na aula de hoje para plotar gráficos de sistemas de primeira e segunda ordem.
- Utilize este código como base para alterar as variáveis dos processos em suas respectivas funções de transferência.
- Observe como essas mudanças afetam os gráficos, permitindo uma melhor compreensão do impacto das variáveis nos comportamentos dos sistemas de primeira e segunda ordem.