# **Capítulo 5: O Desempenho de Sistemas de Controle com Realimentação**

## **1. Resumo Estruturado e Análise Aprofundada**

O Capítulo 5 move a análise de controle de uma perspectiva puramente estrutural (Cap. 4: *Por que usar a realimentação?*) para uma perspectiva quantitativa e de projeto (*Quão bem a realimentação funciona?*).

### **1.1. Especificações de Desempenho no Domínio do Tempo**

O controle é um sistema dinâmico, e seu desempenho é definido em termos de **resposta transitória** e **regime estacionário**.  
As métricas são geralmente avaliadas para uma **entrada em degrau**, por ser simples e representativa.

#### **Destaques da Resposta Transitória (Medidas de Velocidade e Oscilação):**

* **Tempo de Subida (Tr):** Mede a velocidade de resposta (0–100% ou 10–90% do valor final).
* **Instante de Pico (Tp):** Tempo até o primeiro pico da resposta.
* **Máxima Ultrapassagem Percentual (M.U.P.):** Mede a natureza oscilatória e a estabilidade relativa do sistema.

M.U.P.=100e−ζπ1−ζ2M.U.P.=100e1−ζ2​−ζπ​

* **Tempo de Acomodação (Ts):** Tempo para a resposta permanecer dentro de uma faixa de ±2% do valor final.

T\_s = \frac{4}{\zeta \omega\_n} \quad \text{(Critério de 2%)}

* **Observação:** O valor é determinado pela **constante de tempo** das raízes dominantes.

**Ponto-Chave:** O projeto de controle envolve compromisso: aumentar a velocidade de resposta (ωₙ alto ou ζ baixo) aumenta a M.U.P.  
Um bom ponto de equilíbrio é:

ζ≈0.707(M.U.P.≈4.3%)ζ≈0.707(M.U.P.≈4.3%)

### **1.2. O Significado Geométrico dos Polos (Plano-s)**

O capítulo correlaciona as **especificações de desempenho** com a **posição dos polos dominantes** no plano-s.

* **Eixo Real (σ):** O decaimento da resposta é determinado pela parte real do polo (−ζωₙ).  
  Quanto mais à esquerda, mais rápida é a resposta.

Ts∝1σTs​∝σ1​

* **Eixo Imaginário (jω):** A frequência de oscilação amortecida é:

ωd=ωn1−ζ2ωd​=ωn​1−ζ2​

* **Ângulo e Amortecimento:** O fator de amortecimento (ζ) é o **cosseno do ângulo** entre o polo e o eixo imaginário.  
  Assim, especificar a M.U.P. equivale a definir uma **região angular** no plano-s.

### **1.3. Erro em Regime Estacionário e Tipo de Sistema**

O **erro em regime estacionário (e\_{ss})** mede a **exatidão** do sistema.  
Ele depende do **Tipo Numérico (N)** — o número de integrações (polos em s = 0) na função de malha aberta:

L(s)=Gc(s) G(s)L(s)=Gc​(s)G(s)

#### **Constantes e Erros Típicos**

| **Entrada de Teste** | **R(s)** | **Constante de Erro** | **Tipo 0 (N=0)** | **Tipo 1 (N=1)** | **Tipo 2 (N=2)** |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Degrau (A)** | AssA​ | Kp=lim⁡s→0L(s)Kp​=lims→0​L(s) | ess=A1+Kpess​=1+Kp​A​ | ess=0ess​=0 | ess=0ess​=0 |
| **Rampa (At)** | As2s2A​ | Kv=lim⁡s→0sL(s)Kv​=lims→0​sL(s) | ess=∞ess​=∞ | ess=AKvess​=Kv​A​ | ess=0ess​=0 |
| **Parábola (At²/2)** | As3s3A​ | Ka=lim⁡s→0s2L(s)Ka​=lims→0​s2L(s) | ess=∞ess​=∞ | ess=∞ess​=∞ | ess=AKaess​=Ka​A​ |

**Ponto-Chave:** Para eliminar o erro em regime estacionário, o controlador deve ter **número suficiente de integradores**.  
Exemplo: Para rastrear uma rampa com erro finito, o sistema deve ser **pelo menos Tipo 1**.

### **1.4. Índices de Desempenho e Controle Ótimo**

O projeto de controle moderno quantifica o desempenho via **índices de desempenho (performance indices)**, usados para determinar o **controle ótimo**.

* **Integral do Erro Quadrático (ISE):**

ISE=∫0Te2(t) dtISE=∫0T​e2(t)dt

* **Integral do Tempo Multiplicado pelo Erro Absoluto (ITAE):**

ITAE=∫0Tt ∣e(t)∣ dtITAE=∫0T​t∣e(t)∣dt

**Ponto-Chave:** O índice escolhido afeta o comportamento “ótimo”.  
Exemplo: minimizar o ITAE favorece **respostas rápidas e suaves**, enquanto o ISE reduz **erros grandes**.

## **2. Conexão com Aplicações Industriais 4.0**

| **Conceito do Cap. 5** | **Tecnologia I4.0 Relacionada** | **Conexão / Aplicação Prática** |
| --- | --- | --- |
| **M.U.P. e Ts** | *Digital Twin / Simulação de Comissionamento* | Garante que os controladores (PID/MPC) atinjam as especificações antes da implantação. A simulação da resposta ao degrau define o desempenho transiente ideal. |
| **eₛₛ e Tipo de Sistema** | *MES (Manufacturing Execution System) / Qualidade* | Um sistema de Tipo 1 (ou superior) garante erro estacionário nulo — essencial para manter a qualidade (temperatura, espessura, mistura). |
| **Índices ITAE / ISE** | *APC (Advanced Process Control) / Otimização* | Controladores MPC usam funções de custo baseadas nesses índices, otimizando desempenho e economia de recursos. |
| **Polos Dominantes** | *Diagnóstico e Análise Preditiva (IIoT)* | O monitoramento da posição dos polos permite prever falhas: polos próximos ao eixo *jω* indicam perda de amortecimento. |