# Capítulo 6 – A Estabilidade de Sistemas Lineares com Realimentação

#### **1. Introdução**

A estabilidade é um dos conceitos mais críticos em Controle e Automação. Ela determina se um sistema permanecerá em equilíbrio após uma perturbação. Um sistema instável pode levar a danos, falhas e riscos em ambientes industriais automatizados.  
 Por isso, o estudo da estabilidade é essencial tanto na teoria quanto na prática — desde um simples sistema de motor DC até complexas malhas de controle de processos químicos.

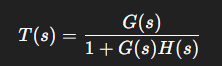
#### **2. Conceito de Estabilidade**

Um sistema linear e invariante no tempo (LTI) é **estável no sentido BIBO** (Bounded Input, Bounded Output) se, para qualquer entrada limitada, a saída permanecer limitada.

No domínio de Laplace, a estabilidade depende da localização dos **polos** da função de transferência:

* Polos com parte real negativa → sistema **estável**.
* Polos com parte real positiva → sistema **instável**.
* Polos sobre o eixo imaginário → sistema **marginalmente estável**.

Matematicamente, um sistema de malha fechada é descrito por:



A estabilidade depende da equação característica:



#### **3. Critério de Routh–Hurwitz**

Esse critério permite verificar a estabilidade **sem calcular as raízes**.  
 A partir dos coeficientes do polinômio característico, constrói-se a **Tabela de Routh**, cuja primeira coluna indica quantos polos estão no semiplano direito.

Se todos os elementos da primeira coluna forem positivos, o sistema é estável.  
 O número de mudanças de sinal na primeira coluna indica o número de polos instáveis.

Exemplo:



A estabilidade depende de K. A análise de Routh mostra que o sistema é estável para 0 < K < 8.

#### **4. Estabilidade Relativa e Espaço de Estado**

Mesmo sistemas estáveis podem apresentar oscilações.  
 A **estabilidade relativa** mede o quão “seguro” o sistema é em relação ao eixo imaginário.

No espaço de estado:



A estabilidade depende dos **autovalores da matriz A** — todos devem ter parte real negativa.

#### **5. Aplicações Industriais**

Na Indústria 4.0, estabilidade equivale a **confiabilidade**.  
 Sistemas de controle distribuído (DCS) e sistemas instrumentados de segurança (SIS) precisam garantir que seus controladores permaneçam estáveis sob perturbações.

Exemplos:

* **Motocicleta robô**: ganhos Kp e Kd ajustados para garantir equilíbrio.
* **Veículo com esteiras**: ganho proporcional K ajustado por Routh para resposta sem overshoot excessivo.
* **Atuador de disco rígido**: requer controle de estabilidade marginal com realimentação adicional.
* **Processos industriais (APC e RTO)**: usam preditores de estabilidade e análise de polos para manter eficiência e segurança.

#### **6. Conexão com a Indústria 4.0**

Na Indústria 4.0, estabilidade se conecta com:

* **APC (Advanced Process Control)**: garante controle ótimo sob restrições.
* **RTO (Real-Time Optimization)**: depende de estabilidade numérica.
* **IIoT e Digital Twin**: permitem simulações de estabilidade em tempo real.
* **Machine Learning em controle**: estabilidade é usada como métrica de treinamento de redes neurais de controle adaptativo.

#### **7. Conclusão**

Estabilidade é o “alicerce” da automação moderna.

Antes de projetar desempenho, robustez ou otimização, é essencial garantir que o sistema seja **estável**.

O estudo de Routh–Hurwitz, espaço de estado e variações de parâmetros fornece ferramentas para projetar sistemas confiáveis em qualquer aplicação industrial.