



Técnicas Avançadas de Controle

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 os Conceitos de Controle Avançado:** Introduzir as principais técnicas de controle avançado, como *feedforward*, cascata, controle preditivo baseado em modelos (MPC) e a aplicação de inteligência artificial no controle.
- **Analisar a Integração com o Controle PID:** Explorar como *feedforward* e cascata podem ser combinados com controladores PID para melhorar o desempenho, com foco em resposta mais rápida, menor *overshoot* e melhor rejeição a distúrbios.
- **Desenvolver Modelos no Simulink:** Introduzir a modelagem das técnicas de controle *feedforward* e cascata no Simulink, permitindo sejam testadas essas abordagens em um ambiente de simulação.
- **Aplicar Técnicas em Implementações Reais:** Discutir como implementar as técnicas *feedforward* e cascata em microcontroladores como o Arduino UNO, considerando as limitações de hardware e a necessidade de simplificações práticas (???)

Índice

- Introdução
- Feedforward
- Cascata
- Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC – *Model Predictive Control*)
- Inteligência Artificial
- Conclusões
- Exercícios

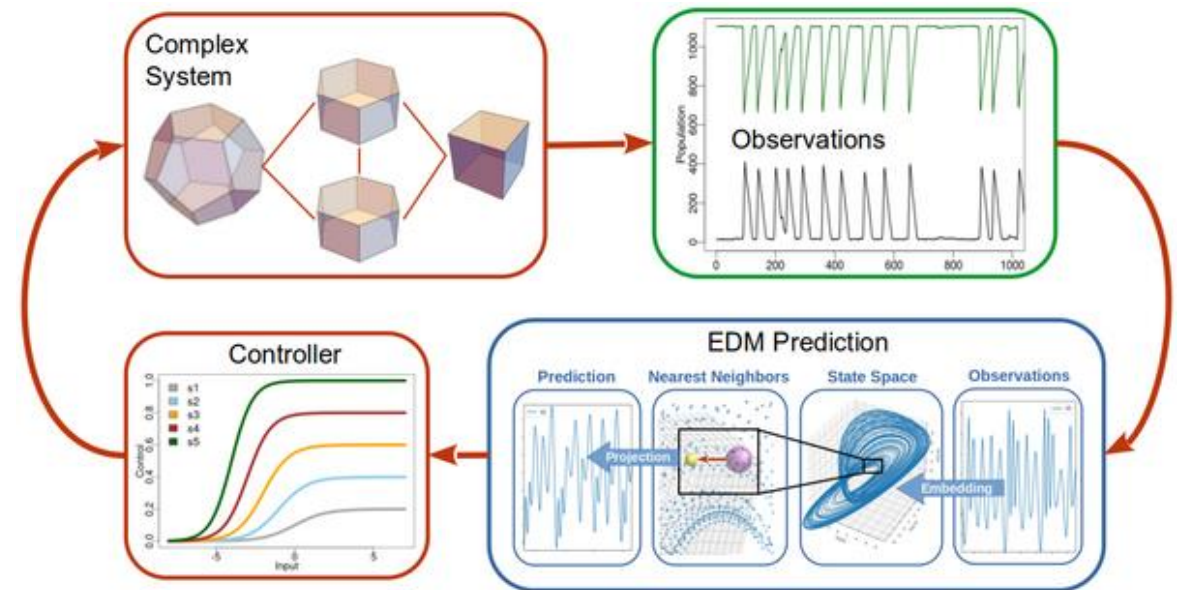
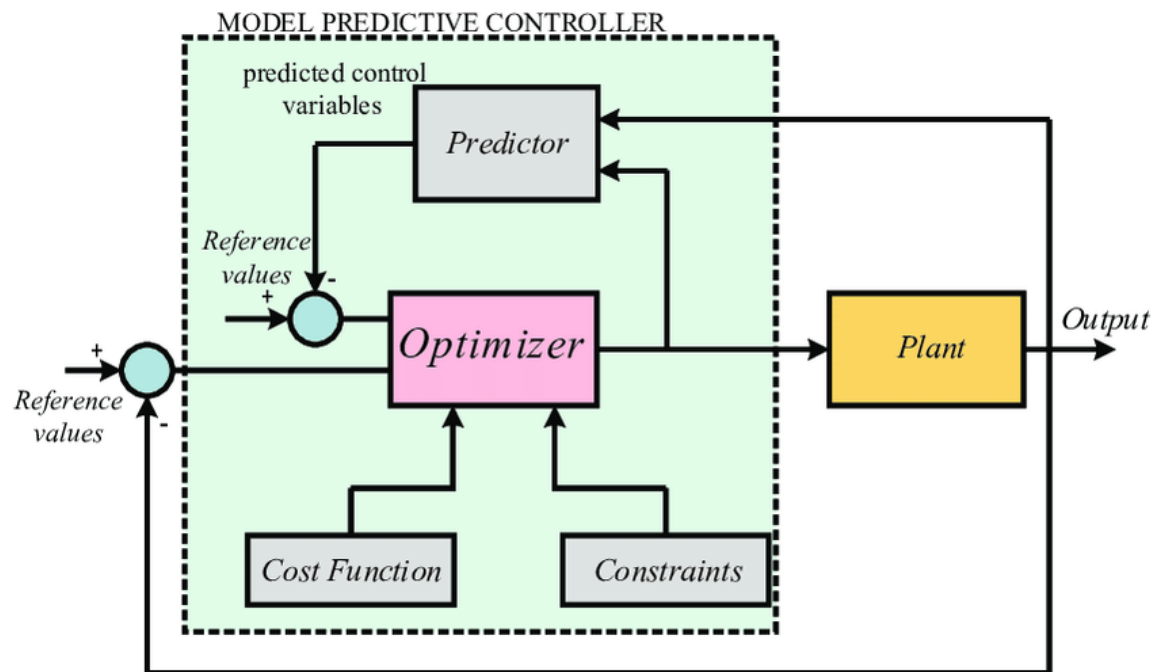
Introdução

- Os sistemas industriais enfrentam desafios cada vez mais complexos e exigem soluções de controle que vão além dos métodos tradicionais, como os controladores PID.
- As técnicas avançadas de controle surgem para lidar com processos que envolvem **dinâmicas mais complexas, variáveis múltiplas, interações entre subsistemas** e a necessidade de respostas rápidas e precisas a **distúrbios e variações no ambiente**.



O que são Técnicas Avançadas de Controle?

- Referem-se a métodos que utilizam estratégias sofisticadas para alcançar um desempenho superior, garantindo maior **estabilidade**, **precisão** e **robustez** em relação aos controladores convencionais.
- Essas técnicas permitem lidar com incertezas do sistema, compensar distúrbios de forma proativa e adaptar-se a mudanças nas condições de operação.



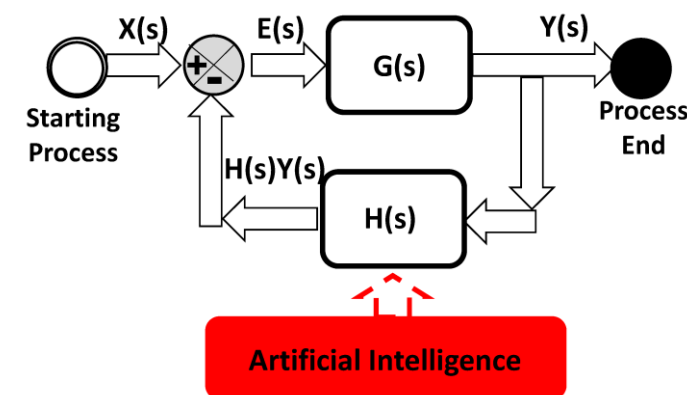
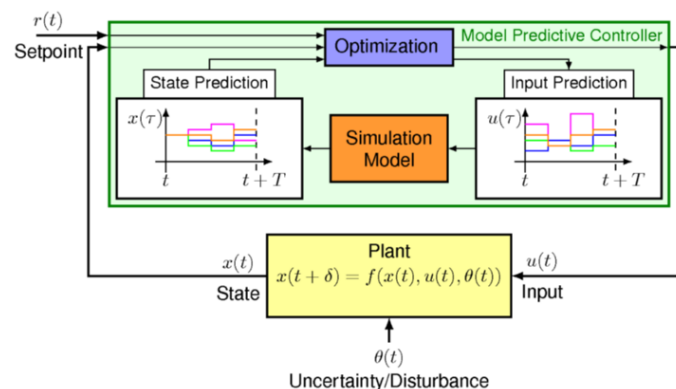
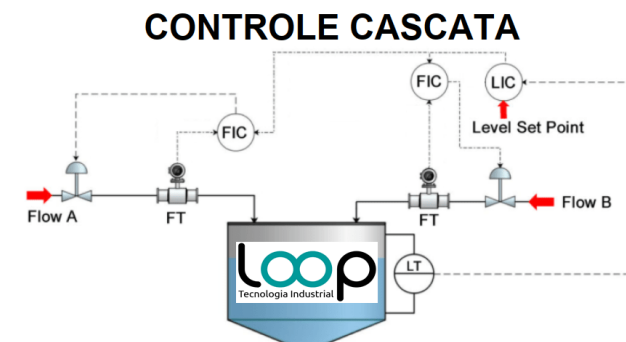
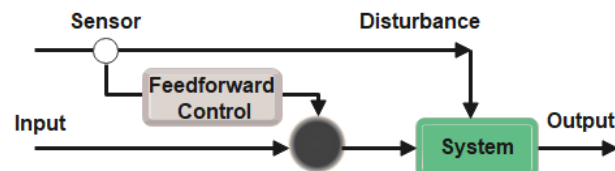
Por que Precisamos de Técnicas Avançadas?

- Os controladores PID convencionais podem não ser suficientes para obter um desempenho ideal em situações que envolvem:
- **Sistemas com Dinâmica Complexa:** processos que apresentam múltiplas variáveis de controle inter-relacionadas, não linearidades ou respostas dinâmicas complexas.
- **Necessidade de Resposta Rápida a Distúrbios:** é necessário antecipar ou compensar rapidamente distúrbios antes que eles afetem o processo.
- **Ambientes em Mudança:** processos onde as condições operacionais mudam com frequência, exigindo que o sistema de controle se adapte rapidamente.



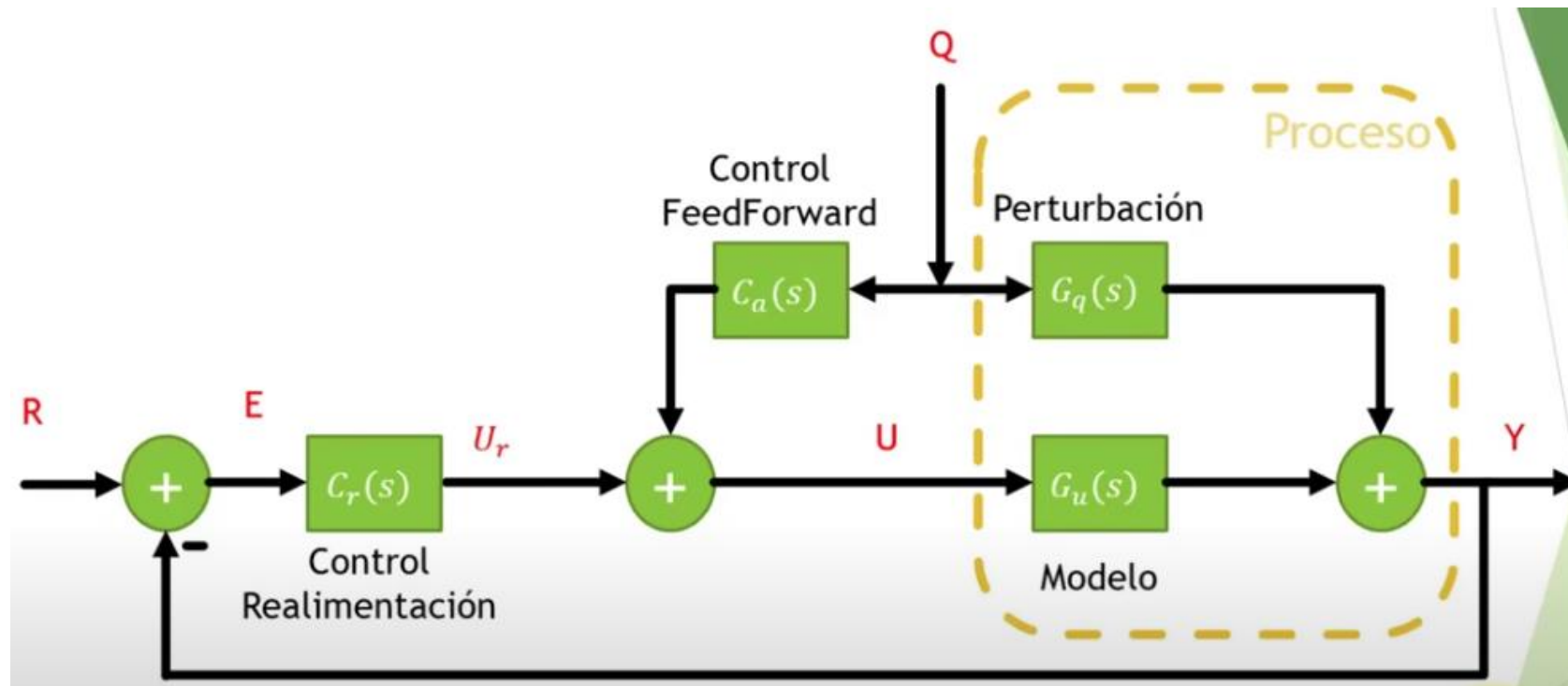
Principais Técnicas Avançadas de Controle

- **Controle Feedforward (Antecipatório):** atua proativamente para compensar distúrbios conhecidos antes que eles impactem a variável controlada.
- **Controle em Cascata:** utiliza múltiplos laços de controle, garantindo maior precisão em sistemas com variáveis interligadas.
- **Controle Preditivo (Model Predictive Control - MPC):** utiliza um modelo do processo para prever o comportamento futuro do sistema e calcular as ações de controle de forma otimizada.
- **Inteligência Artificial:** utilizam algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais para identificar padrões complexos no sistema, oferecendo soluções adaptativas para controle em tempo real.



Controle Feedforward (Antecipatório)

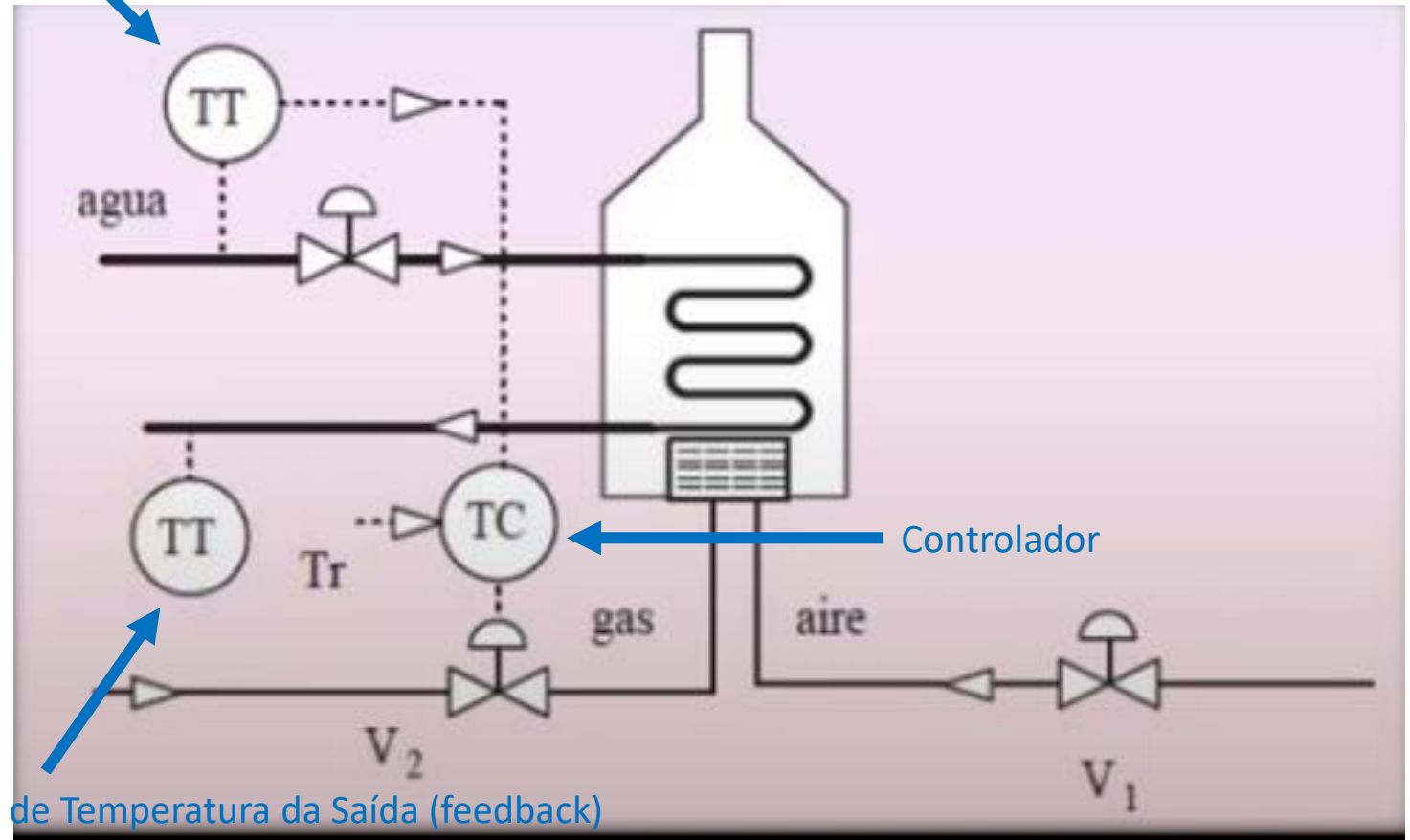
- O princípio do controle ***feedforward*** é medir ou estimar um distúrbio que afeta o sistema antes que ele cause um impacto na variável controlada.
- Com base nesse distúrbio, o controlador ajusta o sinal de controle antes que o erro ocorra, minimizando a necessidade de ajustes corretivos.



Exemplo – Aquecimento de um Tanque de Água

- O sistema de aquecimento mantém a temperatura da água em 60°C, mas a temperatura da água de entrada varia ao longo do dia.
- No controle **feedback**, há atraso na correção, pois a ação só ocorre após detectar a mudança na saída.
- O controle **feedforward** ajusta a potência antecipadamente, medindo a temperatura da água de entrada para manter a estabilidade.

Sensor de Temperatura da Entrada (feedforward)

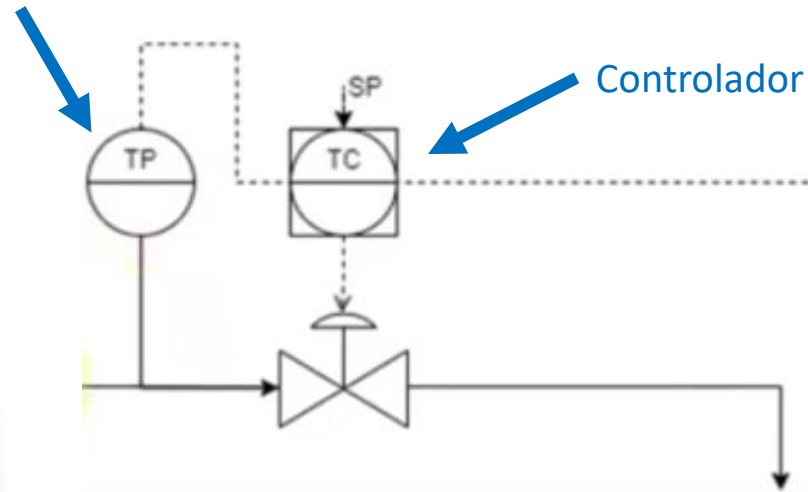


Sensor de Temperatura da Saída (feedback)

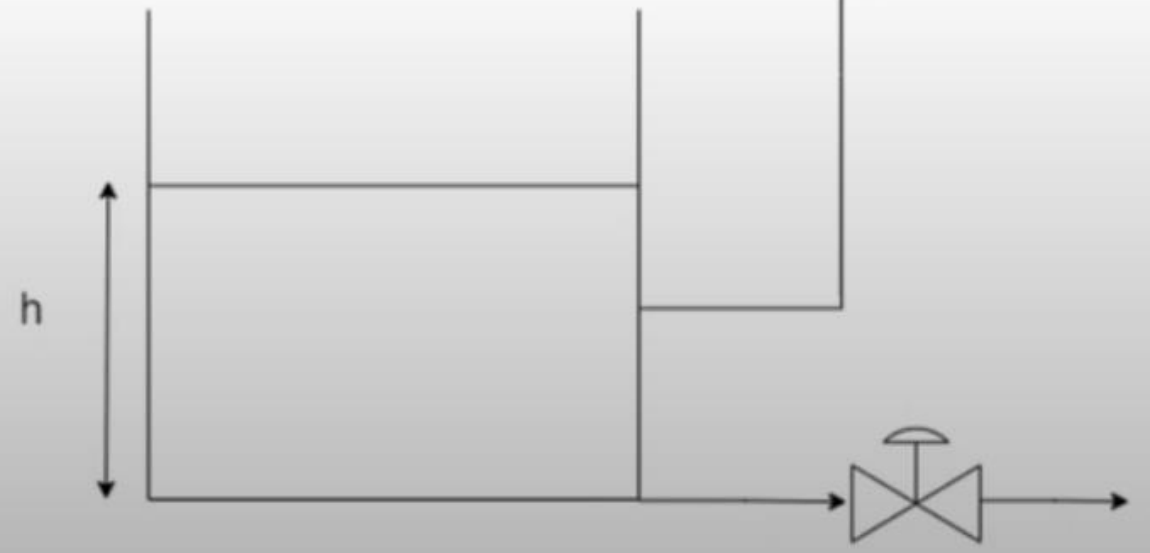
Exemplo – Controle de Nível de Tanque

- O sistema de controle mantém o nível de água de um tanque em uma altura desejada, mas a pressão da entrada de água varia.
- No controle **feedback**, há atraso na correção, pois a ação só ocorre após detectar a variação no nível do tanque.
- O controle **feedforward** ajusta a vazão antecipadamente, medindo a pressão de entrada para manter o nível estável.

Sensor de Pressão de Água (feedforward)

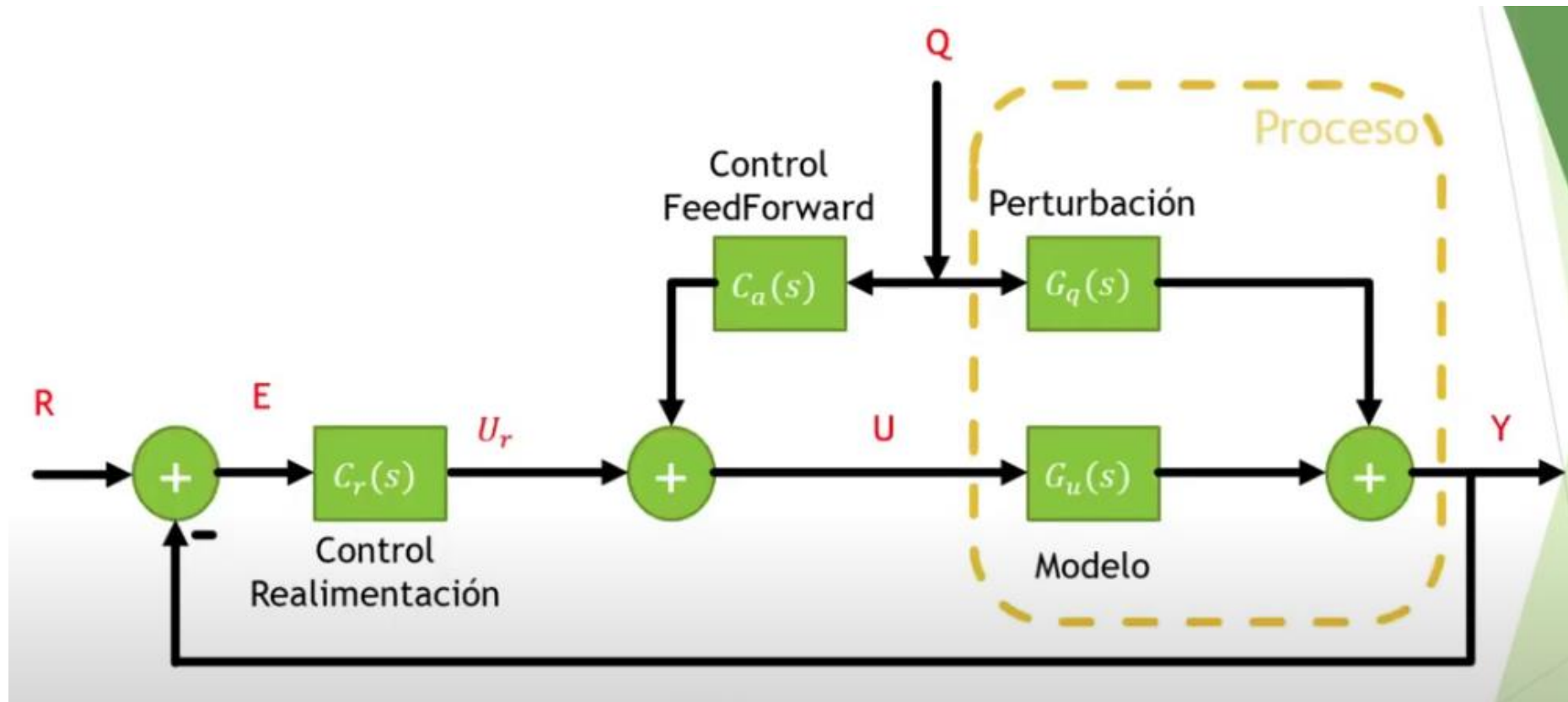


Sensor de Nível de Tanque (feedback)



Controle Feedforward

- No controle *feedforward*, deve-se conhecer o modelo matemático da Perturbação ($G_q(s)$) e do Processo ($G_u(s)$), dessa forma é possível achar o controlador do *feedforward* ($C_a(s)$).
- O controlador do *feedback* ($C_r(s)$) pode ser um controlador PID.



Controlador Feedforward

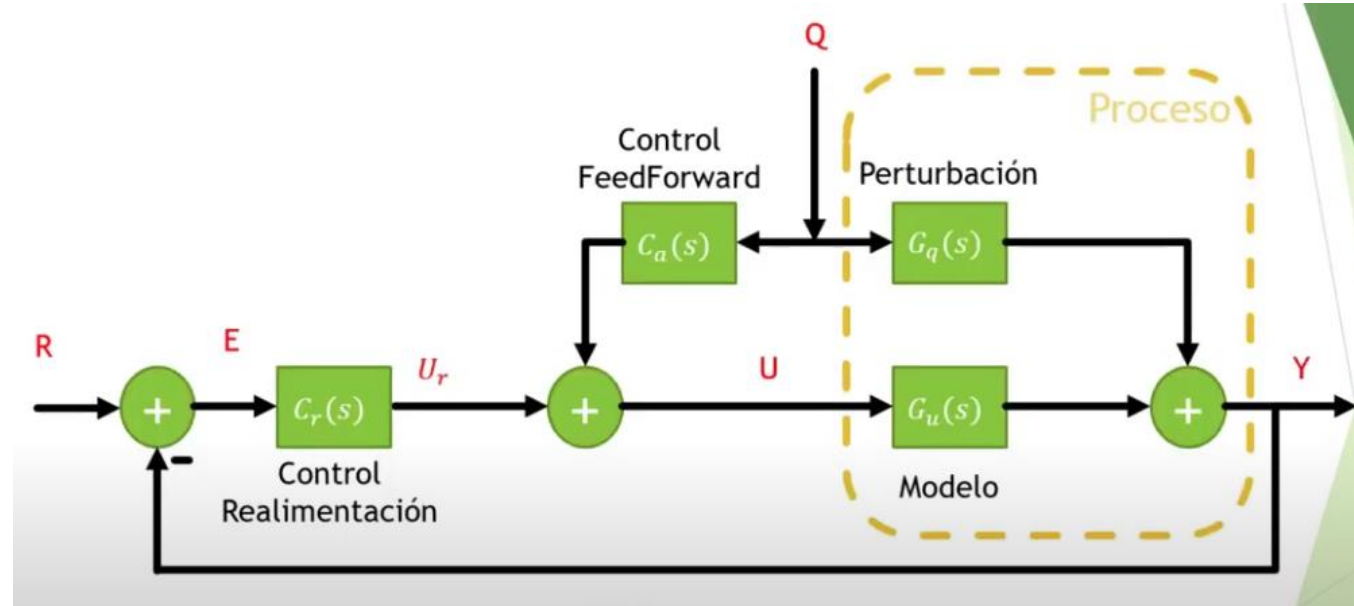
- O controlador do Feedforward ($C_a(S)$) pode ser **estático** ou **dinâmico**.
- No **controlador estático** é considerado apenas as constantes do Processo e da Perturbação, então:

$$C_a(S) = -\frac{K_q}{K_u}$$

- No **controlador dinâmico**, considera-se também as constantes de tempo :

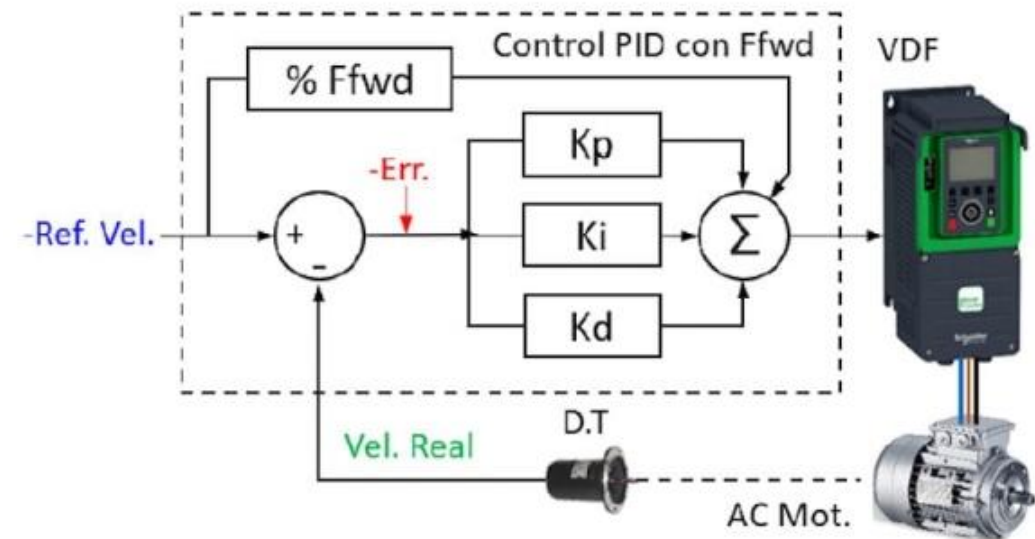
$$C_a(S) = -\frac{K_q (\tau_u s + 1)}{K_u (\tau_q + 1)}$$

- Caso o modelo do Processo e da Perturbação não sejam de primeira ordem, podem ser aproximados para um de primeira ordem.



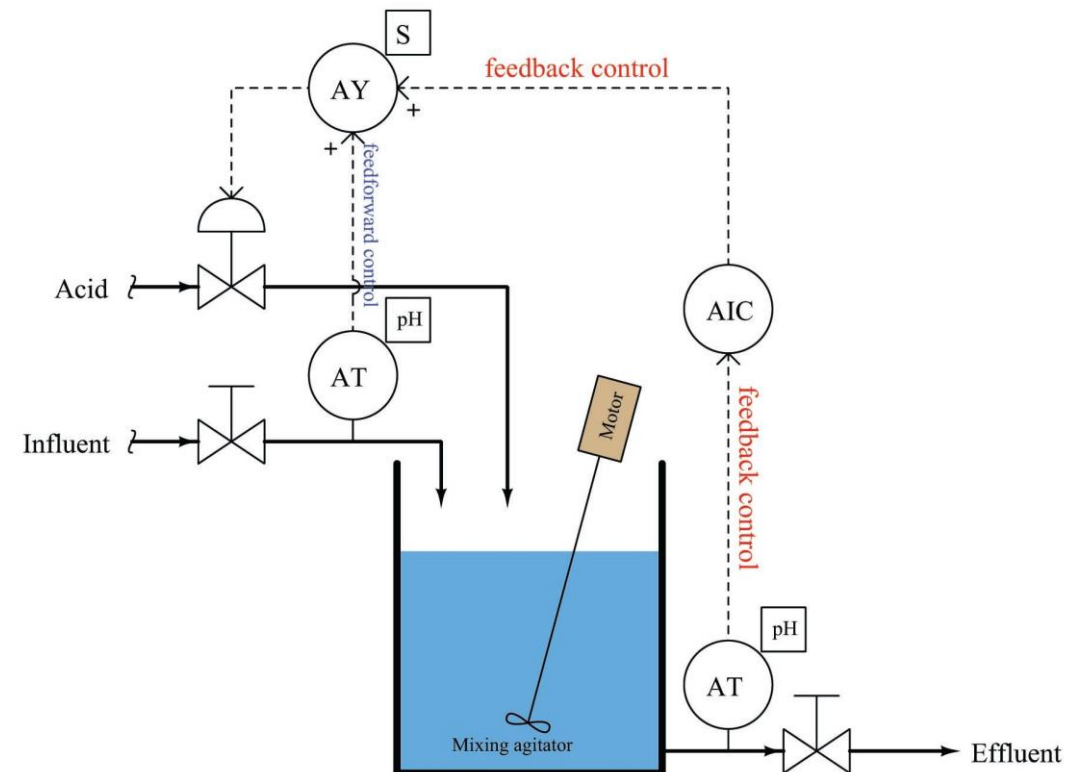
Vantagens do Controle *FeedForward*

- **Correção rápida de distúrbios:**
Antecipação de ações antes que os distúrbios afetem a variável controlada.
- **Simple de implementar:** quando o distúrbio é conhecido e medido, a implementação é direta.
- **Complementa o controle *feedback*:**
Funciona bem em conjunto com o *feedback*, corrigindo distúrbios antes que eles causem erros.



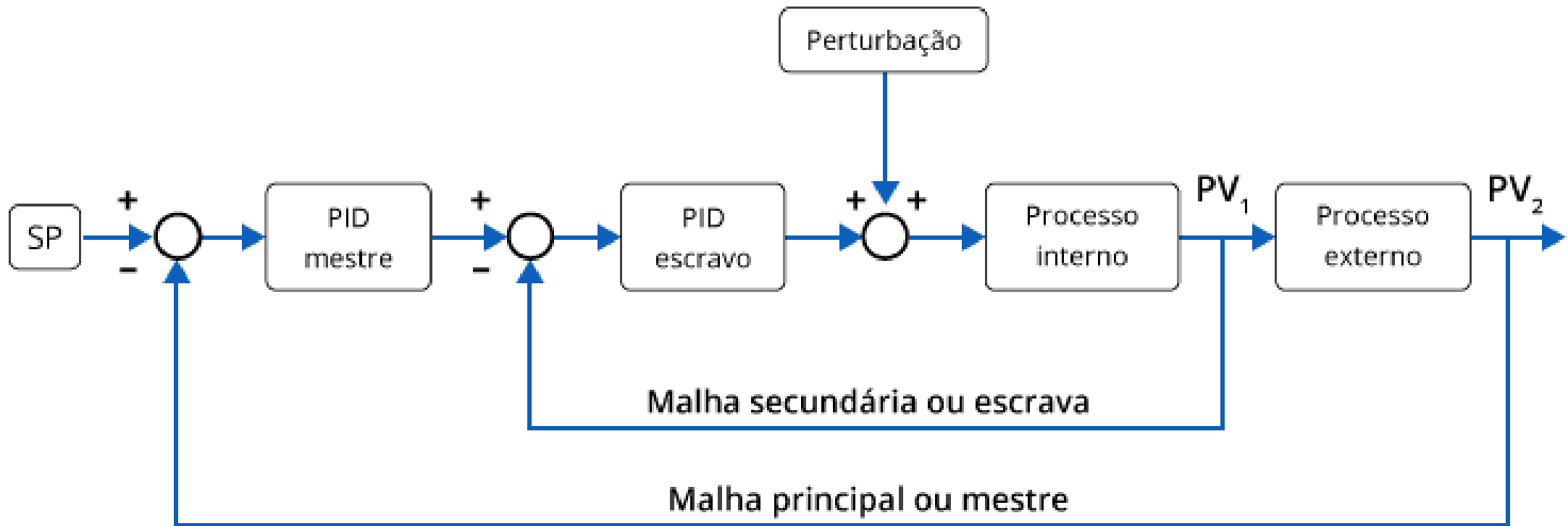
Desvantagens do Controle Feedforward

- **Necessidade de um modelo preciso:**
Depende de um bom entendimento da relação entre o distúrbio e a saída.
- **Limitado a distúrbios conhecidos:**
Ineficaz para distúrbios não medidos ou imprevisíveis.
- **Não lida com erros de modelagem:** Se o modelo estiver incorreto, o controle *feedforward* pode causar desvios.



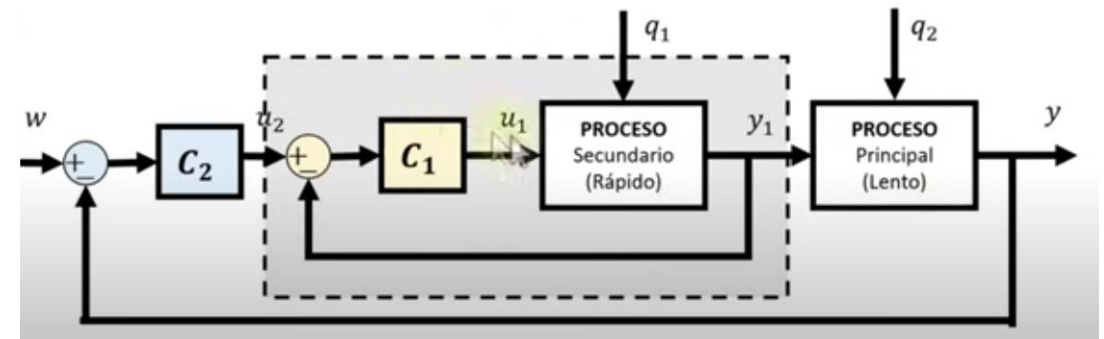
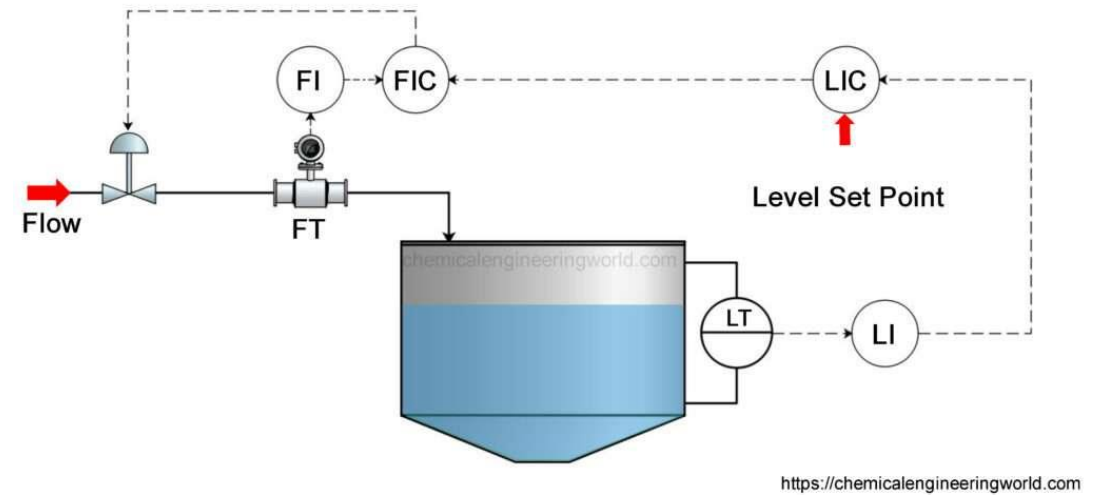
Controle em Cascata

- O **controle em cascata** é uma técnica avançada de controle onde dois ou mais controladores são utilizados em um arranjo hierárquico, organizados em uma estrutura de laços internos e externos.
- Esse método é eficaz para melhorar a resposta do sistema e lidar com variáveis intermediárias que influenciam a qualidade do controle de um processo.



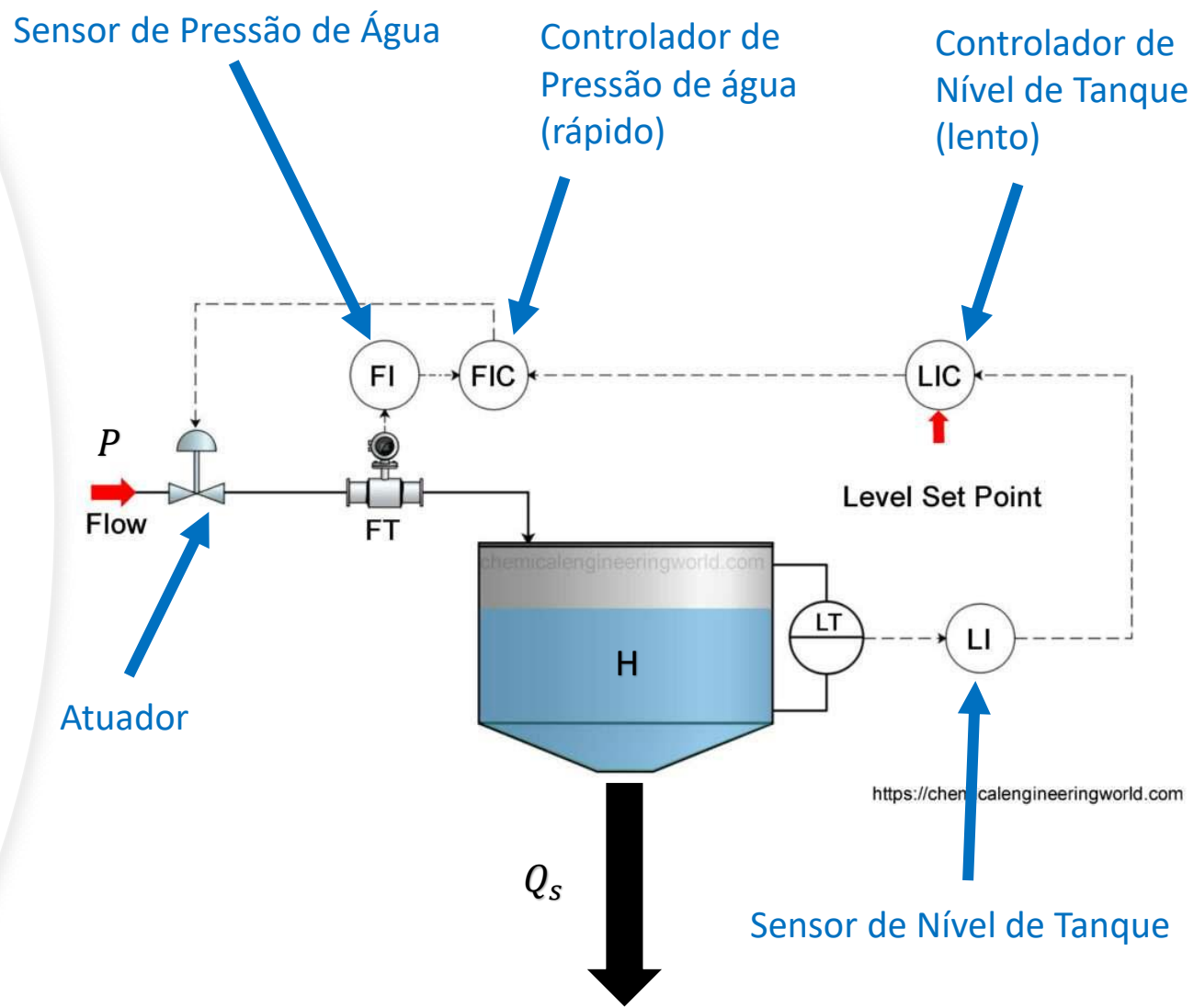
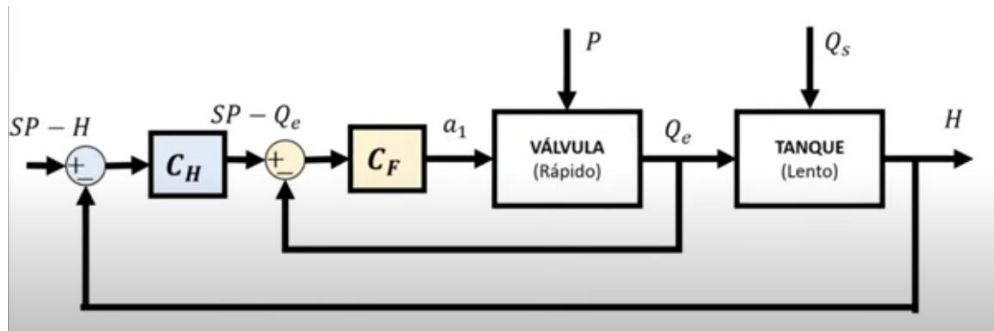
Como Funciona o Controle em Cascata?

- No controle em cascata, temos:
 - **Controlador Primário (Mestre):** Responsável por controlar a variável principal do processo. Este controlador tem uma dinâmica mais lenta, pois atua sobre a variável final que responde de forma mais gradual às mudanças.
 - **Controlador Secundário (Escravo):** Controla uma variável intermediária que influencia diretamente a variável principal. Esta malha é mais rápida, respondendo prontamente a mudanças para estabilizar o sistema antes que afetem a variável principal.



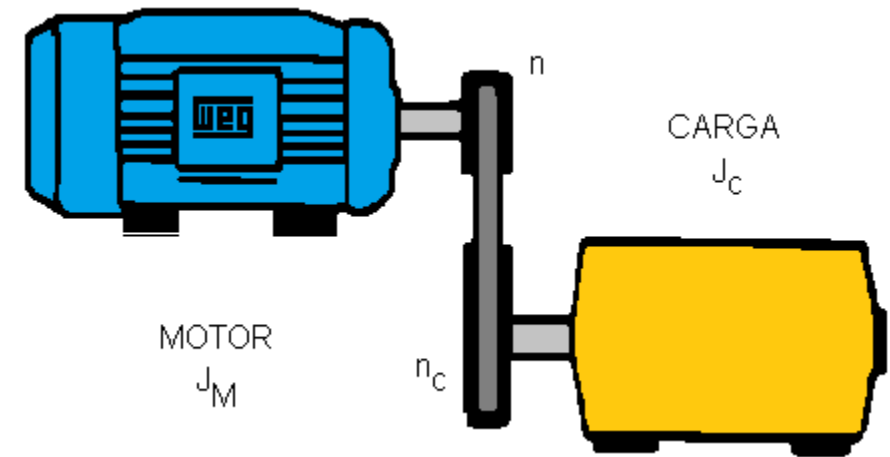
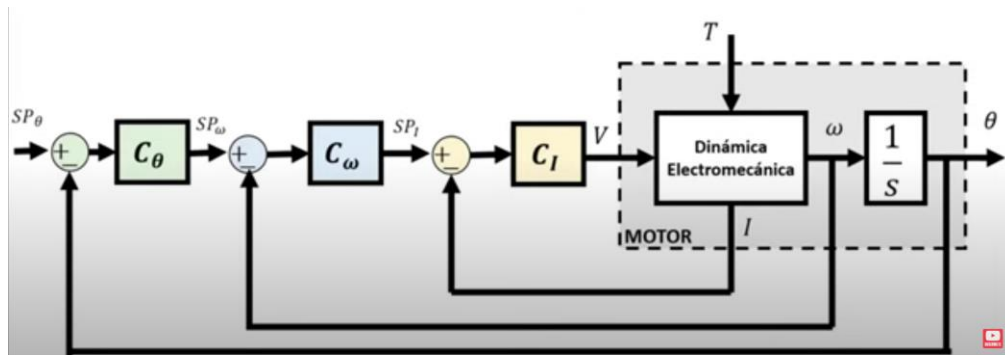
Exemplo de Controle de Nível de Tanque

- No controle de nível de um tanque, o **processo mais lento** é o ajuste do nível de água, enquanto o **processo rápido**, que atua como distúrbio, é a variação da pressão de entrada da água.



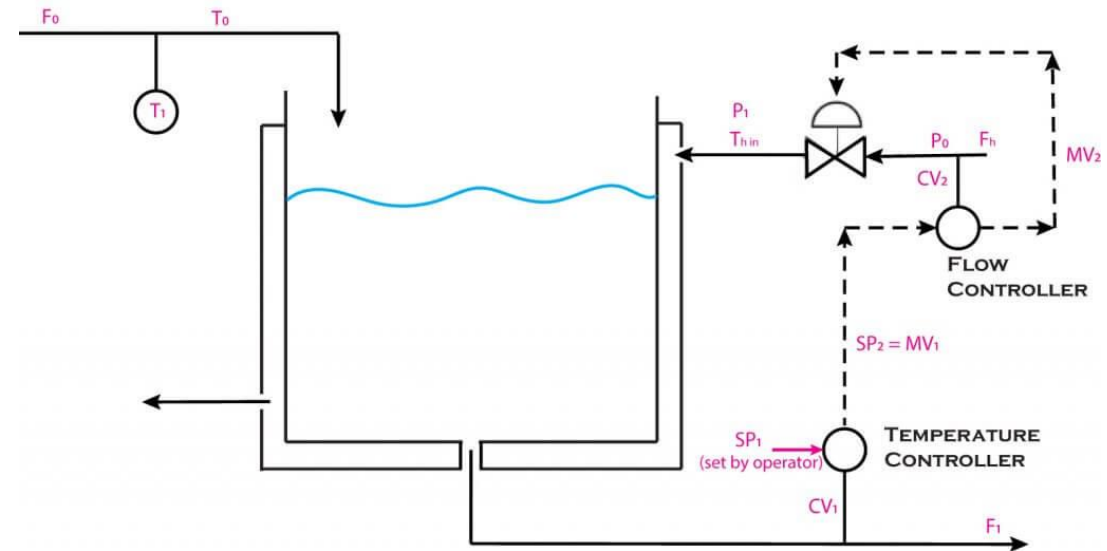
Exemplo de Controle de Posição de um Motor com Carga

- Neste caso, a **variação da voltagem (V)**, varia a **velocidade angular (ω)** do motor que conseqüentemente afeta a **sua posição (θ)**. Então nesse caso faz sentido inserir três controladores em cascata.



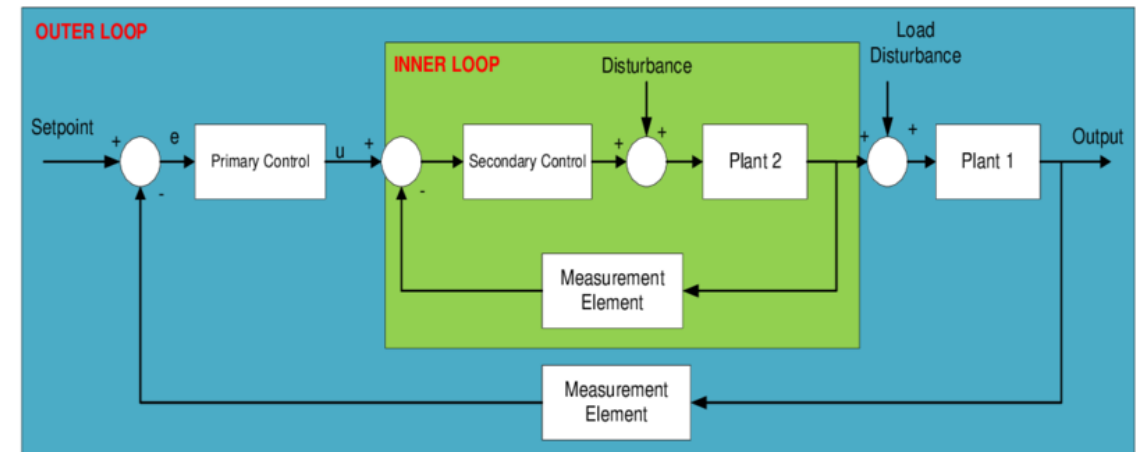
Vantagens do Controle em Cascata

- **Melhora o desempenho:** Ao dividir o controle em dois laços, permite uma resposta mais rápida para variáveis intermediárias.
- **Maior precisão:** A correção de variáveis secundárias aumenta a precisão do controle da variável principal.
- **Robustez a distúrbios:** Reage mais rapidamente a distúrbios que afetam diretamente a variável secundária.



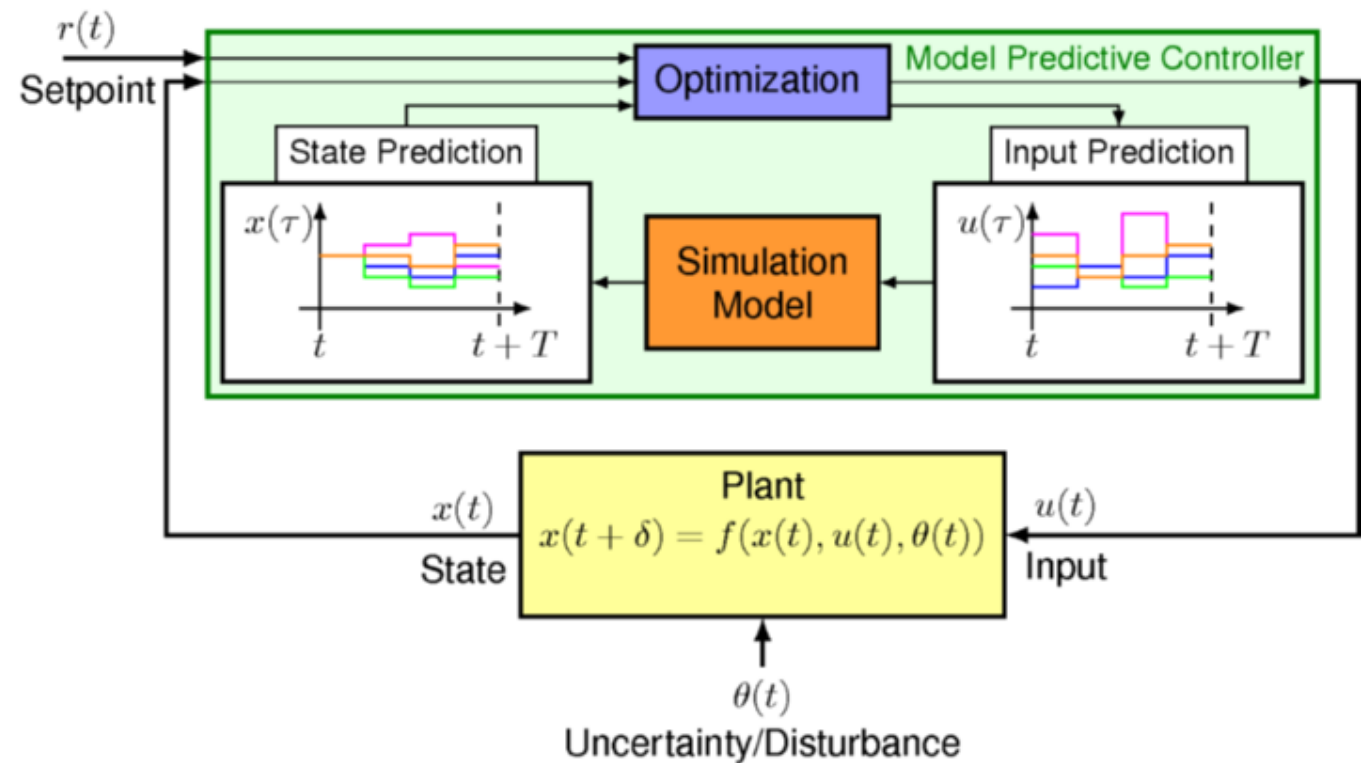
Desvantagens do Controle em Cascata

- **Complexidade de projeto:** ajuste precisos para cada laço de controle.
- **Potencial de instabilidade:** Se os tempos de resposta dos controladores não forem bem ajustados, o sistema pode se tornar instável.



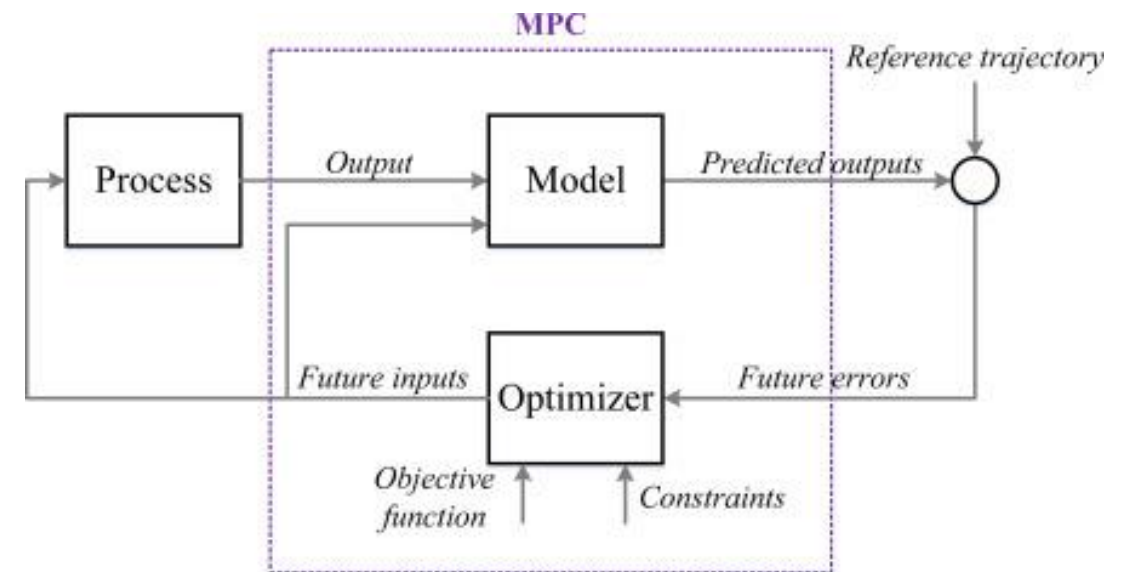
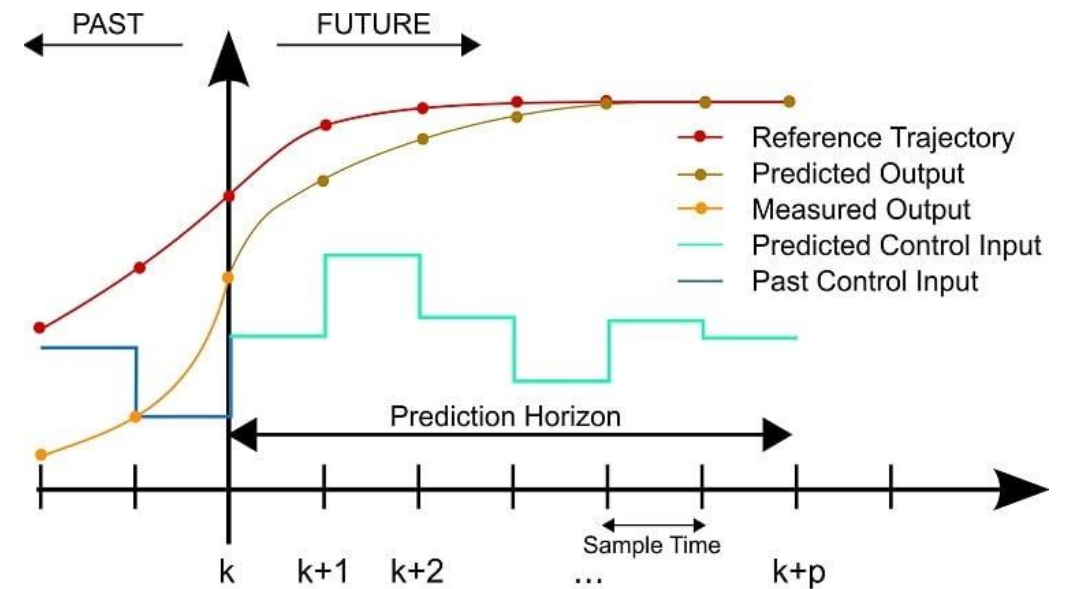
Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC)

- É uma técnica avançada de controle que utiliza um **modelo matemático do sistema** para prever o comportamento futuro do processo e calcular as ações de controle de forma otimizada ao longo de um horizonte de tempo.
- Diferentemente de controladores PID, que reagem apenas ao erro presente, o MPC antecipa as respostas do sistema e ajusta a ação de controle.



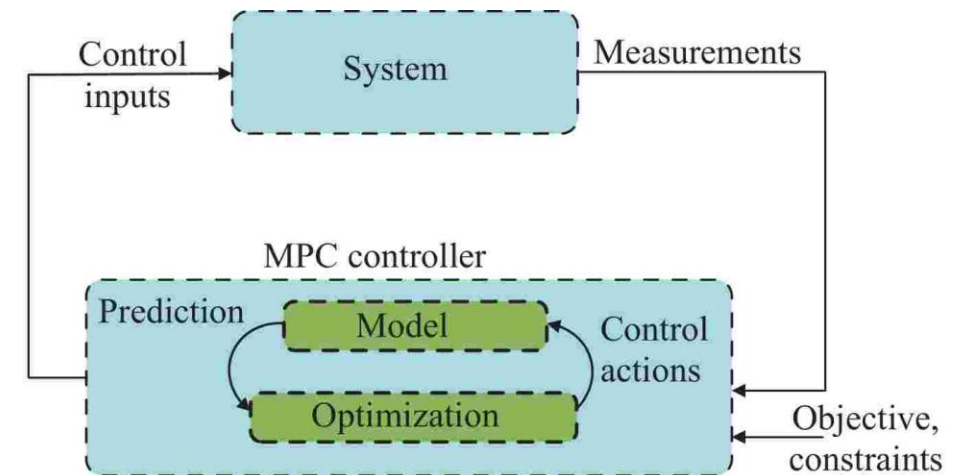
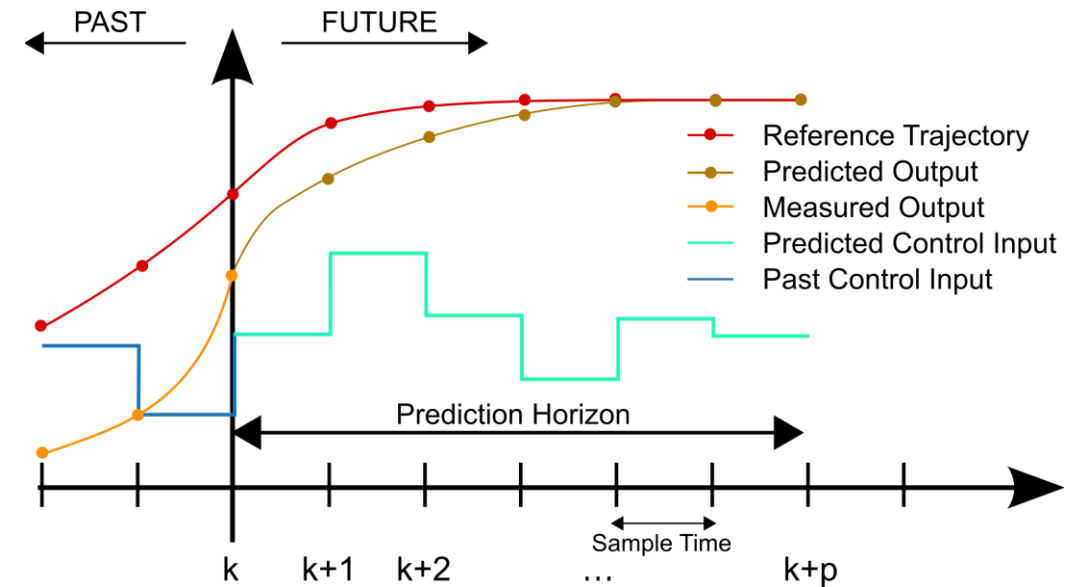
Como Funciona o MPC?

- **Predição do Futuro Comportamento:** Utiliza um modelo matemático para prever a evolução das variáveis de controle e saída ao longo do horizonte de predição, com base no estado atual do sistema.
- **Otimização da Ação de Controle:** Define um horizonte de controle para minimizar uma função objetivo que considera o erro de rastreamento e o esforço de controle.
- **Aplicação da Primeira Ação:** Executa apenas a primeira ação calculada e repete o processo com os novos dados na próxima iteração.



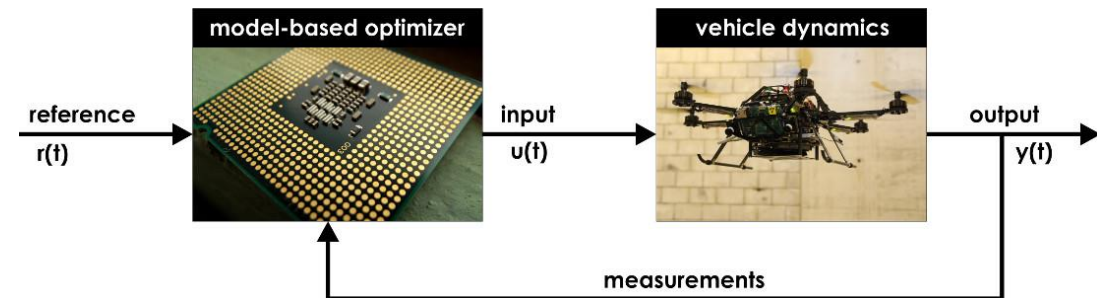
Principais Componentes do MPC

- **Modelo do Processo:** Relaciona as variáveis de entrada (ações de controle) com as de saída (variáveis controladas), podendo ser linear ou não linear conforme a complexidade do sistema.
- **Horizonte de Predição (N_p):** Número de passos à frente usados para prever o comportamento do sistema, influenciando a precisão do MPC.
- **Horizonte de Controle (N_c):** Número de passos para ajustar as variáveis de controle, geralmente menor ou igual ao horizonte de predição.
- **Função Objetivo:** Critérios de otimização que minimizam o erro em relação ao setpoint e evitam mudanças bruscas nas ações de controle.



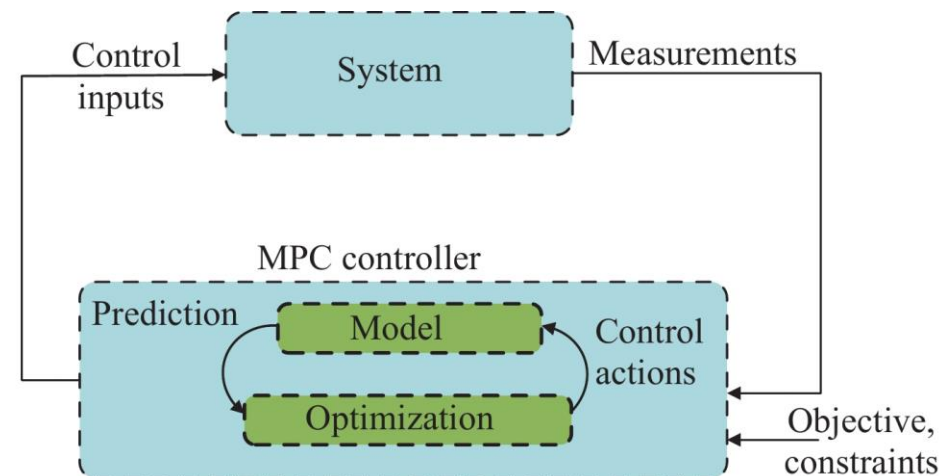
Vantagens do MPC

- **Consideração de Restrições:** O MPC pode lidar com restrições de variáveis (por exemplo, limites de temperatura, pressão, velocidade) de forma natural, o que é difícil de realizar com outros controladores tradicionais.
- **Otimização de Desempenho:** Ao prever o comportamento do sistema e otimizar a ação de controle, o MPC pode alcançar um desempenho superior, especialmente em sistemas multivariáveis (com múltiplas entradas e saídas).
- **Robustez a Distúrbios e Variações de Setpoint:** Como recalcula as ações de controle a cada ciclo, ele é capaz de se adaptar a mudanças no processo e reagir a distúrbios de maneira eficiente.



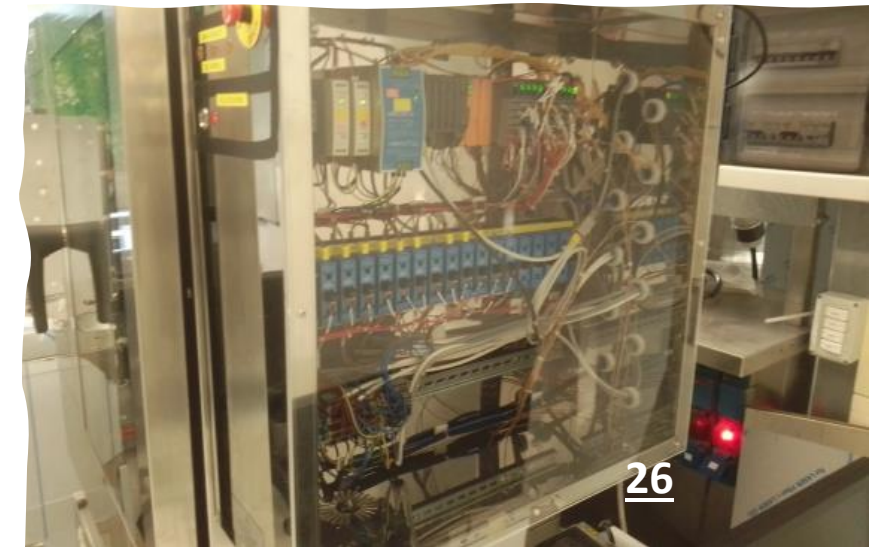
Desvantagens do MPC

- **Complexidade Computacional:** O processo de otimização e previsão requer um poder computacional significativo, especialmente em sistemas com alta frequência de controle ou modelos complexos.
- **Dependência de um Modelo Preciso:** A precisão do MPC depende da qualidade do modelo do sistema. Um modelo impreciso pode levar a previsões erradas e, portanto, a decisões de controle subótimas.
- **Tempo de Cálculo:** O tempo necessário para resolver a otimização deve ser menor do que o período de amostragem do controlador, o que pode ser desafiador em sistemas de resposta rápida.



Exemplo Prático do MPC

- **Variável Controlada:** Temperatura interna do forno.
- **Variáveis de Controle:** Potência dos elementos de aquecimento.
- **Modelo do Processo:** Um modelo matemático que descreve como a temperatura do forno responde ao aumento ou diminuição da potência dos aquecedores.
- **Predição e Otimização:** O MPC calcula as variações na potência de aquecimento necessárias para manter a temperatura constante nos próximos minutos, levando em conta a inércia térmica do forno e as variações de carga (como a entrada de novos materiais frios).
- **Aplicação:** A cada ciclo, o MPC ajusta a potência para manter a temperatura, garantindo eficiência energética e a qualidade do produto final.



Controle Baseado em Inteligência Artificial

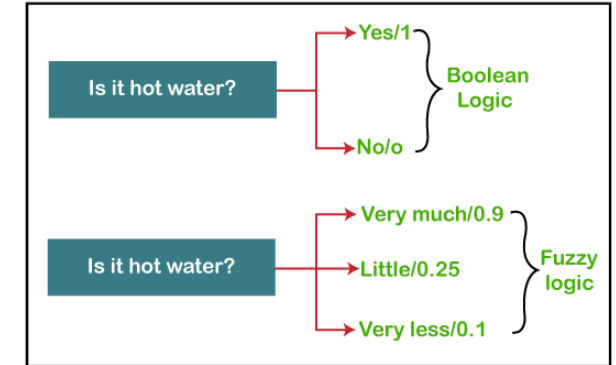
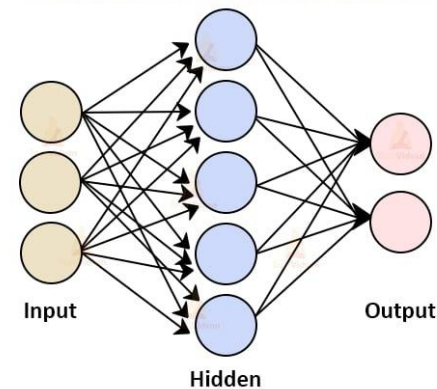
- Aplica técnicas de aprendizado e raciocínio para criar sistemas de controle que podem se **adaptar, melhorar e lidar** com complexidade e incertezas nos processos.
- Diferente dos controladores tradicionais, que dependem de modelos matemáticos precisos do sistema, os **controladores baseados em IA** têm a capacidade de aprender a partir de **dados** e **comportamentos** observados, oferecendo flexibilidade e adaptabilidade a uma ampla gama de situações.



Como Funciona o Controle Baseado em Inteligência Artificial?

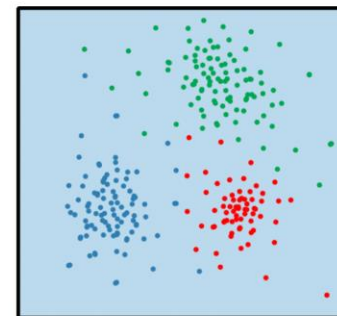
- **Redes Neurais Artificiais (ANNs):** Inspiradas no cérebro humano, as ANNs processam informações e aprendem padrões a partir de dados. Usadas para modelagem de sistemas ou controladores neurais. Ex: Controle de um robô móvel que associa comandos com sensores.
- **Aprendizado por Reforço (RL):** Um agente aprende decisões por meio de recompensas e penalidades, buscando maximizar ganhos ao longo do tempo. Ex: Ajuste automático do ar-condicionado para economizar energia.
- **Lógica Fuzzy:** Lida com incerteza usando variáveis linguísticas e regras intuitivas. Ex.: Controle de velocidade de um motor usando regras como "se a velocidade é dinâmica e lógica fuzzy para ajustes de voo."

Architecture of Artificial Neural Network

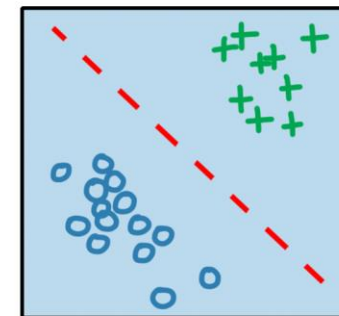


machine learning

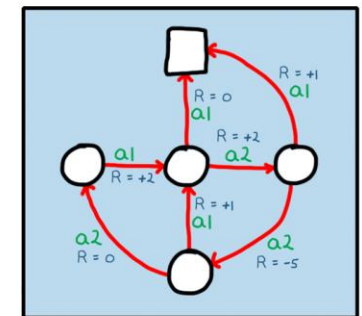
unsupervised learning



supervised learning

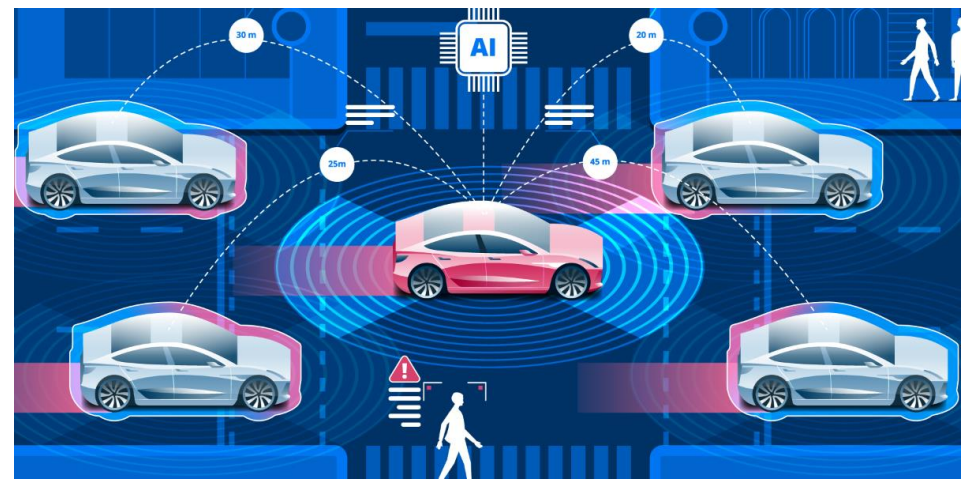


reinforcement learning



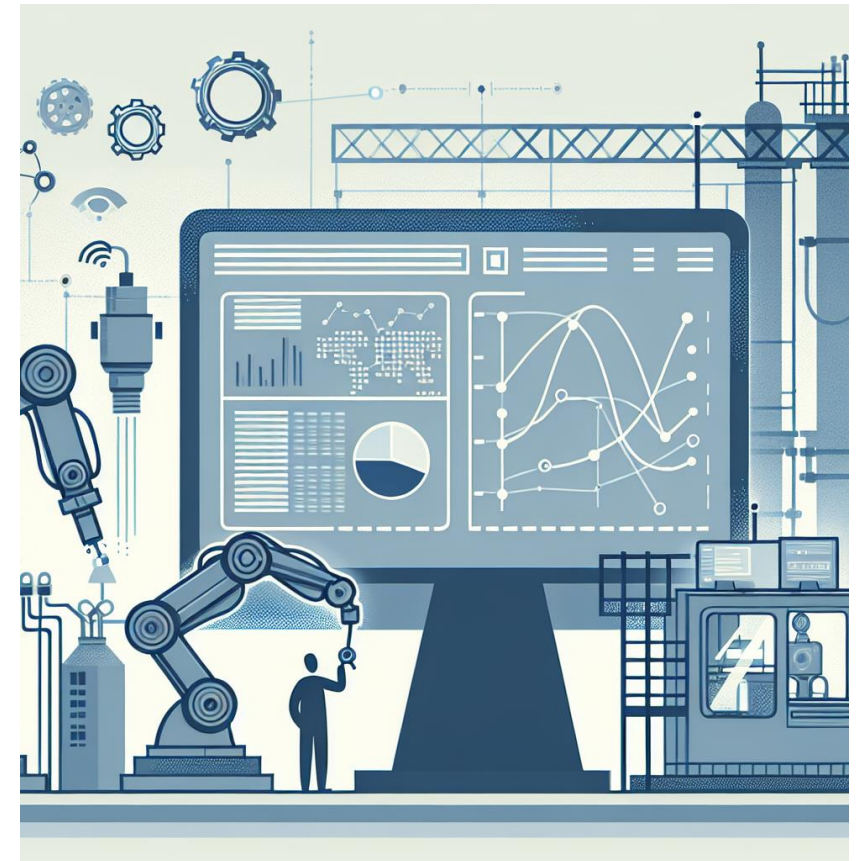
Aplicações Comuns do Controle em IA

- **Automação Industrial:** Otimização de processos complexos, como controle de robôs e ajuste de parâmetros em linhas de produção.
- **Sistemas Autônomos:** Controle de veículos autônomos e drones, que precisam tomar decisões em tempo real com base em múltiplas entradas.
- **Sistemas de Energia:** Controle de redes inteligentes de distribuição de energia, ajustando a distribuição de eletricidade em função da demanda e da geração renovável.



Vantagens do Controle Baseado em IA

- **Adaptabilidade:** A IA permite que os controladores aprendam e se adaptem a mudanças nas dinâmicas do sistema, como variações de carga ou mudanças nas características do processo.
- **Controle de Sistemas Não Lineares e Complexos:** A IA é eficaz em lidar com sistemas cujas dinâmicas são difíceis de modelar matematicamente, especialmente quando há não linearidades ou variáveis difíceis de medir.
- **Tomada de Decisão Inteligente:** Algoritmos como o aprendizado por reforço permitem que o sistema desenvolva estratégias de controle otimizadas, aprendendo com a experiência e ajustando suas ações com base em resultados passados.



Desvantagens do Controle Baseado em IA

- **Treinamento e Coleta de Dados:** Técnicas de aprendizado, como redes neurais e aprendizado por reforço, muitas vezes requerem uma grande quantidade de dados de treinamento.
- **Complexidade Computacional:** Alguns métodos de IA podem demandar alto poder de processamento e memória, tornando sua implementação desafiadora em sistemas com restrições de hardware.
- **Explicabilidade:** A lógica fuzzy oferece um controle mais interpretável, mas redes neurais e aprendizado por reforço podem ser difíceis de entender e explicar, o que é uma limitação em aplicações onde a transparência é importante.



Conclusões

- Foi explorada técnicas avançadas de controle como **Feedforward**, **Cascata**, **MPC** e **IA** para lidar com distúrbios e complexidades dos sistemas.
- Técnicas avançadas oferecem controle proativo e adaptativo, superando o **PID tradicional**.
- Cada técnica tem vantagens e desvantagens, que devem ser analisadas com cuidado antes da aplicação real.
- Agora, é possível iniciar a prática com exercícios em simuladores (como o Simulink) e/ou microcontroladores (???) para entender melhor o funcionamento dos controles feedforward e cascata, pois sua implementação é mais acessível.
- Técnicas como MPC e controle com IA, apesar de poderosas, envolvem uma complexidade maior e requerem mais recursos, sendo recomendadas para estudos mais avançados.

Exercício: Controle *Feedforward* e Cascata com Motor no Simulink

- **Parte 1: Controle *Feedforward***

- **Sistema:** Controle de temperatura de um tanque.
- **Distúrbio:** Variação da temperatura da água de entrada.
- **Simulação:** Aplique o controle *feedforward* para compensar o distúrbio antes que ele afete a saída.
- **Resultado esperado:** Melhoria na estabilidade da temperatura com controle *feedforward*.

- **Parte 2: Controle Cascata com Motor de Carga**

- **Sistema:** Controle da Posição de um motor de Carga com um controlador em cascata.
- **Controladores:** Primário (Posição) e secundário (Velocidade Angular).
- **Simulação:** Observe como o laço de controle de velocidade angular estabiliza a resposta da posição do motor.
- **Resultado esperado:** Melhor resposta a distúrbios e maior precisão na velocidade.

- **Perguntas para reflexão:**

- Como o *feedforward* afeta a estabilidade do aquecedor?
- Qual o impacto do controle cascata na resposta do motor?

DÚVIDAS?
