

# CONTROLE AUTOMÁTICO II

INTRODUÇÃO  
(A TEORIA)



# HISTÓRIA:

Princípio:

Sistemas mecânicos.



**1800:** Os sistemas de controle estão intimamente relacionados ao conceito de automação (q.v.), mas os dois tipos fundamentais de sistemas de controle, **feedforward (malha direta)** e **feedback (malha com realimentação)**, têm ancestralidade clássica.

O tear inventado por Joseph Jacquard\* da França em 1801 é um dos primeiros exemplos de **feedforward**; um conjunto de **cartões perfurados** programava os padrões tecidos pelo tear; nenhuma informação do processo foi usada para corrigir a operação da máquina.

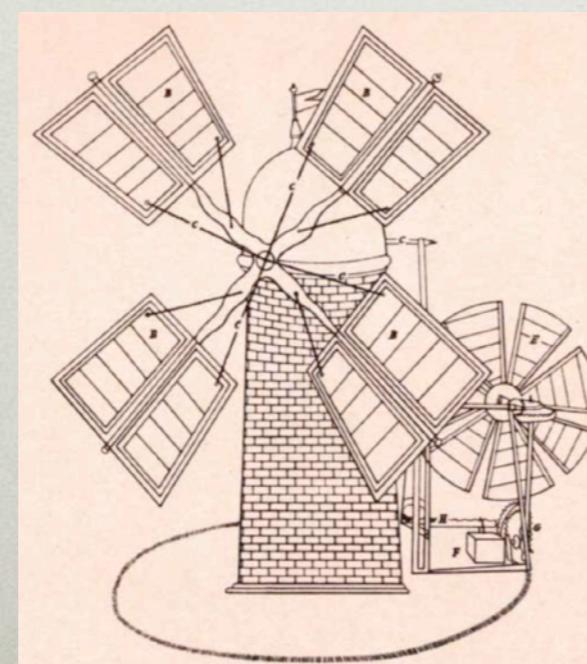
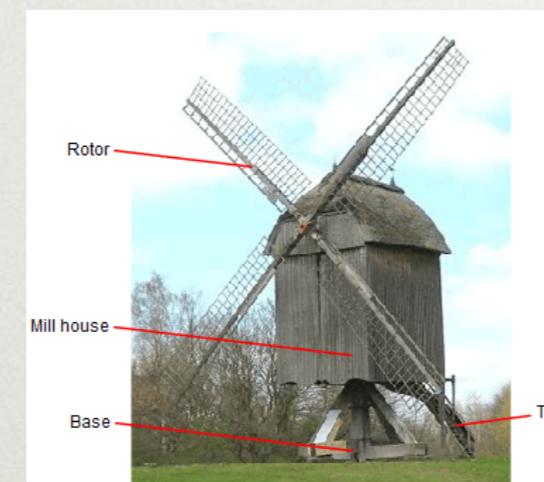
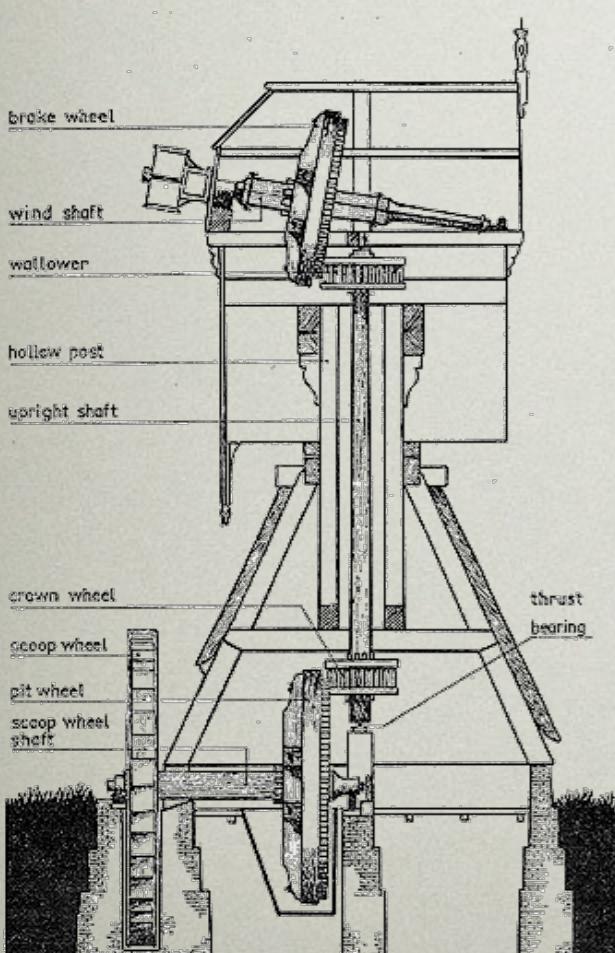
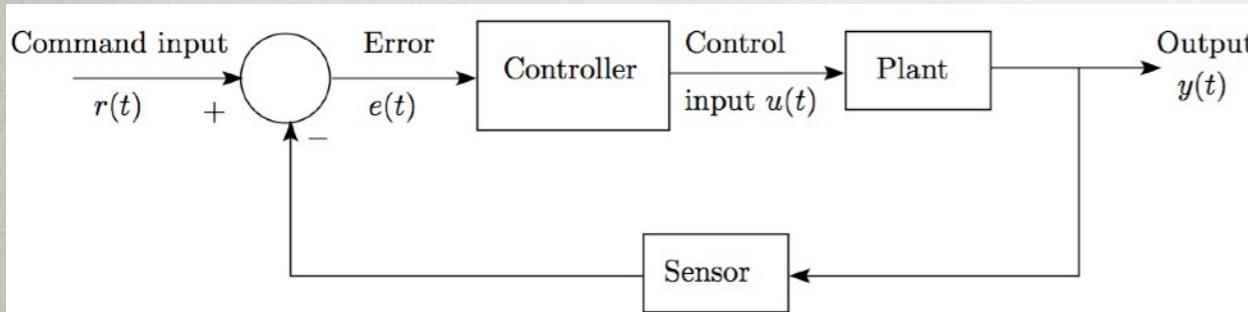
O controle feedforward semelhante foi incorporado em várias máquinas-ferramenta inventadas no século 19, nas quais uma ferramenta de corte seguia a forma de um modelo.

\* Jacquard machine —> [https://en.wikipedia.org/wiki/Jacquard\\_machine](https://en.wikipedia.org/wiki/Jacquard_machine)

# HISTÓRIA:

Princípio:

Sistemas mecânicos.

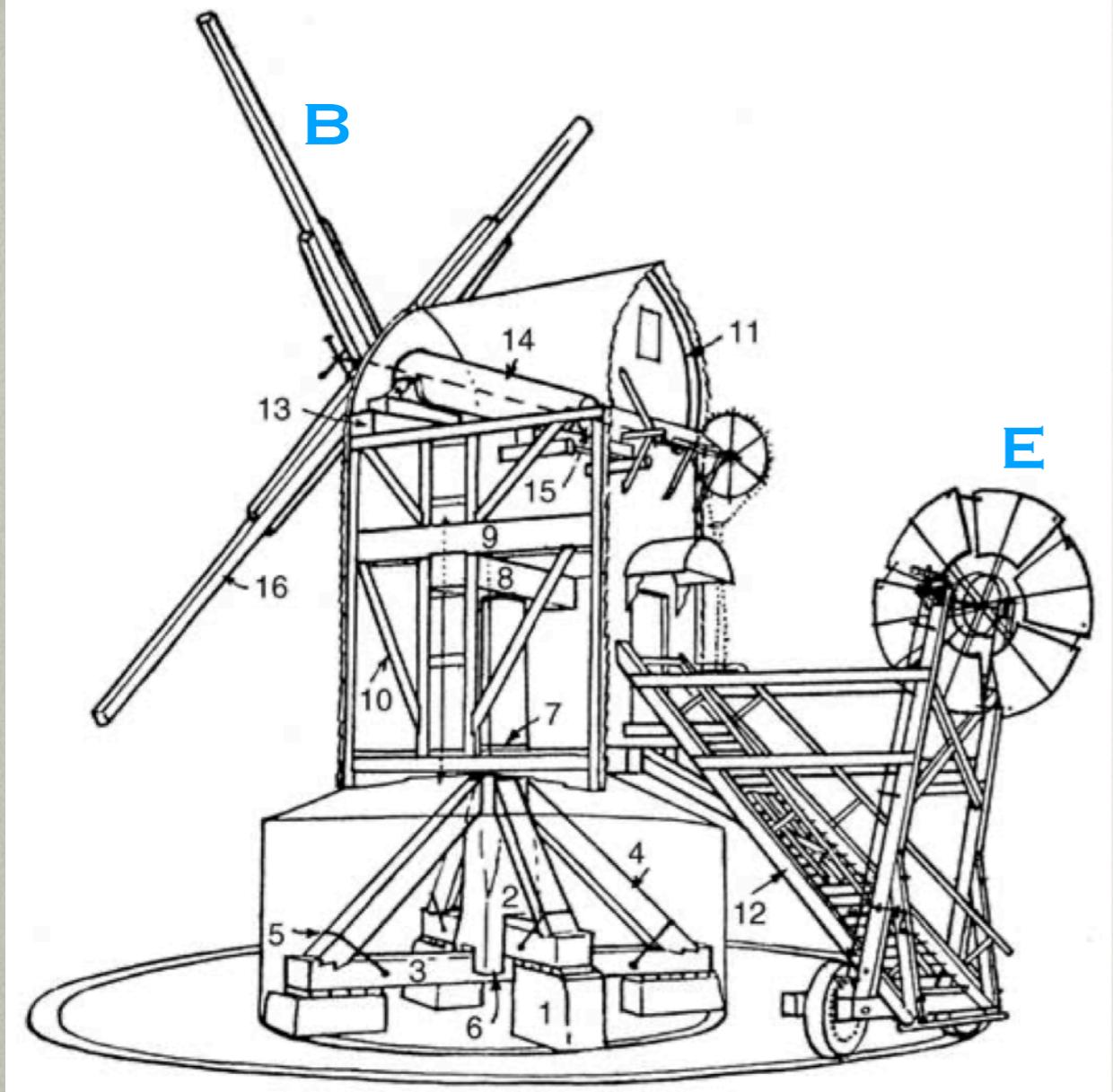


O controle de feedback (por realimentação), no qual as informações do processo são usadas para corrigir a operação de uma máquina, tem uma história ainda mais antiga. Os engenheiros romanos mantinham os níveis de água de seu sistema de aquedutos por meio de válvulas flutuantes que abriam e fechavam em níveis apropriados.

O moinho holandês do século XVII foi mantido virado para o vento pela ação de um cata-vento auxiliar que movimentava toda a parte superior do moinho.

O exemplo mais famoso da Revolução Industrial é o **regulador flyball** de James Watt de 1769, um dispositivo que regulava o fluxo de vapor para uma máquina a vapor para manter a velocidade constante do motor, apesar de uma mudança de carga.

# HISTÓRIA:



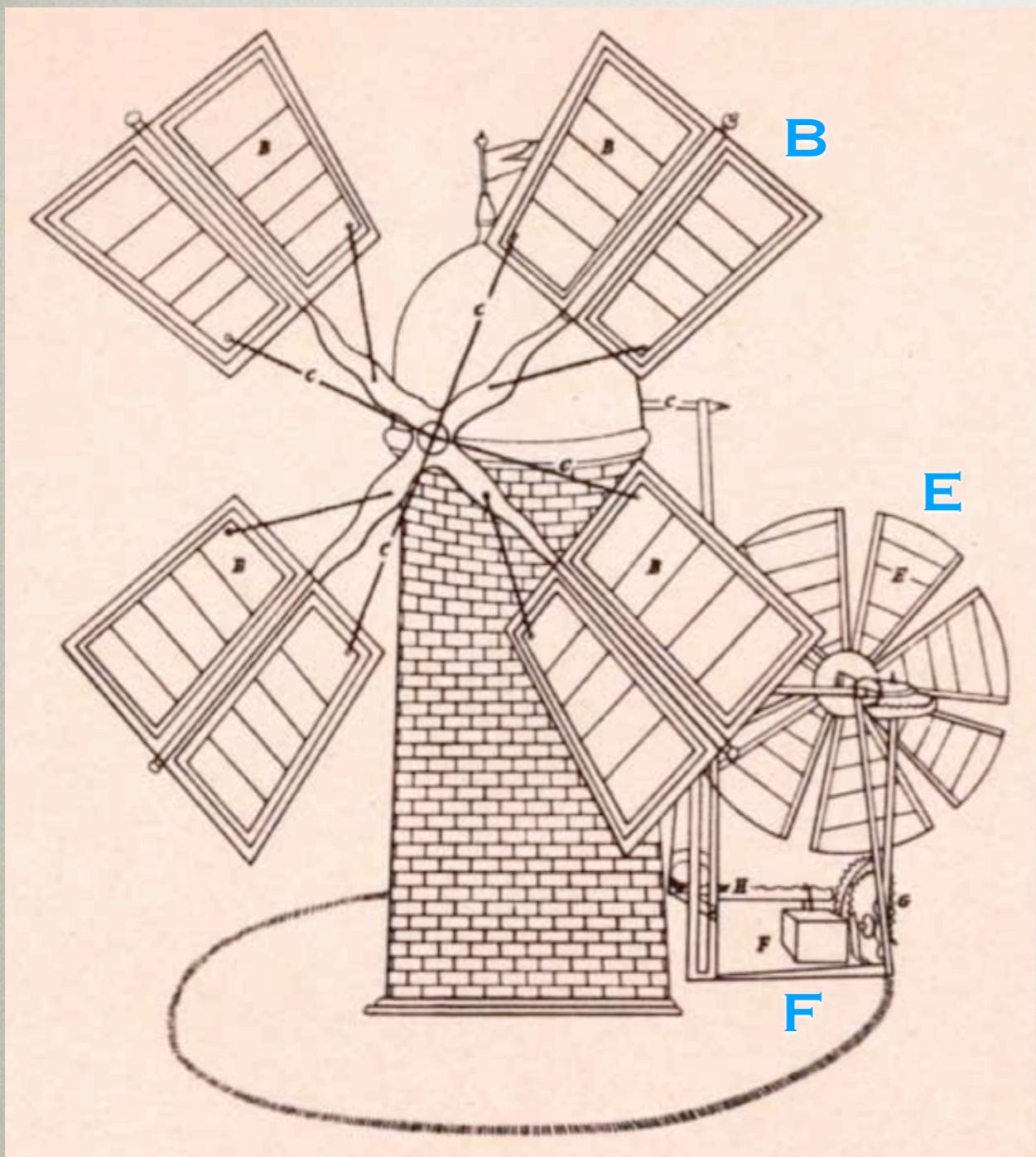
Os primeiros controles do moinho de vento são mostrados neste desenho, de uma patente britânica concedida a Edmund Lee em 1745. Os dispositivos reguladores consistiam em uma cauda projetada para manter o moinho de vento voltado para o vento e um mecanismo para controlar a velocidade do moinho apesar de mudanças na velocidade do vento.

O “fantail” é uma pequena roda do vento montada em ângulos retos com a roda principal. Ele está preso na parte traseira da tampa móvel que vira a roda grande contra o vento. Através de uma série de engrenagens, a cauda do leque controla o giro da tampa, de modo que qualquer rotação da cauda fará com que a tampa gire. Quando a roda principal fica de frente para o vento, a cauda, em ângulos retos, é alinhada paralelamente à direção do vento e não gira. Sempre que o vento muda de forma que a roda principal não esteja mais voltada para ele diretamente, o vento atingirá a roda traseira, fazendo-a girar e girar lentamente a tampa do moinho até que a cauda de leque novamente fique paralela ao vento e a roda principal fique voltada para ele. Resumindo, o sistema forma um circuito fechado. Sob condições reais, com a direção do vento mudando constantemente, a cauda do leque pode ser considerada um servo sistema rudimentar. A roda traseira (**E**) presa à tampa móvel do moinho acionava uma corrente de engrenagens que engatava uma cremalheira circular no solo. Se o moinho não estivesse de frente para o vento, a cauda do leque giraria, girando a roda principal contra o vento.

Mayr, Otto. "The Origins of Feedback Control." **Scientific American**, vol. 223, no. 4, 1970, pp. 110–119., www.jstor.org/stable/24927641. Accessed 16 Aug. 2020.

Bernstein, Dennis, "Feeback Control: An Invisible Thread in the History of Technology", **IEEE Control Systems Mag.**, pp. 53-68, April 2002. (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=993315>) Acessado 16 Aug. 2020)

# HISTÓRIA:

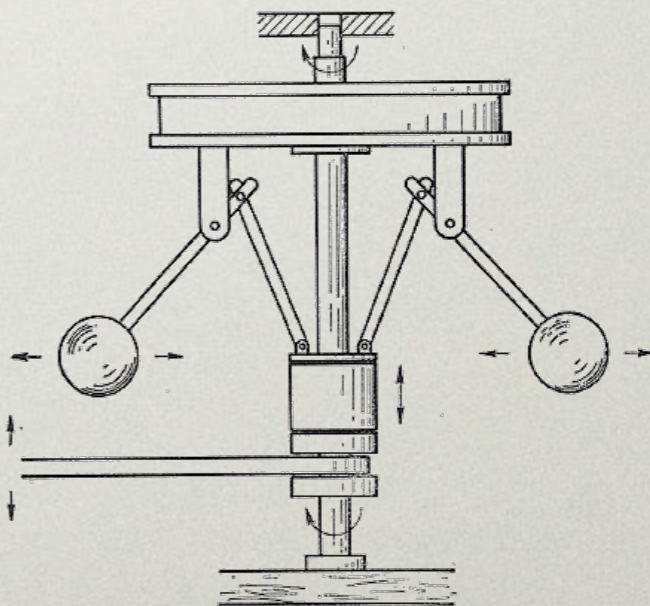


Mayr, Otto. "The Origins of Feedback Control." *Scientific American*, vol. 223, no. 4, 1970, pp. 110–119., [www.jstor.org/stable/24927641](http://www.jstor.org/stable/24927641). Accessed 16 Aug. 2020.

Bernstein, Dennis, "Feeback Control: An Invisible Thread in the History of Technology", *IEEE Control Systems Mag.*, pp. 53-68, April 2002. (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=993315> Acessado 16 Aug. 2020)

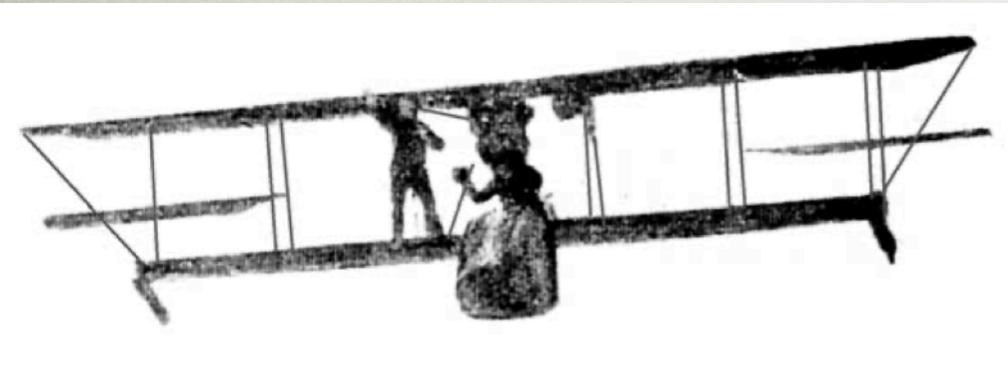
O moinho de vento de Lee também continha uma invenção que foi projetada para **controlar a velocidade do moinho**, apesar das mudanças na velocidade do vento. A regulação da velocidade de rotação era necessária para proteger as mós do desgaste excessivo e para produzir farinha de qualidade uniformemente fina. Lee atacou esse problema **permitindo que as velas do moinho de vento girassem em torno dos braços** que as seguravam. As velas eram conectadas a um contrapeso que lançava sua vanguarda para frente em ventos moderados. Quando o vento aumentava a velocidades excessivas, de modo que sua força nas velas fosse maior do que a do contrapeso, a inclinação das velas era invertida e a velocidade de rotação da roda verificada.

Este sistema não era um caso autêntico de controle de feedback, pois não tenta "sentia" a variável controlada: velocidade. Para um controle de feedback genuíno da velocidade de um moinho de vento, um método de medição da velocidade com alguma sensibilidade teve que ser encontrado.

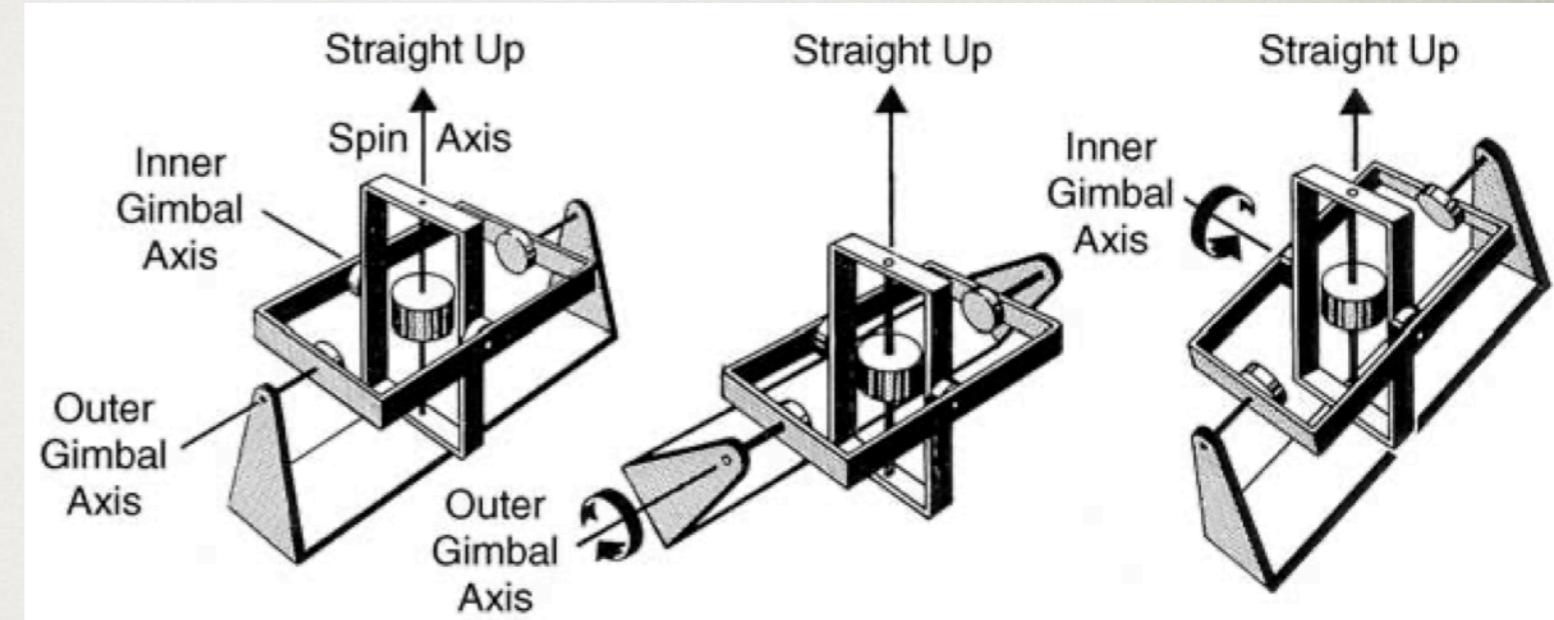


The Dutch Windmill (<http://www.texva.com/holland/The%20Dutch%20Windmill.htm>)

# HISTÓRIA:



Na primeira demonstração pública de estabilização giroscópica, Lawrence Sperry, filho do engenheiro Elmer Sperry, remove as mãos dos controles enquanto seu mecânico, Emile Chardin, caminha para a asa inferior. Esta demonstração ocorreu perto de Paris durante uma competição de 1914 sobre recursos inovadores de segurança de aeronaves.



Um giroscópio de deslocamento é uma roda giratória montada em um par de cardans (gimbals). O eixo de rotação da roda mantém sua orientação no espaço enquanto os cardan giram. Ao alinhar o gimbal externo com o eixo do rolo e o gimbal interno com o eixo do passo, é possível medir esses ângulos durante o vôo.

A chave para este sucesso foi a prática implementação de um giroscópio de deslocamento, ou giroscópio, que é uma roda giratória montada em cardan. O eixo de rotação da roda mantém sua orientação no espaço à medida que os cardan giram em torno dela (Fig. (b)). Para controle de vôo, o gimbal externo pode ser alinhado com o eixo de rotação e o gimbal interno pode ser alinhado com o eixo de inclinação. Quando distúrbios fazem o avião girar, os ângulos do cardan fornecem medidas dos ângulos de rotação e inclinação do avião. No sistema demonstrado em Paris, o giroscópio estava conectado a um contato elétrico que fechava um circuito quando o avião saía do vôo nivelado. O contato elétrico acionou uma válvula que liberava o ar comprimido fornecido pelo motor. A força desse ar comprimido moveu o profundor e ailerons para trazer o avião de volta ao vôo nivelado. Desta forma, os ailerons de Curtiss e o giroscópio de Sperry formaram um loop de feedback para estabilizar o movimento do avião.

Bernstein, Dennis, "Feeback Control: An Invisible Thread in the History of Technology", IEEE Control Systems Mag., pp. 53-68, April 2002. (<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=993315> Acessado 16 Aug. 2020)

# HISTÓRIA:

Princípio:

Sistemas mecânicos.

1.788!

Início da Revolução Industrial  
Controle de máquinas à vapor

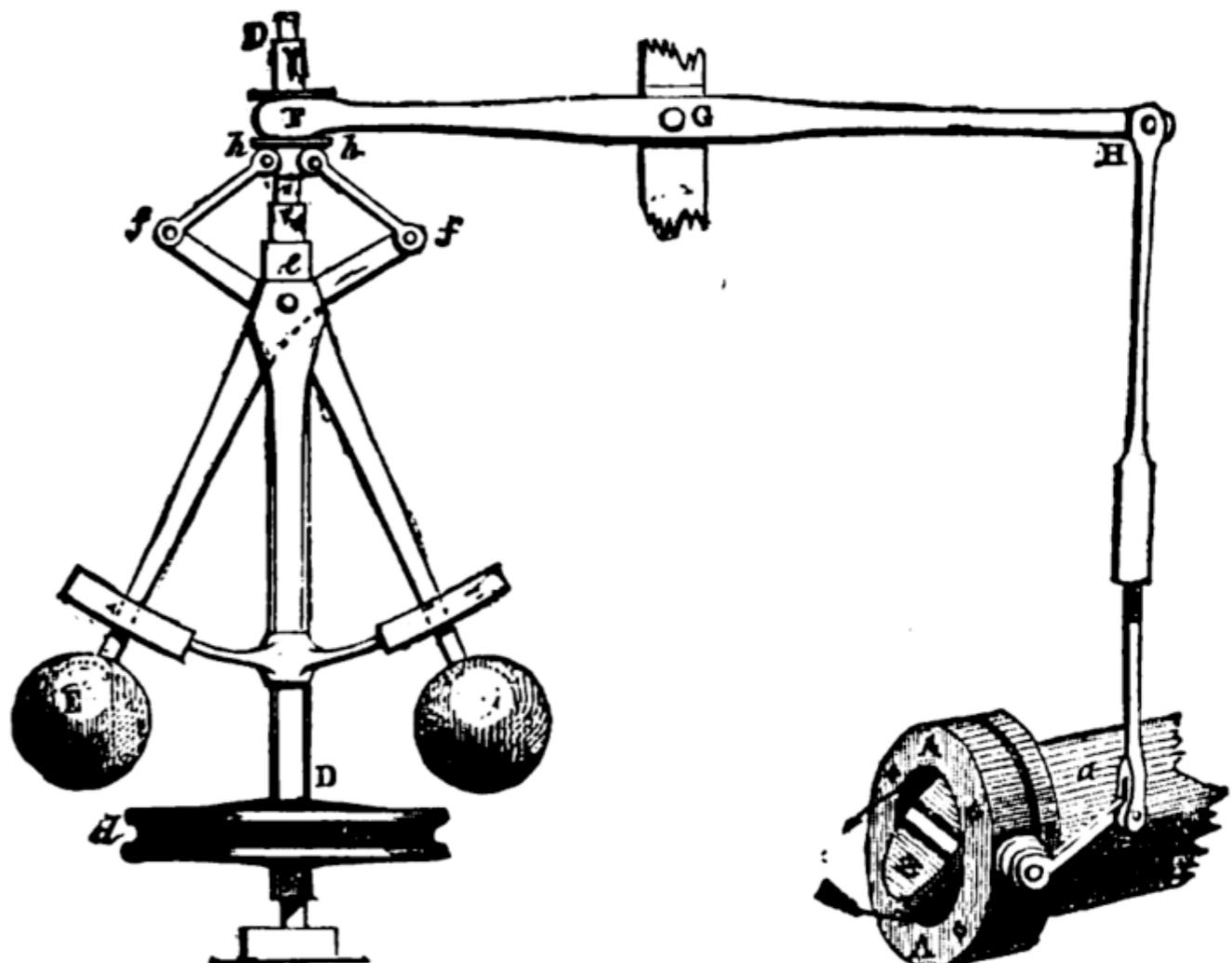


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

Regulador centrífugo + Válvula de controle de fluxo

# HISTÓRIA:

Princípio:

1.788! James Watt

Início da Revolução Industrial

Controle de máquinas à vapor



Centrifugal Governors (<https://youtu.be/B01LgS8S5C8>) - 1 de jul. de 2018 (7.927 visualizações);

# REGULADOR FLYBALL DE WATT

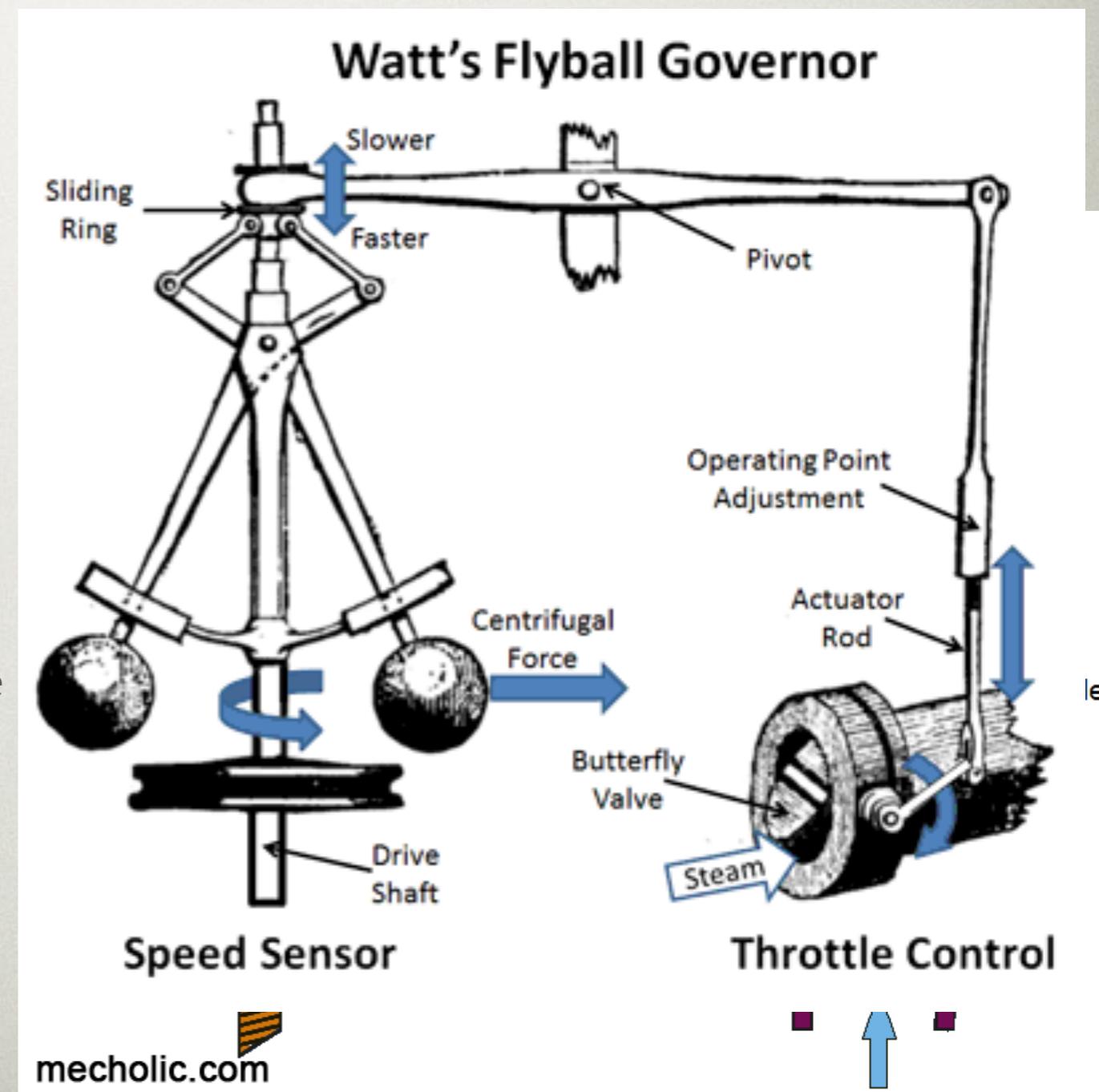
---

O eixo de transmissão do sensor de velocidade de Watt é engrenado no eixo de transmissão principal da máquina a vapor e gira em uma velocidade conveniente em uníssono com ele. À medida que gira, as duas bolas pesadas são empurradas para fora pela força centrífuga. Conforme os pesos voam para fora, um anel deslizante no eixo de transmissão é puxado para baixo pelo mecanismo de tesoura que suporta os pesos. Este deslocamento do anel ao longo do eixo representa a magnitude e a direção do erro de velocidade. Um mecanismo de ligação fornece o ciclo de feedback que transfere esse movimento para a válvula borboleta do controle do acelerador. O pivô na ligação inverte a direção do sinal de erro, fornecendo assim o feedback negativo.

# REGULADOR FLYBALL DE WATT

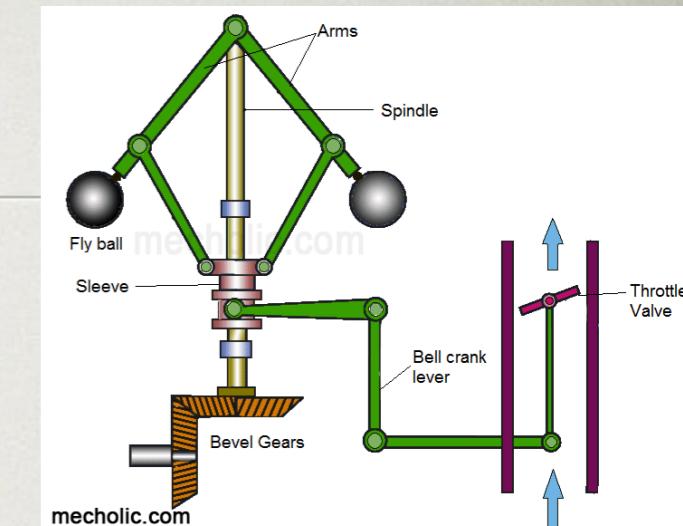
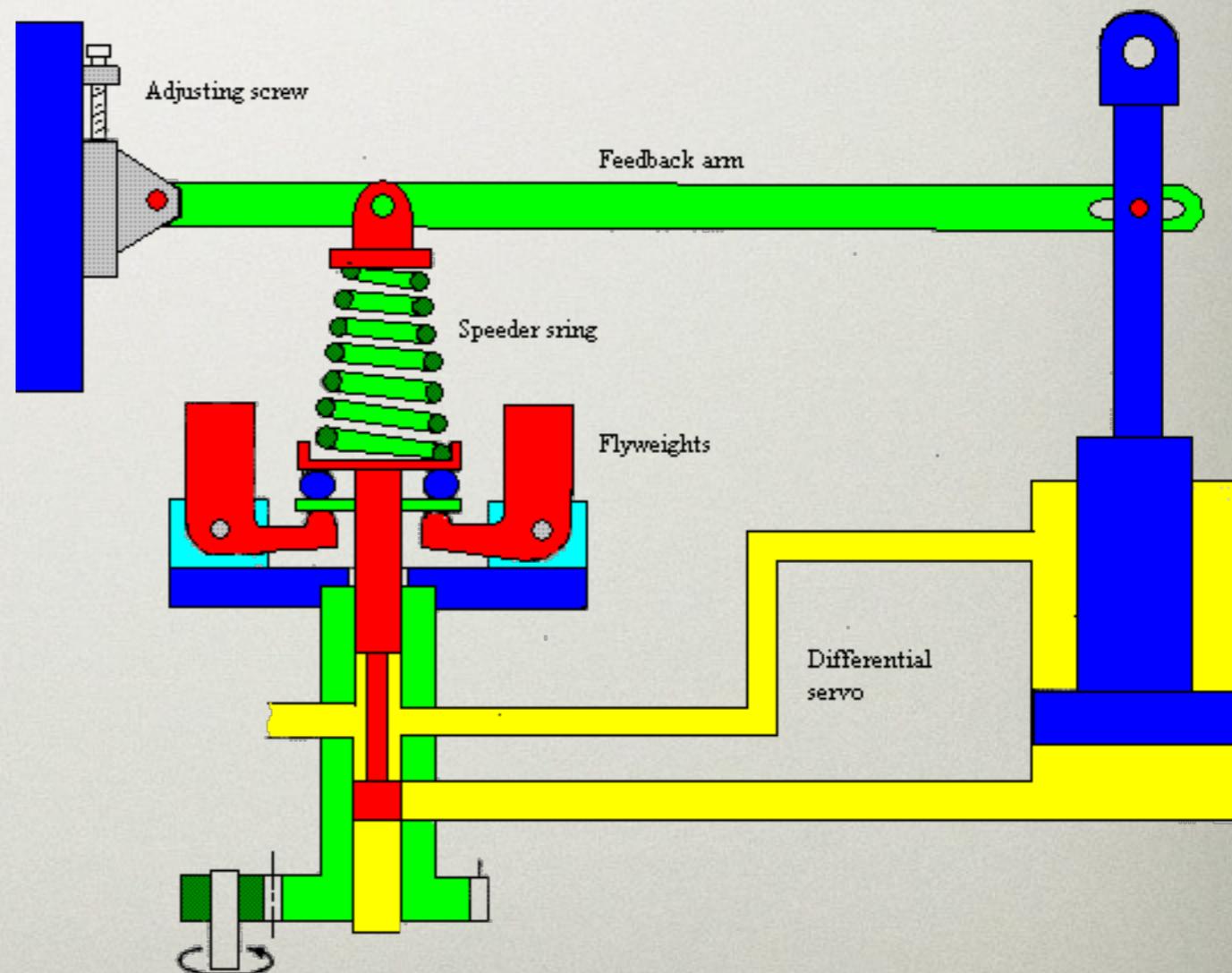
Se a rotação do motor for muito alta, a força centrífuga sobre os pesos do sensor fará com que a haste do atuador seja elevada, por sua vez, fazendo com que a válvula borboleta se move de modo a restringir o fluxo de vapor para o motor, reduzindo assim sua velocidade.

Por outro lado, se a rotação do motor for muito baixa, a força centrífuga será menor e os pesos ficarão mais próximos do eixo de transmissão e o anel deslizante ficará mais alto no eixo de transmissão. Isso forçará a haste do atuador para baixo, abrindo a válvula borboleta para admitir mais vapor no motor, aumentando assim sua velocidade.



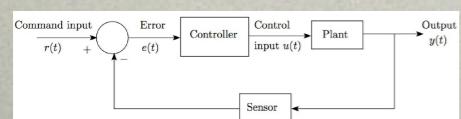
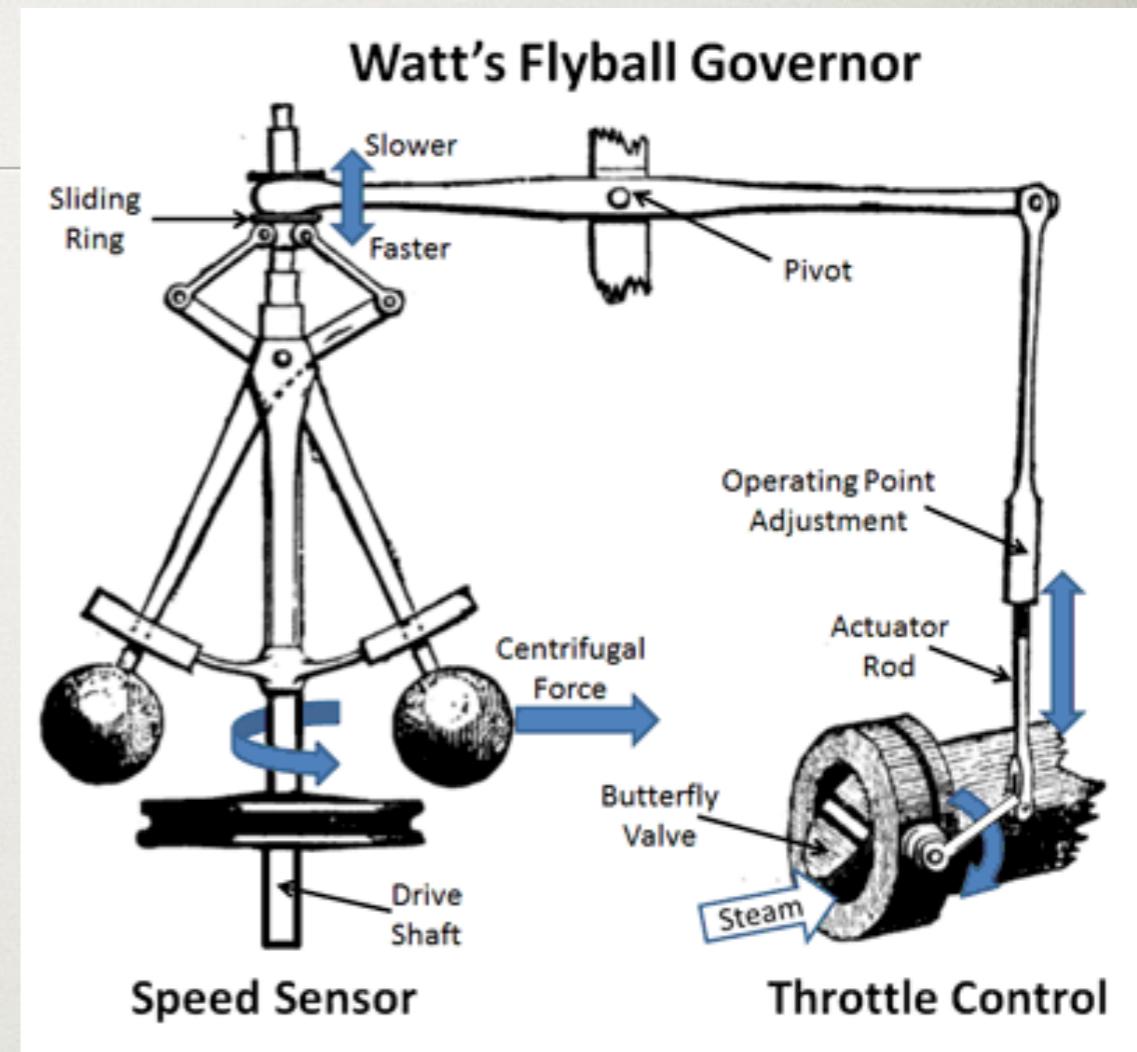
# REGULADOR FLYBALL DE WATT

A velocidade desejada do motor é ajustada por meio de uma rosca na haste do atuador que ajusta o comprimento da haste permitindo assim que o ângulo da válvula borboleta seja ajustado ao ponto de operação correspondente.



# CONTROLADOR FLYBALL DE WATT

O regulador flyball de Watt é um exemplo inicial de um sistema de controle automático que consiste em um sensor de erro conectado por um circuito de feedback negativo a um dispositivo de controle que leva o erro a zero, mantendo assim um ponto operacional desejado.



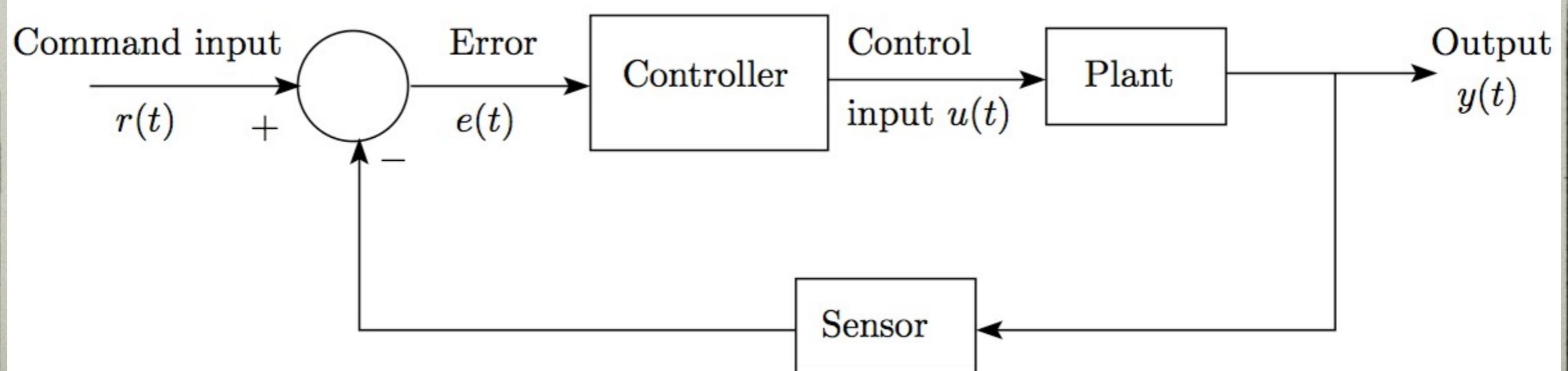
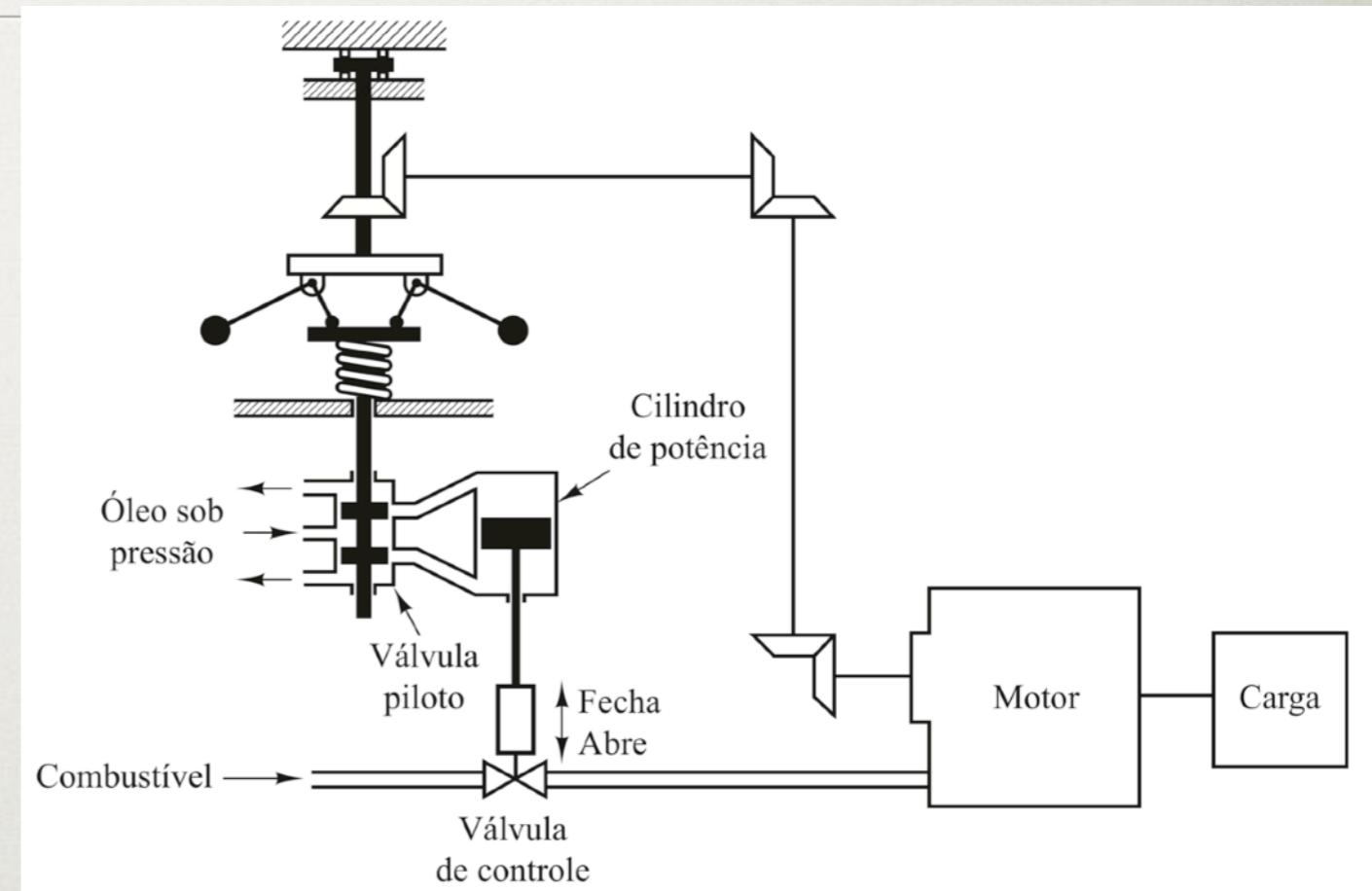
# CONTROLADOR FLYBALL DE WATT

Vídeos internet:

Centrifugal Governors (<https://youtu.be/B01LgS8S5C8>) - 1 de jul. de 2018 (7.927 visualizações);

How Centrifugal Governors Work (<https://youtu.be/ASlI3HWTT4U>) - 13 de jun. de 2018 (55.321 visualizações);

Flyball governor for flow control (<https://youtu.be/SiYEtnlZLSs>) - 24 de mai. de 2012 (57.739 visualizações);



# HISTÓRIA

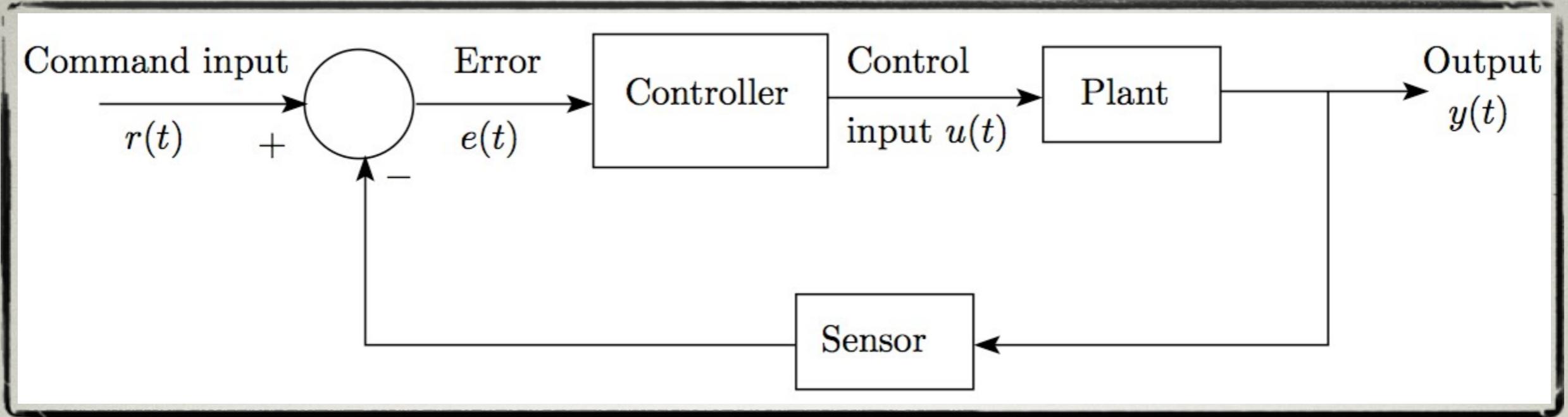
---

- Década de 1930: primeiros dispositivos mecânicos de controle local (“caixa-preta” ou “caixa grande”). Esses instrumentos recebiam dentro de si o fluido do processo (casos de medição de vazão, pressão ou nível), ou operavam com sistemas térmicos (medição de temperatura).
- 1933: a Taylor Instrument Co. (fundada em 1857; atualmente parte da ABB): Fuscope 56R: primeiro controlador pneumático proporcional do mundo.
- 1934: Foxboro Co. (atualmente parte do grupo Schneider): Controlador pneumático modelo 40: primeiro PI do mercado.
- 1940: a Taylor lança o Fulscope 100: primeiro controlador pneumático PID.
- Até final de 1920: os controladores pneumáticos eram de conexão direta ao processo ⇒ controlador e interface permaneciam no campo.
- 1930: Aumento no tamanho das plantas e na complexidade dos processos. Necessidade de melhorar a operação global da planta, possível usando transmissão pneumática. As variáveis do processo eram convertidas em sinais pneumáticos padronizados → transmitidos até sala de controle → sinais manipulados → resultado: transmitido até atuadores no processo. Vantagem: todas as informações importantes referentes ao processo estavam agrupadas, permitindo análise e ação mais precisas do ponto de vista econômico. Antes: o controle era “distribuído”.

# HISTÓRIA

---

- Até 1945: instrumentos pneumáticos (transmissão pneumática: os instrumentos não recebiam mais o fluido do processo; até 50 m do transmissor). ⇒ Primeiras salas de controle.
- Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945): controladores pneumáticos PID estabilizaram servomecanismos de controle de tiro de armas de fogo; auxiliaram a produzir borracha sintética, combustível de aviação e bomba atômica.
- 1951: Swartwout Co. (atualmente Prime Measurement Products): primeiros controladores baseados em tubos a vácuo (válvulas): linha Autronic.
- 1954: surgimento dos semicondutores ⇒ início da instrumentação eletrônica. Circuitos híbridos (pneumáticos e eletrônicos, usando amp.op.).
- 1959: a Bailey Meter Company (atualmente ABB): primeiro controlador à estado sólido (transístores e diodos).
- 1960: surgem sistemas digitais de controle.
- 1969: a Honeywell: linha Vutronik: controladores PD.
- 1970: inicia miniaturização (instrumentos menores) ⇒ arquitetura dividida: indicação feita no frontal dos painéis de controle + controle executado em armário (rack) auxiliar.

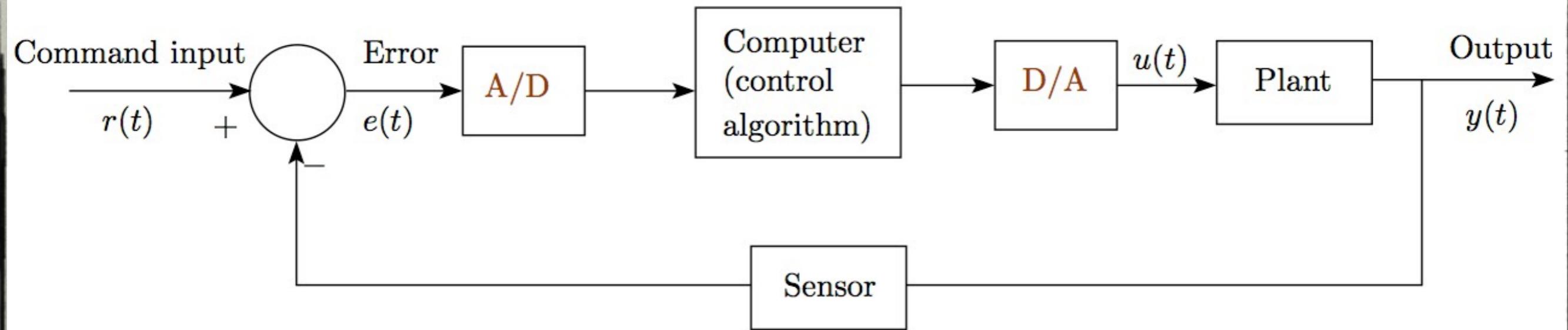
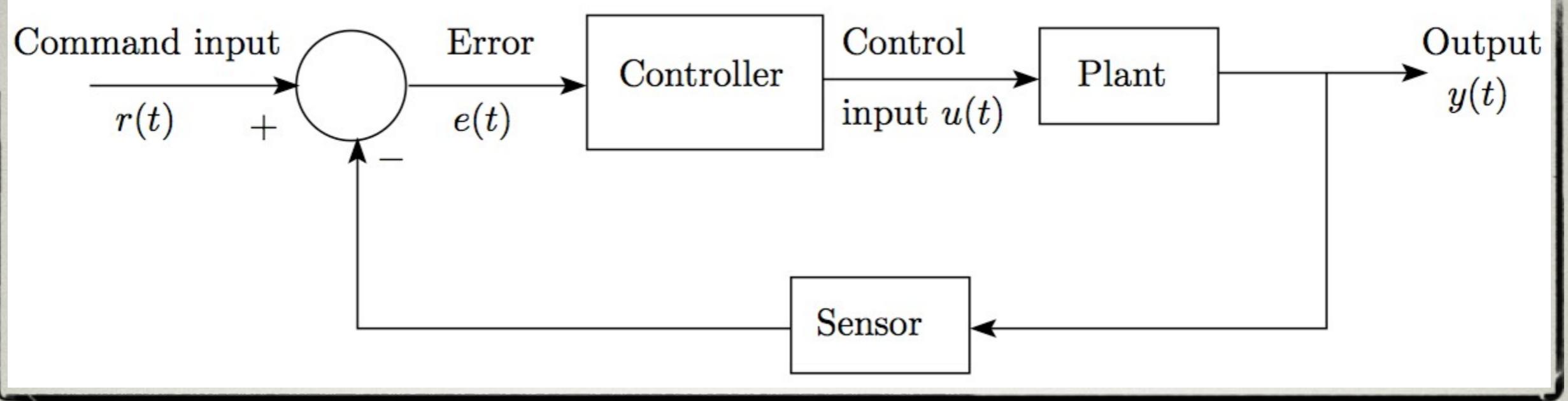


Observações:

Todas as variáveis do sistema são sinais contínuos;

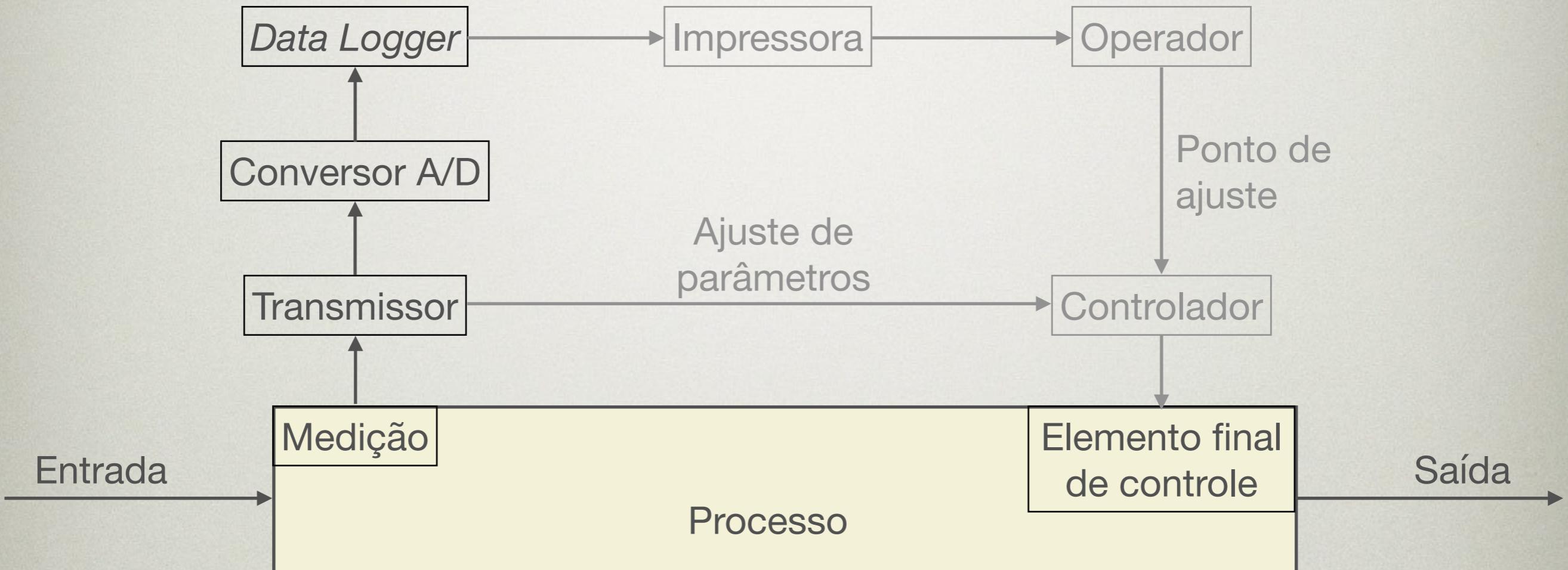
Não importa se o sistema é linear ou não linear,  
todas as variáveis estão continuamente presentes e  
portanto, estão disponíveis em qualquer instante de  
tempo, todo o tempo.

## TÍPICO SISTEMA DE CONTROLE CONTÍNUO NO TEMPO



**TRANSIÇÃO DE ANALÓGICO  
--> DIGITAL: SISTEMA DE  
CONTROLE.**

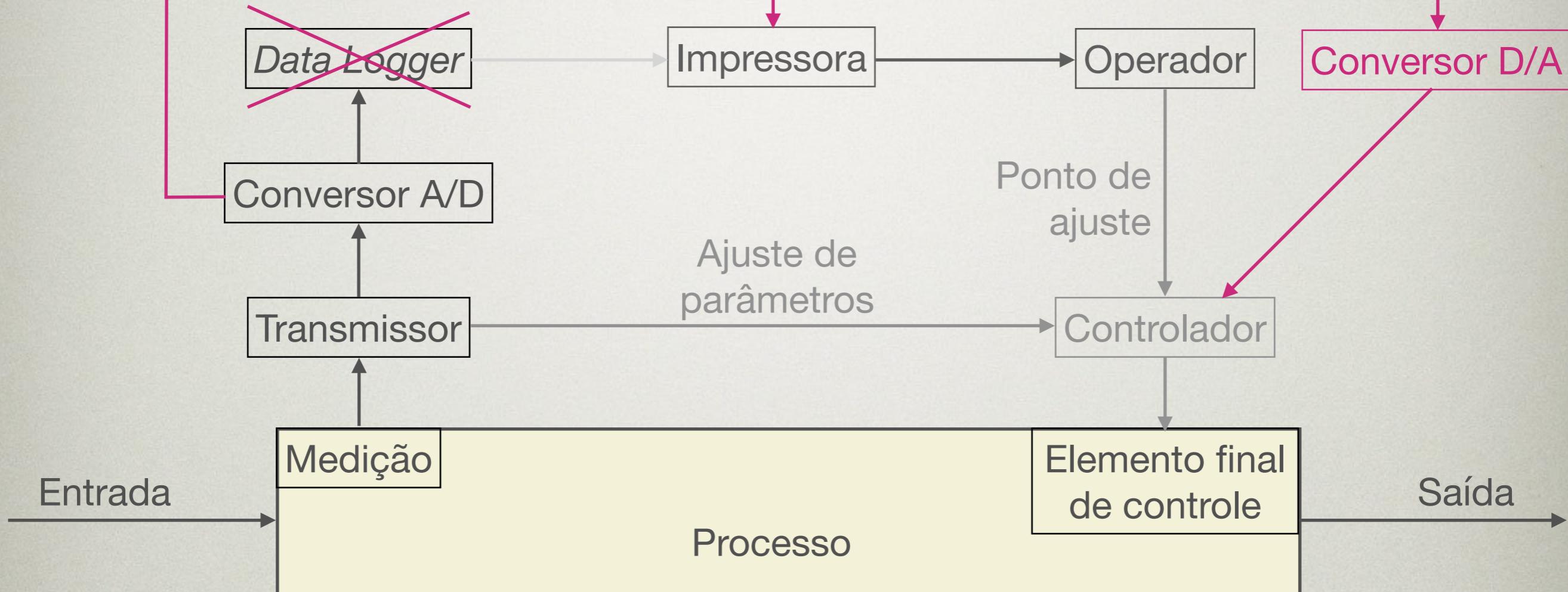
# HISTÓRIA



- 1960: iniciam sistemas digitais de controle. O computador reunia todas as informações num único processador (eventualmente redundante).
- Primeiras tentativas usando computadores: SEM controle de malha fechada. Apenas sistemas digitais de aquisição de dados: *Data loggers*.
- 1958: Primeira planta industrial (sistema digital de aquisição): termoelétrica de Sterlington (Louisiana)

Computador supervisório

# HISTÓRIA



- 1959: Primeira aplicação de Controle Supervisório (SPC: Set Point Control); planta química de amônia da Monsanto em Luling (Louisiana), computador RW300 da Ramo-Wooldridge (hoje TRW).
- 1960: Planta de acrilato em Calvert (Kentucky), com computador RW300;
- 1961: Primeiro termoelétrica em Huntington Beach (California), computador GE-310 (General Electric);
- SPC: Computador se comunica diretamente com processo. Computador calcula as melhores condições de operação, ajusta valor de referência dos controladores ⇒ condições de maior eficiência da planta.

# HISTÓRIA

---

- 1971: primeira empresa no Brasil com controle digital por computador → Processo de eteno e acetileno da Union Carbide, em Cobatão (SP). Computadores de Westinghouse. Processo de Eteno ficou fora das especificações. Unidade desativa pouco tempo depois.
- DETALHE: tentativas de Controle de Processo por Computador entre 1960 ~ 1970: SEM resultados esperados ⇒ Motivos:
  - Custo extremamente elevado (tanto do hardware quanto do software);
  - Falta de confiabilidade (necessidade de backup analógico ou redundância de computadores ⇒ custo ↗;
  - Operação da planta concentrada num único equipamento.
- 1970: Advento dos microprocessadores ⇒ Surge Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD): um computador controlando cada variável (*single loop integrity*) ou um grupo pequeno de variáveis. Uso de microprocessadores.
  - Z80 da Zilog: 1976;
  - 8080 da Intel: 1974
- 1975: Honeywell lança o “TDC-2000” que chegou a controlar cerca de 200.000 malhas em todo o mundo. Custo dos  $\mu$ P começa a baixar ⇒ CLPs (Controladores Lógicos Digitais): SDCD + controle sequencial e combinatório (intertravamentos). CLS: lançado inicialmente para indústria automotiva: antes produção de carros → relés, temporizadores e controladores dedicados ← novo carro: nova fiação de novo sistema de controle e segurança.

# HISTÓRIA

---

- Regulador centrífugo de James Watt para controle de velocidade de máquinas à vapor (séc. 18)
- 1922, Minorsky: controladores automáticos para pilotagem de barcos (demonstrou como a estabilidade de sistemas de malha-fechada poderia ser determinada a partir de equações diferenciais que descrevem o sistema)
- 1932, Nyquist: procedimento para determinação de estabilidade de MF com base na resposta de MA para excitações sentidas estacionárias.
- 1934, Hansen: termo "servomecanismos" para sistemas de controle de posição.
- > 1940: métodos de resposta em frequência (diagramas de Bode).
- 1940-1950: Controladores PID para controle de pressão e temperatura.
- 1940: Ziegler & Nichols: regras para ajuste de controladores PID..
- 1950, Evans: método do lugar das Raízes (Root Locus, RL).
- 1960: início computação digital, início da teoria de controle moderno, emprego de variáveis de estado, controle de sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO)..
- 1960-1980: Controle ótimo: sistemas determinísticos e estocásticos
- 1980-1990: Controle ótimo → Controle adaptativo e de aprendizagem de sistemas complexos.
- > 1990: Controle Robusto.

# CONTROLE MODERNO X ROBUSTO

---

A teoria de **controle moderno** baseia-se na análise do domínio do tempo em sistemas de equações diferenciais.

Ela simplificou o projeto de sistemas de controle porque se baseia no modelo de um sistema de controle real.

No entanto, a estabilidade do sistema é sensível ao erro entre o sistema real e seu modelo. Isso significa que, quando o controlador projetado a partir de um modelo for aplicado a um sistema real, o sistema poderá não ser estável.

Para evitar que isso aconteça, projetamos o sistema estabelecendo primeiro a gama de possíveis erros para depois projetar o controlador de uma forma que, se o erro do sistema estiver dentro da gama prevista, o sistema de controle projetado será sempre estável.

O método de projeto baseado nesse princípio é chamado teoria do **controle robusto**. Essa teoria incorpora tanto a abordagem de resposta em frequência quanto a abordagem de domínio do tempo. Matematicamente, a teoria é muito complexa.

# MALHA ABERTA × FECHADA

---

- MF: o uso da realimentação faz que a resposta do sistema seja relativamente insensível a distúrbios externos e a variações internas nos parâmetros do sistema. Dessa forma, é possível a utilização de componentes relativamente imprecisos e baratos para obter o controle preciso de determinado sistema, ao passo que isso não é possível nos sistemas de malha aberta.
- MA: Do ponto de vista da estabilidade, o sistema MA é mais fácil de ser construído, pelo fato de a estabilidade ser um problema menos significativo.
- MF: a estabilidade constitui um problema importante nos sistemas de controle de MF, que podem apresentar uma tendência de correção de erros além do necessário, causando oscilações de amplitude constante ou variável.
- MA: Para sistemas nos quais as entradas são conhecidas com antecipação e que são isentos de distúrbios, é conveniente o uso do controle de MA.
- MF: Sistemas de controle de MF são mais vantajosos somente nos casos em que houver distúrbios e/ou alterações não previsíveis nos componentes do sistema.
- MF: O número de componentes utilizados em um sistema de controle de MF é maior do que em um sistema correspondente de MA. Assim, no sistema de controle de MF, o custo e a potência são geralmente maiores. Visando à diminuição da potência necessária à operação de um sistema, deve-se optar pelo controle de MA, sempre que possível.

# MALHA ABERTA:

---

- Vantagens:
  - São simples de ser construídos e têm fácil manutenção.
  - São menos dispendiosos que um sistema correspondente de malha fechada.
  - Não apresentam problemas de estabilidade.
  - São adequados quando existem dificuldades de medição da saída ou quando a medição precisa da saída não é economicamente possível.  
(Por exemplo, no caso da máquina de lavar roupas, seria bastante dispendiosa a instalação de um dispositivo para avaliar se as roupas foram bem lavadas.)
- Desvantagens:
  - Distúrbios e mudanças na calibração causam erros, e a saída pode apresentar diferenças em relação ao padrão desejado.
  - Para que a saída mantenha a qualidade requerida, é necessária uma regulagem periódica.

# EXEMPLO DE CONTROLADOR PD

---

PD contínuo:  $u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}$

PD discretizado:  $u(kT) = K_p e(kT) + K_d \frac{\{e(kT) - e[(k-1)T]\}}{T}$

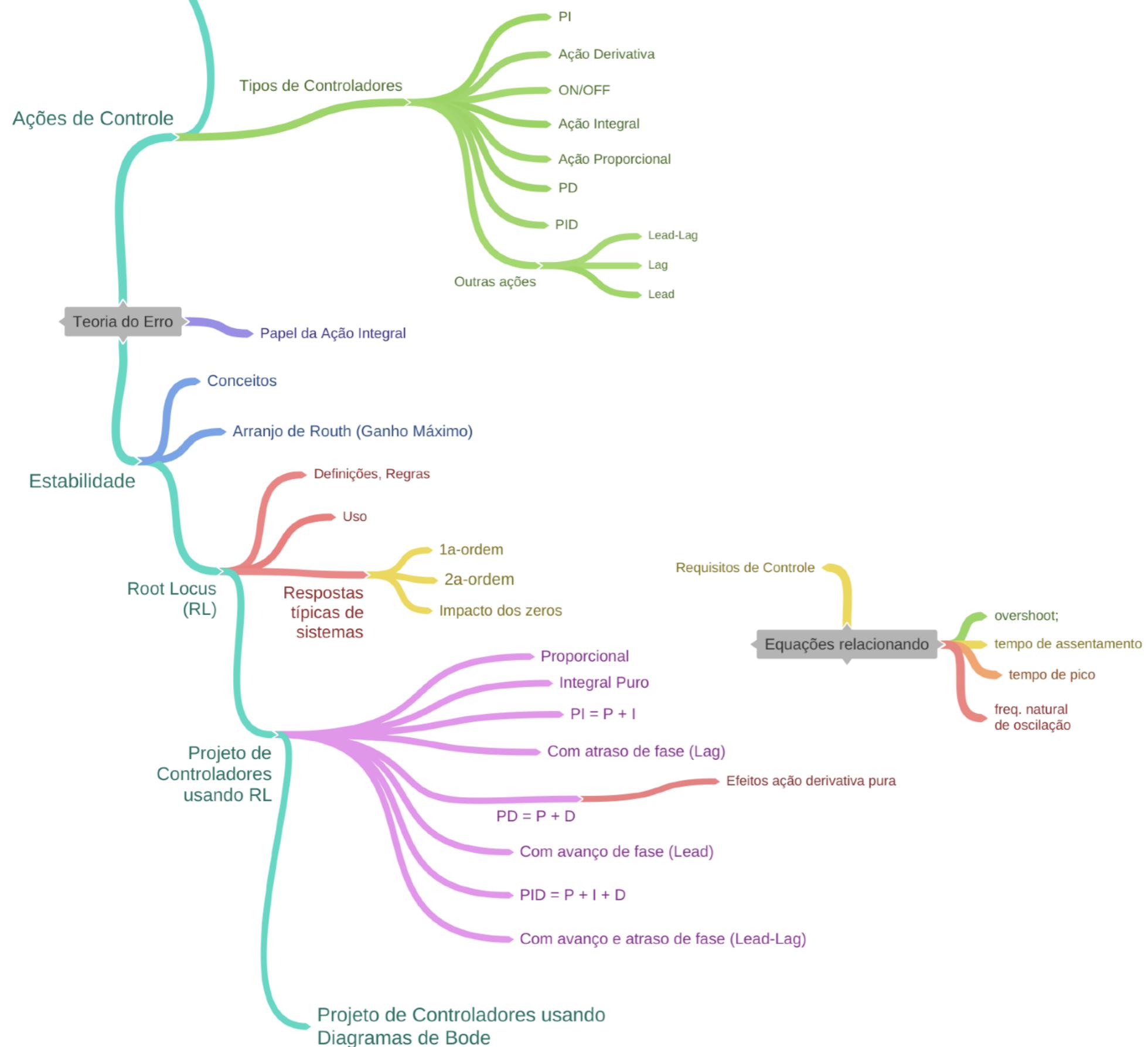
Equações de diferença  
(o que é implementado a nível de código/  
programação)



# DESENVOLVIMENTO DA TEORIA

---

1. **Introdução.**
2. **Ações Básicas de Controle.**
3. **Teoria do Erro (ou da Precisão).** Importância da Ação Integral.
4. **Estabilidade.** Determinação. Arranjo de Routh-Hurwitz. Determinação de faixas de ganho.
5. **Lugar Geométrico das Raízes (ou RL=Root Locus).** Definições. Regras. Uso de ferramenta matemática. Importância e uso do RL.
6. **Revisão de Respostas de Sistemas de 1a e 2a-ordem (equações típicas).** Localização de pólos no plano-s.
7. **Projeto de Controladores usando Root Locus.**
8. **Projeto de Controladores usando Resposta em Frequência (ou Diagramas de Bode).**
9. **Teoria de Espaço de Estados:** desenvolvida no final de 1950. Modelos no espaço de estados são representados no tempo discreto e considerados apenas nos instantes de amostragem.



# SEQUÊNCIA DAS AULAS

Tópicos Previstos

# BIBLIOGRAFIA ADOTADA

---

- NISE, NORMAN S.; “Control Systems Engineering”, 6a-ed., John Wiley & Sons, 2011.
- NISE, NORMAN S.; “Engenharia de Sistemas de Controle”, LTC, 2012.
- OGATA, KATSUHIKO; “Engenharia de Controle Moderno”, 5a-ed., Pearson Education, 2011.
- GARCIA, CLAUDIO; "Controle de Processos Industriais: Volume 1 - Estratégias convencionais", Blucher, 600 p., 2017.
- DORF, RICHARD C.; BISHOP, ROBERT H. "Sistemas de controle modernos". Rio de Janeiro: LTC, 2013. xx, 814 p.