

CONTROLE AUTOMÁTICO I

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.

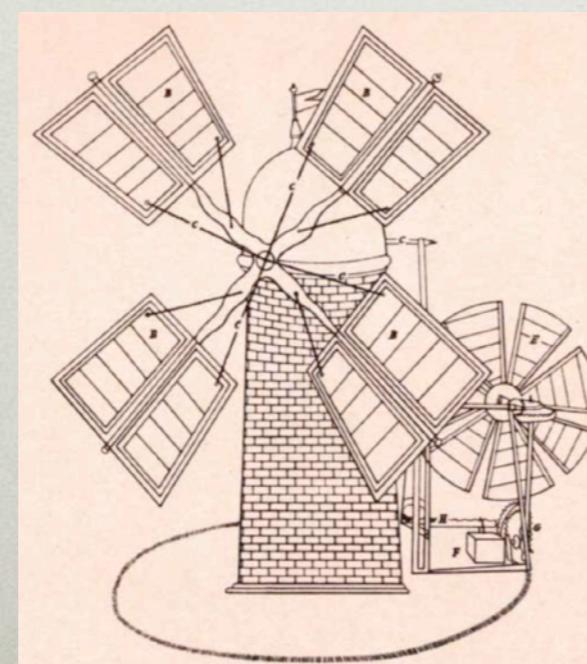
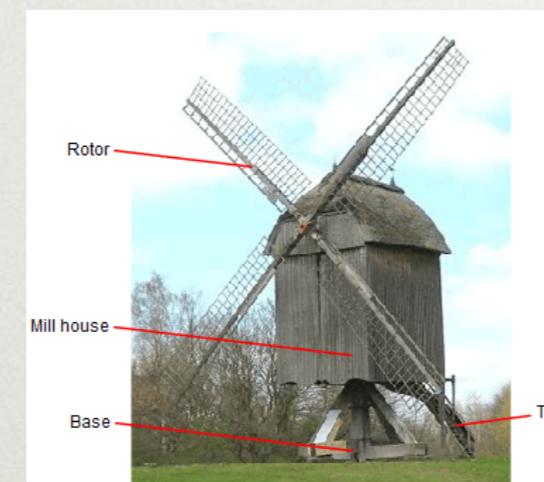
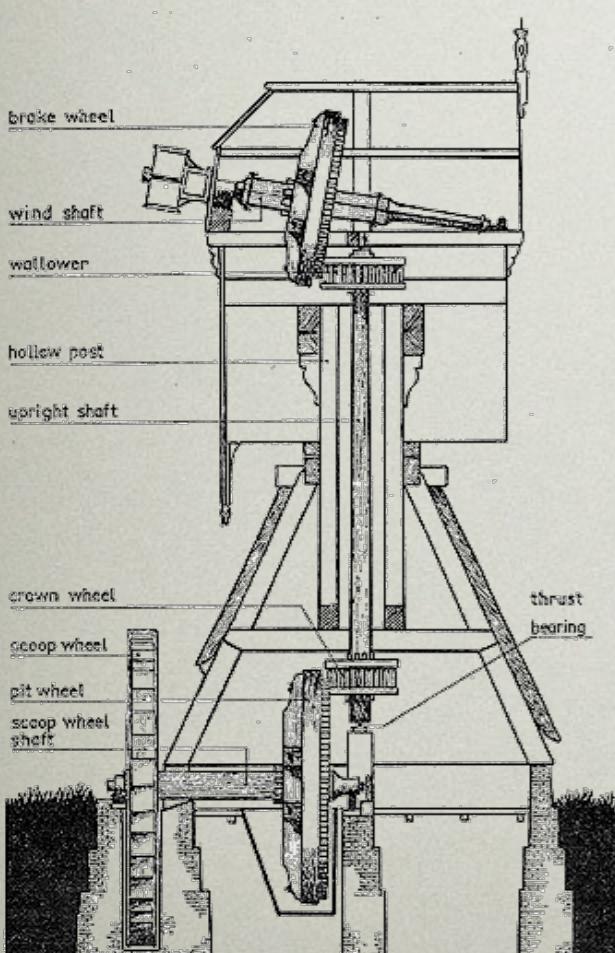
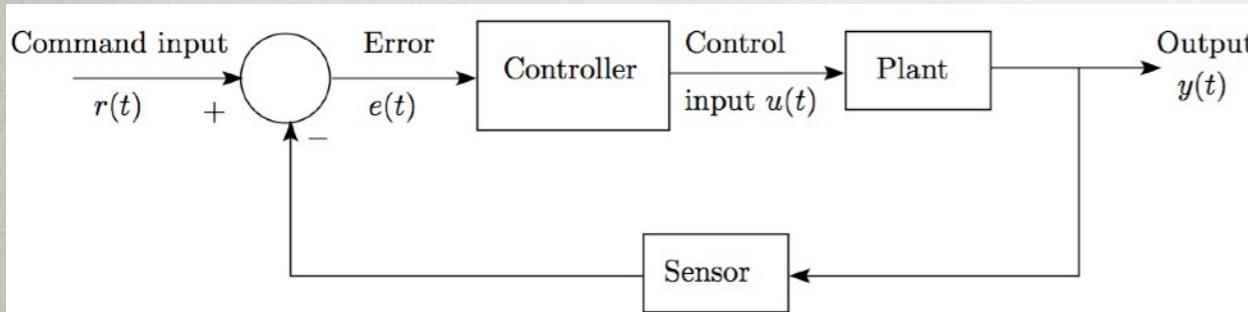
O controle feedforward semelhante foi incorporado em várias máquinas-ferramenta inventadas no século 19, nas quais uma ferramenta de corte seguia a forma de um modelo.

* Jacquard machine —> https://en.wikipedia.org/wiki/Jacquard_machine

HISTÓRIA:

Princípio:

Sistemas mecânicos.

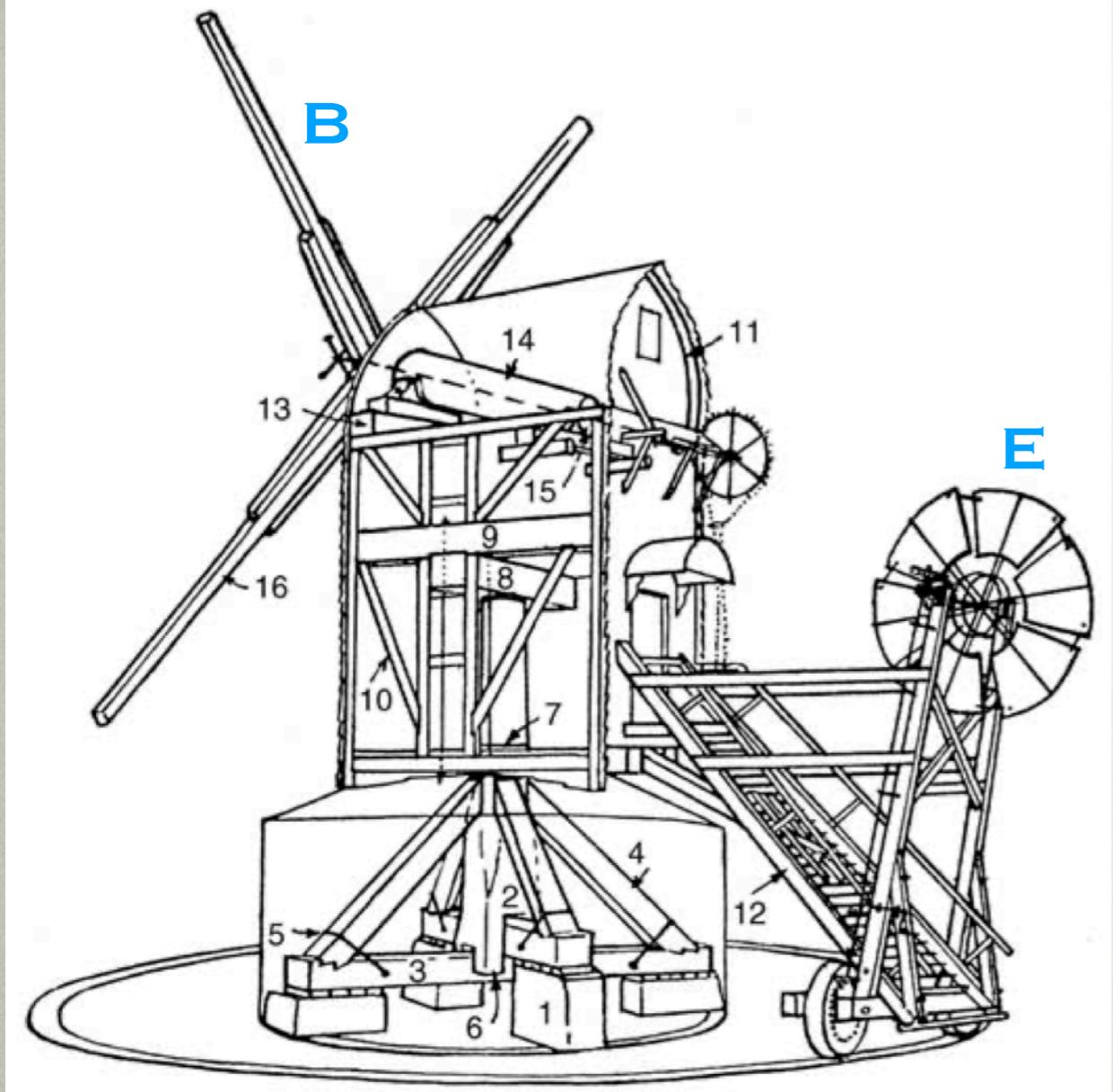


O controle de feedback (por realimentação), no qual as informações do processo são usadas para corrigir a operação de uma máquina, tem uma história ainda mais antiga. Os engenheiros romanos mantinham os níveis de água de seu sistema de aquedutos por meio de válvulas flutuantes que abriam e fechavam em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



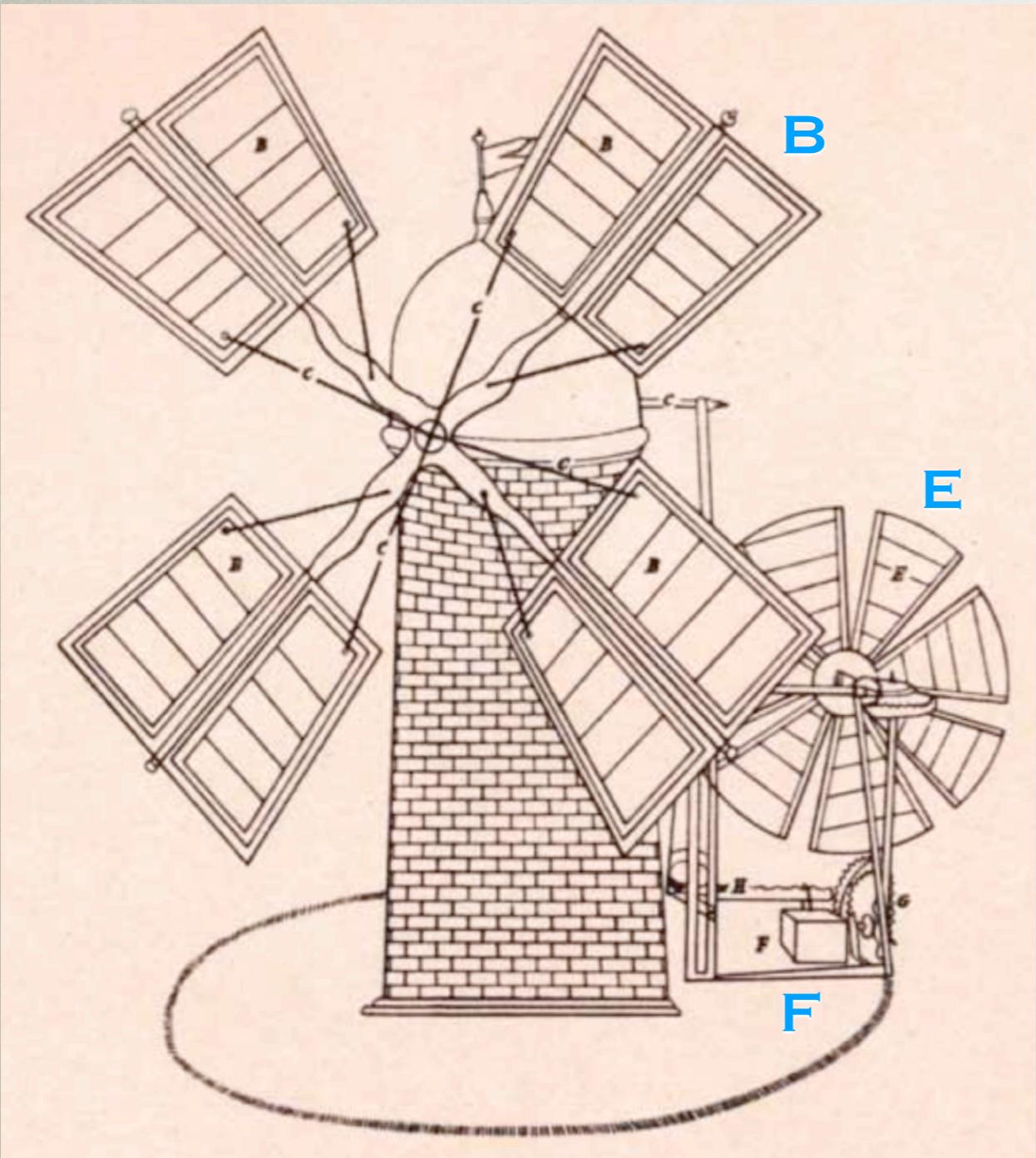
Os primeiros controles do moinho de vento são mostrados neste desenho, de uma patente britânica concedida a Edmund Lee em 1745. Os dispositivos reguladores consistiam em uma cauda projetada para manter o moinho de vento voltado para o vento e um mecanismo para controlar a velocidade do moinho apesar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



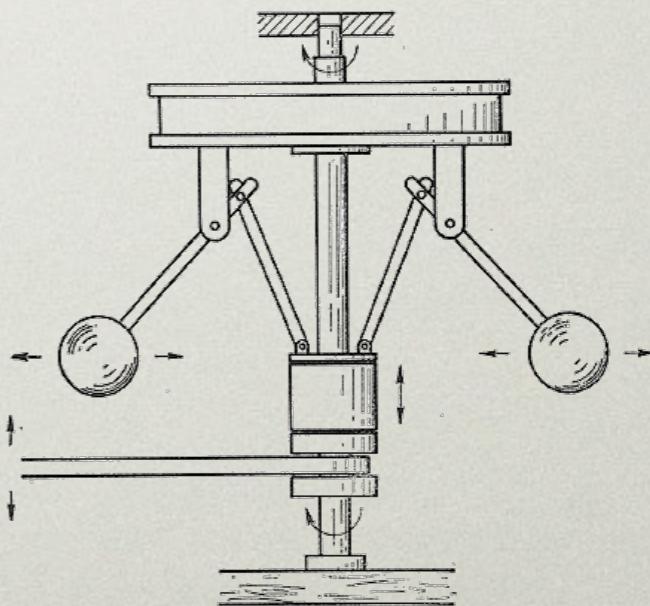
Mayr, Otto. "The Origins of Feedback Control." *Scientific American*, vol. 223, no. 4, 1970, pp. 110–119., www.jstor.org/stable/24927641. Accessed 16 Aug. 2020.

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.

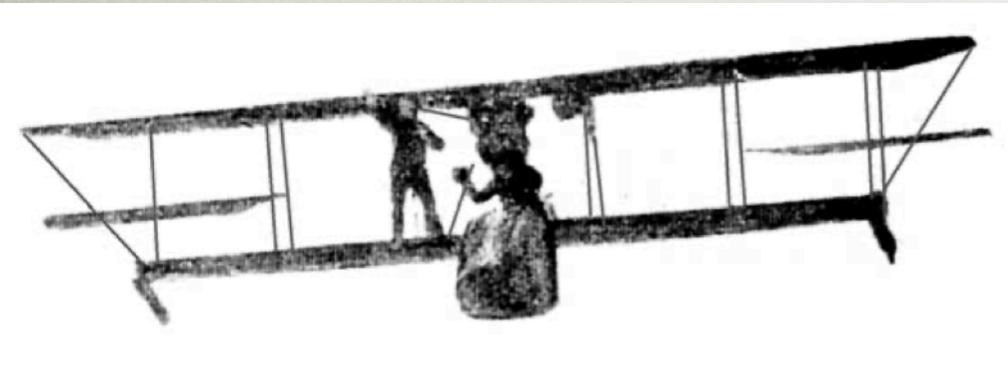
Quando o vento aumentava a velocidades excessivas, de modo que sua força nas velas fosse maior do que a do contrapeso, a inclinação das velas era invertida e a velocidade de rotação da roda verificada.

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.

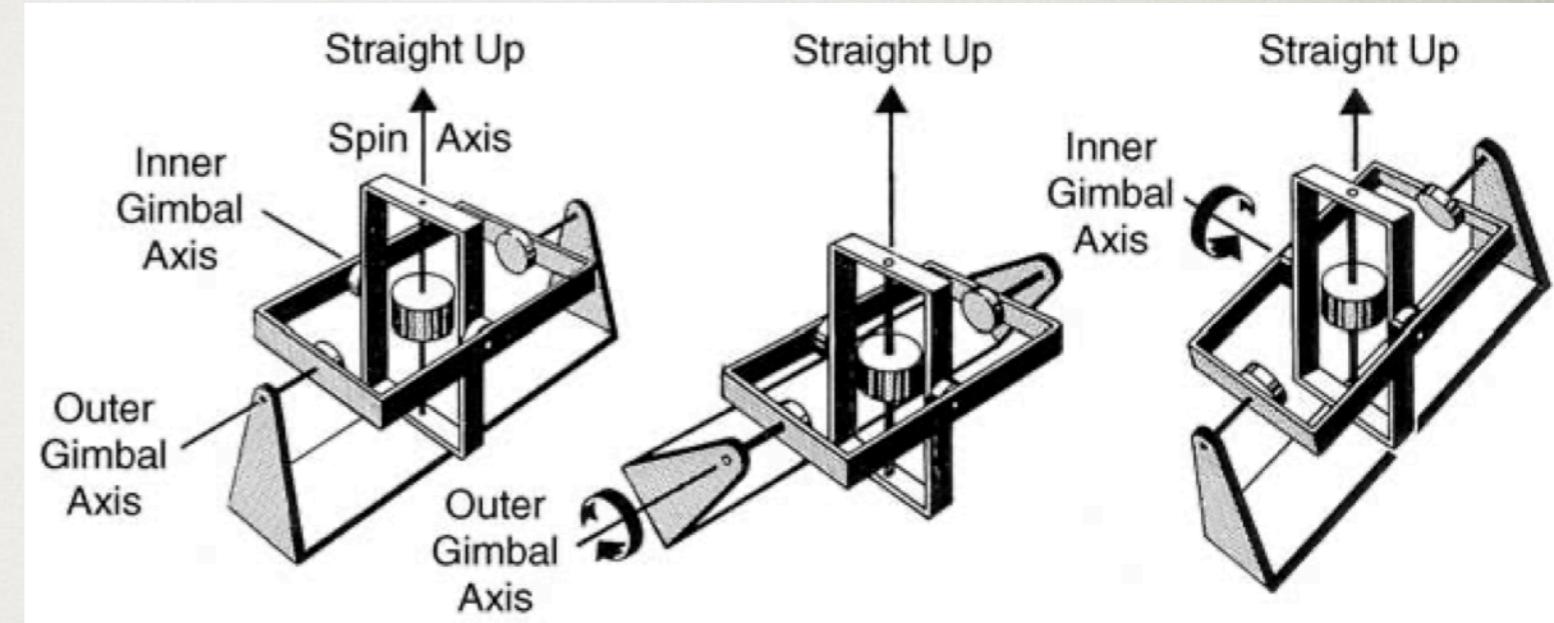


The Dutch Windmill (<http://www.texva.com/holland/The%20Dutch%20Windmill.htm>)

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.



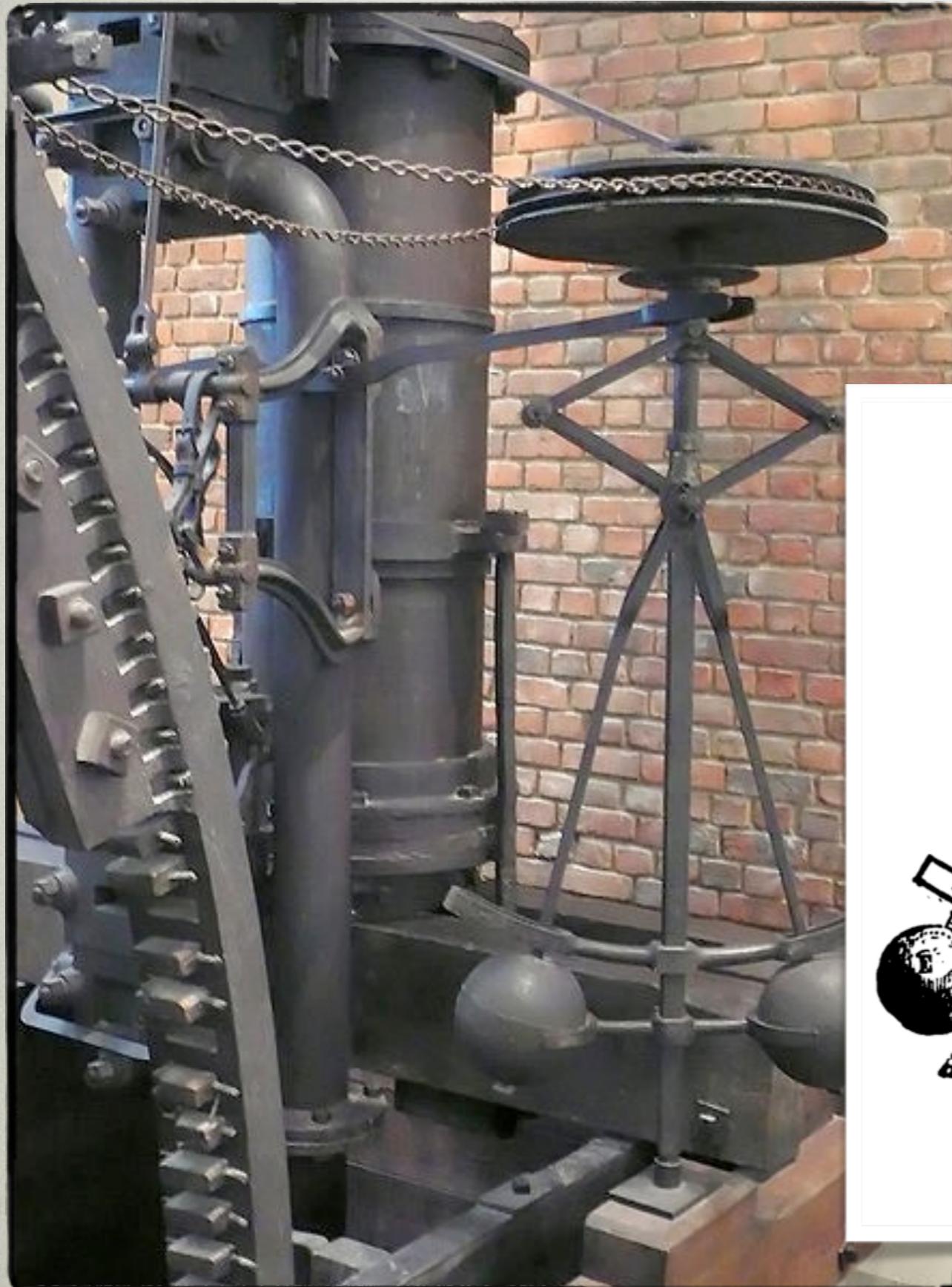
Um giroscópio de deslocamento é uma roda giratória montada em um par de cardans (gimbals). O eixo de rotação da roda mantém sua orientação no espaço enquanto os cardan giram. Ao alinhar o gimbal externo com o eixo do rolo e o gimbal interno com o eixo do passo, é possível medir esses ângulos durante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

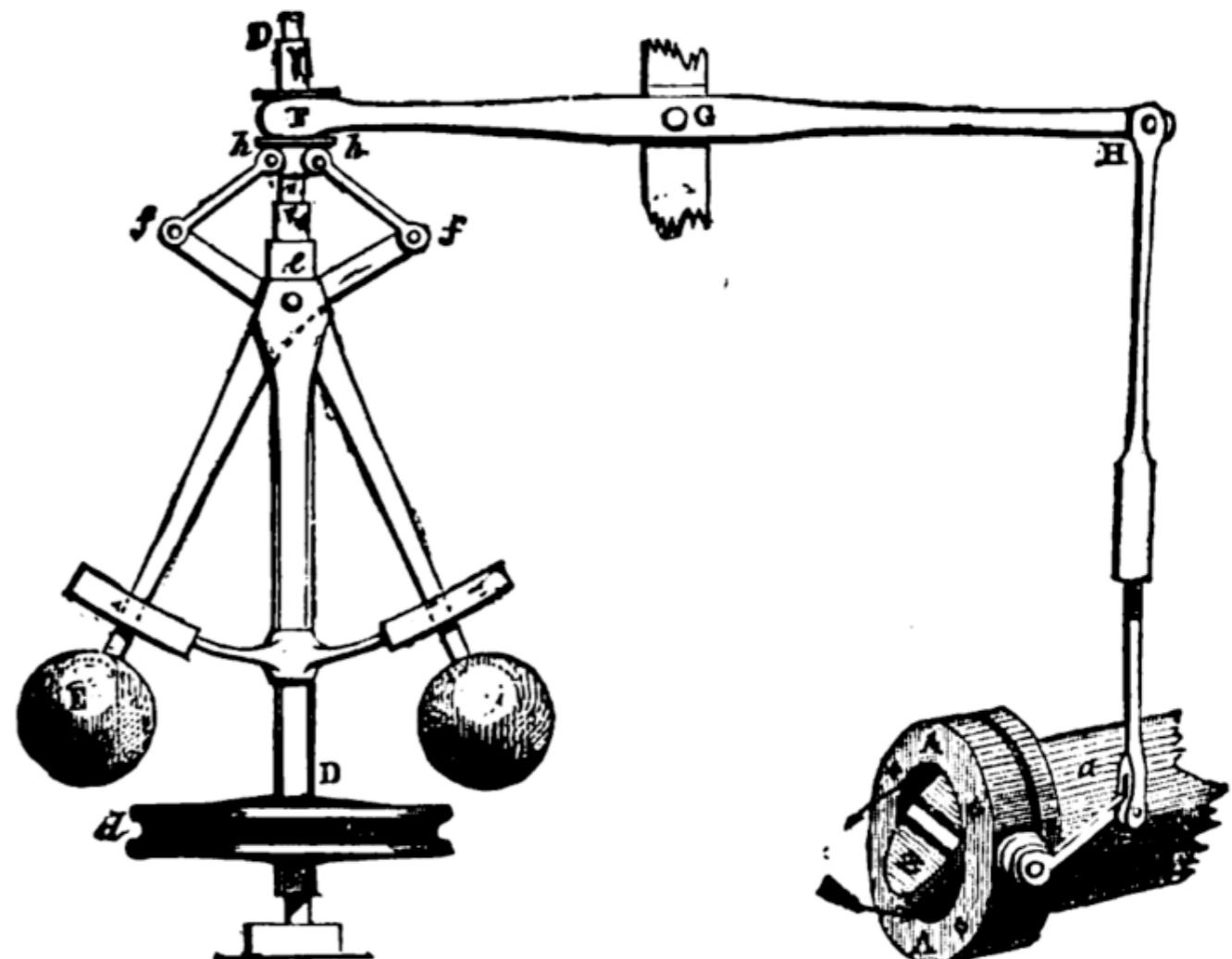


FIG. 4.—Governor and Throttle-Valve.

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);

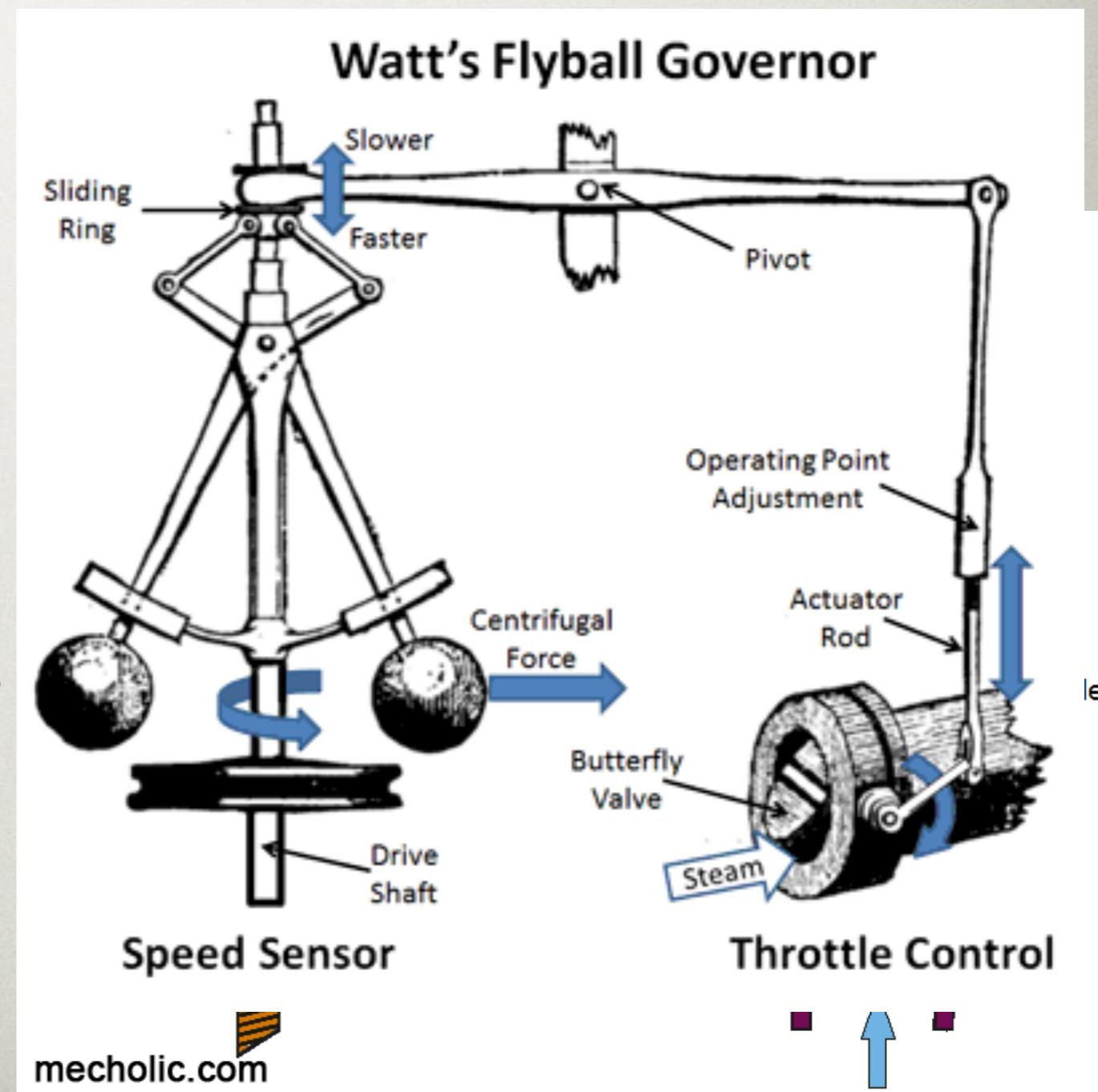
REGULADOR FLYBALL DE WATT

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

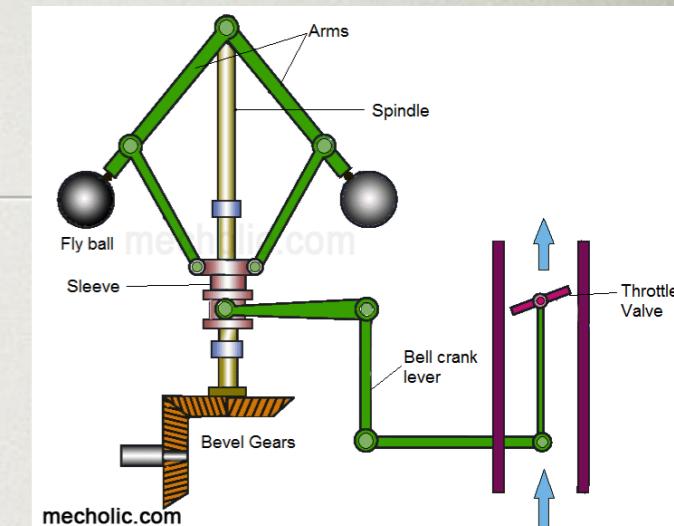
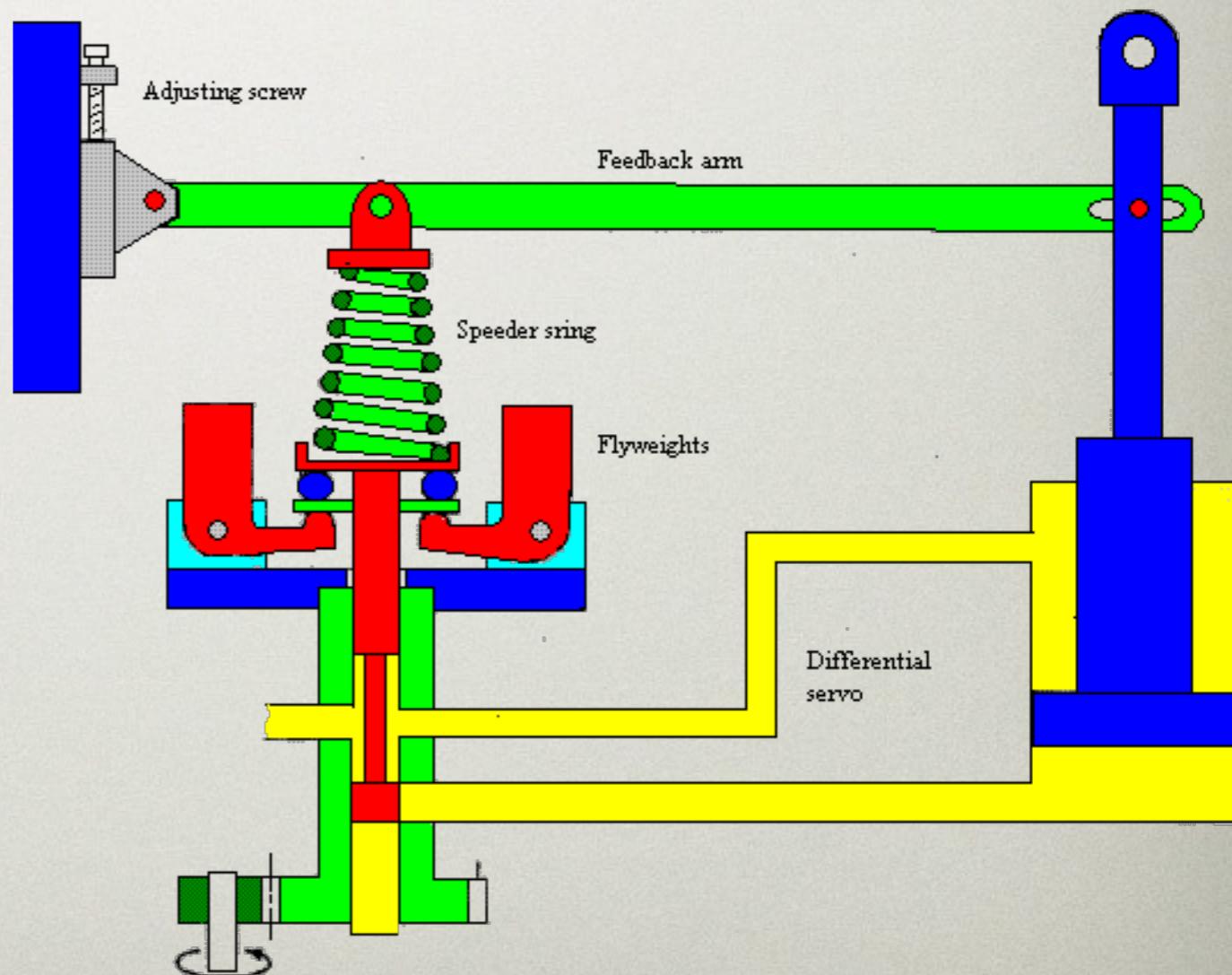
Se a rotação do motor for muito alta, a força centrífuga sobre os pesos do sensor fará com que a haste do atuador seja elevada, por sua vez, fazendo com que a válvula borboleta se move de modo a restringir o fluxo de vapor para o motor, reduzindo assim sua velocidade.

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.



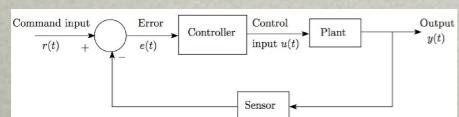
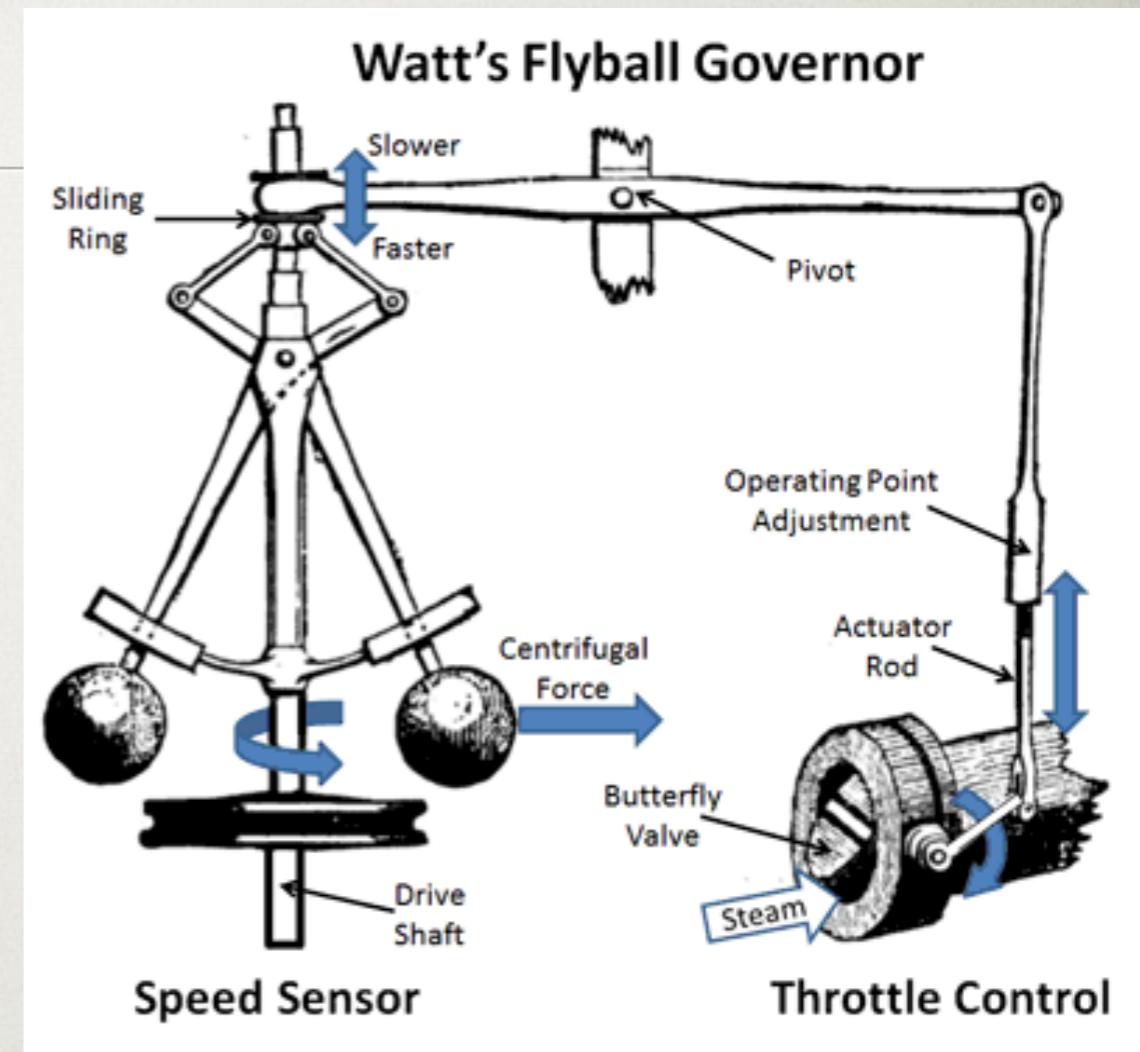
REGULADOR FLYBALL DE WATT

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.



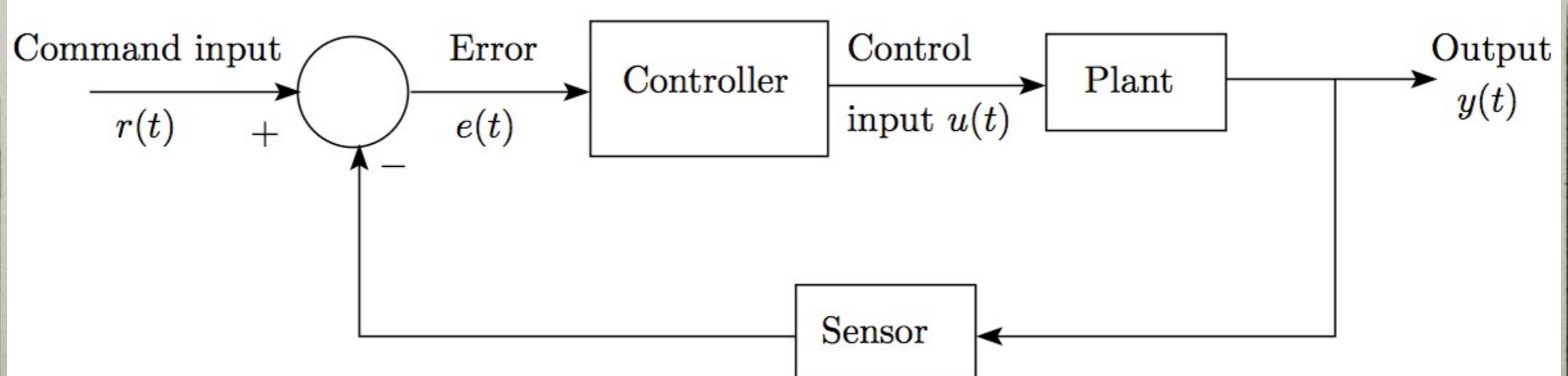
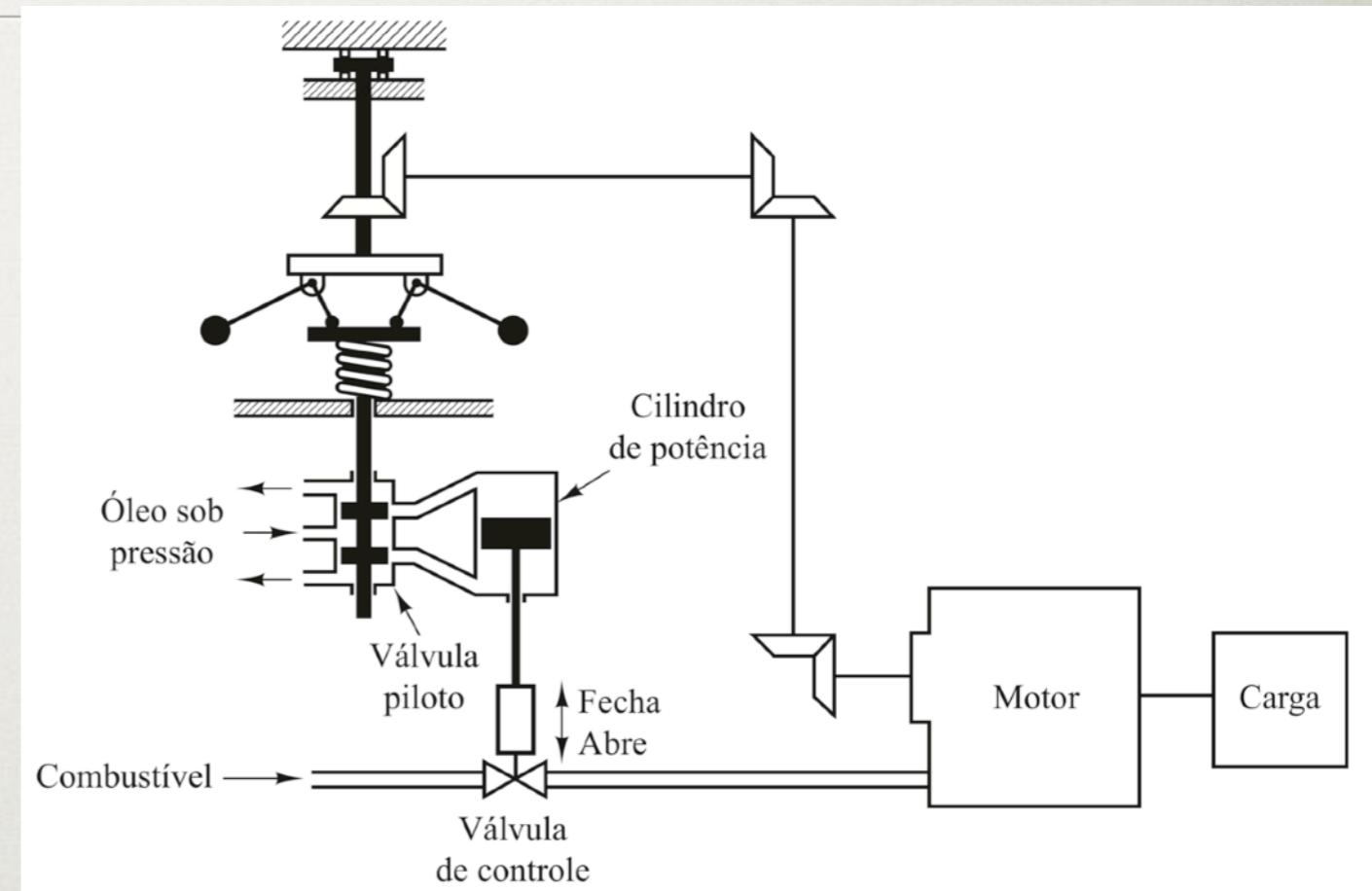
CONTROLADOR FLYBALL DE WATT

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);

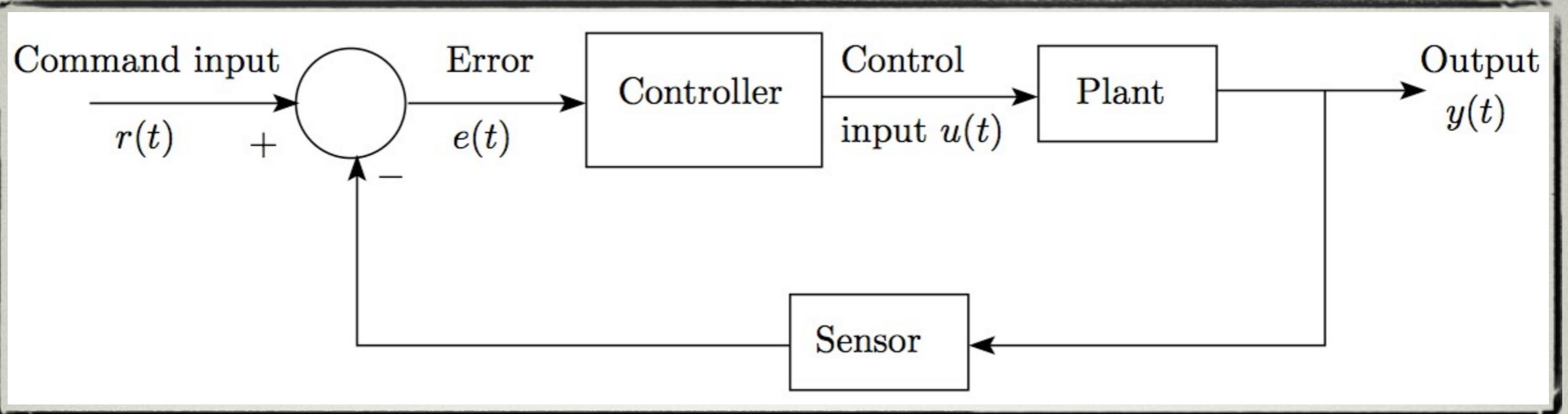


HISTÓRIA

- 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.



TÍPICA MALHA DE CONTROLE FECHADA CONTÍNUA NO TEMPO

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.

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)



CONTEÚDO PREVISTO

Ementa:

Introdução aos sistemas de controle. Transformada de Laplace. Modelagem matemática de sistemas dinâmicos. Análise de resposta transitória e de regime estacionário. Análise de lugar das raízes (Root Locus). Análise de resposta em freqüência (Diagramas de Bode).

Conteúdo previsto:

Revisão da transformada de Laplace - teoremas, propriedades, resolução de tarefas.

Revisão da transformada de Laplace inversa - expansão em frações parciais, aplicação para resolução de equações diferenciais lineares invariantes no tempo.

Função de transferência.

Diagramas de blocos, álgebra de blocos.

Modelamento de sistemas dinâmicos - sistemas mecânicos, eletro-mecânicos, elétricos, eletrônicos e níveis de líquido.

Processos transitórios em sistemas dinâmicos:

Sistemas de 1a ordem, sistemas de 2a ordem, sistemas de ordem superior.

Ações de controle básicas e controladores industriais.

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.