

UMA BREVE HISTÓRIA DO CONTROLE AUTOMÁTICO

Marco Valério Miorim Villaça¹, Jony Lauerano Silveira²

Resumo: O melhor meio para compreender qualquer área do conhecimento é examinar a sua trajetória e as razões para a sua existência. O homem sempre foi fascinado pela ideia de uma máquina autônoma. A mitologia grega, por exemplo, menciona autômatos criados pelo deus Hefesto. Por sua vez, em sua trajetória, a teoria de controle conheceu diferentes estágios e abordagens, intimamente relacionadas com as demandas de sua época. Este trabalho apresenta um breve esboço da evolução da teoria de controle, destacando os avanços mais importantes.

Palavras-chave: Controle automático. História. Teoria de controle.

Abstract: *The best way to understand any area of knowledge is to look at its history and the reasons for its existence. Man has always been fascinated by the idea of an autonomous machine. Greek mythology, for example, mentions automatons created by the god Hephaestus. In turn, control theory known throughout its history, different stages and approaches, closely related to the demands of each period. This paper presents a brief outline of the evolution of control theory, highlighting the most important advances.*

Keywords: Automatic control. History. Control theory.

¹ Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), campus Florianópolis, IFSC <mvillaca@ifsc.edu.br>.

² Professor do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), campus Florianópolis, IFSC <jony@ifsc.edu.br>.

1. INTRODUÇÃO

A história do controle realimentado está intimamente ligada aos problemas práticos que precisaram ser resolvidos em determinadas etapas da história da humanidade. Segundo Lewis (1982), os momentos históricos que influenciaram no rumo do controle realimentado foram:

- a preocupação dos gregos e árabes com o registro preciso do tempo, entre 300 a.C. e 1200 d.C.
- a revolução industrial, que teve início no terceiro quarto do século XVIII.
- o surgimento das primeiras tecnologias de comunicação em massa e as grandes guerras mundiais, entre 1910 e 1945.
- o início da era espacial em 1957, impulsionada pelo concomitante progresso da computação digital.

Entre a Revolução Industrial e as Guerras Mundiais, houve um acontecimento extremamente importante: em 1868, o físico escocês J. C. Maxwell

ofereceu, em seu artigo “*On governors*”, a primeira análise matemática rigorosa de um sistema de controle realimentado:

“Eu proponho, no momento, sem entrar em qualquer detalhe do mecanismo, dirigir a atenção de engenheiros e matemáticos à teoria dinâmica de tais reguladores” (MAXWELL, 1868, p. 271, tradução nossa).

A teoria de controle começava a ser escrita na linguagem da matemática. Assim, o período anterior a 1868 pode ser considerado a pré-história do controle automático.

Segundo Friedland (1986), Lewis (1992) divide a história do controle realimentado em três períodos:

- período primitivo do controle automático, de 1868 até o início do século XX.
- período clássico, do início do século XX até 1960.
- período moderno, de 1960 até os dias atuais.

2. O CONTROLE NA ANTIGUIDADE

O homem sempre foi fascinado com a ideia de uma máquina autônoma. Aristóteles, quase duas centenas de séculos atrás, sugeriu que a automação poderia tornar os homens verdadeiramente livres:

“[...] Se cada instrumento pudesse executar a sua missão obedecendo a ordens, ou percebendo antecipadamente o que lhe cumpre fazer, como se diz das estátuas de Dáidalos, ou dos tripodes de Héfaistos, que como fala o poeta, "entram como autômatos nas reuniões dos deuses", se, as lançadeiras tecessem e as palhetas tocassem cítaras por si mesmas, os construtores não teriam necessidade de auxiliares e os senhores não necessitariam de escravos” (ARISTÓTELES, Política I.2,1254a34-39, trad. Kury).

Homero (*Iliada*, 18.372-377, trad. Nunes) usou a palavra grega *τριπόδης* (*tripé*) para identificar uma espécie de garçom automático criado pelo deus grego Hefesto, que podia se deslocar a sua vontade mediante rodas com a qual estava provido. Ainda, segundo Homero, Hefesto, por ser coxo, teria criado servas inteligentes forjadas em ouro para ajudá-lo a caminhar e trabalhar na forja:

“[...] e após vestir alva túnica sai a coxear da oficina num ceptro forte apoiado ladeado por duas estátuas de ouro semelhantes a moças dotadas de vida – pois ambas entendimento possuíam alento vital e linguagem sobre entenderem das obras que aos deuses eternos são gratas” (*Iliada*, 18.416-420, trad. Nunes).

Segundo o filósofo grego Appolodorus (*Lybrary*, I.ix.26, trad. Frazer), Hefesto construiu também o gigante de bronze Talos, o guardião da ilha de Creta, que “mantinha guarda correndo em volta da ilha três vezes todos os dias” (tradução nossa).

Um bom exemplo de uma máquina autônoma projetada e testada é o relógio de água autorregulado. O relógio de água é uma invenção egípcia e mesopotâmica de aproximadamente 1500 a.C. A versão grega, a *clepsidra* (ladrão de água), surgiu por volta do 3º século a.C. (MAYS, 2010). Nela, um tanque com uma pequena abertura no fundo, enche de água um segundo tanque com uma vazão supostamente constante. Como se pode supor, o registro do tempo é realizado por marcas que indicam a diminuição do nível de água no primeiro tanque ou o aumento do nível de água no segundo tanque. Apesar de oferecer um meio de contagem do tempo, esses relógios não eram muito eficazes, pois o fluxo de água é muito maior quando o primeiro recipiente está cheio do que quando ele está vazio, devido à diferença de pressão exercida pela água no fundo do tanque em cada situação.

Por volta de 270 a.C., o grego Ktesíbios adicionou um componente fundamental ao relógio de água: um regulador de flutuação. Conforme mostra a Figura 1, o regulador é formado por um flutuador em forma de cone e um funil invertido casado. Considere a água fluindo através da válvula para um tanque. Quando a água enche o tanque, o cone bóia em direção ao funil, bloqueando a passagem. Quando a água diminui, a bóia afunda, permitindo que mais água entre. Assim, a função deste regulador é manter o nível de água h_1 constante em um tanque. Este nível constante produz um fluxo constante de água através de um tubo no fundo do tanque o qual enche um segundo tanque com uma taxa constante. O nível de água no segundo tanque h_2 depende, assim, do tempo transcorrido. Este regulador de flutuação cumpre a mesma função que a boia e a válvula em um sistema de descarga moderno. Segundo Kelly (1994), o relógio de água com o regulador de flutuação representa um marco na história da Teoria de Controle, pois foi o primeiro objeto inanimado a se autocontrolar.

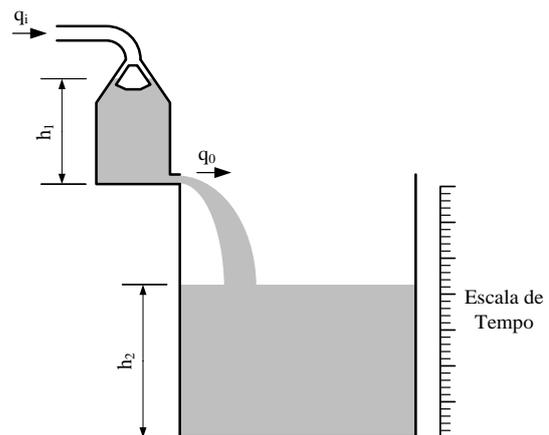


FIGURA 1 – Relógio de água com regulador de flutuação.

Pode-se dizer, assim, que o controle realimentado originou-se com os reguladores de flutuação dos gregos e árabes. Além de controlarem relógios de água, os reguladores de flutuação eram utilizados para controlar lâmpadas a óleo e preparadores de vinho. Além de Ktesíbios, destacaram-se, no mundo grego, Philon de Bizâncio e Heron de Alexandria. A tradição de relógios de água continuou no mundo árabe entre os anos 800 e 1200 d.C., conforme descrito nos livros de Ibn al-Sa-ati (1203) e Al-Jazari (1206) (MANSOUR, 2002). Seguindo a tradição de Heron, os três irmãos Musa, também construíram reguladores de flutuação em Bagdá no século IX d.C. Segundo Lewis (1982), durante este período, um importante princípio de realimentação foi usado, o controle *on-off* ou *bang-bang*, onde a ação de controle possui

apenas dois estados. O Controle *on-off*, consegue, muitas vezes, manter a variável do processo próxima da referência, como na utilização de um termostato para manter a temperatura de uma sala. Ele surgirá novamente nos anos 50 em conexão com os problemas de tempo mínimo. Um exemplo cotidiano de controle *on-off* associado a problemas de tempo mínimo é colocar a água para ferver no menor tempo possível, o que é conseguido através da aplicação de calor pleno e, em seguida, desligá-lo quando a água ferver.

Com a invenção do relógio mecânico (que não é um mecanismo realimentado) nos meados do século XIV, o regulador de flutuação cai no esquecimento, reaparecendo apenas nos meados do século XVIII na Revolução Industrial, especialmente na Inglaterra, particularmente em duas áreas de aplicação: na caldeira das máquinas a vapor e em sistemas domésticos de distribuição de água.

Além da preocupação com o registro do tempo, o homem sempre teve o interesse de se localizar no espaço. Vale mencionar que um sistema de controle pseudo-realimentado foi desenvolvido na China para propósitos de navegação: uma carruagem com uma estátua controlada por um mecanismo de engrenagens preso às rodas da mesma de forma que ela sempre apontava para o sul (Figura 2). Embora a lenda credite sua invenção ao imperador amarelo Huang Di em aproximadamente 2600 a.C., a primeira versão confirmada historicamente é atribuída a Ma Jun (200-265 d.C.), cerca de oitocentos anos antes do emprego da bússola para fins de navegação. Usando a informação direcional fornecida pela estátua, o cocheiro podia seguir um curso correto. A Figura 2 ilustra este mecanismo. Esse mecanismo pode ser chamado de sistema de controle “pseudo-realimentado” já que ele, tecnicamente, não envolve realimentação, a não ser que as ações do cocheiro sejam consideradas como partes do sistema.



FIGURA 2 – Dispositivo conhecido como *The South Pointing Chariot*. Handworx (2013).

3. A REVOLUÇÃO INDUSTRIAL

A Revolução Industrial na Europa foi marcada pela invenção de avançados moinhos de grão, fornos, caldeiras e da máquina a vapor. Como essas máquinas não podiam ser reguladas adequadamente pela mão, surgiu uma nova demanda por sistemas de controle automático. Uma variedade de dispositivos foi inventada, incluindo dispositivos de controle de velocidade e reguladores de flutuação, temperatura e pressão.

Em 1769, o engenheiro escocês James Watt, estudando uma máquina do inglês Thomas Newcomen, inventou uma máquina a vapor mais versátil e mais eficiente. Essa máquina substituiu as máquinas de Newcomen e a sua construção marca o início aceito da Revolução Industrial (LEWIS, 1982). Porém, as raízes da Revolução Industrial podem ser encontradas antes do século XVII com o desenvolvimento de moinhos de grão e de fornos.

O holandês Cornelis Drebbel (1572-1633), em torno de 1624, desenvolveu um sistema de controle automático de temperatura onde, essencialmente, um termômetro de álcool era usado para operar uma válvula de controle de um forno à combustão e, portanto, a temperatura de um recinto fechado, como por exemplo, uma incubadora para chocar ovos. O dispositivo incluía parafusos para alterar o ponto de operação.

“Nos séculos seguintes, essa invenção amadureceu gradualmente. Ela foi apresentada para um público mais amplo, em 1839, quando Andrew Ure, em seu *‘Dictionary of Arts’*, descreveu várias versões de um regulador de temperatura bimetalico que chamou de termostato” (MAYR, 1971, p. 3, tradução nossa).

Um problema associado com a máquina a vapor é o da regulação de pressão do vapor na caldeira, pois o vapor que aciona a máquina deve estar a uma pressão constante. Em 1681, o físico francês Denis Papin inventou um dispositivo realimentado simples, uma válvula de segurança para uma panela de pressão. O dispositivo composto por uma válvula com um sobrepeso colocada na parede da caldeira, compara a pressão real (força na parte interna) com a pressão desejada (força peso); toda vez que a pressão real excede a pressão desejada, a válvula libera o vapor até o equilíbrio ser restaurado. Em poucas décadas, a invenção de Papin tornou-se um acessório padrão das máquinas a vapor. O próprio Papin, em 1707, adaptou seu dispositivo para regular a pressão de um protótipo de uma máquina a vapor.

Os construtores de moinhos ingleses, profissionais com influência notável na tecnologia do século XVIII, desenvolveram uma variedade de dispositivos de controle realimentado. O mais antigo desses, o *fantail* (Figura 3), inventado em

1745 pelo ferreiro britânico E. Lee, pode ser descrito como um moinho de vento auxiliar que é montado atrás das velas principais, num ângulo reto

a elas. Se a direção do vento muda, atinge o *fantail*, virando o moinho até que as velas principais estejam outra vez perpendiculares ao vento.

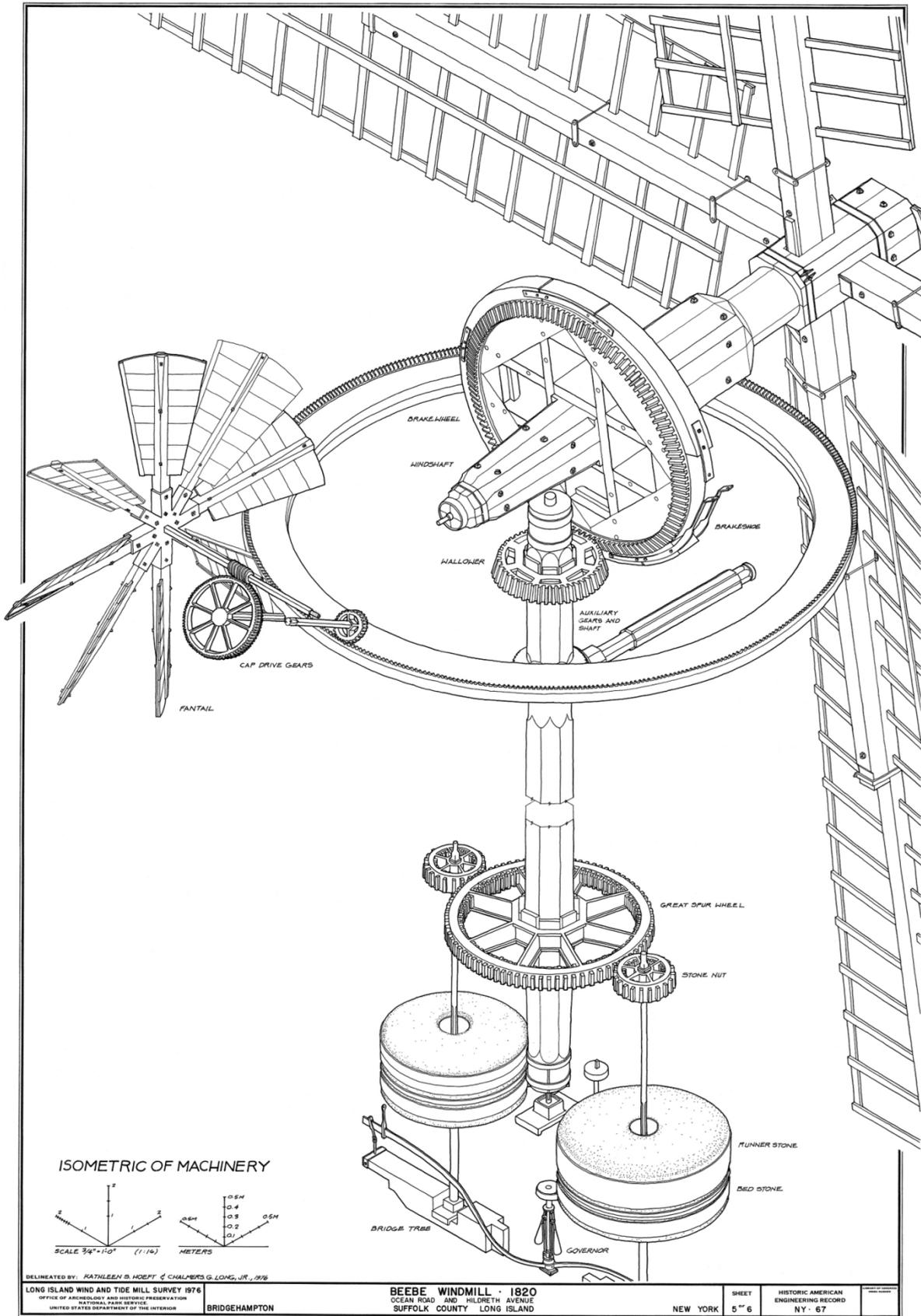


FIGURA 3 - Dispositivo similar ao inventado pelo britânico E. Lee, com a função de manter o moinho de vento na direção do vento. Hoeft e Long Jr. (1976).

Os construtores de moinho dedicaram-se, ainda, ao problema da regulação da velocidade. Para construir um controlador realimentado, contudo, é importante ter dispositivos de medição adequados.

Desta forma, os construtores de moinhos desenvolveram vários dispositivos para sensorar velocidade de rotação. Usando estes sensores foram inventados vários reguladores de velocidade, destes, talvez os mais importantes foram os dispositivos patenteados em 1787 pelo engenheiro inglês Thomas Mead, que usavam o pêndulo centrífugo (*flyball*) como sensor de velocidade e, que em algumas aplicações, também supria a realimentação. Mais tarde, grande parte desta tecnologia foi adaptada para o uso na regulação de máquinas a vapor.

As primeiras máquinas a vapor proviam um movimento de produção alternativo e foram desenvolvidas para controlar o bombeamento de água em minas de carvão. As máquinas de vapor de James Watt com movimento de produção rotativo alcançaram a maturidade por volta de 1783, quando a primeira foi vendida.

Um problema associado com a máquina a vapor rotativa é o de regulação da sua velocidade de revolução. Alertado pelo seu colaborador Matthew Bolton, Watt toma conhecimento do pêndulo centrífugo de Mead e, em 1788, utiliza um regulador centrífugo de esferas suspensas (Figura 4) para manter constante a velocidade de uma máquina a vapor rotativa (Figura 5), independente das variações de carga e da pressão do vapor.

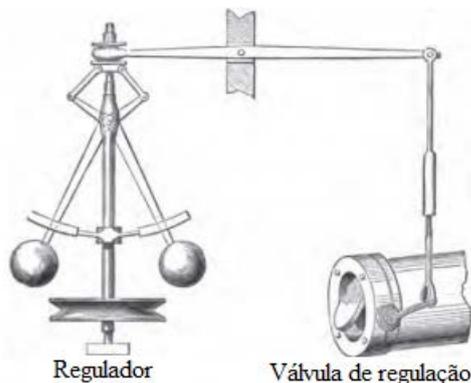


FIGURA 4 – Ilustração de um regulador centrífugo. Adaptada de Clark (1892, p. 49).

Esse dispositivo empregava duas esferas suspensas que giravam em torno de um eixo e que eram arremessadas para fora pela força centrífuga. Quando a velocidade de rotação da máquina a vapor aumentava, por algum motivo, os pesos suspensos balançavam mais para fora e para cima, operando uma válvula de estrangulamento do fluxo de vapor que reduzia a velocidade da máquina. Se o motor desacelerava, como resultado de uma carga súbita, o

movimento para dentro dos pesos abria a válvula de fluxo e a máquina podia acelerar. Assim, uma velocidade constante era alcançada automaticamente.

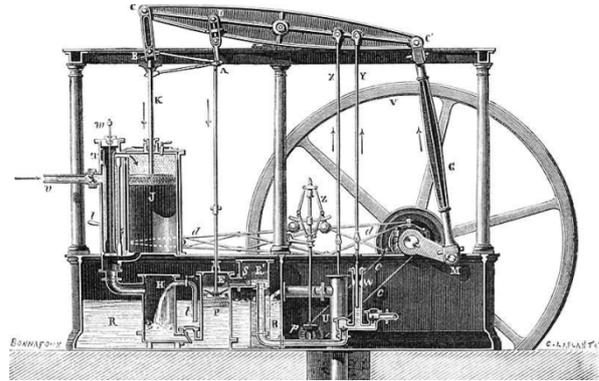


FIGURA 5 – Máquina a vapor de Watt. Old Book Illustrations (2013).

Para Lewis (1982), os dispositivos de realimentação anteriores ao regulador centrífugo de esferas suspensas “permaneceram obscuros ou fizeram um papel imperceptível como uma parte da maquinaria que eles controlavam”. A operação do regulador centrífugo, por sua vez,

“era claramente visível até mesmo para o olho destreinado e seu princípio tinha um sabor exótico que parecia para muitos encarnar a natureza da nova era industrial”.

Bennett (1979) nos dá uma ideia do seu sucesso ao informar que, até 1868, 75.000 reguladores estavam em operação.

Os projetos de sistemas de controle realimentados através da Revolução Industrial eram desenvolvidos por tentativa e erro e acompanhados de muita intuição; estavam mais para arte do que ciência. Em meados do século XIX, a matemática começou a ser utilizada para analisar a estabilidade de sistemas de controle realimentados. Considerando que a matemática é o idioma formal da teoria de controle automático, o período anterior a este poderia ser considerado a pré-história da teoria de controle.

Concomitantemente com a evolução dos reguladores industriais, astrônomos britânicos se interessaram por um mecanismo realimentado capaz de manter um telescópio direcionado para um corpo celeste durante um longo tempo compensando a rotação da terra. Em 1840, o astrônomo real britânico George B. Airy, ao analisar a dinâmica desses mecanismos em seu artigo “*On the regulator of the clock-work for effecting uniform movement of equatoreals*”, descobriu que fortes oscilações eram introduzidas no sistema devido ao projeto impróprio do laço de controle realimentado. Ele foi o primeiro a discutir a instabilidade dos sistemas de malha

fechado e o primeiro a utilizar as equações diferenciais na sua análise.

Em seu artigo “*On Governors*”, publicado em 1868, o físico inglês James C. Maxwell explicou as instabilidades apresentadas pelo regulador *flyball* usando equações diferenciais para descrever o sistema de controle. Nesse artigo, a condição de estabilidade que todos os pólos devem estar no semiplano esquerdo foi indicada explicitamente pela primeira vez:

“Esta condição é matematicamente equivalente à condição que todas as possíveis raízes e todas as possíveis partes das raízes impossíveis de uma certa equação devem ser negativas” (MAXWELL, 1868, p. 271, tradução nossa).

Até este momento, não se entendia porque reguladores aparentemente bem elaborados podiam apresentar um comportamento instável. “Com o trabalho de Maxwell nós podemos dizer que a teoria de sistemas de controle estava firmemente estabelecida” (LEWIS, 1982, tradução nossa).

Em 1877, o matemático inglês Edward J. Routh venceu o Prêmio Adams da Universidade de Cambridge, uma competição bienal para selecionar o melhor ensaio sobre um determinado assunto científico, com a monografia “*A Treatise on the Stability of a Given State of Motion*”, que apresenta um critério algébrico para determinar a estabilidade de um sistema. Um dos examinadores era Maxwell, que havia recebido o Prêmio Adams em 1857. Cerca de 20 anos após Routh, o matemático alemão Adolf Hurwitz (1895), chegou as mesmas conclusões de Routh. Independentemente de Maxwell e Routh, em 1877, o russo Ivan Vishnegradsky (1949) analisou em seu artigo “*On direct-action governors*” a estabilidade de reguladores usando equações diferenciais. Ele expressou os resultados finais da teoria por uma fórmula compacta e por um gráfico original, os quais permitem uma rápida aplicação prática dos resultados da investigação. O trabalho de Vishnegradsky mostra como a estabilidade do regulador é afetada pelas alterações dos parâmetros do sistema tais como a massa das esferas, o atrito, o erro de regulação e o momento de inércia do volante. O artigo de Maxwell foi um passo essencial na área da mecânica teórica. Mas somente após o artigo de Vishnegradsky, os engenheiros puderam entender o que eles tinham que fazer para obter um controle estável. Seu compatriota Alexander Lyapunov (1892) estudou a estabilidade de equações diferenciais não-lineares usando uma noção generalizada de energia, introduzindo conceitos e técnicas que ainda são utilizadas.

4. AS GUERRAS MUNDIAIS E O CONTROLE CLÁSSICO

Antes da Segunda Guerra Mundial, os avanços na área do controle automático estavam distribuídos entre vários campos da engenharia. No controle de processos industriais, controladores automáticos foram usados para criar produtos de melhor qualidade com um menor custo. Segundo Bennett (1984), reivindica-se que o primeiro controlador de processos de três termos: proporcional + integral + derivativo (PID) foi introduzido pela Taylor Instrument Company em 1936. O método usado para sintonizar cada um dos três termos foi desenvolvido por John G. Ziegler (1942) e Nathaniel B. Nichols, então funcionários da Taylor Instrument Company. Segundo Desborough (2002), mais de 95% dos sistemas de controle das indústrias de processo contínuo (indústrias petroquímicas, cimenteiras, siderúrgicas, papel e celulose, entre outras) utilizam esse tipo de controlador, embora muitos dos controladores sejam, na realidade, controladores do tipo proporcional-integral (PI) que, portanto, não incluem a ação derivativa.

Antes disso, em 1911, o inventor norte-americano Elmer Sperry, fundador da Sperry Gyroscope Company, utilizou uma espécie de controlador PID para automatizar um mecanismo de direcionamento de navios (ROBERTS, 2008). Em 1922, o engenheiro russo Nikolai F. Minorsky apresentou a primeira análise teórica dos controladores PID em seu trabalho “*Directional stability of automatically steered bodies*”, atualmente utilizados em quase todos os processos industriais. Minorsky baseou a sua análise na observação de um timoneiro, verificando que o timoneiro controla o navio não apenas baseado no erro presente, mas também no erro passado e na sua taxa de variação. A ação de um controlador PID é ilustrada na Figura 6. No instante t_1 , o passado é representado pela integral do erro (área hachurada), o presente pelo valor instantâneo do erro e o futuro pela derivada do erro que provê uma estimativa do seu crescimento ou decaimento. O tempo derivativo T_d representa aproximadamente o tempo em que o erro é antecipado.

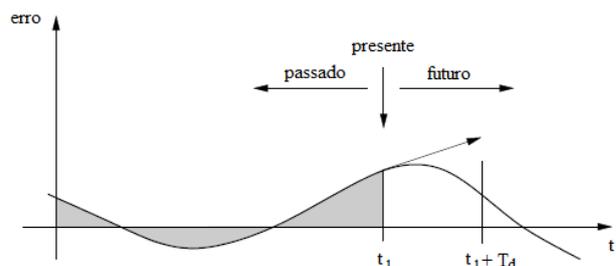


FIGURA 6 – Ação de um controlador PID. Adaptado de Åström e Murray (2008, p. 25).

Em sistemas de telefonia, amplificadores realimentados foram desenvolvidos para tornar possível a transmissão de voz em longa distância. Destacam-se nesse campo, os trabalhos no domínio da frequência dos engenheiros norte-americanos Harry Nyquist (1932), Harold S. Black (1934) e Hendrik W. Bode (1940) nos Laboratórios Bell. Em 1927, Black utilizou a realimentação negativa para reduzir a distorção em amplificadores repetidores. Nyquist desenvolveu um trabalho sobre a estabilidade de amplificadores realimentados. Em seu trabalho “*Relations between attenuation and phase in feedback amplifier design*”, Bode apresenta os diagramas logarítmicos da resposta em frequência da magnitude e da fase (Diagramas de Bode) e as definições de margem de fase e de ganho, com os quais investiga a estabilidade dos amplificadores realimentados.

Em projetos de computação analógica do Massachusetts Institute of Technology (MIT), o servomecanismo foi introduzido para substituir os operadores humanos das máquinas. Em seu artigo de 1934, sobre a teoria dos servomecanismos, o engenheiro norte-americano Harold Hazen (*apud BERGBREITER, 2005*) define um servomecanismo como um dispositivo cujo elemento de saída “[...] é então acionado para fazer a diferença entre as indicações da saída e da entrada tender a zero” (tradução nossa). Nesse sentido, um servomecanismo segue um dado sinal de entrada. Hazen também descreve o servomecanismo como um amplificador de potência, onde entradas de baixa potência poderiam ser utilizadas para controlar altas potências.

Os trabalhos desenvolvidos na Sperry Gyroscope, no MIT, nos Laboratórios Bell e na Marinha norte-americana contribuíram para a fabricação de equipamentos de direcionamento exato das armas a bordo de navios e aeronaves. A mira de bomba Norden (Figura 7), desenvolvida pelo holandês Carl Norden e frequentemente mencionada junto com o radar e a bomba atômica como as tecnologias aliadas mais importantes da Segunda Guerra, usou repetidores síncronos para transmitir informação sobre o vento, altitude e velocidade da aeronave para o computador analógico da mira, assegurando a distribuição precisa das armas.

Para estudar os problemas de controle e de processamento de informação associados ao recém-inventado radar, o Laboratório de Radiação (Rad Lab) foi fundado no MIT em 1940. Muito da teoria de controle durante a década de 1940 saiu desse laboratório. O livro “*Theory of servomechanisms*” de 1947, preparado pelo Rad Lab e organizado pelo físico Hubert M. James, pelo engenheiro Nathaniel B. Nichols e pelo matemático Ralph S. Philips,

tornou-se um texto de referência da engenharia de controle do pós-guerra.

“O trabalho descrito aqui, contudo, é o resultado coletivo do trabalho feito em muitos laboratórios, exército, marinha, universidade e indústrias, neste país, na Inglaterra, no Canadá e em outros lugares” (HUBERT; NICHOLS; PHILIPS, 1947, p. vi).

Ele introduziu a Carta de Nichols (NICHOLS; MANGER; KROHN, 1947), uma ferramenta gráfica para a análise da estabilidade e robustez de sistemas realimentados.



FIGURA 7 – Mira Norden. Glenn’s Computer Museum, 2013.

Em 1948, o engenheiro norte-americano Walter R. Evans (1948, 1950) apresentou sua técnica do Lugar das Raízes, outra contribuição importante para projeto de sistemas de controle. A ideia subjacente a esse método consiste em utilizar as propriedades de malha aberta do sistema para, a partir da variação de um parâmetro, determinar as propriedades do sistema em malha fechada. Os anos 50 foram bastante profícuos em trabalhos de controle de malha fechada baseados nos requisitos de tempo de subida, sobressinal e outros parâmetros de desempenho.

5. A ERA ESPACIAL/DO COMPUTADOR E O CONTROLE MODERNO

Esses estudos conduziram a chamada Teoria Clássica de Controle, formulada no domínio da frequência e utilizando como ferramentas matemáticas as transformadas de Laplace e Fourier. O controle clássico mostrou-se adequado para resolver os problemas de controle durante e imediatamente após a Segunda Guerra Mundial. Sua abordagem no domínio da frequência era adequada para sistemas lineares invariantes no

tempo de uma única entrada e de uma única saída. A Teoria de Controle Clássico e suas técnicas gráficas não deram conta dos problemas de controle suscitados pela corrida espacial, iniciada com o lançamento do Sputnik em 1957 pela extinta URSS. Era necessária uma teoria de controle que pudesse lidar com equações diferenciais não-lineares em sistemas multivariáveis. Desta forma, passam a ser desenvolvidos métodos no domínio do tempo, os quais recebem um forte impulso com o desenvolvimento dos computadores digitais, que constituíam a plataforma tecnológica necessária para resolver os sistemas de equações diferenciais que produzem as leis de controle. Aparece, então, um novo método de projeto de controle, a Teoria de Controle Moderno, que passa a representar os sistemas por variáveis de estado e trabalha quase exclusivamente no domínio do tempo.

O primeiro computador dedicado ao controle de uma planta industrial foi empregado em uma refinaria da empresa de petróleo Texaco em Port Arthur, Texas, no ano de 1959 (BUSINESS WEEK, 1959). Até a década de 1970, contudo, a aplicação dos computadores digitais nos sistemas de controle estava restrita a grandes plantas industriais de processos considerados lentos, devido ao alto custo e a baixa velocidade de processamento. O surgimento dos microprocessadores, em 1969, mudou radicalmente esta realidade, desenvolvendo uma nova área da engenharia de controle, o controle digital. Nele o papel do computador é analisar as variáveis provenientes do processo a ser controlado e, com base nessas, gerar os sinais de controle (Figura 8).

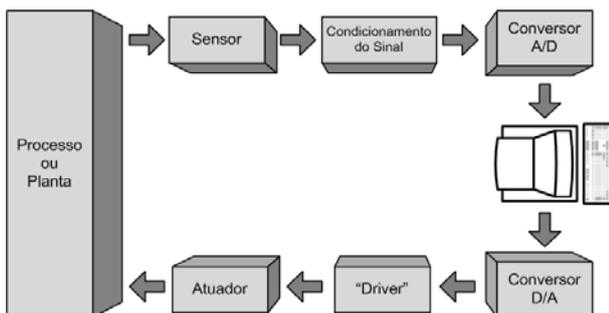


FIGURA 8 – Sistema de controle digital em malha fechada.

A proliferação de microprocessadores no mundo do controle de processos permitiu o surgimento de uma nova topologia de controle, o controle distribuído. No começo da década de 1980, um sistema em rede usando comunicação serial conectava os prédios do campus da Universidade de Melbourne, Austrália até uma sala de controle. O sistema instalado usava microprocessadores Z80 da Zilog, tanto na sala de controle, quanto nas unidades remotas (SEGOVIA; THEORIN, 2013).

Nas últimas décadas, os esforços têm se concentrado, sobretudo, nas teorias de controle robusto e controle ótimo. Os métodos de controle robusto tentam a busca de soluções em sistemas reais e que, portanto, estão sujeitos a certas incertezas na planta, nos sensores e nos atuadores. O controlador deve ser projetado não somente para atender ao modelo matemático (modelo nominal), mas também de forma a considerar pequenas variações paramétricas. No controle ótimo o projeto de controladores além de garantir a estabilidade deve ser encarado como um problema de otimização matemática, buscando um conjunto ótimo de critérios de desempenho.

Por fim, apesar de serem normalmente apresentadas separadamente na literatura, está claro nos dias atuais que a engenharia de controle deve considerar simultaneamente as teorias do domínio do tempo e do domínio da frequência.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O controle automático apresenta uma história muito longa, algo em torno de dois mil anos. Entretanto, olhando pelo menos mais mil anos para trás, é possível encontrar o controle automático como ideia na mente humana, uma vez que os mitos das antigas civilizações estão repletos de referências a máquinas robóticas automáticas. Na realidade, o primeiro dispositivo de controle realimentado com registro histórico foi o relógio de água com o regulador de flutuação de Ktesíbios. Na revolução industrial, destacam-se os reguladores mecânicos para o controle de moagem nos moinhos de vento, os mecanismos de controle de posição para telescópios e o controle de velocidade de máquinas a vapor. Por combinar sensoriamento, atuação e controle, o regulador centrífugo de Watt de 1788 foi o destaque da época. Como a procura pelo regulador centrífugo cresceu, ele passou a operar em condições nas quais exibia, por razões inexplicáveis na época, oscilações indesejáveis. O primeiro a modelar e explicar o fenômeno foi Maxwell em 1868, evento que, juntamente com os trabalhos de Routh, Vyshnegradsky e Lyapunov, introduziu o rigor matemático no estudo dos dispositivos de controle automático.

Como disciplina, a teoria de controle começou a se consolidar com as contribuições de Sperry e Minorsky no direcionamento de navios, os trabalhos sobre amplificadores realimentados de Black, Nyquist e Bode nos Laboratórios Bell na década de 1930, a teoria dos servomecanismos Harold Hazen na mesma década, o livro “*Theory of servomechanisms*” de 1947, preparado pelo Laboratório de Radiação do MIT e, finalmente, a técnica do lugar das raízes de Evans (1948). Esses estudos conduziram, na década de 1950, a chamada

Teoria Clássica de Controle, formulada no domínio da frequência e utilizando como ferramentas matemáticas as transformadas de Laplace e Fourier.

Entende-se que a visão histórica apresentada possa auxiliar na compreensão da teoria de controle ensinada nos cursos de tecnologia e engenharia como um sistema de disciplinas. O controle transcende os limites das áreas tradicionais da engenharia, tais como a aeronáutica, naval, química, elétrica, mecânica e nuclear. Seu desenvolvimento na linha do tempo não foi fruto de uma única área tecnológica, mas de vários projetos tecnológicos, tais como registro do tempo, direcionamento de navios, telefonia, controle de armamento, processos industriais e exploração espacial.

REFERÊNCIAS

- AIRY, G.B. *On the regulator of the clock-work for effecting uniform movement of equatorials*, **Memoirs of the Royal Astronomical Society**, v. 11, pp. 249-267, 1840.
- APPOLODORUS. *The library*. Trad. Sir James Jorge Frazer. Londres: William Heinemann, 1921.
- ARISTÓTELES. *Política*. Trad. Mário da Gama Kury. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1985.
- ÅSTRÖM, K.; MURRAY, R. *Feedback systems: an introduction for scientists and engineers*. New Jersey: Princeton University Press, 2008.
- BENNETT, S. *A history of control engineering 1800-1930*. London: Peter Peregrinus, 1979.
- BERGBREITER, S.. *Moving from Practice to Theory: Automatic Control after World War II*. Student paper: HIS 285S: **History of Science**, University of California, Berkley.
- BLACK, H.S. *Stabilized feedback amplifiers*. **Bell Systems Technical Journal**, v. 13, pp. 1-18, 1934.
- BODE, H.W. *Feedback amplifier design*. **Bell Systems Technical Journal**, v.19, pp.421-444, 1940.
- BUSINESS WEEK. *Texaco closes the loop*. New York: McGraw-Hill. 4 abr. 1959.
- CLARK, D. *An Elementary Treatise on Steam and the Steam-engine Stationary and Portable*. London: Lockwood, 1892.
- DESBOROUGH, L; MILLER, R. *Increasing customer value of industrial control performance monitoring - Honeywell's experience*. **AICHE Symposium Series**, n. 326, pp. 169-189, 2002.
- EVANS, W.R. *Graphical Analysis of Control Systems*. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 67, n. 1, pp. 547-551, 1948.
- EVANS, W. *Control system synthesis by root-locus method*. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. 69, pp. 66- 69, 1950.
- FRIEDLAND, B. *Control System Design: An Introduction to State-Space Methods*. New York: McGraw-Hill, 1986.
- GLENN'S COMPUTER MUSEUM. *Old Bombsights, Gun Sights & Navigation Computers*. Disponível em <<http://www.glennsmuseum.com/>>. Acessado em 27 ago. 2013.
- HANDWORX. Disponível em <http://www.handworx.com.au/gearworx/images/hist_examples/th%20pointing%20chariot.jpg> Acessado em 21 ago. 2013.
- HOEFT, K; LONG JR, C. *Beebe windmill*. Washington, D.C: **Historic American Engineering Record, National Park Service**, 1976.
- HOMERO. *Iliada*. Trad. Carlos Alberto Nunes. Rio de Janeiro: Ediouro, 2001.
- HURWITZ, A. *Ueber die Bedingungen, unter welchen eine Gleichung nur Wurzeln mit negativen reellen Theilen besitzt*, **Mathematische Annalen**, v. 46, n. 2, pp 273-284, 1895.
- KELLY, K. *Out of Control: the rise of neo-biological civilization*. Perseus Publishing, 1994.
- LEWIS, F.L. *Applied Optimal Control and Estimation*. Prentice-Hall, 1982.
- LYAPUNOV, M.A. *The General Problem of the Stability of Motion*. **Int. J. Control**, v. 55, pp. 531-773, 1992. Tradução para o inglês do artigo original em russo publicado em 1892 em Comm. Kharkov Soc. Math.
- MANSOUR, M.A *Review of Early Muslim Control Engineering*. Disponível em <<http://www.muslimheritage.com/uploads/ACF25BA.pdf>>. Acessado em 21 ago. 2013.
- MAXWELL, J. *On Governors*. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 16, pp. 270–283, 1867/68.
- MAYR, O. *Feedback mechanisms in the historical collections of the national museum of history and technology*. Washington: Smithsonian Institution Press, 1971.
- MAYS, L.W. *A brief history of water technology during antiquity: before the romans*. In: MAYS, L.W. (Org.). *Ancient water technologies*. London: Springer, 2010.

MCCORDUCK, P. *Machines who think*. 2a ed. Natick, Mass.: A. K. Peters, 2004.

MINORSKY, N. *Directional stability of automatically steered bodies*. **J. Ame. Soc. Naval Engineers**, v. 34, pp. 280–309, 1922.

NICHOLS, N.; MANGER, W.; KROHN, E. *General design principles for servomechanisms*. In: HUBERT, J.; NICHOLS, N.; PHILIPS, R. (Orgs). *Theory of Servomechanisms*. New York: McGraw-Hill, 1947.

NYQUIST, H. *Regeneration theory*. **Bell Systems Technical Journal**, v. 11, pp. 126-147, 1932.

OLD BOOK ILLUSTRATIONS. *Watt's steam engine*. Disponível em <<http://www.oldbookillustrations.com/pages/watt-steam-engine.php?lng=en>>. Acessado em 21ago. 2013.

ROBERTS, G. *Trends in marine control systems*. **Annual Reviews in Control**, n. 32, pp. 263-269, 2008.

ROUTH, E.J.A. *Treatise on the Stability of a Given State of Motion*. Londres: Macmillan, 1877.

SEGOVIA, V.R.; THEORIN, A. *History of control: history of PLC and DCS*. Disponível em <http://www.control.lth.se/media/Education/DoctorateProgram/2012/HistoryOfControl/Vanessa_Alfred_report.pdf>. Acessado em 21 ago. 2013.

VYSHNEGRADSKY, I.A. *О регуляторах прямого действия*. In: MAXWELL J.; VYSHNEGRADSKY, I.; STODOLA, A. (Orgs). *Теория автоматического регулирования (линеаризованные задачи)*. Москва: АН СССР, 1949.

ZIEGLER, J.; NICHOLS, N. *Optimum Settings for Automatic Controllers*, **Trans. ASME**, v. 64, pp. 759-768, 1942.