

LUIS ANTONIO AGUIRRE

SISTEMAS REALIMENTADOS

Uma abordagem histórica



Blucher

Luis Antonio Aguirre

SISTEMAS REALIMENTADOS
Uma abordagem histórica

Sistemas realimentados: uma abordagem histórica

© 2020 Luis Antonio Aguirre

Editora Edgard Blücher Ltda.

Imagem da capa: acervo do autor

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar

04531-934 – São Paulo – SP – Brasil

Tel.: 55 11 3078-5366

contato@blucher.com.br

www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 5. ed.
do *Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa*,
Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer
meios sem autorização escrita da editora.

Todos os direitos reservados pela Editora
Edgard Blücher Ltda.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Angélica Ilacqua CRB-8/7057

Aguirre, Luis Antonio

Sistemas realimentados : uma abordagem histórica /
Luis Antonio Aguirre. -- São Paulo : Blucher, 2020.

362 p. : il.

Bibliografia

ISBN 978-85-212-1919-4 (impresso)

1. Sistemas operacionais (Computadores) I. Título.

120-0265

CDD 005.43

Índice para catálogo sistemático:

1. Sistemas operacionais (Computadores)

Conteúdo

Apresentação	13
Prefácio	17
Créditos	23
1 Realimentação	25
1.1 Realimentação	27
1.1.1 Otto Mayr	29
1.2 Dois tipos de realimentação	30
1.3 Primeiras menções de realimentação	31
1.4 Alguns dos primeiros sistemas realimentados	34
1.4.1 Tesibios	34
1.4.2 Philon e Heron	39
1.5 Uso de realimentação na medição do tempo	40
1.6 Sistemas do século XVII e depois	46
1.7 Considerações finais	49
2 Moinhos e máquinas a vapor	53
2.1 Moinhos	55
2.1.1 A patente de Edmund Lee	57
2.1.2 Detecção de velocidade	64
2.2 Regulação de velocidade	65
2.3 Máquinas a vapor	67
2.3.1 A válvula governadora de Watt	71
2.3.2 Primeiras tentativas de análise e solução de problemas	75
2.4 Considerações finais	79

3	Análise de dispositivos governadores	83
3.1	A análise de Airy	86
3.1.1	O pêndulo centrífugo	89
3.1.2	O pêndulo centrífugo amortecido e forçado	90
3.1.3	O complemento de 1851	91
3.1.4	A análise de Fuller	91
3.2	O Artigo <i>On Governors</i>	92
3.2.1	Moderadores e reguladores	95
3.2.2	O dispositivo de Fleeming Jenkin	99
3.2.3	Os governadores de Thomson e de Foucault	102
3.3	A análise de Wischnegradski	104
3.4	Considerações finais	107
4	Estabilidade de sistemas lineares	113
4.1	Resultados preliminares	116
4.2	Resultados no Reino Unido	120
4.2.1	O critério de estabilidade de Routh	122
4.2.2	Edward John Routh	124
4.3	Resultados na Europa continental	127
4.3.1	Aurel Stodola	127
4.3.2	Adolf Hurwitz	129
4.3.3	O critério de estabilidade de Hurwitz	130
4.4	Resultados na Ásia	133
4.4.1	O critério de estabilidade de Mikhailov	133
4.5	Considerações finais	135
5	Estabilidade no sentido de Liapunov	141
5.1	Estabilidade de Liapunov	143
5.1.1	O primeiro método de Liapunov	145
5.1.2	O segundo método de Liapunov	147
5.2	Alexander Mikhailovitch Liapunov	149
5.3	Considerações finais	154
6	Amplificador com realimentação negativa	157
6.1	Os desafios	160
6.2	A solução de Black	163
6.3	As características do novo amplificador	166
6.4	O surgimento de uma nova área	169
6.5	Considerações finais	173

7	Estabilidade de sistemas com realimentação	177
7.1	Cauchy e o princípio do argumento	180
7.1.1	Augustin-Louis Cauchy	181
7.2	O critério de estabilidade de Nyquist	182
7.2.1	O contexto	182
7.2.2	O procedimento de Nyquist	184
7.2.3	Harry Nyquist	188
7.3	Desdobramentos do artigo de Nyquist	190
7.3.1	O critério de Nyquist e o princípio do argumento	191
7.3.2	A primeira aplicação do critério de Nyquist	195
7.3.3	A generalização do critério de Nyquist	198
7.4	Outros estudos de estabilidade	201
7.5	Considerações finais	204
8	Servomecanismos	207
8.1	Sistemas elétricos: estabilidade e modelagem	209
8.2	Computação analógica	212
8.3	Carregamento: o problema e a solução	215
8.4	Teoria de servomecanismos	220
8.4.1	Servomecanismos do tipo relé	221
8.4.2	Servomecanismos de controle contínuo	224
8.4.3	Harold Hazen	226
8.5	O método do lugar das raízes	228
8.5.1	Síntese de controladores pelo método do lugar das raízes	228
8.5.2	Dinâmica de sistemas de controle	231
8.5.3	Walter Evans	233
8.6	Outras iniciativas	234
8.7	Considerações finais	235
9	Análise no domínio de frequência	241
9.1	A gênese da análise de Fourier	243
9.1.1	O desenvolvimento inicial de Fourier	245
9.1.2	Desenvolvimentos subsequentes	248
9.1.3	Jean-Baptiste Joseph Fourier	251
9.2	Resposta em frequência	252
9.2.1	A relação ganho-fase	255
9.2.2	Margens de ganho e de fase	260
9.2.3	Hendrik Wade Bode	261

9.3	Considerações finais	263
10	Análise no domínio de Laplace	269
10.1	A contribuição de Laplace	270
10.1.1	Formulação atual da transformada de Laplace	273
10.1.2	Pierre-Simon Laplace	275
10.2	O cálculo operacional	278
10.2.1	Resultados do cálculo operacional de Heaviside	279
10.2.2	Admitâncias, impedâncias e séries	281
10.2.3	Oliver Heaviside	285
10.2.4	A controvérsia com a Royal Society	286
10.2.5	Um aliado em Cambridge	289
10.3	Funções impulso e degrau	290
10.4	Uso do cálculo operacional e da transformada de Laplace	294
10.5	Considerações finais	297
11	O controlador PID	301
11.1	Ações P, I ou D ao longo da história	303
11.2	A lei de controle PID	304
11.2.1	Prolegômenos	304
11.2.2	Dispositivos da primeira classe	306
11.2.3	Dispositivos da segunda classe	308
11.2.4	Influência do atraso de transporte	309
11.2.5	Nicolas Minorsky	310
11.3	Controladores PID	312
11.4	Sintonia do controlador PID	316
11.4.1	Sintonia em malha fechada	317
11.4.2	Sintonia em malha aberta	319
11.4.3	Nathaniel Nichols	321
11.5	Considerações finais	325
12	Notação e nomenclatura	327
12.1	Sinais elementares	329
12.2	Integrais de Convolução e de Duhamel	331
12.3	Funções complexas e transformadas	332
12.4	Termos técnicos	334
12.5	Simbologia	339
12.6	Considerações finais	341

Bibliografia 345

Índice remissivo 355

Capítulo 1

Realimentação

“Esse controle de uma máquina — usando o desempenho atingido, em vez do desempenho esperado — é conhecido como *realimentação* e envolve sensores (...), que são elementos que indicam o desempenho. A função desses mecanismos é controlar a natural tendência à desorganização, em outras palavras, é produzir uma reversão localizada e temporária da direção normal da entropia.

“Essa função (...) é chamada *realimentação*, que é a propriedade de ser capaz de ajustar o comportamento futuro baseado no desempenho passado.

“Repito, *realimentação* é um método de se controlar um sistema que insere novamente, nesse mesmo sistema, os resultados de seu desempenho passado.”¹

Norbert Wiener, 1954²

¹Citado de (Wiener, 1954, pp. 24, 33, 61).

² Norbert Wiener (1894–1964) foi um matemático que teve importantes contribuições em diversas áreas da teoria de sinais e do controle. Wiener é considerado um dos maiores matemáticos nascidos nos Estados Unidos (Daintith, 2009) e o pai da cibernética, assunto abordado de forma filosófica e do ponto de vista social no livro de onde foram retiradas as citações que abrem este capítulo. Foi considerado uma criança prodígio, tendo se formado em matemática pela Universidade de Tufts com apenas 14 anos de idade e obtido seu título de doutor em matemática aos 18. Algumas de suas principais contribuições para a área de controle incluem o uso de funções de correlação na análise de sinais com ruído. Como resultado disso, Wiener teve um importante papel em processos estocásticos, análise espectral generalizada, e é conhecido também pelo filtro que leva seu nome. Conhecido também por haver formulado a teoria do movimento Browniano (1920), análise harmônica, fluxo de informação (1925), comunicações e controle em sistemas mecânicos e biológicos. Durante a Segunda Guerra Mundial trabalhou com o projeto de sistemas de radar. Ocupou posições nas Universidades de Harvard e Maine, bem como no MIT (Hall, 2008), em que ingressou em 1919 (Gleick, 2011, p. 236).

“Realimentação: é o princípio fundamental que está subjacente a todos os sistemas autorregulados, não apenas máquinas, mas também os processos de vida.”³

Arnold Tustin, 1952⁴

Quando fazemos algum exercício físico percebemos um aumento nas frequências cardíaca e respiratória, ou seja, o coração bate mais depressa e ficamos ofegantes. Qual é a causa desse aumento e qual é seu objetivo? Ao aumentarmos a atividade física, o consumo de oxigênio aumenta e, portanto, a disponibilidade de oxigênio no sangue diminui. Ao respirar de maneira mais intensa e frequente, a troca de gases nos pulmões se intensifica. Com o aumento da frequência cardíaca ocorre também o aumento da circulação sanguínea e a melhor distribuição do oxigênio adicional. Em outras palavras, o aumento das frequências cardíaca e respiratória tem efeito *regulatório* pois atua no sentido de corrigir a redução de oxigênio disponível.

Esse mecanismo envolve *realimentação*, que permeia praticamente todos os aspectos da vida, e não apenas sistemas tecnológicos. Apesar de serem utilizados há séculos em sistemas construídos pelo homem, a compreensão de alguns aspectos fundamentais de sistemas realimentados começou a se concretizar somente na segunda metade do século XIX.⁵

Antes de considerar em maior detalhe o conceito de realimentação e como foi sendo utilizado ao longo dos séculos, mencionaremos, a título de curiosidade, um conhecido mecanismo automático para abertura das portas de um templo, ilustrado na Figura 1.1. Tal invenção é atribuída a Heron,⁶ que será mencionado novamente na Seção 1.4.2. Para abrir as portas do templo era necessário acender o fogo sobre o “altar” A. À medida que o ar no compartimento A aquecia e se

³Tustin, A., Feedback, *Scientific American*, 9:58–55, Sept. 1952.

⁴Arnold Tustin (1899–1994) foi um influente professor britânico de Engenharia Elétrica na Universidade de Birmingham. É conhecido por suas importantes contribuições para a área de teoria de controle e sua aplicação em máquinas elétricas (Wellstead, 2010). Ele participou na aplicação de métodos de controle avançado em sistemas de transporte, especialmente no sistema de metrô da cidade de Londres (Editorial Board of Scientific American, 1955, p. 1).

⁵Bennet vai mais longe e afirma que, “em geral, considerava-se que a realimentação era uma das descobertas realizadas no século XX” (Bennett, 2002, p. 29).

⁶Heron de Alexandria (c. 20–c. 70) foi um engenheiro, cientista, matemático e inventor grego. Fez importantes contribuições nas áreas de geometria, mecânica, máquinas (alavancas, polias, rodas, planos inclinados, rodas denteadas, máquinas a combustão), turbinas a vapor, técnicas de medida (Hall, 2008). Escreveu diversos livros, dentre eles *Metrica*, *Pneumatica* e *Mechanica* (Daintith, 2009).

expandia, a água do recipiente B era “empurrada” para o balde C. Depois de transferir uma certa quantidade de água para o balde C, este ficava mais pesado que o contrapeso E e, pela ação das polias e dos eixos D e D’, as portas se abriam. Uma vez consumido o “sacrifício sobre o altar”, o fogo, aos poucos, se extinguia. Com a contração do ar no recipiente A, que voltava a esfriar, o efeito oposto era verificado. Apesar de *automático*, o procedimento de abertura de portas atribuído a Heron não usava realimentação, que requer o uso de informação para definir a ação. Basta notar que em nenhum momento a posição das portas era informada ao sistema que as movimentava.

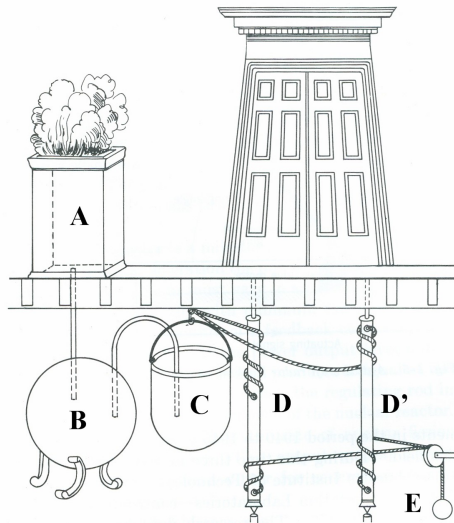


Figura 1.1. Sistema automático de abertura de portas de um templo atribuído a Heron. Figura adaptada de (Woodcroft and Greenwood, 1851), (Wikimedia, 2018).

Um outro interessante exemplo de um sistema que operava sem realimentação será discutido na Seção 1.4.1. Contudo, o assunto central deste livro é o de sistemas com realimentação, conceito esse abordado a seguir.

1.1 Realimentação

Ao considerar o tema de realimentação, é necessário enfrentar uma dificuldade com a nomenclatura, o que não é incomum na literatura técnica. O conceito ao qual se refere o presente capítulo é o de *feedback*, que, em inglês, tem o sentido

de “alimentar de volta” ou “alimentar para trás”. O termo em português “realimentação”, por sua vez, transmite o sentido de “alimentar novamente”, o que claramente não descreve a ideia subjacente ao termo *feedback*. Em português, os termos “retroalimentação” e “retroação” procuram aproximar-se da terminologia em inglês, mas o fazem com alguma dificuldade. Em situações como essas, o melhor parece ser utilizar o termo mais comumente empregado pelas pessoas da área, e assegurar-se de que o conceito referido seja o mesmo.

No Brasil, o termo *realimentação* é o mais utilizado, sendo que *retroalimentação* é preferido em Portugal, assim como *controlo* é preferido a *controle*, sendo este o termo utilizado no Brasil. Ao longo deste livro será utilizado o termo *realimentação* para referir-se ao que, em inglês, se designa pela palavra *feedback*.

Mas, enfim, o que é realimentação? Considere um sistema com uma entrada (uma causa, uma “alimentação”) e uma saída (um efeito). Realimentação implica utilizar informação da saída para influenciar a entrada. Esse *retorno* de informação da saída para a entrada (Figura 1.2) — para a *alimentação* — é o que se deseja expressar com os termos realimentação ou retroalimentação. Nas palavras de Arnold Tustin:

“As duas grandezas são interdependentes. Ambas são causa, e ambas são efeito, uma da outra. Em tais casos temos uma cadeia ou uma sequência fechada— o que os engenheiros chamam de ‘malha fechada’.

“A distinção é muito subjetiva. ‘Causa’ é o que, concebivelmente, pode-se manipular. ‘Efeito’ é o que, concebivelmente, pode-se almejar.”⁷

Na Figura 1.2, o ramo de realimentação é aquele indicado pela seta que flui da direita para a esquerda, na parte inferior do diagrama de blocos. No caso particular ilustrado nessa figura, esse ramo de realimentação é unitário e, portanto, o sinal realimentado é a própria saída.

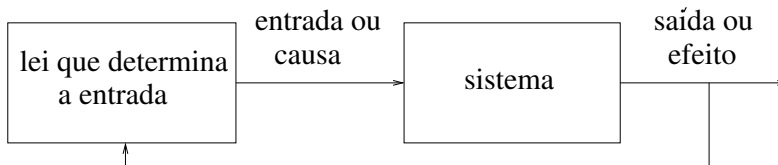


Figura 1.2. Diagrama de blocos de um sistema realimentado geral.

⁷Citado de (Tustin, 1955, pp. 11, 23).

No caso de um sistema sem realimentação, é natural considerar o sinal de entrada como *causa* e o sinal de saída como *consequência*. Contudo, para o caso de um sistema com realimentação percebe-se que essa interpretação é mais difícil de ser aplicada, pois a própria saída é parte da causa (Figura 1.2). Um resultado prático dessa característica é que o desempenho de sistemas com realimentação deve ser analisado para o sistema como um todo, o qual é referido como o “sistema em malha fechada”. Essa necessidade motivou o desenvolvimento de algumas das técnicas a serem abordadas no presente volume.

Em seu livro “As origens do controle realimentado” (*The Origins of Feedback Control*), Otto Mayr apresenta um cuidadoso levantamento dos primeiros sistemas realimentados dos quais se tem alguma documentação. A fim de levar a cabo esse estudo, foi preciso definir o que seria considerado um sistema realimentado. A definição de trabalho utilizada por Mayr consiste de três critérios (Mayr, 1970):⁸

1. o propósito de um sistema de controle realimentado é executar comandos; o sistema mantém a variável controlada igual ao sinal de referência, a despeito de distúrbios externos;
2. o sistema opera como um laço fechado (ou malha fechada) com realimentação negativa;
3. o sistema inclui um elemento sensor e um elemento comparador. Ao menos um deles deve constituir um elemento físico separado.

1.1.1 Otto Mayr

O engenheiro mecânico (1956) alemão Otto Mayr é um dos pioneiros no estudo da história do controle automático. Após quase dez anos de experiência como engenheiro mecânico, instrutor e professor nos Estados Unidos,⁹ Mayr voltou à Alemanha, onde conseguira uma posição no Museu Deutsches, como assistente de pesquisa. Foi então que começou a investigar as origens de mecanismos com realimentação. Em 1968 foi-lhe concedido o título de doutor pela Universidade Técnica de Munique por esse trabalho sobre a história do controle. Publicou seu primeiro livro – baseado em sua tese de doutorado – em alemão em 1969 e a versão em inglês foi publicada um ano depois. Aposentou-se em 1992, depois de haver

⁸Sobre seu próprio livro, Otto Mayr escreveu: “Hoje, mais de 30 anos depois, percebo que é um livro simplório e ingênuo. Dificilmente pode ser chamado de uma história. Mas o livro fez a sua parte: respondeu algumas perguntas, convidou outros a entrarem nessa área e foi meu ponto de partida como historiador de tecnologia” (Mayr, 2002, p. 90).

⁹Mayr chegou aos Estados Unidos em 1956 aos 25 anos de idade (Mayr, 2002, p. 88).

trabalhado em museus nos Estados Unidos e na Alemanha. Recebeu o Prêmio Abbot Pauyson Usher, pelo artigo intitulado *Yankee practice and engineering theory: Charles T. Porter and the dynamics of the high speed steem engine*, bem como a Medalha Leonardo da Vinci, que é a mais elevada honraria concedida pela *Society for the History of Technology*. Ao longo da carreira, Mayr publicou vários livros e artigos. Alguns deles foram listados e comentados em (Bennett, 2002).

Encerraremos esta curta nota biográfica de Otto Mayr com duas citações. Na primeira ele conta como tomou conhecimento da palavra *feedback* e, na segunda, Mayr descreve como decidiu tornar-se um historiador da área de tecnologia.

“Devo ter ouvido a palavra *realimentação* muitas vezes antes de perguntar a meu tio¹⁰ o que significava. Suas explicações eram abstratas e generalistas, possivelmente inspiradas por Norbert Wiener. Depois de algum tempo exclamei: ‘você quer dizer que realimentação funciona como o dispositivo governador de uma máquina a vapor?’ Eu sabia, claro, o que era um governador, bem como um termostato ou um regulador de nível baseado em boia, mas nunca havia considerado que todos eles compartilhavam o mesmo princípio de operação.”¹¹

“Um dia em 1964 vi um artigo publicado por Lynn White no *Journal of Engineering Education*. O autor era um conhecido historiador da Universidade da Califórnia em Los Angeles que acabara de publicar um livro sensacional: *Medieval technology and social change*. O artigo apontava a falta de historiadores de tecnologia e sugeria que havia oportunidades de emprego para pessoas interessadas nessa área com formação em engenharia. A queixa de White era que muitos historiadores eram tecnologicamente analfabetos e que muito da história havia sido escrita sem levar em conta as contribuições da tecnologia. Imediatamente escrevi para White perguntando-lhe como alguém poderia se tornar um historiador na área de tecnologia.”¹²

1.2 Dois tipos de realimentação

No segundo critério utilizado por Mayr encontramos a expressão *realimentação negativa*. Na maioria das vezes em que se usa o termo *realimentação*, deseja-se

¹⁰Mayr passou a morar com seu tio em Cambridge, Massachussets, quando chegou aos Estados Unidos, para estudar inglês (Mayr, 2002).

¹¹Citado de (Mayr, 2002, p. 88).

¹²Citado de (Mayr, 2002, p. 89).

fazer referência à realimentação *negativa*. Contudo, o fato de a realimentação ser negativa *não* está implícito no termo *realimentação*, que tanto pode ser positiva como negativa. Por essa razão é importante procurar, sempre que possível e necessário, qualificar o tipo de realimentação em questão. Em termos práticos, os efeitos das realimentações negativa e positiva são radicalmente distintos.

Com referência à Figura 1.2, o que determina se a realimentação é positiva ou negativa é a maneira com que o sinal realimentado é utilizado na lei que determina a entrada, a lei de controle. Nesta discussão inicial, a realimentação será considerada *negativa* se um aumento (diminuição) no sinal realimentado (que, no caso da Figura 1.2, é o próprio sinal de saída) resultar em uma variação do sinal de entrada tal que o sinal realimentado diminua (aumente), ou seja, há uma ação *regulatória*. Respectivamente, se o aumento do sinal realimentado resultar em uma mudança do sinal de entrada tal que o sinal de saída aumenta ainda mais, então a realimentação é dita *positiva*. Pela descrição anterior percebe-se que na realimentação positiva *não há* ação regulatória.

No exemplo dado na abertura deste capítulo, a *diminuição* de oxigênio disponível no sangue resulta no aumento das frequências cardíaca e respiratória, que, por sua vez, provoca o *aumento* de oxigênio no sangue. Portanto esse é um exemplo de realimentação negativa.

Com essas definições em mente, não é difícil observar que a realimentação negativa tem um potencial regulador, não necessariamente aproveitado. Por outro lado, a realimentação positiva tem um potencial desestabilizador. Como no primeiro critério utilizado por Mayr o objetivo é o de controle (regulação), não é de surpreender que, no critério 2, a realimentação considerada seja a negativa.

1.3 Primeiras menções de realimentação

Segundo o historiador da área de controle Stuart Bennett, a palavra *feedback* foi originalmente utilizada em 1920 no *Oxford English Dictionary* na seguinte frase: “Uma realimentação indutiva em relação ao sistema secundário provoca oscilações locais” (Bennett, 1979). O contexto dessa declaração não deixa dúvida de que se trata de realimentação positiva.

Apesar de o termo *feedback* ter sido utilizado apenas a partir do início do século 20, anteriormente utilizavam-se outros termos para referir-se ao mesmo conceito; nos Estados Unidos utilizava-se o termo “ciclo fechado” (*closed-cycle*) e, no Reino Unido, utilizava-se o termo *reset*. Logo após o aparecimento do termo *feedback*, em 1920, os engenheiros de telecomunicações da Bell Telephone

Laboratories passaram a adotá-lo, o que garantiu a consolidação do seu uso nas comunidades técnico-científicas (Bennett, 1979).

Será interessante buscar as origens do conceito de realimentação, sem a preocupação da terminologia utilizada para descrevê-la, uma vez que, na ciência, a regra é utilizar conceitos antes de formalizá-los e rotulá-los, à semelhança de uma criança que aprende a usar sua mão muito antes de saber que tal membro do corpo chama-se mão.

Um dos primeiros registros do conceito de realimentação parece encontrar-se nos escritos de Aristóteles¹³ (Figura 1.3), que entendia que o fundamento de um estado estável era o equilíbrio. Segundo ele, a constituição deveria garantir o equilíbrio de forças entre a aristocracia e a democracia. Outros detalhes sobre as origens mais remotas do conceito de realimentação podem ser encontradas em (Bennett, 1979), e uma lista de quase duzentas referências, em (Bissell, 1991).

Avançando diversos séculos na história, voltamos a encontrar o conceito de realimentação (mais especificamente, o de regulação) claramente mencionado nos escritos sobre política econômica do filósofo escocês David Hume¹⁴ (Figura 1.3):

“Imagine que quatro quintos de todo o dinheiro da Grã Bretanha sejam aniquilados em uma noite (...) qual seria a consequência? O preço de bens e serviços necessariamente deveria reduzir na mesma proporção (...) Que nação poderia disputar conosco em qualquer mercado internacional (...) vendendo seus produtos ao mesmo preço? Esse cenário seria para nós muito lucrativo. Assim, em pouco tempo, o dinheiro perdido seria trazido de volta. À medida que isso acontecesse, os preços se elevariam gradualmente até atingir os mesmos níveis dos países vizinhos. Chegando a esse patamar de preços, perderíamos as vantagens associadas aos bens e serviços baratos, e, devido à nossa nova condição de abundância, cessaria o fluxo de dinheiro.

¹³Aristóteles de Stagira (384–322 a.C.) foi um filósofo e cientista grego. Estudou assuntos como o arco-íris, reflexão da luz sobre a água, espectro de cores, leis do movimento e mecânica. Escreveu o primeiro tratado de engenharia conhecido (Hall, 2008). Dedicou-se também ao estudo de biologia, tendo escrito as obras *De Partibus Animalium* e *De Generatione Animalium* em que mencionou nada menos que 500 espécies de animais (Daintith, 2009).

¹⁴David Hume (1711–1776) nasceu em Edimburgo, onde também estudou. Imaginava estudar Direito, mas dedicou-se à sua paixão: a filosofia. Trabalhou como bibliotecário para Faculdade de Direito de Edimburgo, e durante esse período escreveu a obra *A História da Inglaterra* em 6 volumes. A sua obra mais famosa, publicada em 1738, é *A Treatise of Human Nature* tendo proposto diversos conceitos como o empiricismo e a indução (Daintith, 2009).

Supondo que todo o dinheiro da Grã Bretanha fosse multiplicado por cinco em uma noite, por ventura não seria observado o efeito contrário? (...)¹⁵

Um século depois, o fisiologista francês Claude Bernard¹⁶ (Figura 1.3) descreveu diversos mecanismos fisiológicos em que se constata a realimentação negativa. Em 1932, o fisiologista americano Walter B. Cannon¹⁷ publicou um livro “A Sabedoria do Corpo” (*The Wisdom of the Body*) no qual estudou sistematicamente os diversos mecanismos de controle no corpo. Ele propôs e desenvolveu o conceito de *homeostase*, que é a propriedade de um organismo regular seu interior, a fim de manter uma condição estável e balanceada.



Figura 1.3. Da esquerda para a direita: Aristóteles (384–322 a.C.), David Hume (1711–1776) e Claude Bernard (1813–1878), (Wikipedia, 2012; Wikepedia.pt, 2012).

Os exemplos citados nesta seção nasceram em áreas outras que não a área de ciências exatas e engenharias. Assim, não é de admirar que, apesar de o conceito de realimentação ser bastante antigo, o desenvolvimento sistemático de

¹⁵Hume, D., *Essays, Moral, Political, and Literary, Part II, Essay V: Of the Balance of Trade*, Indianapolis, IN: Liberty Fund, Inc., ed. Eugene F. Miller, 1987. Disponível em: <http://www.econlib.org/library/LFBooks/Hume/hmMPL28.html>; acesso em: 26 jul. 2007; Internet. Nesse documento encontra-se a seguinte frase: “Nossa inveja e ódio da França são ilimitados”.

¹⁶Claude Bernard (1813–1878) estudou medicina e desenvolveu pesquisa nessa área no Collège de France. Em 1865 escreveu seu famoso trabalho intitulado *Introduction à la Médecine Expérimentale*, que foi uma das razões por ter sido eleito membro da Academia de Ciências da França em 1869 (Daintith, 2009).

¹⁷Walter Bradford Cannon (1871–1945) graduou-se na Universidade de Harvard em 1896, onde foi professor de fisiologia de 1906 a 1942. Seu assunto principal de pesquisa foi o estudo de como o sistema nervoso regula diversas funções do corpo por meio da manipulação de hormônios (Daintith, 2009).

sistemas realimentados é muito mais recente, pois para isso foi necessário esperar que se encontrassem maneiras de descrever tais sistemas de forma precisa. Um dos primeiros trabalhos a abordar e analisar de forma matemática um sistema realimentado foi o artigo do conhecido físico e matemático escocês James Clerk Maxwell¹⁸ intitulado *On Governors* (Maxwell, 1868). Esse e outros trabalhos contemporâneos serão investigados com um pouco mais de detalhe no Capítulo 3.

1.4 Alguns dos primeiros sistemas realimentados

Na seção anterior foram mencionados exemplos que ilustram o fato de que o conceito de realimentação já era conhecido, ainda que não muito bem compreendido, muitos séculos atrás. Nesta seção, contudo, seguindo o cuidadoso estudo de Otto Mayr (1970), serão mencionados os primeiros sistemas construídos, ou seja, os primeiros mecanismos que usavam realimentação e que se encontram descritos na literatura.

1.4.1 Tesíbios

Um dos problemas que ocupava a atenção dos cientistas e engenheiros há mais de dois milênios era o da medição do tempo. Algumas das primeiras alternativas que não dependiam do sol foram os relógios de água. A ideia fundamental era despejar água com fluxo constante em um recipiente onde se encontrava uma boia. Sobre essa boia era montado algum dispositivo para indicação do movimento vertical sobre uma escala “calibrada”, a partir da qual era possível ler o tempo.

Para se ter o bom funcionamento de tal dispositivo era necessário garantir um fluxo de água constante. Sendo assim, pode-se dizer que um dos primeiros problemas de controle descritos na literatura é o de controle de fluxo de água. Como frequentemente acontece, o controle da grandeza em questão não era um fim em si mesmo, mas constituía-se em uma etapa fundamental na resolução de um outro problema mais abrangente, a medição do tempo.

O relato de um sistema com essas características é atribuído a Tesíbios¹⁹ (Figura 1.4), que viveu em Alexandria possivelmente na primeira metade do terceiro século a.C. Tesíbios é considerado um dos três nomes com os quais culminou a

¹⁸Ver Nota 2 do Capítulo 3 para uma breve nota biográfica de James Clerk Maxwell (1831–1879). Seu retrato é mostrado na Figura 3.3.

¹⁹Tesíbios (285–247 a.C.) foi um físico e inventor grego, que investigou sistemas como: a bomba, órgão a água, órgão de tubos, teclado musical, molas metálicas, relógios a água (Hall, 2008). Outras grafias de seu nome são Ctesibius e Ktesibios.

tecnologia antiga, durante o período helenístico (Mayr, 1970). Alguns de seus contemporâneos o equipararam a Arquimedes.

Entre as muitas invenções atribuídas a Tesíbios, consta a do relógio de água, que incluía um sistema com realimentação negativa para o controle do fluxo de água. Esse tipo de relógio, chamado às vezes de *clepsidra*, foi o mais preciso da época, até ser suplantado pelo relógio de pêndulo inventado nos dias do físico holandês Christian Huygens (1629–1695). Mais detalhes sobre o contexto da invenção do relógio a pêndulo serão fornecidos na Seção 1.5.

Antes de prosseguir com parte do legado de Tesíbios, deseja-se mencionar uma interessante citação sobre relógios d'água, que serve de preparação para a descrição do sistema de Tesíbios, ilustrado na Figura 1.5:

“Um antigo uso de realimentação para regular relógios d'água foi atribuído a James Watt, que aparentemente utilizou uma bomba d'água para manter constante o nível de um reservatório de onde fluía a água [para um outro reservatório]. A vazão de água deveria ser constante a fim de que o nível em um outro reservatório, o que recebe água, indique o tempo corretamente. Há muitos anos, em Cantão, na China, uma cascata de reservatórios foi usada para manter a vazão de água praticamente constante por um curto período de tempo. Esse relógio era conhecido como ‘Hon-woo-et-low’ (jarras de cobre que gotejam água). James Arthur viu esse relógio em 1897 e foi-lhe dito que tinha 3000 anos de existência, sendo conhecido como o relógio da rua do arco.”²⁰

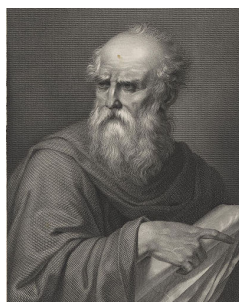


Figura 1.4. À esquerda encontra-se uma gravura de Tesíbios (c. século III a.C.), à direita, uma de Vitruvius (c. século I a.C.) pintada por Vincenzo Raggio (Wikimedia, 2009, 2018).

²⁰Citado de (Bateman, 1945, p. 622).

A documentação deixada por Tesíbios não sobreviveu, mas, sim, a de um de seus leitores, o engenheiro e arquiteto Marcus Vitruvius Pollio²¹ (Figura 1.4), que descreveu o que se conhece das invenções de Tesíbios.

A Figura 1.5 mostra um esquema do relógio de Tesíbios, conforme reconstrução do historiador Hermann Diels.

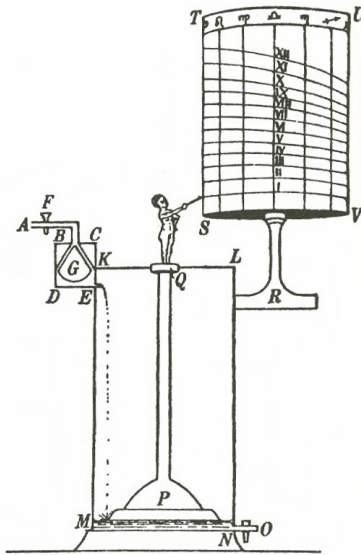


Figura 1.5. Relógio de água inventado por Tesíbios, conforme reconstrução de Hermann Diels. Figura adaptada de (Mayr, 1970).

A parte que corresponde ao sistema realimentado é composta pelo duto de suprimento de água A, pelo vaso de regulação BCDE e pela boia G. Se a água fosse despejada diretamente no recipiente principal do relógio, no qual está a boia P, a vazão dependeria diretamente da pressão em A. Se a água viesse de algum outro recipiente maior, à medida que o nível desse recipiente mudasse, mudaria também a pressão em A e, portanto, a vazão. Para entender os mecanismos básicos da regulação nesse sistema, suponha que a vazão de água seja inicialmente ajustada para o valor desejado, utilizando-se o registro F. Tal vazão implicará uma certa quantidade de água no vaso de regulação BCDE e, portanto, uma certa posição da boia G. Se a vazão de água vinda de A aumentar, o nível de água em BCDE tenderá a aumentar, elevando a boia.

²¹Marcus Vitruvius Pollio, que viveu no primeiro século a.C., foi um arquiteto e engenheiro militar romano. Estudou materiais de construção, planejamento urbano, a construção de anfiteatros e arquitetura clássica. Inventou o hodômetro romano (Hall, 2008).

Essa elevação, devido ao formato da boia, resultará em uma diminuição da vazão de água de entrada em BCDE. Se a vazão de água vinda de A diminuir, a boia G descerá, reduzindo a resistência hidráulica e, portanto, permitindo a regulação da vazão de água. Esse sistema conseguia garantir em BCDE um nível de água aproximadamente constante e, assim, garantia uma vazão de entrada no tanque do “relógio” aproximadamente fixa.

Fica como exercício para o leitor verificar que esse sistema atribuído a Tesíbios satisfaz os três critérios indicados no início do capítulo, sendo, por essa razão, considerado o inventor do primeiro dispositivo realimentado (Mayr, 1970).

Uma interessante aplicação em malha aberta

Antes de passar a outros dois nomes de grande destaque da antiguidade no que se refere à tecnologia, é interessante mencionar uma aplicação do uso de relógios água, porém em *malha aberta*, ou seja, em um contexto em que não há realimentação.

O conceito de aceleração linear foi constatado por Galileu Galilei²² em um experimento realizado em 1604, que os educadores de Física costumam chamar de Experimento Alfa (Crease, 2006).

De maneira a observar o processo de aceleração de um corpo “em câmera lenta”, Galileu concebeu o experimento do plano inclinado para substituir uma alternativa (frustrada) anteriormente utilizada: observar a queda do corpo imerso em líquido translúcido. No experimento do plano inclinado, havia um pêndulo conectado a um sino mestre e diversos sinos móveis distribuídos ao longo de uma calha sobre a qual rolava um peso esférico. O experimentador deveria posicionar os sinos móveis de maneira que tocassem em sincronia com o sino mestre (acionado pelo pêndulo) à medida que o peso se deslocava do topo ao fundo do plano inclinado. Uma vez

²²Galileu Galilei (1564–1642) foi um físico italiano, que também fez importantes contribuições para a matemática, astronomia e filosofia. Matriculou-se na Universidade de Pisa para estudar medicina, mas não conseguiu concluir o curso e acabou apaixonando-se pela matemática (Daintith, 2009). Seu nome está intimamente ligado a um suposto experimento realizado na Torre de Pisa, em que ele teria mostrado que dois corpos de massas diferentes levam o mesmo tempo para cair da mesma altura. Alguns autores consideram esse suposto experimento ser folclore (Daintith, 2009), sendo que o que foi realmente realizado foi o experimento com planos inclinados, brevemente descrito na Seção 1.4.1 (Crease, 2006). Galileu, investigou, em alguns casos pela primeira vez, diversos sistemas, entre eles o princípio do pêndulo (1581), o equilíbrio hidrostático (1586), uma máquina de irrigação (1594), um termômetro chamado de termoscopto (1607), relógios a pêndulo (1641), compasso proporcional (1606) e construiu um telescópio astronômico (1608) (Hall, 2008). Foi professor de matemática em Pisa de 1589 a 1591. Em 1592 assumiu essa cátedra na Universidade de Pádua (Daintith, 2009).

ajustados os sinos, era possível constatar que a distância percorrida pelo peso era proporcional ao quadrado do tempo gasto.

Um dos resultados dessa experiência de Galileu foi perceber que o tempo era uma variável independente e, portanto, deveria ser determinado.²³ Essa mudança demandou que Galileu medisse o tempo. Em seus escritos, o físico italiano descreveu que media o tempo utilizando um relógio de água e que conseguia atingir uma resolução de até um décimo de segundo. Esse dado impressionante foi contestado por vários historiadores da ciência, sendo que um deles chegou a dizer:

“Uma bola rolando numa ranhura de madeira ‘suave e polida’! Um vaso de água com um furinho através do qual o líquido escoava e é coletado num copinho para ser depois pesado, e assim medir o tempo de descida. (...) que acúmulo de fontes de equívocos e inexatidão! (...) É óbvio que os experimentos de Galileu são completamente destituídos de valor: a própria perfeição de seus resultados é a prova rigorosa de sua incorreção.”²⁴

Em reação a tal afirmativa, o estudante de história da ciência Thomas Settle decidiu fazer uma montagem do experimento, utilizando dispositivos e procedimentos disponíveis para Galileu e que não fossem melhores do que os que o italiano teria utilizado. O resultado foi publicado em 1961 na revista *Science*.²⁵ “Settle percebeu que poderia obter excelentes informações, de acordo com a lei de Galileu, e concluiu que o experimento fora ‘perfeitamente factível para ele’ [Galileu]. Mais ainda, descobriu que, com prática, o cronômetro feito com um vaso de flores poderia marcar com precisão o quase décimo de segundo obtido por Galileu” (Crease, 2006, p. 53).

A medida de tempo feita por Settle, e possivelmente pelo próprio Galileu, era relativamente precisa graças à curta duração do experimento. Nesse caso, a constante de tempo do sistema formado pelo vaso de flores cheio de água com um

²³Até aquela época, em tais experimentos, media-se a velocidade de um objeto a partir do espaço por ele percorrido.

²⁴Citado em (Crease, 2006) de Koyré, A., An experiment in measurement, *Proc. American Philosophical Society*, n. 97, 1953, 222–237. Não há dúvida de que a citação de Alexander Koyré está carregada de preconceito. Isso não é difícil de entender à luz da seguinte declaração feita sobre ele: “Koyré tinha uma visão platônica da ciência, de acordo com a qual esta procede por meio do raciocínio teórico, e o experimento era ‘teoria encarnada’.” (Crease, 2006, p. 52).

²⁵Settle era aluno de pós-graduação da Universidade de Cornell nos Estados Unidos. Seu experimento foi publicado em Settle, T. B., An experiment in the history of science— With a simple but ingenious device Galileo could obtain relatively precise time measurements. *Science*, 133(344):19–23, 1961.

furo no fundo era suficientemente grande comparada à duração do experimento. Assim, o nível de água no vaso podia ser considerado constante — e, portanto, a vazão de saída também — durante o período em que a medição era feita. Caso o experimento fosse mais longo, seria necessário algum mecanismo para garantir que a vazão de água fosse regulada. Um tal mecanismo já havia sido concebido por Tesíbios (ver Figura 1.5).

1.4.2 Philon e Heron

Os outros dois nomes associados ao ápice da tecnologia antiga, junto com Tesíbios, são o de Philon,²⁶ que viveu uma geração após Tesíbios, e o de Heron (Figura 1.6a), que viveu no primeiro século desta era.

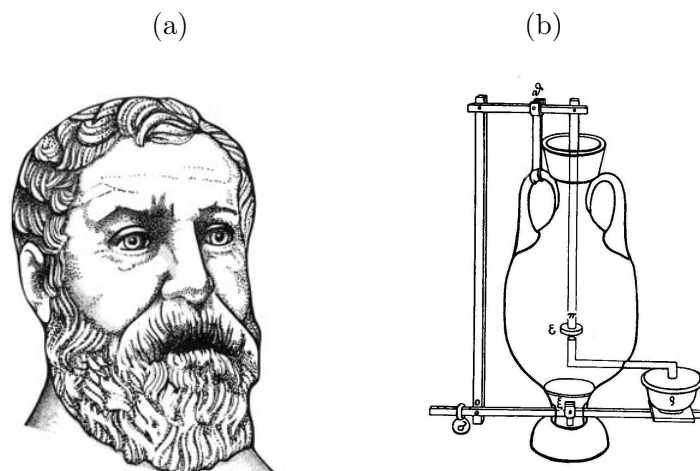


Figura 1.6. (a) Heron de Alexandria (Wikimedia, 2011); (b) máquina de servir vinho de peso controlado, inventada por Heron. A ação de controle é o movimento da haste vertical (π) e a variável controlada é o peso do copo de vinho (g). Figura (b) adaptada de (Mayr, 1970).

Nos escritos de Philon e Heron também encontram-se dispositivos que faziam uso de realimentação negativa. Em particular, Philon desenvolveu um sistema realimentado para regular o nível de óleo em uma lâmpada. Uma análise cuidadosa

²⁶Philon (ou Philo), que fez importantes contribuições no período de 250–230 a.C., foi um engenheiro militar grego. Ficou conhecido por seu trabalho com catapultas, cuidadosos estudos sobre mecânica e o desenvolvimento de dispositivos pneumáticos (Hall, 2008).

desse dispositivo revela que se trata de um sistema de controle liga-desliga (Mayr, 1970, pp. 16–18).

Os trabalhos de Heron cobrem uma ampla gama de assuntos, como matemática, óptica e engenharia mecânica. Escreveu livros sobre mecânica, pneumática, máquinas de guerra e relógios de água. A descrição de dispositivos realimentados negativamente são encontrados na sua obra intitulada *Pneumatica*.

Um desses dispositivos é chamado “máquina de servir vinho de peso controlado”, mostrada na Figura 1.6b. A variável controlada é o peso do “copo” de vinho (g). A ação de controle é o movimento da haste vertical (π) que termina com a tampa (ε) do tubo por onde o vinho escoou para o copo. A referência é determinada pelo peso (δ) dependurado no lado esquerdo da haste horizontal sobre a qual se apoia o copo de vinho. Essa haste faz o papel do sensor de peso e do comparador com a referência. A comparação é feita pela subtração dos conjugados (torques) produzidos pelo copo e pelo peso-referência. O ganho da lei de controle é determinado pela posição do pivô (ϑ), localizado no topo da montagem. Possivelmente a invenção mais conhecida atribuída a Heron seja aquela ilustrada na Figura 1.1.

1.5 Uso de realimentação na medição do tempo

Na Seção 1.4 foi visto como a realimentação foi usada por Tesíbios em um relógio de água. Há muito que a medição do tempo é um desafio para a humanidade. Os primeiros “relógios”, que utilizavam o sol e o movimento da terra para indicar o tempo surgiram no Egito por volta de 3000 a.C., tendo sido seguidos pelos de água, na Grécia, por volta de 400 a.C. (Harms et al., 2004). A procura por relógios cada vez mais precisos ainda não parou. A história dessa procura revela a engenhosidade de muitos e a utilidade de realimentação, ainda que não reconhecida por seus inventores.

Na história do desenvolvimento de relógios, uma importante marca foi a invenção de um dispositivo conhecido como *verge and foliot*. Esse dispositivo surgiu na segunda metade do século XIII, mas o seu inventor não é conhecido (Harms et al., 2004).

Se fosse possível manter constante a velocidade de uma roda denteada, seria possível também marcar o tempo por meio de um (ou mais) ponteiro ligado a essa roda, direta ou indiretamente. Apesar de conceitualmente simples, o problema à época era tecnologicamente difícil, pois não se conheciam formas eficazes de controle de velocidade angular. O *verge and foliot* foi concebido para conseguir manter a velocidade média de uma roda denteada aproximadamente constante.

Para apreciar o funcionamento do *verge and foliot* seguiremos, de maneira bastante simplificada, o estudo quantitativo descrito em (Lepschy et al., 1992). Um interessante relato qualitativo do funcionamento e desenvolvimento dos primeiros relógios pode ser encontrado em (Headrick, 2002). Considere uma roda denteada, que chamaremos de coroa, acionada por um conjugado T . Fazendo algumas considerações e desprezando o atrito, a relação entre T e a velocidade angular ω da coroa é dada por $\omega(s) = (K/s)T(s)$, em que $T(s)$ e $\omega(s)$ são as transformadas de Laplace de T e ω , respectivamente. Portanto, para um conjugado constante, a velocidade angular da coroa aumentaria uniformemente *ad infinitum*. Se o atrito não for desprezado, a relação é da forma $\omega(s) = (K/s + a)T(s)$, $a > 0$, e a velocidade tende a um valor final finito, ainda que bastante elevado.

Nos relógios do século XIII, o conjugado constante, ou aproximadamente constante, era conseguido pela ação de pesos ou de molas. Independente de como era gerado o conjugado T aplicado sobre a coroa, era necessário atuar para manter a velocidade ω constante em torno de um valor adequado. O *verge and foliot* provia essa ação (Fig 1.7^{27 28}).

O ponto central no funcionamento desse dispositivo é notar que a relação $\omega(s) = (K/s)T(s)$ é válida quando a coroa (C) gira livremente, antes que um de seus dentes impacte com uma das paletas (p ou q) presas na verga (V). Após o impacto, a coroa precisa “carregar” a verga e o braço com os pesos. Em poucas palavras, durante os períodos de movimento livre, a coroa acelera e, durante os demais períodos, graças aos impactos, sua velocidade reduz de maneira significativa. O diagrama de blocos na Figura 1.8 ilustra o sistema como um todo. Acredita-se que o primeiro relógio a utilizar esse sistema existiu por volta do ano 1285 (Headrick, 2002).

Pelo diagrama da Figura 1.8 percebe-se que, nos períodos em que a coroa roda livremente, o sistema está em malha aberta. Sob a ação do conjugado T , a velocidade da coroa ω aumenta rapidamente. Quando a coroa atinge um determinado ângulo θ_α , o bloco B fecha a chave e, portanto, a malha de controle. Deve ser notado que essa ação corresponde ao impacto de uma aleta (p ou q) com a coroa. A partir desse momento o sistema opera em malha fechada e a coroa “carrega” o conjunto *verge and foliot* — até “livrar-se” da paleta e voltar a girar em malha aberta novamente.

²⁷A imagem da Fig 1.7a vem de Henry Evers (1874), *A Handbook of Applied Mechanics*, William Collins & Sons, London.

²⁸A imagem da Fig 1.7b está disponível em: <http://www.abbeyclock.com/anchor.html>; acesso em: 25 ago. 2009.

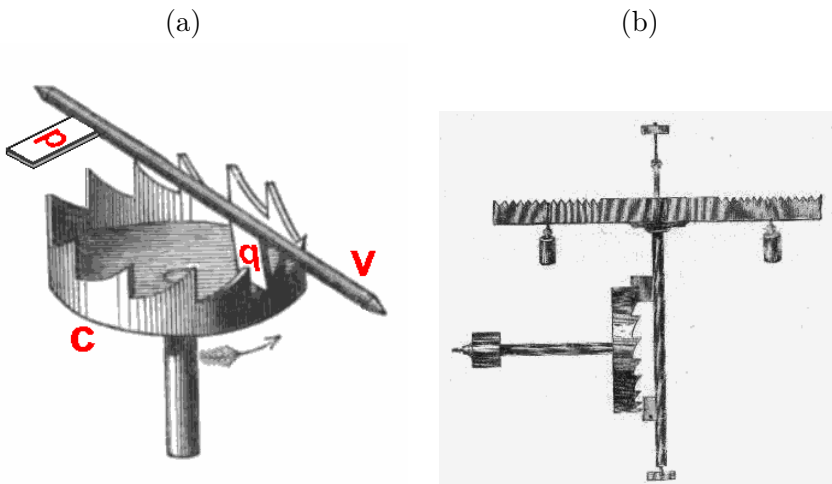


Figura 1.7. Em (a) tem-se a coroa C e a “verga” (*verge*) V. Sob a ação dos impactos das paletas p e q com os dentes da coroa, a sua velocidade média era mantida aproximadamente constante. Gravura de Henry Evers (1874). Em (b), além da coroa e da verga com as paletas (na vertical), pode-se ver o braço oscilatório (*foliot*) com os dois pesos. Dispositivo do relógio de De Vick, construído em 1379. Gravura de Pierre Dubbois (1849), (Wikipedia, 2009).

Em malha fechada, a relação entre o conjugado T e a velocidade da coroa ω passa a ser:

$$\frac{\omega(s)}{T(s)} = \frac{1/J}{\frac{1}{KJ}s + 1}. \quad (1.1)$$

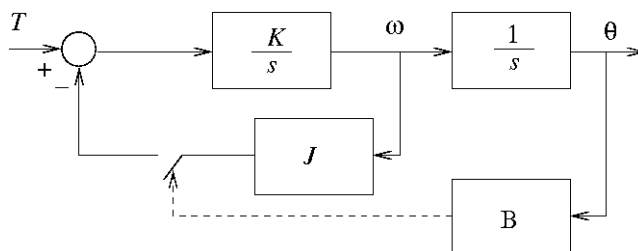


Figura 1.8. Diagrama de blocos da coroa acoplada ao dispositivo *verge and foliot*. O bloco B aciona a chave para determinados valores do ângulo da coroa. A realimentação negativa pode ser claramente constatada neste diagrama. Adaptada de (Lepschy et al., 1992).

Portanto, desprezando-se o atrito, em malha aberta a contante de tempo é infinita, bem como o ganho em estado estacionário. Ao fechar a malha — que ocorre quando do contato de alguma paleta com a coroa —, como pode ser visto pela Equação 1.1, a constante de tempo e o ganho passaram a ser finitos. Como consequência, há uma rápida (constante de tempo pequena) redução de velocidade (ganho pequeno, relativo ao anterior), até que a malha volte a abrir, quando o procedimento se repetirá. Um gráfico da velocidade da coroa revela uma certa periodicidade. O período é determinado pelo número de dentes da coroa e pelos pesos no braço (*foliot*), cujo valor e posição são utilizados para determinar o momento de inércia do conjunto. O primeiro registro documental de um dispositivo desse tipo é atribuído a Giovanni de Dondi,²⁹ que construiu um relógio em meados do século XIV em Pádua, Itália (Figura 1.9³⁰).

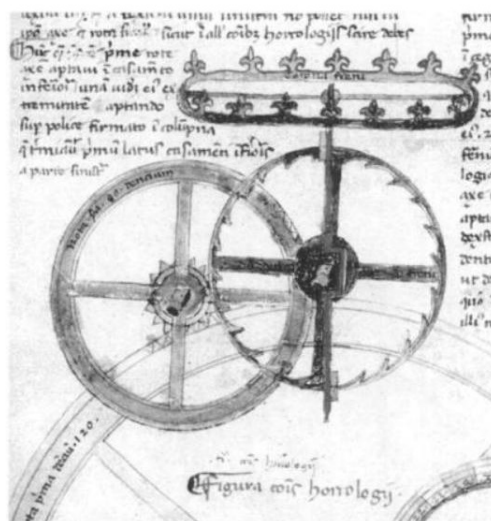


Figura 1.9. Desenho da verga de um relógio astronômico atribuído a Giovanni de Dondi, que escreveu *Tractatus Astrarii*, 1364 (Wikipedia, 2009).

Um dos problemas diretamente vinculados à medição de tempo era o da navegação. Uma das formas de os marinheiros do século XVII determinarem a sua longitude em alto-mar era por meio de relógios. O procedimento consistia em acertar um relógio com o tempo local (no porto), logo antes da partida, e verificar

²⁹Giovanni de Dondi e seu pai Jacopo de Dondi viveram em Pádua, Itália, no século XIV. São reconhecidos como pioneiros no projeto e construção de relógios.

³⁰A imagem da Figura 1.9 vem de John David North, *God's Clockmaker: Richard of Wallingford and the Invention of Time*, Hambleton & London Co., London, 2005.

a que horas, no porto, o sol se encontrava no ponto mais alto de sua trajetória. Depois de haver navegado por algum tempo, para determinar a longitude era necessário saber a que horas o sol atingia o ponto mais alto no céu. Determinava-se a diferença entre o horário em que o sol atingia esse ponto e o horário em que o mesmo ocorria no porto de onde haviam partido. Cada hora de diferença corresponde a 1500 km, que é $1/24$ do comprimento da linha do Equador. Os relógios baseados no *verge and foliot* acumulavam erros de centenas de segundos por dia,³¹ o que era desastroso para aplicações em navegação.

A necessidade de aumentar a precisão na medida do tempo motivou muitos,³² como o holandês Christian Huygens³³ (Figura 1.10), a desenvolver projetos alternativos. Em 1657, Huygens produziu o primeiro relógio de pêndulo (Bernstein, 2002, p. 56). Uma das principais modificações em relação aos relógios baseados no *verge and foliot* foi a substituição do *foliot* por um pêndulo.

Uma maneira conveniente de interpretar o funcionamento do relógio com pêndulo é considerar o relógio sem atrito. Nesse caso, o pêndulo teria período constante, o que garantiria regularidade de movimento. Contudo, ao levar em conta o atrito, o pêndulo tende a parar. Mesmo que o pêndulo não parasse, ainda haveria um outro problema, pois o período do pêndulo depende da amplitude da oscilação. Huygens propôs soluções para os dois problemas.

Para não permitir que o pêndulo deixe de oscilar, é necessário repor a energia dissipada pelo atrito. Huygens utilizou o mesmo conceito da coroa interagindo com paletas (em inglês isso é chamado de *escapement*, pois é permitido à energia

³¹Uma estimativa menos otimista é que tais dispositivos podiam acumular erros de várias horas (Headrick, 2002, p. 43).

³²Os polpudos prêmios oferecidos eram provavelmente a real motivação. Com respeito a isso, Fuller disse: “Em 1599 Filipe III da Espanha havia oferecido uma recompensa de dez mil coroas para a pessoa que conseguisse determinar a longitude em alto-mar; e, em 1714, o governo britânico anunciou que pagaria uma generosa recompensa de vinte mil libras (cujo valor possivelmente fosse o de um milhão de libras ou dois milhões de dólares nos dias de hoje) por um dispositivo que contasse o tempo e que permanecesse preciso em alto mar” (Fuller, 1976a, p. 109).

³³ Christian Huygens (1629–1695) foi um cientista e inventor holandês. Aperfeiçoou a qualidade dos relógios a pêndulo, especialmente para aplicações em alto-mar (1649). Investigou outros temas e fez outras invenções, entre elas: o motor a pólvora, métodos para polir lentes para telescópios (1655), impacto de corpos elásticos (1669), relógio a mola (1675), teoria ondulatória da luz (1678) e teoria de probabilidades (Hall, 2008). Foi um dos membros fundadores da Academia de Ciências da França. Escreveu diversos trabalhos, entre eles *Horologium* (1658), *Horologium Oscillatorium* (1673), *Discours de la Cause de la Pesanteur* (1690) e *Traité de la Lumière* (1690) (Daintith, 2009).

“escapar” toda vez que um dos dentes da coroa é liberado (Headrick, 2002, p. 42)) para aplicar pulsos de energia, um a cada período. Um processo semelhante ocorre quando se empurra alguém em um balanço. A cada período, um pulso é aplicado ao balanço, em uma *fase adequada*, para manter o sistema oscilando com amplitude e período constante. Esse é o papel da coroa e as paletas. A determinação do momento (fase) adequado para aplicar o novo impulso, no diagrama de blocos da Figura 1.8, é feita pelo bloco B.



Figura 1.10. Christian Huygens (1629–1695), (Wikipedia, 2009).

Para contornar o problema resultante da dependência do período do pêndulo com a amplitude da oscilação, Huygens projetou uma superfície curva, que recebeu o nome de *tautochrone* — que é um cicloide —, sobre a qual parte do pêndulo tocava. Com isso, a amplitude “aparente” da oscilação era mantida constante (Fuller, 1976a). Essa curva está ilustrada na Figura 1.11a.

Na Figura 1.11b³⁴ mostra-se um desenho de Huygens de um de seus relógios. Uma solução alternativa ao uso da cicloide, também inventada por Huygens, foi o uso de uma outra estrutura curva, que tinha o mesmo papel. O resultado é conhecido como o relógio cônico de Huygens (Fuller, 1976a).

Com as novas propostas, os relógios de Huygens tinham uma incerteza da ordem de dez segundos por dia. Apesar disso, ao que tudo indica, ele nunca ganhou algum dos prêmios da época.

³⁴A imagem da Figura 1.11b vem de Harold C. Kelly, *Clock Repairing as a Hobby: A How-To Guide for Beginners*, Skyhorse Publishing, 2007.

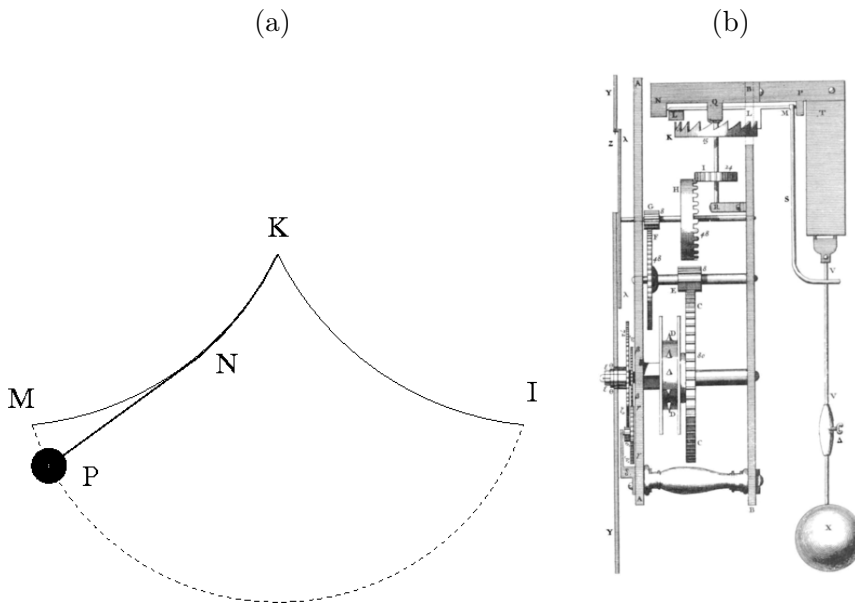


Figura 1.11. (a) Desenho proposto por Huygens. A curva MPI é uma cicloide. A estrutura KM e KI é tal que o período do pêndulo P independe da amplitude. (b) Desenho de um relógio de Huygens, em seu *Horologium Oscillatorium*, publicado em 1673. Na parte superior desse desenho, pode ser vista a coroa e as paletas utilizadas para repor ao pêndulo a energia dissipada pelo atrito (Wikipedia, 2009).

1.6 Sistemas do século XVII e depois

O holandês Cornelius Jacobszoon Drebbel³⁵ (Figura 1.12) inventou a estufa ilustrada na Figura 1.13.³⁶ Esse dispositivo foi originalmente concebido como incubadora de ovos de galinha, e é considerado o primeiro dispositivo realimentado de origem puramente europeia (Mayr, 1971a).

A descrição do dispositivo e seu funcionamento, conforme relatada por Mayr (1970), é a seguinte. Na parte inferior, indicada por A–A, encontra-se o fogo, que é separado do corpo da estufa por uma placa de ferro com uma abertura

³⁵Cornelius Jacobszoon Drebbel ou Drubbel (1572–1633) foi um engenheiro e inventor holandês que trabalhou com o abastecimento de água para cidades. Em 1604 mudou-se para a Inglaterra, onde trabalhou para a marinha e, em 1620, inventou o primeiro submarino navegável. A ele são atribuídas as invenções do torpedo, a incubadora ilustrada na Figura 1.13 e o aperfeiçoamento de termômetros (Hall, 2008).

³⁶Cambridge University Library, Manuscript number 2206, L1.5.8; Catal. IV (1861), p. 63. Citado por Jaeger, *Cornelius Drebbel* pp. 135–138.

central. A caixa incubadora está desenhada com linhas tracejadas, e é composta de paredes e piso ocios, cheios de água, que é abastecida pela mangueira (C).³⁷



Figura 1.12. Cornelius Jacobszoon Drebbel (1572–1633). Gravura de autoria de C. van Sichem (1631), (Wikipedia, 2009).

Os fumos resultantes da combustão passam pelo piso e paredes da incubadora, antes de sair pelo orifício (E). Na base da incubadora encontra-se o sensor de temperatura (D), também mostrado no detalhe, feito de vidro e cuja extremidade direita encontra-se fora do corpo da estufa. O sensor (D) tem uma parte cilíndrica preenchida com álcool, e uma parte em U, na extremidade direita, cheia de mercúrio. O nível de mercúrio no lado aberto do tubo em U varia de acordo com a expansão do álcool, que, por sua vez, depende da temperatura da parte cilíndrica do sensor. Essa temperatura reflete a temperatura da água no piso da incubadora. Flutuando sobre o mercúrio encontra-se uma vareta (B) que se conecta com a haste (H), que, por sua vez, pivota em G, provocando a abertura ou fechamento do orifício basculante (F), por onde entra o ar necessário para a combustão. O fechamento de F resulta em menos ar e, conseqüentemente, uma redução na temperatura da incubadora. A vareta (B) e a haste (H) são ajustáveis. Dessa forma é possível ajustar a sensibilidade do ramo de realimentação (via B) e o ganho na lei de controle (via H).

A estufa de Drebbel é precursora das caldeiras industriais. Alguns dos princípios utilizados por Drebbel foram posteriormente empregados no controle de temperatura de ambientes e de caldeiras. Uma importante mudança foi o uso de elementos bimetálicos no lugar do conjunto DBH (Figura 1.13), que, pela primeira vez em 1830, foram chamados de *termostatos* por Andrew Ure.

³⁷O leitor com algum conhecimento de caldeiras não terá dificuldade de reconhecer na estufa de Drebbel o precursor das caldeiras a vapor.

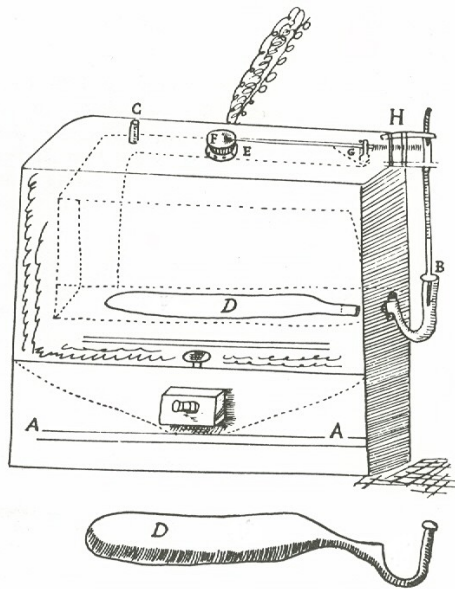


Figura 1.13. Estufa de Drebbel originalmente concebida como incubadora de ovos. A variável controlada é a temperatura na caixa da incubadora, indicada por linhas tracejadas. Um elemento fundamental é o sensor de temperatura (D), ilustrado também no detalhe. O funcionamento está descrito no texto. Figura adaptada de (Mayr, 1970), conforme manuscrito da Universidade de Cambridge.

Pouco depois da morte de Drebbel, os responsáveis pela gerência de seu patrimônio conseguiram, em favor dos herdeiros, uma patente britânica para a estufa inventada.³⁸

Outros importantes dispositivos realimentados inventados depois da estufa de Drebbel foram a válvula de segurança de pressão, inventada em 1681, pelo matemático e físico francês Denis Papin,³⁹ e o sistema de Edmund Lee,⁴⁰ patenteado em 1745, para o posicionamento e controle de velocidade de cataventos

³⁸Patente britânica (série antiga) número 75, 1634: Hildebrand Prusen and Howard Stachy, *Stoves and Furnances for the Manufacture of Salt*. Essa é certamente uma das primeiras patentes de algum dispositivo realimentado.

³⁹Denis Papin (1647–c.1714) graduou-se em medicina na França, mas preferiu trabalhar como físico e inventor. Começou sua carreira como assistente no laboratório de Christian Huygens (ver Nota 33 deste capítulo) em Paris. Construiu a primeira máquina a vapor em que a condensação do vapor era usada para gerar vácuo. Inventou também a panela de pressão ou autoclave (1679) quando trabalhava com Robert Boyle na Inglaterra (Daintith, 2009), a válvula de segurança de pressão, a máquina a vapor (1690) e um tipo de bomba centrífuga (Hall, 2008).

⁴⁰Edmund Lee era um ferreiro inglês, que patenteou o leque de cauda para moinhos. Trabalhava na forja Brock Mill, em Wigan, ao norte da Inglaterra (Wikipedia, 2011).

de moinhos. Mas detalhes da patente de Lee serão vistos na Seção 2.1.1. Nos próximos dois capítulos, outros dispositivos, relevantes na história de sistemas automáticos, serão mencionados.

Em um interessante livro, Khramoi descreveu dezenas de sistemas que em algum aspecto são automáticos inventados e construídos na Rússia (Khramoi, 1969). O foco do livro é sobre sistemas de automação e, portanto, sistemas chaveados (comandados por relés e dispositivos semelhantes) dominam largamente sobre sistemas de controle regulatório. A maioria dos sistemas descritos foram concebidos a partir da primeira metade do século XVIII. Ainda que os sistemas, na sua maioria, não sejam sistemas regulatórios, dois aspectos que chamam atenção na engenharia da Rússia são i) o amplo uso de eletricidade em relés, motores, regulação de lâmpadas a arco ainda no século XIX e ii) a preferência por sistemas chaveados, em oposição a sistemas regulatórios. Nesse livro, escrito para promover os inventores e engenheiros russos, o autor afirma que o primeiro regulador para uma unidade industrial foi desenvolvida por I. I. Polzunov⁴¹ em 1765. Apesar de todo o entusiasmo de Khramoi, o esquema descrito tem alguns elementos parecidos aos da máquina de servir vinho de Heron (Figura 1.6b) e sua operação está mais próxima de um sistema liga-desliga do que de um sistema de regulação contínua.

1.7 Considerações finais

O objetivo do presente capítulo foi o de brevemente descrever algumas menções antigas do conceito de realimentação. Alguns dos primeiros sistemas realimentados foram mencionados a título de ilustração e para dar ao leitor uma ideia da época em que a realimentação começou a ser utilizada.

Espera-se que o leitor perceba que, ao contrário do que pode parecer, o conceito de realimentação não é uma contribuição do século XX. Sim, foi nesse século que o termo *feedback* passou a ser usado, mas o conceito já era conhecido de muito tempo, e começara a ser formalmente estudado no século XIX, por exemplo com o trabalho de Maxwell *On Governors*. Neste ponto o leitor pode se exercitar e, mentalmente, tentar explicar qual é, em sua opinião, a contribuição do século XX para a área de sistemas realimentados, ou sistemas de controle.⁴²

⁴¹O russo Ivan Ivanovich Polzunov (1728–1766) foi um notável engenheiro mecânico e de calor, que inventou uma máquina a vapor de operação contínua e um regulador automático de admissão de vapor (Khramoi, 1969, p. 222).

⁴²Supondo que o leitor já tenha feito seu exercício de reflexão, oferecemos a seguinte citação: “A noção geral de controle automático pode ser antiga, mas a formulação de seus princípios

A fim de ajudar o leitor em seu exercício, serão citados trechos de dois dos livros mencionados neste capítulo. O primeiro é o trecho do livro de Otto Mayr:

“Tanto Philo quanto Heron demonstram uma certa satisfação no puro princípio de suas invenções. Essa satisfação parece independe de qualquer uso prático ou de algum ganho comercial. Essa atitude difere da abordagem utilitarista da tecnologia moderna, mas demonstra que esses cientistas helenistas eram capazes de pensar em termos de sistemas causais, em malha fechada.”⁴³

Um dos pontos a destacar dessa citação de Otto Mayr é que, desde a sua origem, a área hoje conhecida como controle automático inclui, entre aqueles que a desenvolvem, pessoas que veem mérito na pura concepção de ideias, sem a preocupação de alguma aplicação imediata. Ao longo dos anos, entre outras razões, essa postura resultou em um certo distanciamento entre a teoria e a prática do controle automático. A aproximação desses dois igualmente importantes aspectos da área de controle tem sido um dos desafios das últimas gerações, as quais, ironicamente, são as que mais contribuíram para o distanciamento quase irreversível entre a teoria e a prática.

Segue o segundo trecho, extraído do livro de Stuart Bennett:

“O caminho em direção a uma clara compreensão e formulação matemática da teoria de sistemas realimentados foi alcançada por meio da engenharia: primeiramente mecânica (...) e, à medida que as dificuldades de análise de sistemas mecânicos começaram a impedir maiores progressos, [esse caminho em direção a uma teoria de sistemas realimentados deu-se] posteriormente por meio da eletrônica, em particular, pela necessidade de alcançar baixa distorção na amplificação e transmissão de sinais de telefonia.

“Essa fase durou 150 anos, aproximadamente de 1790 a 1940. O progresso foi irregular. A prática dos engenheiros normalmente estava muito além da compreensão teórica daquilo que desejavam alcançar. Foi o período do inventor (...) uma linguagem comum para descrever

foi alcançada recentemente. O uso sistemático desses princípios — a sutileza de sua elaboração teórica e sua aplicação de longo alcance — deve ser atribuído ao século XX (...). Há, certamente, uma profunda diferença entre o reconhecimento primitivo de que alguns mecanismos são autorregulados e outros não, e a invenção de uma teoria que não apenas explique os principais fatos, mas que também possa ser utilizada na construção de novos sistemas” (Nagel, 1955, p. 2).

⁴³Citado de (Mayr, 1970, p. 26).

os sistemas de controle ainda não havia sido desenvolvida (...). Foi durante a Segunda Guerra Mundial,⁴⁴ com a necessidade de servomecanismos que operassem de forma muito mais rápida do que antes imaginado, que engenheiros e matemáticos criaram o engenheiro de controle.”⁴⁵

O texto de Bennett levanta diversos pontos muito interessantes, alguns dos quais salientamos para a reflexão do leitor. O início do desenvolvimento da área de controle deu-se no seio da engenharia mecânica. Coube à engenharia elétrica tomar o bastão do desenvolvimento da teoria de controle, quando o desenvolvimento parecia saturado⁴⁶ no contexto da engenharia mecânica. Um dos empecilhos ao desenvolvimento da teoria de controle era a falta de uma linguagem que fosse adequada para descrever sistemas realimentados.⁴⁷ A prática da engenharia de controle estava muito adiante da teoria. Esse cenário parece ser exatamente o oposto àquele observado na atualidade. Tentar determinar a época e as principais razões para essa inversão são ótimos desafios.⁴⁸ Por fim, Bennett aponta para o fato de o engenheiro de controle ser um profissional com formação sólida tanto em matemática aplicada quanto em engenharia. Ao longo dos próximos capítulos será possível constatar a veracidade dessa observação.

⁴⁴Apesar de a Segunda Guerra Mundial ter tido papel fundamental no desenvolvimento da área de controle, é verdade que guerras em geral tiveram esse papel: “Não deve ser negligenciado que as guerras em que a Rússia foi atacada (guerra com Napoleão em 1812 e a Guerra da Crimeia de 1853 a 1856) produziu um entusiasmo patriótico que se refletiu também em ciência e engenharia, em particular em áreas relacionadas com defesa, como minas automáticas e controladas remotamente, foguetes, dentre outros” (Khramoi, 1969, pp. 12–13).

⁴⁵Citado de (Bennett, 1979, p. 3).

⁴⁶Por *saturado* refere-se ao fato de que, no fim do século XIX e início do século XX, havia se tornado muito difícil construir sistemas mecânicos que viabilizassem testar novos conceitos teóricos na área de sistemas realimentados. A nova “plataforma” de desenvolvimento foi provida, naquela época, pela área de eletrônica, especialmente com aplicações em comunicações.

⁴⁷Acredita-se que aqui também haja razões para a engenharia elétrica ter tomado a dianteira no desenvolvimento da teoria de controle. Aqueles pesquisadores e engenheiros de projeto envolvidos na área de telecomunicações, tipicamente, tinham uma formação matemática superior à média da pessoas em outras áreas da engenharia, como mecânica e sistemas elétricos de potência. Dois nomes-chave na nova teoria de controle foram Harry Nyquist (Seção 7.2.3) e Hendrik Bode (Seção 9.2.3); ambos eram doutores com sólida formação matemática.

⁴⁸O leitor encontrará algumas dicas sobre essa inversão de tendências na Seção 11.5.

A partir de uma perspectiva histórica e usando conceitos e linguagem técnicos, esta obra descreve os principais desafios conceituais e tecnológicos da área de controle e automação, bem como alguns dos principais engenheiros e pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento dessa área.

A obra conta com ampla bibliografia, informações importantes e curiosidades sobre cientistas e inventores. A nomenclatura, os termos técnicos e a simbologia utilizados são, sempre que possível, os dos documentos originais.

A abordagem histórica mostra que os conceitos e métodos fundamentais da área de controle e automação existem há séculos e vêm sendo usados e aperfeiçoados desde então. Para o autor, a melhor explicação para muitos dos procedimentos e técnicas da área não se encontra em teoremas, mas na história de sua invenção e de seu desenvolvimento.

Esta obra pode ser utilizada como livro-texto em disciplinas sobre a história da tecnologia na área de sistemas realimentados; pode ser útil como leitura complementar para alunos cursando disciplinas de controle, especialmente controle clássico; e também pode ser consultada por engenheiros eletricitas e eletrônicos e profissionais de outras áreas interessados em história da ciência.

www.blucher.com.br

ISBN 978-85-212-1919-4



9 788521 219194

Blucher



Clique aqui e:

VEJA NA LOJA

Sistemas Realimentados *Uma abordagem histórica*

Luis Antonio Aguirre

ISBN: 9788521219194

Páginas: 362

Formato: 17 x 24 cm

Ano de Publicação: 2020

Peso: 0.000 kg
