

2

Panorama histórico

Com o intuito de contextualizar a importância dos sistemas de controle, bem como para proporcionar uma visão macroscópica de como ocorreu o seu desenvolvimento, apresenta-se aqui uma linha de tempo simplificada.

São destacados alguns dos eventos marcantes na história da ciência e da tecnologia, bem como as suas consequências.

Por exemplo, o advento da máquina a vapor de James Watt é um evento marcante que promoveu uma série de avanços científicos, tecnológicos, sociais, econômicos e culturais. Mesmo considerando apenas uma aplicação da máquina a vapor, mais especificamente o transporte ferroviário, as implicações foram globais em termos de geopolítica, economia e adaptações culturais.

O desenvolvimento de sistemas de novas tecnologias, incluindo os sistemas de controle, está fortemente ancorado na necessidade de buscar soluções para os vários problemas da sociedade (*demand pull*). Por outro lado, a curiosidade e a busca de maior conhecimento da natureza também impulsionam as realizações científico-tecnológicas (*science push*). Em verdade, os dois movimentos *demand pull* e *science push* interagem entre si e, por exemplo, a demanda por um bom manejo do fornecimento de água à população levou ao desenvolvimento de novos sistemas de bombeamento, purificação, distribuição, incluindo sistemas de controle. Por outro lado, os trabalhos para o problema da água levou à concepção de bombas mais eficientes, medidores de vazão mais precisos, métodos de purificação mais baratos e muitas outras inovações utilizáveis em uma variedade de aplicações.

Assim, de um lado os sistemas de controle foram fruto da necessidade de obter soluções específicas de certos problemas. Por outro lado, os avanços nos conhecimentos sobre sistemas de controle têm proporcionado a concepção de novos produtos inovadores.

As principais fontes de informações contidas nesta seção são:

1. A coleção de livros editados por David C. Lindberg e Ronald L. Numbers, *Cambridge History of Science*, 8 volumes, Cambridge University Press, 2013.
2. Coleções dos artigos seminais incluídos em (MAYR, 1970), (THALER, 1974) e (BASAR, 2001).
3. Os livros do Prof. Stuart Bennett. A história da Teoria de Controle entre 1.800 e 1930 é apresentada em (BENNETT, 1979). A evolução entre 1930 a 1955 é tratada em (BENNETT, 1993).
4. A obra editada por Luiz Antonio Aguirre, *Enciclopédia de Automática: Controle e Automação*, 3 volumes, Editora Blücher, 2007, e também William S. Levine, *The Control Handbook*, CRC Press Handbook/IEEE Press, 1996.
5. Quanto às biografias, os dados foram obtidos através de buscas na Internet.

Dispositivos antigos

Os dispositivos antigos eram construídos, em geral, de modo artístico e artesanal, baseado na capacidade inventiva de quem os concebeu. Um exemplo clássico é o Sistema Automático de Abertura de Portas atribuído ao matemático Heron de Alexandria (c.10-c.70 AD). Consistia de um vaso de pressão, conectado ao altar da chama. Quando se acendia a chama, a variação de pressão devido à queima movimentava água de um compartimento a outro, de modo a obter uma tração mecânica para abrir o portão. Por curiosidade, em 1931, Horace H. Raymond e Sheldon S. Roby projetaram e obtiveram uma patente de uma porta automática (Apparatus for Operating Doors, 23 out 1934, n. US1978093A). Essa porta foi instalada em um restaurante de West Haven para facilitar os garçons no atendimento aos clientes. Hoje em dia, as portas automáticas são largamente difundidas.

Observação: Atribui-se a Heron a invenção do *aeolipile*, que, em princípio, poderia ser considerado como uma turbina a vapor ou máquina a vapor. A invenção de máquinas a vapor constitui um importante marco na história da teoria de controle, mas que se tornou efetivo no século XVIII. Esse detalhe ilustra a dificuldade de se organizar uma linha de tempo.

Regulação de temperatura

O termostato bimetálico, utilizado ainda nos dias de hoje, foi inventado em 1830 por Andrew Ure (1778-1857). Consiste de duas lâminas de metal com coeficientes de dilatação diferentes coladas. Quando a temperatura aumenta, a dilatação maior de uma das lâminas faz o conjunto envergar e esse movimento pode ser utilizado, por exemplo, para ligar ou desligar o circuito de aquecimento. Em 1609, Cornelis Jacobszoon Drebbel (1572-1633) concebeu uma incubadora de ovos com termostato baseado na dilatação do mercúrio para regular a temperatura. A estratégia de controle liga-desliga é encontrada em um grande número de aplicações, sendo que termostatos bimetálicos continuam ainda em uso, apesar de chaves mais modernas baseadas em relés e componentes semicondutores.

Atualmente, o controle de temperatura está presente na estufa, no fogão, no ar-condicionado, no ferro elétrico, na geladeira, no arrefecimento de motores de carros, no *cooler* de microprocessadores e muitos outros dispositivos e equipamentos.

Fontes de energia

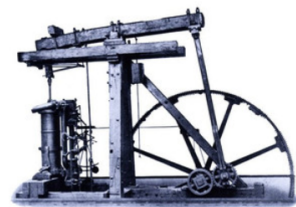
Para se atuar sobre um sistema físico para que esse apresente o comportamento desejado, necessita-se de fontes de energia. Antes do advento de máquinas a vapor, a energia mecânica para bombeamento de água e moenda de grãos, por exemplo, era obtida através de cataventos e rodas d'água. Mecanismos engenhosos como a hélice de Edmund Lee (1745) permitiam que os cataventos ficassem alinhados com a direção do vento.

Thomas Newcomen (1664-1729) projetou, em 1712, a primeira máquina prática que queimava combustível para produzir movimento mecânico utilizado no acionamento de bombas hidráulicas (cilindro-pistão), melhorando o projeto idealizado por Thomas Savery (c.1650-1715). As bombas eram utilizadas para drenagem de minas.

Denis Papin (1647-1713) inventou em 1681 um mecanismo de segurança para



Figura 2.1: Ex-
traído da wikipedi-
a.org/wiki/Aeolipile.



Máquina a Vapor. Ex-
traído de [www.deutsches-
museum.de/en/exhibitions/](http://www.deutsches-museum.de/en/exhibitions/).

regulação de pressão em máquinas a vapor.

James Brindley (1716- 1772) patenteou em 1758 um sistema de boia e válvula para regular o nível de água em caldeiras a vapor.

James Watt (1736-1819) inventa em 1769 uma máquina a vapor automatizada, mais eficiente que a máquina de Newcomen, cujas válvulas eram controladas manualmente. Além de utilização para bombeamento de água, inventou mecanismos para obter movimentos rotativos de eixos. Em 1788 Watt completa o desenvolvimento do mecanismo de regulação de velocidade de rotação de máquinas a vapor utilizando esferas suspensas por haste e submetidas a força centrífuga. O problema de *hunting* (oscilações na velocidade de rotação) levou ao desenvolvimento da teoria de estabilidade de Maxwell.

A invenção de máquinas a vapor contribuiu significativamente para a Revolução Industrial (meados do século XVIII a meados do XIX), em um processo que levou à substituição de artesão por máquinas, a produção doméstica por estabelecimentos fabris e a lenha por cavão.

A Revolução Industrial impulsionou o desenvolvimento tecnológico e transformou o estilo de vida da humanidade. Um exemplo notável no campo da automação é o Tear de Jacquard, inventado em 1801 por Joseph Marie Jacquard (1752-1834). Um outro exemplo é o desenvolvimento de estradas de ferro. A construção (1804) da primeira locomotiva empregando uma máquina a vapor é atribuída a Richard Trevithick (1771-1833).

Medida do tempo

A medida do tempo é de grande importância no controle do plantio e da colheita, na navegação marítima, no monitoramento de processos químicos, no estudo da evolução clínica de doenças, no controle de processos culinários e muitas outras atividades.

Acredita-se que um dos primeiros relógios era solar baseado no movimento da sombra de algum obelisco ou uma haste, ao longo do dia.

A medida de intervalos maiores de tempo era baseada em mapas estelares. Por exemplo, no Brasil, vê-se a constelação de Órion no verão e a de Escorpião no inverno. Os relógios de água (clepsydras) apareceram em torno de 1.500 BC e relacionavam o tempo decorrido com o nível de água de um vaso em que se despejava água a um fluxo constante. As ampulhetas forneciam uma medida do tempo baseado na passagem de areia de um compartimento a outro,

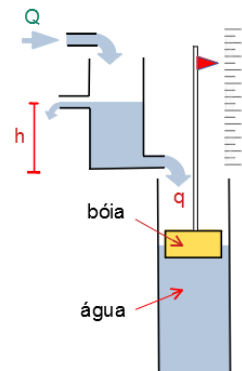


Figura 2.2: Clepsidra.

devido à ação da gravidade.

Gerbert de Aurillac (c.946-1003), Papa Sylvester II, é creditado como o inventor do primeiro relógio totalmente mecânico em 996.

Em torno de 1500, Peter Henlein (1485-1542) construiu os primeiros relógios pequenos e portáteis de bronze e usando mecanismos de mola. Em geral eram relógios ornamentais usados pela alta sociedade e alguns eram pomandros (porta perfumes, do francês, pomme d'ambre, maçã de âmbar).

Christiaan Huygens (1629-1695) constrói, em 1656, um relógio preciso baseado no período de oscilação de um pêndulo.

O relojoeiro William Clement (1657-1709) melhorou significativamente o funcionamento dos relógios introduzindo o mecanismo de escape (ou âncora de escape).

Em 1927 o primeiro relógio baseado em oscilações do cristal de quartzo foi construído por W.A. Marrison e J. W. Horton no Laboratório da Bell Telephone (detalhes em Marrison, W.A. *The Crystal Clock*, Proc. Nat. Acad. Sci. USA, v. 16, n. 7, 1930 pp. 496-507).

O primeiro relógio atômico, baseado em *caesium-133*, foi construído por Louis Essen em 1955 no National Physical Laboratory (Reino Unido), alcançando precisões da ordem de $\pm 10^{-9}$ s/dia.

Avanços da Matemática

No enfoque quantitativo da Teoria de Controle, a Matemática desempenha um papel primordial.

Aqui são mencionados apenas três exemplos de ferramentas amplamente utilizadas nos projetos de controladores para ilustrar a importância da matemática:

- funções de transferência
- equação de Euler-Lagrange
- critérios para verificação de estabilidade

Como será visto à frente, um conceito muito importante na Teoria de Controle é o de *Função de Transferência*, formalizado por Thomas John I'Anson Bromwich (1875-1929) a partir do *cálculo operacional* de Oliver Heaviside (1850-1925), utilizando a transformada de Laplace (Bromwich,

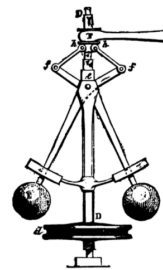


Figura 2.3: Governador de Watt. Obtido de wikipedia.org.

T.J.P.A., Normal Coordinates in Dynamical Systems, *Proc. London Math. Soc.*, 1917).

A equação de Euler-Lagrange apresentada é uma poderosa ferramenta para a modelagem de sistemas que se deve a Leonhard Paul Euler (1707-1783) e Joseph Louis Lagrange (Giuseppe Lodovico Lagrangia, 1736-1813). A equação de Euler-Lagrange permite a obtenção de equações diferenciais que descrevem o comportamento físico de sistemas com base no princípio da *estacionaridade da ação* de William Rowan Hamilton (1805-1865).

A garantia de estabilidade é um dos principais desafios encontrados no projeto de sistemas de controle.

Em 1840, o astrônomo Sir George Biddell Airy (1801-1892) desenvolveu um mecanismo para apontar o seu telescópio para objeto celestes de modo a compensar automaticamente a rotação da Terra. Foi constatado por Airy que um projeto inadequado da lei de controle utilizado para apontar o telescópio resultava em oscilações sustentadas. Ao estudar esse fenômeno, Airy se tornou um dos primeiros cientistas a discutir o fenômeno de oscilações.

Em 1868, James Clerk Maxwell (1831-1879) apresentou um artigo com uma análise matemática rigorosa da estabilidade de um sistema de controle realimentado, utilizado para manter regulada a velocidade de rotação de uma máquina a vapor, usando esferas que se deslocavam com a força centrífuga. Tal mecanismo foi chamado, na época, de *governors* (Maxwell, J.C. On Governors, *Proceedings of the Royal Society of London*, 1867-1868, v.16, pp. 270-283).

Em 1876, Ivan Alekseyevich Vyshnegradskii (1832-1895) também logrou obter, independentemente de Maxwell, um critério de estabilidade para governadores utilizados em máquinas a vapor (Vishnegradskii, I.A. On controllers of direct action (em russo). *Izvestiya St. Petersburg Technological Inst.*, v. 1, 1877 pp. 21-62).

Em 12 de setembro de 1892, Aleksandr Mikhailovich Lyapunov (1857-1918) defendeu a sua tese de doutorado *The general problem of the stability of motion* junto à Universidade de Kharkov e publicado inicialmente pela *Kharkov Mathematical Society*. A tese foi traduzida para o francês, Davaux, E. Problème général de la stabilité du mouvement (*Annales de la Faculté des Sciences de Toulouse*, v.2, n.9, 1907, pp. 203-474 e para o inglês (a partir do texto em francês), Fuller, A.T. The general problem of the stability of motion. *Int. J. Control*, v. 55, n.3, 1992, pp. 531-773.

Eletricidade

Ányos István Jedlik (1800-1895) é considerado o inventor de motores DC e em 1827, construiu o que ele chamou de auto-rotor eletromagnético. Um motor

realmente operacional foi construído por Moritz Hermann (ou Boris Semyonovich von Jacobi, 1801-1874) em 1834. O hoje em dia onipresente *motor de indução com gaiola de esquilo* foi inventado por Mikhail Osipovich Dolivo-Dobrovolsky (1861-1919) em 1889.

Thomas Alva Edison (1847-1931) era um inventor e empresário. Entre as suas contribuições estão o sistema de energia elétrica, fonógrafo, lâmpada elétrica, filmadora (Kinetograph), bateria etc. Charles Proteus Steinmetz ([Karl August Rudolph Steinmetz, 1865-1923) era um matemático e engenheiro electricista que fomentou o uso de AC que permitiu a expansão da indústria de energia elétrica nos EUA.

Antes do advento da energia elétrica, a transmissão de energia era um grande problema. No início da revolução industrial utilizavam-se polias e correias para a distribuição de energia.

Em 1938, Otto Hahn (1879-1968) e Fritz Straßmann (1902-1980) descobriram o fenômeno da fissão nuclear. Logo depois, em 1942, a equipe liderada por Enrico Fermi construiu, em Chicago, o reator nuclear Chicago Pile-1. Iniciava-se então a era nuclear, com grandes potenciais de geração de energia elétrica, além de produção de radioisótopos para tratamento médico, artefatos bélicos e propulsão de navios, entre outras aplicações. Porém, acidentes como os de Three Mile Island, Chernobil e Fukushima têm sensibilizado a população em termos de segurança.

A menos do problema de descarte do combustível radioativo exaurido, usinas nucleares são consideradas limpas em termos de emissão de gases que provocam o efeito estufa. Outras modalidades de geração de energia elétrica limpa são a hidroelétrica, fotovoltaica e eólica.

Observação: Embora a transmissão de energia elétrica seja hegemônica, particularmente quando se envolvem distâncias longas, é interessante notar que o calor de vaporização da água é 2.27 MJ/kg. Sem contar o calor devido ao superaquecimento do vapor, um fluxo de 1kg/s transporta 2.27 MJ/s, correspondendo à potência de 2.270.000 W, razão pela qual ainda se utilizam muitas caldeiras. Por exemplo, uma caldeira de 15 ton/h = 15.000/kg/3.600s \approx 4.2 kg/s.

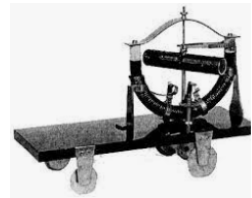


Figura 2.4: Jedlik's "electromagnetic self-rotor", 1828, Museu de Artes Aplicadas, Budapeste.

Motor de combustão interna

O primeiro motor de combustão interna que atingiu sucesso comercial foi aquele desenvolvido por Jean Joseph Étienne Lenoir (1822-1900) em 1858, embora já existissem outros projetos, como o de François Isaac de Rivaz (1752-1828), baseado em hidrogênio. O primeiro motor de quatro tempos e utilizando combustível líquido foi desenvolvido por Nikolaus August Otto (1832-1891) em 1876.

O ferro, o carvão e a energia a vapor são icônicos da primeira revolução industrial, do século XVIII a meados de XIX. A segunda revolução industrial, de meados do século XIX a meados do século XX, pode ser caracterizada pela intensa utilização do aço, da eletricidade e do petróleo (caldeiras e motores) em um sem número de novas aplicações e produtos, incluindo o transporte em massa e desenvolvimento de aeroplanos.

O processo desenvolvido em 1856 por Sir Henry Bessemer FRS (1813-1898) para reduzir o teor de carbono de ferro gusa fundido havia tornado eficaz a produção barata de aço.

São características da época a produção em massa, estabelecimento de padrões, disseminação do conceito de peças de reposição e métodos de linha de produção, introduzido em 1913 por Henry Ford (1863-1947) para a produção do automóvel Model T.



Figura 2.5: Arnott's factory at North Strathfield, Sydney, in the 1920s MAAS Collection, Photo: Milton Kent.

Aplicações navais

Os desafios trazidos pela indústria naval contribuíram significativamente para o desenvolvimento da Teoria de Controle. Cornelis Jacobszoon Drebbel (1572-1633) já havia projetado, em torno de 1620, o que é considerado o primeiro submarino do mundo.

Jean Joseph Léon Farcot (1824-1908) é considerado um dos pioneiros no projeto de *servomecanismos*, tendo desenvolvido mecanismos para movimentar lemes de navio de várias toneladas a partir do comando do timoneiro. (Farcot, J.J.L. *Le servo-moteur ou Moteur Asservi*, J. Baudry, 1873).

Em 1866 Robert Whitehead inventou o primeiro torpedo autopropulsionado utilizando ar comprimido e iniciou a primeira fábrica desse tipo de artefato. Em 1890 os torpedos foram dotados de giroscópio para melhorar o seu controle direcional. Em 1877, Louis Brennan patenteou um sistema para *regular* a profundidade de navegação do torpedo em 12 pés.

Nikolai (Nicolas) Fyodorovich Minorsky (1885-1970) introduziu o controlador de 3 termos para posicionar lemes de navios, sendo considerado o inventor do *controle PID* (Proporcional, Integral e Derivativo). Minorsky, N. Directional stability of automatically steered bodies. *Journal of the American Society of Naval Engineers*, v.42, n.2, 1922, pp. 280-309.

O termo *servomecanismo* foi popularizado por Harold Locke Hazen (1901-1980) através da publicação: Hazen, H. L. Theory of servomechanisms. *J. Franklin Institute*, v. 218, 1934, pp.209-331. Notar, porém, que em 1873 Jean Joseph Léon Farcot (1824-1908) havia publicado o livro *Le Servo-Moteur*. Farcot era engenheiro e empresário e concebeu servomecanismos para movimentar pesados lemes de navios. (Farcot, J. Le servo-moteur: ou, moteur-asservi, ses principes constitutifs - variantes diverses application à la manoeuvre des gouvernails. J. Baudry, 1873. Reimpressão Forgotten Books, 2018).

Aeronáutica

Em 8 de agosto de 1709, o balão de ar quente construído por Bartolomeu de Gusmão, alçou na corte de Dom João V de Portugal, em Lisboa.

Em 24 de setembro de 1852, Baptiste Jules Henri Jacques Giffard (1825-1882) voou 27 km entre Paris e Elancourt no seu dirigível propelido por uma máquina a vapor.

Júlio César Ribeiro de Souza (1843-1887) concebeu o dirigível Le Victoria (homenagem à esposa, Victoria Hippolita do Valle), que possuía um formato dissimétrico favorável para avançar contra o vento.

Em 1890, Clément Ader (1841-1925), construiu Eole, um avião equipado com um motor a vapor. Ader conseguiu decolar, mas *não conseguiu controlar a Eole*.

Alberto Santos Dumont (1873-1932), no seu dirigível No. 5, ganhou o prêmio *Deutsch de la Meurthe* do Aero



Figura 2.6: Voo do Santos Dumont no seu 14-bis. Extraído de [wikipédia.org/wiki /Voo_do_14_bis.jpg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Voo_do_14_bis).

Clube da França por ter voado de Saint-Cloud ao Torre Eiffel Tower e retornado em 30 minutos.

Em 17 de dezembro de 1903, os irmãos Orville (1871-1948) e Wilbur (1867-1912) conseguiram voar, de modo *controlado*, por 6 km em uma área de Kitty Hawk, North Carolina, após ser lançado por uma catapulta. O *Wright Flyer* possuía um mecanismo de controle em 3 eixos.

Em 23 de outubro de 1906, Alberto Santos-Dumont (1873-1932) decolou e pousou com sucesso o seu aeroplano 14-bis, voando por 60m a uma altura de 5m no Château de Bagatelle, Bois de Boulogne, Paris, ganhando o prêmio Deutsch-Archdeacon.

A estabilidade é um tema de extrema relevância em aeronáutica e, em 1911, George Hartley Bryan (1864-1928) publicou um livro abrangendo esse tema (Bryan, G.H. *Stability in Aviation: an Introduction to Dynamical Stability as Applied to the Motions of Aroplanes*. Macmillan, London, 1911.

Entre 1952 e 1956, Heinrich Focke (1890-1979) foi contratado pelo Centro Técnico Aeroespacial (CTA), onde desenvolveu, em 1951, o aeroplano de decolagem vertical chamado de *Convertiplano* e, em 1956, o Helicóptero BF-1 batizado de *Beija-Flor*.

A Turbina a Jato foi inventada por Sir Frank Whittle (1907-1996) e por Hans J. P. von Ohain (1911-1998). O primeiro aeroplano a jato foi o *He 178*, que voou em 1939 com uma turbina *von Ohain* produzindo 4.9 kN de empuxo.

O Laboratório de Radiação (*Radiation Laboratory*) foi construído no campus do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), em 1940, para resolver problemas de processamento de sinais e controle relacionado com o o posicionamento de canhões e processamento de dados de Radar.

Um grande número de resultados importantes relacionados com métodos no domínio da frequência foi desenvolvido nesse laboratório, como descrito em James, Nichols, and Phillips. *Theory of Servomechanisms*, 1947.

Enquanto trabalhava no projeto cooperativo *MIT/Corporação Sperry*, em 1941, Albert C. Hall (1914-1992) percebeu a importância dos efeitos deletérios do ruído em sistemas de controle e de processamento de sinais. Utilizando técnicas no domínio da frequência, Hall projetou um efetivo sistema de radar.

Em 1911, Elmer Ambrose Sperry (1860-1930), fundou a *Sperry Gyroscope Company*. Ainda durante a Primeira Guerra Mundial, a *Sperry Gyroscope Company* desenvolveu o primeiro sistema de controle de navios, denominado de *Metal Mike*. Os esforços militares impulsionaram significativos desenvolvimento em uma miríade de áreas estratégicas, incluindo a Teoria de Controle.

Foguetes e satélites

Em 1960, Charles Stark “Doc” Draper (2 de outubro de 1901-25 de julho de 1987) inventou o sistema de navegação inercial utilizando giroscópios e acelerômetros, muito utilizados ainda hoje em navegação, apesar do advento de dispositivos como giro-LASER, GPS e outras invenções modernas. Em 1953, Draper e sua equipe puderam testar o sistema de navegação inercial *Space Inertial Reference Equipment* (SPIRE) em um bombardeiro B-29.

Assume-se que o foguete foi inventado por volta de 1000 DC, na forma de flechas propulsionados por pólvora. Em torno de 1405 DC, Konrad Kyeser (1366-?) escreveu o livro *Bellifortis*, sobre a tecnologia militar, e incluiu descrições de foguetes.

Várias variantes de foguetes e pirotécnicos foram descritas em *Artis Magnae Artilleriae pars prima* (Grande arte de artilharia, parte I), de Kazimierz Siemienowicz (c. 1600-c. 1651), impresso em Amsterdã em 1650.

Em 16 de março de 1926 foi lançado o primeiro foguete de combustível líquido projetado por Robert Hutchings Goddard (1882-1945). In 1943, iniciou-se a produção do famoso foguete V-2 (Vergeltungswaffe 2 ou arma de vingança 2) pela equipe coordenada por Wernher Magnus Maximilian Freiherr von Braun (1912-1977), que permitia atingir alvos a 300 km carregando 1.000 kg de explosivos.

O primeiro satélite artificial, o Sputnik 1, foi lançado do cosmódromo de Baikonur no Cazaquistão, pela União Soviética, em 4 de outubro de 1957. Era uma esfera de 58 cm de diâmetro e 83.6 kg de massa.

Em 12 de abril de 1961 foi lançado o Vostok I, levando o cosmonauta Yuri Alekseyevich Gagarin (1934-1968) para um voo orbital de 48 min ao redor da Terra.

No Natal de 1968, Frank Frederick Borman II (1928-), James Arthur Lovell Jr. (1928-) e William Alison Anders (1933-) circum-navegaram a Lua a bordo do Apollo 8. Em 20 de julho de 1969, Neil Alden Armstrong (1930-2012) pisou no solo lunar, durante a missão do Apollo 11, cunhando a famosa frase: “Um pequeno passo para um homem, um salto gigantesco para a humanidade”.

O primeiro astronauta brasileiro é Marcos Cesar Pontes (1963-), que partiu para a Estação Espacial Internacional (ISS) em 30 de março de 2006, a bordo da nave russa Soyuz TMA-8, e retornou no dia 8 de abril, a bordo da nave



Figura 2.7: Satélite Sputnik 1, obtido de wikipedia.org/wiki.

Soyuz TMA-7.

Eletrônica

Os engenheiros que trabalham hoje em dia com Sistemas de Controle estão familiarizados com notações tais como 1 mH, 5 Ω , 2 A, 5 V, 3 C, 10 μ F, 100 Hz, 3 G, 7 Oe e 9 Wb, relacionados com alguns dos precursores de eletricidade e magnetismo (Henry, Ohm, Ampère, Volta, Coulomb, Faraday, Hertz, Gauss, Oersted e Weber, respectivamente).

Em 1799, Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827) demonstra a sua bateria (pilha de discos intercalados de zinco, cobre e água salgada). Hoje em dia baterias empregando outros compostos são usadas em pilhas mais compactas e eficientes.

Em 1845, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) formulou as conhecidas leis que levam o seu nome quando ainda era estudante na Universidade de Königsberg.

Em 1906, Lee de Forest (26 de agosto de 1873-30 de junho de 1961) concebe “Audion”, que é uma válvula termoiônica tipo triodo. Com o advento da válvula termoiônica a eletrônica tem uma rápida expansão em termos de novos produtos, incluindo equipamentos de áudio e de rádio.

No campo de receptores de rádio, em 1914, Edwin Howard Armstrong (1890[2]-1954) solicitou uma patente sobre circuitos regenerativos (ou seja, com *realimentação negativa*), concedida em 1906 (*Wireless Receiving System*, n. US 1113149A). Em 1931, Armstrong obteve a patente do sistema receptor superheterodino, *Radio Signaling System*, n. US 1941066A. Em 1933, recebeu também a patente do FM de banda larga.



Figura 2.8: Válvula Termoiônica Audion, obtido de wikipedia.org/wiki/Audion.

Telecomunicações

A era dos semicondutores inicia-se em 1947 com os trabalhos de William Bradford Shockley (1910-1989), John Bardeen (1908-1991) e Walter Houser Brattain (1902-1987), que desenvolveram o primeiro transistor efetivo nas dependências dos laboratórios Bell. Julius Edgar Lilienfeld (1882-1963) depositou uma solicitação de patente de um transistor de efeito de campo (FET) em 1925, no Canadá, mas um dispositivo operacional ainda não havia sido apresentado.

Em 1971, a Intel introduziu o primeiro microprocessador comercial, 4004 de

4 bits, desenvolvido por Federico Faggin (1941-), Marcian Edward “Ted” Hoff Jr. (1937-), Stanley Mazor (1941-) e Masatoshi Shima (1943-).

A transmissão, recepção, armazenamento, recuperação, processamento e proteção de informações é muito relevante no projeto de controladores. Um exemplo óbvio é o controle remoto, mas, mesmo para um sistema simples de controle, o sensor deve “comunicar” com o módulo de controle de modo a ter pouca distorção, sofrer pouca interferência de ruídos, ter velocidade adequada de transmissão etc.

Em 1876, Alexander Graham Bell (1847-1922) obteve a patente do telefone. Porém, em 11 de junho de 2002, o Congresso dos Estados Unidos, através da resolução N°. 269, reconheceu Antonio Santi Giuseppe Meucci (1808-1889) como o verdadeiro inventor, uma vez que Meucci havia vendido o protótipo a Bell por volta de 1870. Em 1875, registrou a patente de um telégrafo. Em 1837, Sir William Fothergill Cooke (1806-1879) e Charles Wheatstone (1802-1875) obtiveram uma patente conjunta, após uma acirrada disputa sobre a primazia da invenção do telégrafo de 5 agulhas. As agulhas eram movidas eletromagneticamente. A letra selecionada era a que ficava na intersecção da direção apontada por 2 das agulhas (as demais agulhas permaneciam em uma posição neutra).

In 1835, Samuel Finley Breese Morse (1791-1872), concebeu um método de representar letras e números através de pontos e traços (código Morse: $\cdot - = \mathbf{a}$, $- \cdot \cdot \cdot = \mathbf{b}$, $- \cdot - \cdot = \mathbf{c}$, etc). Utilizando esse método, Morse obteve uma patente de telégrafo eletromagnético em 1873. Em comunicações telefônicas a longas distâncias, existe a necessidade de amplificação do sinal de voz, mas que também amplifica o ruído. Para resolver esse problema em amplificadores repetidores, Harold Stephen Black (1898-1983) mostrou a efetividade da *realimentação negativa* em 1927. A realimentação negativa é um conceito de fundamental importância na Teoria de Controle.

Em 14 de agosto de 1894, Oliver Joseph Lodge (1851-1940) transmitiu sinais de rádio em um encontro da Associação Britânica para o Avanço da Ciência na Universidade de Oxford e obteve a patente US 609.154 de 1898, Electric Telegraphy.

Em 1896, Guglielmo Giovanni Maria Marconi, Marquis of Marconi (1874-1937) requereu a patente britânica No. 12,039, concedida em 1897, *Improvements in Transmitting Electrical Impulses and Signals, and in Apparatus therefor*.



Figura 2.9: Transistor. Obtido de computerhistory.com.

Computador digital

Em 1854, George Boole (1815-1864) desenvolveu a Teoria da Álgebra de Boole (Boole, G. *An Investigation of the Laws of Thought*. Walton e Maberly, 1854) e em 1822, Charles Babbage (1791-1871) apresentou um modelo funcional do *Difference Engine*, que era uma máquina mecânica para produção automática de tabelas matemáticas. Em 1837, Babbage descreveu, mas não construiu, o *Analytical Engine*, um sucessor para o *Difference Engine* que possuía unidade lógico-aritmética, controle de fluxo de execução e memória.

Em 1936, Turing concebeu uma máquina digital abstrata que utilizava instruções armazenadas na memória para sequenciar as suas operações.

Em 1941, Konrad Zuse (1910-1995) logrou construir um computador digital controlado por programa, chamado Z3.

Em 21 de junho de 1949, foi utilizado com sucesso o computador de programa armazenado *Small-Scale Experimental Machine* (SSEM), construído pela Universidade de Manchester e apelidado de “Baby”.

Em 1944, John William Mauchly (1907-1980) e John Adam Presper Eckert Jr (1919-1995) propuseram a construção do *Electronic Discrete Variable Automatic Computer* (EDVAC), utilizando a arquitetura de John von Neumann (Margittai Neumann János Lajos, 1903-1957). Foi entregue em 1949 ao *Ballistic Research Laboratory*. Era um computador eletrônico de uso geral utilizando o conceito de programa armazenado. O EDVAC utilizava aproximadamente 6.000 tubos de vácuo e 12.000 diodos, consumia 56 kW de potência, ocupava 45.5 m² de área e pesava 7.850 kg.

Em 1960, no IME, é apresentado um computador híbrido desenvolvido como o trabalho final do curso de engenharia eletrônica, construído por José A. M. Mendonça, Jorge M. Barreto, Herbert B. Fiuza, Edison Dytz, Mário M. Alencastro e Walter M. Lace, sob a orientação dos professores Antônio M. M. Chaves, Antônio J. D. Amarante, Danilo Marcondes, Rubens T. Carrilho, Werther A. Vervloet e Dr. Helmut T. Schreyer.

Em 1961, no ITA, é apresentado o *Zezinho*, um computador digital desenvolvido como o trabalho final do curso de engenharia eletrônica, construído pelos formandos Alfred Volkmer, András G. Vásárhelyi, Fernando V. Souza e José E. Ripper Filho, orientado pelos professores Tien Wei Chu e Richard R.



Figura 2.10: Computador digital Zezinho, obtido de <http://www.aeitaonline.com.br>.

Wallauschek.

No dia 29 de outubro de 1969, ARPAnet enviou a primeira mensagem de um computador na UCLA para um outro em Stanford. A tecnologia de rede de computadores evoluiu rapidamente e, em 1970, Robert Elliot Kahn (1938-) e Vinton Gray Cerf (1943-) propuseram o Transmission Control Protocol and Internet Protocol, or TCP/IP. Em 1 de janeiro de 1983, a ARPANET adotou a TCP/IP e a rede de redes evoluiu para a Internet.

A terceira revolução industrial, de meados do século XX a início do século XXI, é um efeito conjunto de vários fatores, incluindo a disseminação de equipamentos eletrônicos, avanços na tecnologia de semicondutores, a energia nuclear, a disseminação do computador digital e efeitos decorrentes disso, como a robótica, Internet, além da descoberta de novos fenômenos físicos, como a supercondutividade e *light amplification by stimulated emission of radiation* (LASER), que impulsionaram o desenvolvimento de novos processos e produtos. Trata-se de uma época muito criativa, com inovações na indústria farmacêutica, imagiologia médica, explorações espaciais, mecanização agrícola, automação bancária, controle de tráfego e de cargas, armamentos inteligentes etc.

Indústria 4.0

A indústria 4.0 é a quarta revolução industrial, resultado da amalgamação de várias tecnologias avançadas, tais como a inteligência artificial, aprendizado de máquina, a computação em nuvem, *big data*, internet das coisas, robótica autônoma, realidade virtual, realidade aumentada, manufatura aditiva, prototipação rápida, energia limpa, sustentabilidade etc.

2.1 IFAC

O primeiro evento na área de Controle Automático foi realizado na Universidade de Heidelberg entre os dias 25 e 29 de setembro de 1956 sob o título *Regelungstechnik – Moderne Theorien und ihre Verwendbarkeit*. Neste evento os participantes assinaram um acordo para a criação de uma organização internacional e foi estruturado um Comitê Provisório sob a presidência de Victor Brodia, responsável por fundar a *International Federation of Automatic Control* (IFAC).

Em 12 de setembro de 1957 foi realizada a Primeira Assembleia Geral, em Paris, no Conservatoire National des Arts et Métiers, com a participação de delegados de 18 países. A Primeira Assembleia Geral convocou a reunião constituinte em Paris. Nessa assembleia foram votados os Estatutos e eleito o

primeiro presidente, Harold Chestnut.

O primeiro Congresso Mundial da IFAC ocorreu em Moscou entre os dias 27 de junho e 7 de julho de 1960.

A Sociedade Brasileira de Automática (SBA) foi fundada em 1975 e é uma *National Member Organization* (NMO) da IFAC no Brasil.

2.2 Livros-textos pioneiros

O Prof. Dr. Luis Antonio Aguirre ([AGUIRRE, 2015a](#)) oferece uma análise aprofundada e contextualizada dos livros pioneiros da área de sistemas de controle.

Alguns livros publicados antes de 1950 são:

- Tolle, M. *Die Regelung der Kraftmaschinen*, Springer Verlag, Berlin, 1909.
 - Oldenbourg, R. C. and Sartorius, H. *The dynamics of automatic controls*. The American Society of Mechanical Engineers, 1948.
 - Smith, E. S. *Automatic control engineering*. New York: McGraw Hill, 1944.
 - Bode, H. W. *Network analysis and feedback amplifier design*. D. Van Nostrand Company, 1945.
 - Hall, A. C. *The Analysis and synthesis of linear servomechanisms*. The MIT Press, 1943.
 - James, H. M., Nichols, N. B., Phillips, R. S. *Theory of servomechanisms*. McGraw Hill, 1947.
 - Eckman, D. P. *Principles of industrial process control*. John Wiley and Sons, 1945.
 - Lauer, H., Lesnick, R., Matson, L. *Servomechanism fundamentals*. McGraw Hill, 1947.
 - Leonhard, A. *Die selbsttätige regelung*. Springer Verlag, 1940.
 - MacColl, L. A. *Fundamental theory of servomechanisms*. D. Van Nostrand, 1945.
-

2.3 Controle no Brasil

O ensino de Controle Automático no Brasil iniciou-se, possivelmente, em 1953, no Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA), quando foi oferecida a disciplina *Controle Automático*, ministrada pelo professor americano Edward Wilson Kimbark, que foi o primeiro Chefe da Divisão de Engenharia Eletrônica.

Em 1957, o professor Luiz Valente Boffi organizou o primeiro grupo para educação e pesquisa em Controle Automático do Brasil, no Departamento de Engenharia Eletrônica do ITA.

Posteriormente, na Escola Politécnica da USP, os primeiros cursos de controle automático foram lecionados em 1970, pelos professores Plínio Benedito de Lauro Castrucci e Luís Augusto Góes Calmon de Barros Barreto.

Também em 1970, foi lecionado o primeiro curso de controle automático na Unicamp, pelo professor Manoel Sobral, que foi o primeiro diretor da então Faculdade de Engenharia de Campinas, da Unicamp, e foi também o primeiro a criar um Departamento de Automação em uma universidade brasileira.

Na Universidade do Brasil, em 1963, hoje Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), foi criada a Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE).

Alguns livros de autores do Brasil Embora não se analise detalhadamente como apresentado em (AGUIRRE, 2015a), acredita-se que a lista cronológica dos livros escritos por autores brasileiros, apesar de várias omissões, possa prover um retrato de como se desenvolveu o ensino de Sistemas, Controle e Automação.

No âmbito do tema Sistemas Dinâmicos, o excelente texto de autoria de autoria de Jacob Palis Jr. e Welington de Melo, editado pelo Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), proporciona uma base sólida, incluindo os célebres resultados de Maurício Matos Peixoto e Stephen Smale, entre outros.

- Boffi, L. V. e Coutinho, J. A. M. *Elementos de Análise de Sistemas Lineares*. ETEGIL, 1966.
 - Castrucci, P. B. L. *Controle automático: teoria e projeto*. Edgar Blücher, 1969.
 - Sighieri, L. e Nishinari, A. *Controle automático de processo industriais - Instrumentação*. Edgar Blücher, 1973.
 - Castrucci, P. B. L. e Batista, L. *Controle linear método básico*. Edgar Blücher, 1980.
-

- Bottura, C. P. *Princípios de controle e servomecanismos*. Guanabara Dois, 1982.
 - Bottura, C. P. *Análise linear de sistemas*. Guanabara Dois, 1982.
 - Castrucci, P. B. L. e Sales, R. M. *Controle digital*. Edgar Blücher, 1990.
 - Castrucci, P. B. L. e Curti, R. *Sistemas não lineares*. Edgar Blücher, 1991
 - Barczak, C. L. *Controle digital de sistemas dinâmicos projeto e análise*. Edgar Blücher, 1995.
 - Hemerly, E. M. *Controle por computador de sistemas dinâmicos*. Edgar Blücher, 1996.
 - Cruz, J. J. *Controle robusto multivariável*. Edusp, 1996.
 - Miyagi, P. E. *Controle programável*. Edgar Blücher, 1996.
 - Nascimento Jr, C. L. e Yoneyama, T. *Inteligência artificial em controle e automação*. Edgar Blücher, 2000.
 - Aguirre, L.A. *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e não Lineares Aplicadas a Sistemas. Teoria e Aplicação*. Editora da UFMG, 2000.
 - Faleiros, A. C. e Yoneyama, T. *Teoria matemática de sistemas*. Arte e Ciência, 2002.
 - Kienitz, K. H. *Análise de circuitos – um enfoque de sistemas*. Manole, 2002.
 - Coelho, A. A. R. e Coelho, L. S. *Identificação de sistemas dinâmicos lineares*. Editora da UFSC, 2004.
 - Geromel, J. C. e Palhares, A. G. B. *Análise linear de sistemas dinâmicos*. Edgar Blücher, 2004.
 - Alves, J. L. L. *Instrumentação, controle e automação de processos*. LTC, 2005.
 - Bazanella, A. S. e Silva Jr., J. M. G. -*Sistemas de controle: princípios e métodos de projeto*. Editora da UFRGS, 2005.
 - Campos, M. C. M. e Teixeira, H. C. G. - *Controles típicos de equipamentos e processos industriais*. Edgar Blücher, 2006.
-

- Aguirre, L. A. (ed.). *Enciclopédia de automática, coleção de 3 volumes*. Edgar Blücher, 2007, publicado com os apoios da SBA e FAPESP.
- Geromel, J. C. e Korogui, R. H. *Controle linear de sistemas dinâmicos*. Edgar Blücher, 2011.
- Baumaister, J. e Leitão, A. C. G. *Introdução à teoria de controle e programação dinâmica*. IMPA, 2014.
- Palis Jr., J. e Melo, W.C. *Introdução aos sistemas dinâmicos*. IMPA, 1978.
- Bonatti, I. S., Lopes, A. e Peres, P. L. D. *Linearidade em sinais e sistemas*. Edgar Blücher, 2015.
- Rios Neto, A. *Controle ótimo de sistemas dinâmicos*. Clube dos Autores, 2017.
- Garcia, C. *Controle de processos industriais - Vol. 1: Estratégias Convencionais*. Edgar Blücher, 2017 e *Controle de processos industriais - Vol. 2: Estratégias modernas*. Edgar Blücher, 2019.
- Coelho, A. A. R., Jeronymo, D. C. e Araújo, R.J. *Sistemas dinâmicos: controle clássico e preditivo discreto*. Editora da UFSC, 2019.
- Geromel, J. C. e Deaecto, G. S. *Análise linear de sinais*. Edgar Blücher, 2019.
- Aguirre, L. A. *Sistemas realimentados: uma abordagem histórica*. Edgar Blücher, 2020.

2.4 Medalhistas IEEE

Ao longo deste livro serão mencionados vários cientistas destacados que contribuíram para a “arte e ciência” de controle e que foram agraciados com a medalha *IEEE Control Systems Science and Engineering Award*, chamado após 1991 de *IEEE Control Systems Award*.

1982: H. H. Rosenbrock	1987: Walter M. Wonham	1991: R. W. Brockett
1983: No award		1992: Harold J. Kushner
1984: A. E. Bryson, Jr.	1988: Dante C. Youla	1993: Moshe M. Zakai
1985: George Zames	1989: Yu-Chi Ho	1994: Elmer G. Gilbert
1986: Charles A. Desoer	1990: Karl J. Åström	1995: P. V. Kokotovic

1996: V. A. Yakubovich	2005: Manfred Morari	2014: Tamer Başar
1997: B. D. O. Anderson	2006: P. R. Kumar	2015: Bruce Francis
1998: Jan C. Willems	2007: Lennart Ljung	2016: Arthur J. Krener
1999: A. Stephen Morse	2008: M. Vidyasagar	2017: R. M. Murray
2000: Sanjoy K. Mitter	2009: David Q. Mayne	2018: John N. Tsitsiklis
2001: Keith Glover	2010: G. C. Goodwin	2019: P. Khargonekar
2002: Pravin Varaiya	2011: E. D. Sontag	2020: Anders Lindquist
2003: N. N. Krasovski	2012: Alberto Isidori	2021: Hidenori Kimura
2004: John C. Doyle	2013: Stephen P. Boyd	2022: Dimitri Bertsekas

2.5 Exercícios

2.5.1 Exercício

Este capítulo apresentou alguns dos marcos relevantes no desenvolvimento de sistemas de controle. Comente sobre os possíveis impactos de sistemas de controle nos seguintes campos

1. Novas fontes de energia
2. Sustentabilidade
3. Mão de obra especializada
4. Comunicação digital
5. Qualidade da vida
6. Exploração espacial
7. Robótica
8. Veículos autônomos

2.5.2 Exercício

Liste 5 novas tecnologias que tem recebido atenção nos últimos anos e comente sobre o potencial impacto na sociedade do futuro, incluindo considerações sobre a Teoria de Controle Automático.
