



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Marília



**CULTURA
ACADÊMICA**
Editora

Aspectos da teoria de controle na cibernética

Ademar Ferreira

Como citar: FERREIRA, A. Aspectos da teoria de controle na cibernética. *In:* FERREIRA, A. ; GONZALEZ, M. E. Q. ; COELHO, J. G (org). **Encontro com as Ciências Cognitivas. Vol.4.** Marília: Oficina Universitária; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2004.p221-232. DOI: <http://doi.org/10.36311/2004.85-7129520-9.p221-232>.



All the contents of this work, except where otherwise noted, is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial-ShareAlike 3.0 Unported.

Todo o conteúdo deste trabalho, exceto quando houver ressalva, é publicado sob a licença Creative Commons Atribuição - Uso Não Comercial - Partilha nos Mesmos Termos 3.0 Não adaptada.

Todo el contenido de esta obra, excepto donde se indique lo contrario, está bajo licencia de la licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.

Aspectos da teoria de controle na cibernética

Ademar Ferreira¹

Introdução

A frase que melhor resume o pensamento de Norbert Wiener relativamente às ambições científicas de um grupo de cientistas nos Estados Unidos em toda uma década (1943 – 1953) talvez seja:

Assim, há pelo menos quatro anos, o grupo de cientistas à volta do Dr. Rosenblueth e de mim mesmo já estava cômico da unidade essencial do conjunto de problemas centrados na comunicação, no controle e na mecânica estatística, seja na máquina ou no tecido vivo (WIENER, 1970).

A motivação deste trabalho é a tentativa de explicitar qual teria sido o papel dos conceitos e da teoria de controle na concepção da unidade dos problemas a que se refere Wiener, não só naquela década, mas também nos desdobramentos mais recentes de sua influência.

A julgar pelo nome escolhido, *cibernética*, para designar o domínio que se pretendia comum aos três campos técnicos e científicos mencionados, deveríamos concluir pela influência marcante do controle. De fato, o termo cibernética vem do vocábulo grego para timoneiro ou piloto (WIENER, 1970), e tratava-se de um reconhecimento ao trabalho de James Clerk Maxwell com o artigo *On Governors* (1868), que marca o início da teoria de controle automático.

Entretanto, se considerarmos os rumos tomados pelo movimento, originando o Cognitivismo e a Inteligência Artificial já na década seguinte, seríamos forçados a reconhecer que a influência da teoria de controle, enquanto pertencente a Sistemas Dinâmicos, foi pequena. Mais recentemente, porém, como que entrando pela porta dos fundos do que sobrou da cibernética, ressurge um papel, agora considerável, dessas disciplinas, na ciência cognitiva e na concepção de sistemas inteligentes artificiais, conforme apontaremos.

Este trabalho explora aspectos da trajetória das disciplinas de controle e sistemas dinâmicos, na construção de idéias da primeira cibernética, e de alguns

¹ Professor Associado, Escola Politécnica da USP.

dos seus desdobramentos mais recentes, que estão alterando definitivamente nossas concepções do sistema nervoso central, da mente e do próprio fenômeno da vida. Assim, pretendemos analisar, ainda que resumidamente, algumas das possibilidades que se apresentaram aos conceitos e teoria de controle, de representar um papel mais significativo no projeto de edificar uma ciência da mente, tal como poderia ter sido idealizado pelos primeiros cibernéticos. Estaremos também colocando em perspectiva algumas idéias e temas que, num segundo momento, contribuiram para o desenvolvimento da neurociência e da inteligência artificial. O trabalho não tem por objetivo um estudo crítico aprofundado da cibernética, que pode ser encontrado em Dupuy (1996).

Um pouco da prática e teoria de controle

Realimentação é uma noção central nas construções teóricas de Wiener para a cibernética, e por isso é interessante esclarecer a sua origem e evolução. Trata-se de um conceito conhecido há muito tempo, em economia política, representando a idéia de auto-regulação (BENNETT, 1979). A palavra realimentação (feedback), entretanto, foi usada pela primeira vez somente em 1920, por engenheiros de comunicação. Na mesma época, W. B. Cannon utilizava o termo homeostase para designar mecanismos regulatórios no corpo.

Para introduzir o conceito de controle automático, que é inseparável da idéia de realimentação, vamos falar de dois inventos de James Watt, um construtor de equipamentos de Glasgow. O primeiro, em 1765, foi a introdução, na máquina a vapor, de um condensador separado, evitando o resfriamento do cilindro a cada ciclo, e a conseqüente perda de calor latente. Esta invenção permitia aumentar o rendimento de conversão da energia térmica em energia mecânica, economizando $\frac{1}{4}$ do combustível antes utilizado, tornando a nova máquina o verdadeiro motor da Revolução Industrial. Watt ainda introduziu diversos melhoramentos no equipamento, como a obtenção do movimento circular. Mas foi a adaptação do regulador centrífugo, para manter constante a velocidade do eixo de rotação, o invento cujo significado mudaria definitivamente a forma de utilização das máquinas em geral, qualquer que fosse a sua natureza. É preciso, entretanto, considerar que as duas invenções aqui enfatizadas são de naturezas muito diferentes. Na primeira, a melhoria do funcionamento é obtida por modificação da *estrutura* da máquina a vapor. Já a

segunda, aplicada de forma “externa” ao equipamento, é obtida pelo uso de *informação* do processo representado pela máquina (no caso, a conversão da energia) para tornar sua operação mais próxima de um padrão desejado, aqui, velocidade de rotação constante, independentemente da carga acoplada ao eixo. Trata-se da primeira aplicação nas máquinas do princípio de *realimentação* e, para nossos propósitos, vamos considerá-la como origem prática dos chamados sistemas de controle automático. Uma descrição simples do funcionamento do regulador encontra-se em Franklin et al. (1994).

Generalizando os preceitos acima, podemos dizer que um sistema de controle tem por objetivo manter constante uma ou mais variáveis de um processo, ou então fazê-las variar de acordo com um padrão desejado. Na descrição de tais sistemas, distinguem-se o processo a ser controlado, também chamado de ‘planta’, e o controlador, cuja função é produzir o sinal ou *ação de controle*, que, aplicada à planta, conduzirá a variável controlada ao padrão desejado. A saída do conjunto controlador-planta é realimentada para a entrada, onde é comparada com o sinal de referência ou padrão de comportamento, produzindo o sinal de erro, que por sua vez, será a entrada do controlador.

O conjunto da máquina a vapor mais o regulador (ou controlador) de Watt satisfaz a conceituação de sistema de controle, e dá conta de uma condição de *desempenho*, então considerada satisfatória. De fato, durante os próximos cem anos, o sistema da máquina a vapor controlada apresentou comportamento aceitável. No século seguinte, entretanto, o matemático e astrônomo G. B. Airy descobriu que tal sistema poderia apresentar *instabilidade* de operação, e iniciou o estudo do controle à realimentação por meio de equações diferenciais. Tais estudos tornaram-se mais sistemáticos com o trabalho de James Clerk Maxwell, outro escossês, de Edinburg, que então escrevia o seu *Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo*. Maxwell, cujo interesse no controlador nada tinha a ver com a sua utilidade prática (MAYR, 1971) apresentou um modelo de equações diferenciais do regulador de Watt, no artigo “On Governors”, publicado em 1868, e obteve uma condição de estabilidade, em função dos coeficientes da ‘equação característica’ correspondente à equação diferencial linearizada. Assim, um século após a solução prática da questão do desempenho na máquina a vapor, iniciava-se o estudo teórico da noção de *estabilidade*, completando-se o reconhecimento do par de conceitos, cuja consideração haveria de marcar permanentemente o estudo dos sistemas de controle. Por outro

lado, ficou também claro que tal disciplina deveria revestir-se de caráter matemático, além do aspecto aplicativo.

A partir dos anos 1930, o princípio da realimentação foi aplicado, por meio de grandezas elétricas, aos amplificadores de telefonia de longa distância, para compensação de perdas de transmissão. A teoria do amplificador à realimentação negativa foi descrita por H. S. Black em artigos publicados em 1934 (BENNETT, 1993), mas a inovação exigiu vários anos para ser aceita plenamente.

A facilidade de manipulação dos sinais elétricos e o desenvolvimento de transdutores, que convertem grandezas físicas diversas para elétricas, vão acelerar a aplicação dos sistemas de controle aos diversos segmentos industriais e proporcionar um grande avanço da teoria correspondente. Nesse período, os sinais elétricos e os computadores utilizados eram analógicos, isto é, baseados em grandezas de variação contínua em intensidade e no tempo. A realimentação era aplicada através de um único “laço” ou “malha” de controle, e os sistemas eram do tipo “SISO” (single-input, single-output). Diversas técnicas de análise assistiam os engenheiros em seus projetos de controladores. Esse arsenal de teoria e prática, conhecido por “controle clássico” é o “estado-da-arte” na época da primeira cibernética.

A influência de Wiener na cibernética

Trabalhando em matemática aplicada no MIT, Norbert Wiener teve ocasião de estudar diversos problemas de controle automático, relacionados ao esforço de guerra. Uma dessas questões era sobre o disparo de projéteis de modo a atingir uma aeronave em vôo. A solução (WIENER, 1970) corresponderia a prever uma trajetória a partir de dados sobre posições passadas, tarefa a ser realizada por um dispositivo eletromecânico. Wiener vai dizer-se envolvido no estudo de um sistema “destinado a usurpar uma função especificamente humana”, a de previsão do futuro. É também preocupação sua o desempenho do operador humano, a ponto de sugerir a incorporação, na máquina, de um modelo matemático das características do operador. Em casos como esses, na máquina e no homem, trata-se do desempenho de uma atividade voluntária, isto é, destinada a realizar um propósito. Wiener, e seu colaborador H. S. Bigelow, associam a realização de atividade voluntária do sistema nervoso central a

processos circulares, nos quais intervém o efeito de realimentação negativa, com base na diferença entre o realizado e o propósito, como forma de assegurar que este seja atingido. Um exemplo citado é a ação de levantar uma lapiseira. Consta-se também, por confirmação com o Dr. Rosenblueth, que uma realimentação excessiva ocasiona a condição patológica de tremor em pacientes com lesão no cerebelo. Toda essa evidência em torno do conceito de realimentação é divulgada através de um artigo assinado pelos três pesquisadores (ROSENBLUETH et al., 1943). Essa publicação, na realidade, reveste-se de um caráter programático: trata-se de uma ampla proposta de trabalho multidisciplinar sobre o tema que haviam delineado (WIENER, 1970).

Comparada às explicações da neurofisiologia corrente, a nova abordagem representa uma inovação. Antes, a resposta do sistema nervoso central (SNC) sobre os músculos era diretamente ligada ao estímulo dos sentidos, ou seja, em conformidade com as hipóteses do behaviorismo radical. Agora, a relação estímulo-resposta é considerada como ocorrendo através de um processo circular, no qual o estímulo é modificado por uma mensagem realimentada do resultado sobre o ambiente. Trata-se ainda de um ponto de vista externo, mas correspondendo a um behaviorismo atenuado. A originalidade está em que o sistema nervoso central é agora descrito em termos de um todo integrado, e não como simples comando aos músculos a partir de um sinal dos sentidos. O que Wiener faz é encapsular o comportamento voluntário do SNC como um sistema à realimentação, suficiente para descrever sua atuação para um observador externo. Considerada em termos da teoria de controle, esta caracterização corresponderia a uma análise elementar, na qual o controlador, ou seja, o SNC é visto como “caixa-preta”, com uma realimentação negativa para a entrada, fechando o laço.

Em Cibernética (WIENER, 1970), são discutidos exemplos mais complexos de controle de máquinas, e também do corpo humano (p. 144). A título de curiosidade, e para ilustrar uma percepção antecipatória de Wiener, apresentamos um caso que exemplifica a melhor maneira para se dirigir um automóvel numa estrada coberta de gelo. Para controlar o carro neste caso, deve-se “imprimir ao volante uma sucessão de pequenos e rápidos impulsos”, não suficientes para derrapar, mas adequados para “informar ao nosso sentido cinestésico se o carro está em perigo de derrapagem”. Ora, isto dir-se-ia que é uma antecipação, em 1948, da noção de *controle dual*, introduzida por Feldbaum

em 1960, segundo a qual, em situações de incerteza, o sinal de controle deve servir ao duplo papel de identificar e controlar (FELDBAUM, 1973). Wiener, entretanto, apenas salienta o aspecto da realimentação e classifica este esquema de “controle por realimentação informativa”.

Quando se trata de controlar um sistema artificial, seja uma máquina ou processo industrial, o uso de realimentação possibilita o projeto de controle sem dispor-se de um bom modelo do sistema a controlar. Por outro lado, para projetar a realimentação, é necessário um modelo da planta (ZAMES, 1996). Wiener, no caso da atividade voluntária no homem, está apenas descrevendo o controle à realimentação do sistema nervoso central. Mas o faz de um ponto de vista externo, sob influência behaviorista, ignorando qualquer mentalismo e estrutura funcional neurofisiológica. Deve-se ter em conta que o controlador aqui é o sistema nervoso central e, entender o seu funcionamento, significaria conhecer a dinâmica dos processos neuronais envolvidos.

Ora, a primeira cibernética não demonstrou ensejo de investir nessa direção, embora fossem disponíveis alguns recursos teóricos que poderiam subsidiar algumas tentativas de interpretações possíveis. Quanto ao paralelismo entre os tratamentos dados à máquina e ao vivente relativo à categoria de finalidade, ou teleologia, Dupuy (1996) o classifica como um exemplo de “isomorfismo entre domínios diferentes”, que permite à ciência avançar notavelmente no tocante à extensão.

A influência decisiva de McCulloch na cibernética

Em muitos sentidos, Warren McCulloch, um neurofisiologista, mas também grande conhecedor de filosofia, lógica, psiquiatria, entre outros domínios, foi o mais influente cientista na cibernética. Muitas de suas contribuições contaram com o apoio de Walter Pitts em lógica matemática; os dois escreveram um artigo (McCULLOCH, 1943) que juntamente com o primeiro (ROSENBLUETH et al., 1943) foram decisivos no lançamento da cibernética. Nesse trabalho, intitulado *A logical calculus of ideas immanent in nervous activity*, o sistema nervoso central é representado, em princípio, como uma máquina lógica equivalente à de Turing (DUPUY, 1996), constituída de redes de unidades elementares, os neurônios. Estes são modelizados como *portas lógicas* de tipo “tudo ou nada”, isto é, com apenas dois níveis lógicos,

“verdadeiro” ou “falso”, ou “1” ou “0”, de tal forma que “a atividade de qualquer neurônio pode ser representada como uma proposição”. Além disso, “relações fisiológicas existentes entre atividades nervosas correspondem, naturalmente, a relações entre as proposições” (McCULLOCH, 1989). Tais redes de neurônios, que podem comportar realimentações, foram depois classificadas como autômatos finitos, podendo calcular classes de funções aritméticas pertencentes à classe de funções recursivas, equivalentes à classe de funções calculáveis por máquina de Turing (DUPUY, 1996). De qualquer forma, o modelo de McCulloch e Pitts foi revolucionário, e serviu de inspiração para John von Neumann (von NEUMANN, 1961) conceber e construir a máquina que seria o computador digital de nossos dias.

Deve-se observar que as redes lógicas de McCulloch e Pitts não levam em conta a constituição neurofisiológica intrínseca dos neurônios. Jerome Lettvin, que trabalhou com ambos, assim justifica a consideração: “Em certo sentido há propriedades de tais sistemas de conexões (de neurônios) que são mais ou menos independentes da natureza intrínseca dos elementos não-lineares utilizados, sejam portas lógicas ou neurônio” (prefácio a McCULLOCH, 1988), o que está de acordo com a finalidade computacional prevista para tais redes.

De alguma forma, o modelo de McCulloch e Pitts do sistema nervoso central, relativamente ao de Wiener, apresenta maior nível de detalhamento, uma vez que o considera- constituído por unidades elementares, cada uma com o mesmo comportamento, definindo dois estados. Entretanto, haveria um paralelismo entre os dois modelos. Enquanto o objetivo de Wiener, segundo Papert, na introdução ao livro de McCulloch (1988), seria o de estabelecer os princípios gerais para mecanismos que corporificariam o conceito de *propósito*, o modelo de McCulloch, extraindo da funcionalidade neurofisiológica do sistema nervoso central seus mecanismos materiais e lógicos, realiza uma corporificação da própria mente (a partir de DUPUY, 1996).

Assim, os objetivos dos dois artigos poderiam ser vistos como complementares relativamente à mente, o de Wiener estabelecendo princípios para obter comportamentos externos, e o de McCulloch, princípios para obter comportamentos “internos à mente”.

Algumas conseqüências da Cibernética

O modelo da mente como computação lógica, resultante da primeira cibernética, teve o papel de possibilitar a materialização de uma máquina computacional de Turing, dando origem ao computador digital. Já a ciência da mente que a cibernética originou deixou muito a desejar, por caracterizar a cognição como computação sobre representações simbólicas (VARELA et al., 1991). Seu ambicioso programa de inteligência artificial resultante ainda está por realizar.

Se, do ponto de vista da máquina de calcular, o cálculo proposicional por meio da lógica booleana era o caminho certo, tal não deveria ter sido motivo para desprezar totalmente o modelo analógico dos sistemas dinâmicos. Afinal, o próprio McCulloch, nas palavras de Lettvin, “sabia muito bem que os neurônios individuais não são portas lógicas, mas antes que cada um é um processador analógico complexo de dados analógicos” (McCULLOCH, 1988). A complexidade dos neurônios era conhecida meio de resultados experimentais de neurofisiologia. A obtenção de um modelo representativo do funcionamento neuronal certamente demandaria conhecimentos de sistemas dinâmicos não lineares.

A consideração de tais sistemas, todavia, não se ajustava bem mesmo no caso de controle automático. Tais estudos tiveram origem com Poincaré, no final do século XIX, e prosseguiram no século XX com Van der Pol e outros, com estudos no plano de fase. O trabalho de Lyapunov sobre a estabilidade de sistemas dinâmicos foi publicado em 1893, na Rússia, e traduzido ao francês em 1907, e ao inglês somente em 1949, com reprodução em (LYAPUNOV, 1992), e só mais recentemente começou a ser usado em controle. Os métodos utilizados pelos engenheiros de controle privilegiavam o estudo no *domínio de frequência*, para o qual tem sido desenvolvidas várias técnicas lineares de análise e projeto. O estudo das equações não lineares no *domínio do tempo* deveria esperar os anos 1960, com a introdução dos métodos de espaço de estados.

Apesar de toda essa dificuldade, Hodgkin e Huxley, trabalhando na contra-mão da cibernética, obtiveram, em 1952, as equações dos canais iônicos em neurônios, dando origem à neurociência computacional (HODGKIN, 1952).

Ao ler-se o prefácio da segunda edição de Cibernética, muito se esclarece sobre a frase de Wiener que inicia o presente texto. Wiener aí

reconhece que o estágio da teoria de controle no advento da cibernética, por tratar basicamente de sistemas lineares invariantes no tempo, era inadequado para representar os complexos fenômenos que se verificavam, quer na biologia, quer nas máquinas. Wiener chega a comparar a extensão da teoria linear aos problemas mais complexos àquela dos últimos estágios do sistema ptolomaico da astronomia, em que a prática da correção sobre correção não conseguiu evitar seu desabamento. Para o estudo de sistemas não lineares, naturais ou artificiais, uma nova abordagem se tornava necessária, e Wiener propõe iniciar tal estudo com o seu livro *Nonlinear Problems in Random Theory* (WIENER, 1958). Mas a grande complexidade de sua teoria, de tipo entrada-saída de representação geral multivariável para sistemas não lineares, exigia quantidades astronômicas de adições e multiplicações, o que inviabilizava o seu uso prático (ZAMES, 1996). Devido a incertezas nos modelos, recomendava-se, no lugar de representar com generalidade e calcular com exatidão, a análise de aspectos mais qualitativos dos sistemas de controle, tais como robustez das soluções, estabilidade, existência de oscilações (ZAMES, 1996).

Assim, por constatação própria, e a partir das confissões de Wiener, chegamos à conclusão de que as expectativas dos primeiros cibernéticos, quanto às possibilidades da teoria de controle disponível em 1943, para construir uma ciência da mente, eram um pouco exageradas e um tanto ingênuas. Por outro lado, sendo o trabalho proposto por Wiener, Bigelow e Rosenblueth de caráter programático, não se verificou disposição posterior dos cibernéticos em pelo menos seguir uma linha paralela de pesquisas, privilegiando o estudo do neurônio como sistema analógico. Poderiam ter retirado inspiração da história da teoria de controle, construída com intenso trabalho diligente e, às vezes, de gênio, características que também não faltavam entre os cibernéticos. Mas os esforços desses pesquisadores deram origem ao computador digital, o que não é pouco, visto que este possibilitou o próprio desenvolvimento do connexionismo.

Ultimamente, a teoria de controle e sistemas dinâmicos vem representando importante contribuição nos campos da neurociência, ciência cognitiva e robótica móvel, realizando, ainda que muito depois, as expectativas de Norbert Wiener.

Referências

- BENNETT, S. *A history of control engineering 1800-1930*. Stevenage: Peter Peregrinus Ltd., 1979.
- _____. *A history of control engineering 1930-1955*. Stevenage: Peter Peregrinus Ltd., 1993.
- DUPUY, J. P. *Nas origens das ciências cognitivas*. Traduzido por R. L. Ferreira. São Paulo: Edunesp, 1996.
- FELDBAUM, A. *Principes théoriques des systèmes asservis optimaux*. Traduzido por V. Polonski. Moscou: Editions Mir, 1973.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, G. D.; EMAMI-NAEINI, A. *Feedback control of dynamic systems*. Reading – MA: Addison-Wesley, 1994.
- HODGKIN, A. L.; HUXLEY, A. F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *J. Physiol.*, v.117, p.500-544, 1952.
- LYAPUNOV, A. M. *The general problems of the stability of motion*. Traduzido por A. T. Fuller. London: Taylor & Francis, 1992.
- MAXWELL, J. C. On governors. *Proc. Roy. Soc.*, v. 16, p.249-283, 1868.
- MAYR, O. Maxwell and the origins of cybernetics. *Isis*, v. 62, part. 4, n. 214, p. 425-444, 1971.
- McCULLOCH, W.; PITTS, W. A logical calculus of the Ideas Immanent in nervous activity. *Bulletin of the Mathematical Biophysics*, v.5, 1943.
- McCULLOCH, W. *Embodiments of mind*. Cambridge – MA: The MIT Press, 1988.
- ROSENBLUETH, A.; WIENER, N.; BIGELOW, J. Behavior, Purpose and Teleology. *Philosophy of Science*, v. 10, n. 1, 1943.
- VARELA, F. J.; THOMPSON, E.; ROSCH, E. *The embodied mind: cognitive science and human experience*. Cambridge — MA: The MIT Press, 1991.
- VON NEUMANN, J. The general and logical theory of automata. In: TAUB, A. H. (Ed). *John von Neumann collected works*. Oxford: Pergamon Press, 1961.
- WIENER, N. *Cibernética*. Traduzido por G. K. Ghinzberg. São Paulo: USP; Polígono, 1970. Edição original 1948.

WIENER, N. *Nonlinear problems in random theory*. New York: The Technology Press of MIT; John Wiley & Sons, 1958.

ZAMES, G. Input-output feedback stability and robustness, 1959-85. *Control Systems*, v. 16, n. 3, 1996.