TEORIA DOS SERVOMECANISMOS

E

DO CONTROLE AUTOMÁTICO

por

L. T. C. B. S.

Projeto gráfico: Letellier Criação Ltda

EDIÇÃO DO AUTOR

1ª Edição

Este livro, conforme ao termo lavrado na cidade do Rio de Janeiro em quatro de maio de 2011 e assinado pela senhora Rejane Beatris Schneider, responsável técnica pelo EDA/FBN, foi registrado no Escritório de Direitos Autorais da Fundação BIBLIOTECA NACIONAL, sob o Número de Registro 527.019, Livro 1001, Folha 71. Na sua integralidade ou em parte, ele não pode ser reproduzido sem a permissão escrita do autor, cujos direitos estão resguardados na forma da lei.

TEORIA DOS SERVOMECANISMOS E DO CONTROLE AUTOMÁTICO

por

Luiz Tarcisio Castello Branco Sampaio

Engenheiro especializado em Ciência e Técnicas de Automação

Ex-aluno da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

Sucessivamente:

Engenheiro e Professor de Instrumentação Industrial da Petrobrás (Rio de Janeiro)

Engenheiro-Pesquisador da Empresa Thomson-Varian, no Campo da Física do Estado sólido, visando a Concepção e o Desenvolvimento de Fontes geradoras de Sinais de hiper-Freqüência destinadas a pilotar Engenhos aeroespaciais em Aplicações científicas e militares (Paris - França)

Engenheiro do IFP *(Institut Français du Pétrole*), responsável pela Concepção e o Desenvolvimento de Sistemas digitais de Automação de Processos industriais (Rueil-Malmaison - França)

Presidente das Empresas Comsip Engenharia e Comsip Eletrônica (São Paulo)

Volume I

APRESENTAÇÃO

Este livro é o primeiro volume de um curso sobre a Teoria dos Servomecanismos e do Controle automático, dando ênfase à Automação industrial.

Ele destina-se à iniciação de estudantes de escolas de engenharia e de escolas técnicas, que incluem em seus programas o ensino de ciências modernas, surgidas no decorrer das últimas décadas, e que prosseguem em constante evolução. No entanto, temos como preocupação tornar acessível àqueles estudantes, através de exemplos, às vezes simples, e quando complexos, minuciosamente analisados, uma teoria abordada, com freqüência, de forma puramente abstrata, desvinculada de sua finalidade operacional, podendo criar no leitor, desinteresse e mesmo rejeição. Ora, os campos de aplicação desta ciência são múltiplos e variados, indo das casas e edifícios às ruas e avenidas das cidades; dos veículos, que nelas circulam, às estações e aeroportos; das indústrias aeronáuticas e navais à navegação aérea e marítima; das plataformas de petróleo *off shore* às refinarias e complexos petroquímicos; das fábricas de cimento, vidro, celulose, às usinas siderúrgicas e à metalurgia de metais não ferrosos; das centrais termoelétricas e hidroelétricas ao ciclo de processamento de urânio, passando por sua mineração, concentração e enriquecimento; do lançamento de foguetes à colocação em órbita geoestacionária, de satélites de telecomunicações; etc.

Realçam o texto deste livro, com o objetivo de mostrar a utilidade prática da teoria exposta, exemplos decorrentes de projetos de grande porte e complexidade, concebidos por empresas brasileiras de engenharia e destinados a indústrias e redes de infra-estrutura de nosso país. Esses projetos, por sua criatividade, equiparam-se a similares implantados na mesma época em países do Primeiro Mundo.

Seria desejável que os estudantes motivados pela aprendizagem desta matéria possuíssem conhecimentos, ainda que superficiais, de Análise matemática, em particular de Equações diferenciais, assim como de Mecânica newtoniana, Mecânica dos fluidos, Termodinâmica, Eletricidade, Eletromagnetismo e, se possível, Física do Estado sólido. Um capítulo deste livro é dedicado ao estudo da Transformação de Laplace, instrumento matemático, indispensável à construção da Teoria em foco. A familiarização com o alfabeto grego é recomendável, em virtude do uso generalizado de seus caracteres em textos científicos. Com esse propósito ele está inserido no anexo III deste volume.

A idéia de escrever este livro nasceu de reuniões realizadas no centro do SENAI, da cidade de Americana, estado de São Paulo, com a participação de seu Diretor Marcelo Virgílio e de seu Coordenador técnico Vinicius de Martin.

A eles, a minha esposa e inspiradora Martine e a minha filha Laetitia, diretora de arte, e autora das ilustrações gráficas do texto, dedico estes escritos.

São Paulo, maio de 2010

O autor

Í N D I C E

Pag.

APRESENTAÇÃO..... 3

CAPÍTULO I

IDEIAS, CONCEITOS E DEFINIÇÕES 11

Introito 11

O Comando simples 12

O Controle simples ou Controle em Malha aberta 16

O Controle em Malha fechada não automático 17

O Controle automático 20

Conceito de Servomecanismo 23

CAPÍTULO II

CARACTERÍSTICAS DE UM PROCESSO INDUSTRIAL 28

Considerações iniciais 28

Variáveis de um Processo 29

Características dos Sistemas físicos 31

CAPÍTULO III

ALGUNS TIPOS DE ENTRADAS EM SISTEMAS 42

Entrada em Forma de Degrau 43

Entrada em Forma de Rampa 44

Entrada em Forma de Impulso 45

Outros Tipos de Entradas 47

CAPÍTULO IV

A TRANSFORMAÇÃO DE LAPLACE 47

A sua Importância 48

Definições 48

Teorema do Fator de Escala 54

Teorema do Retardo 54

Teorema do Amortecimento ou do Deslocamento frequencial 54

Condições de Heaviside 54

Teorema da Derivada primeira 54

Teorema da Derivada segunda 54

Teorema da Integração 55

Transformação inversa de Laplace 55

Teorema do Produto de Convolução 55

Observação fundamental 55

Teorema do Valor inicial 56

Teorema do Valor final 57

CAPÍTULO V

ESTUDO DOS SISTEMAS LINEARES DE PRIMEIRA ORDEM

NO DOMÍNIO DO TEMPO 58

Primeiro Exemplo: Circuito elétrico resistivo e capacitivo 58

Segundo Exemplo: Circuito elétrico resistivo e indutivo 61

Terceiro Exemplo: Reservatório alimentado por líquido

que dele também se escoa 63

Conceito de Constante de Tempo 65

A Forma canônica da Equação diferencial de um

Sistema de primeira Ordem 67

O Ganho estático e a Constante de Tempo nas

Curvas de Resposta às Excitações 68

CAPÍTULO VI

ESTUDO DOS SISTEMAS LINEARES DE SEGUNDA ORDEM

NO DOMÍNIO DO TEMPO 74

Sistema Massa-Mola-Amortecedor 74

Formas canônicas da Equação diferencial de um Sistema de segunda Ordem .. 76

CAPÍTULO VII

O CONCEITO DE FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA 79

1º. Caso: Sistema de primeira Ordem 80

2º. Caso: Sistema de segunda Ordem 80

Transmitância de alguns Elementos físicos 81

CAPÍTULO VIII

DIAGRAMAS FUNCIONAIS 84

Generalidades 84

Estrutura de uma Malha aberta; Transmitâncias em Série 86

Estrutura de uma Malha aberta; Transmitâncias em Paralelo 86

Estrutura em Malha fechada 86

Sistema com Malhas concêntricas 86

Observação 88

Modelização do Motor de Corrente contínua de Fluxo constante 89

CAPÍTULO IX

A COMPREENSÃO DO MUNDO MODERNO 92

A Omnipresença da Cibernética 92

A Limitação do Campo de Estudo 93

CAPÍTULO X

O SISTEMA DIGITAL DE CONTROLE DISTRIBUÍDO 96

Aquisição e Controle 98

Interface com o Operador 99

Gestão e Otimização 99

Ligação com outros Equipamentos 100

Automação integrada 100

CAPÍTULO XI

OS SISTEMAS DE SUPERVISÃO E CONTROLE 103

Comentários 103

O Projeto básico do Sistema Supervisor do Polo Petroquímico do Nordeste ... 103

Introdução 106

A. O Polo petroquímico e a sua Configuração cibernética 106

A.1. A Configuração global 106

A.2. Os Princípios de Funcionamento da Teletransmissão das Interfaces 108

A.3. Configuração do Centro de Comando e Processamento 112

B. As Macrofunções do Sistema cibernético 110

B.1. A Escrutação 110

B.2. A Filtragem de Dados Brutos 111

B.3. Cálculos imediatos 111

B.4. Os Alarmes 116

B.5. Os Cálculos necessários aos Balanços e Faturamentos 116

B.6. A Rejeição de Cargas 117

B.7. Os Relatórios 124

B.8. Os Diálogos e Visualizações 125

Anexo à Matéria Rejeição de Cargas 127

Anexo à Matéria Relatórios 137

O SSCH 139

Considerações iniciais 140

O Parque gerador da CESP 140

Estratégia do SSCH 140

Configuração do Centro de Operação do Sistema – COS 140

Principais Funções operacionais 140

Os Meios físicos de Comunicação 141

CAPÍTULO XII

A DISTRIBUIÇÃO DA MATÉRIA DESSE LIVRO 145

APÊNDICE I: Glossário..... 146

APÊNDICE II: Unidades do Sistema Internacional..... 150

APÊNDICE III: o Alfabeto grego..... 151

CAPÍTULO I

IDÉIAS, CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Introito

A segunda Revolução industrial, que ainda estamos vivendo, utiliza como matéria prima o elemento abstrato da *Informação*, enquanto a Primeira utilizava, sobretudo, o carvão e o ferro. Ela deu origem às ciências da *Cibernética*, da *Informática*, das *Telecomunicações*, dos *Servomecanismos*, do *Controle Automático*, etc.

Em 1948, o cientista Norbert Wiener publicou sua obra famosa *Cybernetics or the Communication in the Animal and the Machine* (Cibernética ou a Comunicação no Animal e na Máquina), em que definia a Cibernética como a ciência que estuda o controle e a comunicação tanto nos seres-vivos como nos engenhos mecânicos e eletromecânicos, surgidos ao longo dos séculos XIX e XX. Cibernética, como palavra, é um neologismo, que provém do vocábulo grego *kybernetes*, o qual deu origem, em latim, a *gubernator* e, em português, a *governador*, no sentido de *comandante*, *piloto*, *timoneiro*. Pode-se dizer, por exemplo, que o comandante governa o seu barco, no sentido de dirigir a sua navegação.

Tendo refletido sobre a função do piloto ou *peça mestra*, que controlava *automaticamente* a velocidade da *máquina a vapor* de Watt, Norbert Wiener desenvolveu uma análise comparativa entre os *automatismos* existentes no sistema nervoso e no cérebro, e os equivalentes, próprios aos sistemas eletromecânicos. Norbert Wiener alçou a Informação ao mesmo nível de importância que a energia e a matéria, assinalando que ela deveria ser examinada por seu caráter quantitativo, apesar de abstrato, e não apenas qualitativo, e que o fio de cobre poderia ser estudado tanto pela energia que é capaz de conduzir quanto pela quantidade de informação que pode transportar. Norbert Wiener foi, assim, o criador do ambiente intelectual que tornou possível o desenvolvimento do computador, máquina que se apossou de certas propriedades inerentes ao cérebro humano, como também dos *autômatos* e *robôs*. Entretanto não pode ser colocada em segundo plano a contribuição de cientistas que vieram antes e que construíram, pouco a pouco, o caminho que levaria até Norbert Wiener. Citaremos, assim, além de Watt, Maxwell, Nyquist, Black. O edifício da ciência é levantado, pedra sobre pedra, por pensadores, filósofos e cientistas, que se sucedem, legando às novas gerações o acervo de suas descobertas e invenções. Em 1687, Isaac Newton, um dos maiores sábios de toda a história da humanidade, publicou a obra, escrita em latim, que iria revolucionar a ciência: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (Princípios Matemáticos da Filosofia Natural). Interrogado por seus discípulos sobre o que fizera para enxergar tão longe, Isaac Newton, referindo-se a dois outros grandes pensadores, Kepler e Galileu, que o precederam, respondeu dizendo simplesmente que tinha subido nos ombros de dois gigantes.

As ciências dos Servomecanismos e do Controle Automático podem ser consideradas como grandes capítulos da Cibernética, porque seus conceitos, métodos e finalidades são muito próximos. O significado da palavra servomecanismo provém da entidade física, mecânica ou eletromecânica, que reúne partes que controlam e outras que são controladas numa *cadeia* ou *malha de controle*. É como se uma parte submetesse a outra como a um servo. As palavras automatismo, *automação*, *automatização*, *autômato*, assim como robô, *robótica*, *sistema*, cadeia, malha, *realimentação* ou *retroação* (em inglês, *feedback*), *comando*, *controle* e muitas outras, fazem parte do vocabulário especializado da Cibernética, mas são hoje do domínio público e empregadas com freqüência quotidiana.

Neste curso vamos estudar a teoria que serve de base a estas duas últimas citadas ciências, com ênfase sobre o Controle Automático industrial. A sua metodologia consiste em estudar meticulosamente, caso a caso, as idéias, os princípios e os fenômenos físicos que regem os sistemas de comando e de controle, compreender e descrever seu funcionamento de forma progressiva e concatenada, identificar cada elo da cadeia e sua respectiva função, antes de revesti-los de formulações matemáticas. A reflexão e a intuição devem preceder as equações, as quais têm, no entanto, a virtude de descrever quantitativamente, por letras, símbolos, números e curvas, que as constituem ou que delas provêm, o comportamento dos sistemas, tanto em seu *regime transitório* quanto no *estacionário* ou *permanente*. A matemática é a linguagem própria das ciências físicas e daquelas que lhe são próximas. O seu uso freqüente conduz, pouco a pouco, à familiarização com ela, tornando-a um instrumento fácil no entender, agradável no ouvir, elegante no manusear.

O Comando simples

O conceito de *comando* empregado nesta teoria refere-se à dependência que pode existir entre uma ou mais *grandezas* ou *variáveis* físicas e outra ou outras, de mesma ou diferente natureza. Consideremos, como primeiro exemplo, a figura I.1, que representa a vazão q de um líquido, que pode variar aleatoriamente com o tempo, alimentando um reservatório. A altura h do líquido, que se acumula no reservatório, depende da vazão q. Diremos então que a vazão q comanda a altura h do líquido no reservatório. E como a vazão q é uma função do tempo, o nível h também o é. A vazão q é, então, chamada de *grandeza* ou *variável* de comando, e a altura h, *grandeza* ou *variável comandada*.

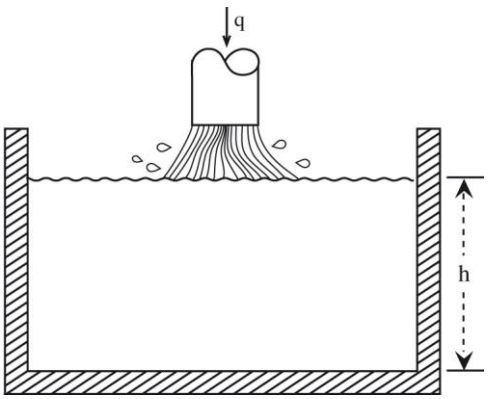


Fig. I.1

Podemos então escrever as relações acima em linguagem matemática:

$$q = f_1(t)$$
$$h = f_2(q,t)$$

Consideremos como segundo exemplo, esquematizado na figura I.2, duas canalizações pelas quais passam, respectivamente, as vazões q_1 e q_2 de um líquido variando de forma aleatória em função do tempo e juntando-se para formar uma terceira canalização, pela qual passa a vazão q_3.

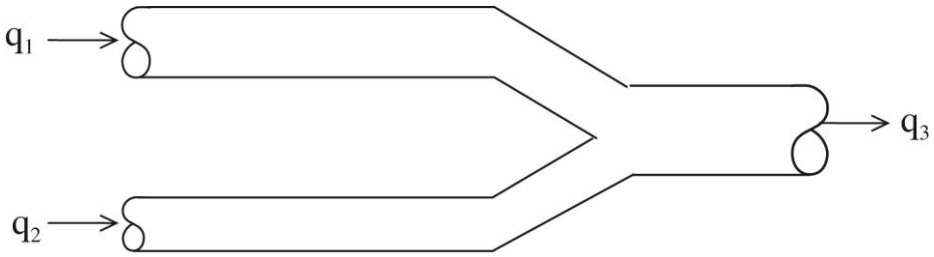


Fig. I.2

Dizemos então que às vazões q_1 e q_2 comandam a vazão q_3 e podemos escrever matematicamente:

$$q_1 = f_1(t)$$
$$q_2 = f_2(t)$$
$$q_3 = f_3(q_1, q_2, t)$$
$$q_3 = q_1 + q_2$$

Consideremos um terceiro exemplo, conforme figura I.3, que representa uma canalização pela qual passa uma vazão q_1, variando aleatoriamente com o tempo, e alimentando um reservatório, onde o líquido atinge uma altura h. Outra canalização, saindo do fundo do reservatório, deixa passar através de uma restrição, uma vazão q_2, do líquido. A altura h depende da diferença entre as vazões q_1 e q_2. A vazão q_2 depende de h e, indiretamente, da vazão q_1.

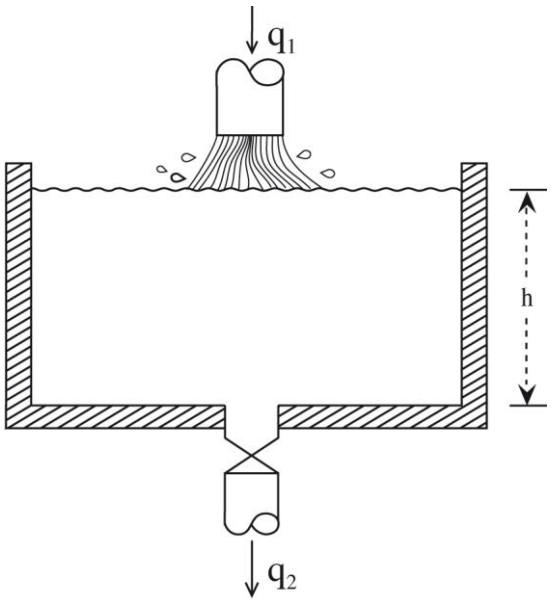


Fig. I.3

Podemos então escrever as relações matemáticas:

$$q_1 = f_1(t);$$
$$q_2 = f_2(h,t);$$
$$h = f_3[(q_1 - q_2),t];$$
$$q_2 = f_2\{f_3[(q_1 - q_2),t],t\}.$$

A relação de dependência entre duas variáveis será esquematizada por um retângulo, chamado *bloco*, que representa um sistema físico, e ao qual chega uma flecha, que simboliza a variável de comando, também chamada de *entrada* ou de *excitação*, e do qual sai outra flecha, simbolizando a variável comandada, também chamada de *saída* ou *resposta*. Assim, no caso do primeiro exemplo visto acima, teremos o esquema representado na figura I.4.

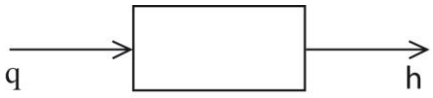


Fig. I.4

Quando duas variáveis, de mesma natureza, comandam uma terceira variável, de mesma ou diferente natureza, por adição ou por diferença, a soma algébrica das duas primeiras é representada por um círculo que encerra dois segmentos que se cruzam entre si. A este círculo chegam duas flechas que representam as variáveis de comando q_1 e q_2, acompanhadas pelos sinais de + ou de - , conforme se trate de uma adição ou de uma diferença, e dele sai uma terceira flecha, que representa a soma algébrica das duas, sendo pois de mesma natureza. Esta terceira flecha representa uma variável q_3 que poderia ser considerada como a grandeza comandada; no entanto estes esquemas apenas movimentam informações, não tendo por isso o mesmo caráter dos desenhos nos quais se enxergam equipamentos e grandezas físicas. Na verdade esta terceira flecha vai tocar a entrada de um bloco do qual sairá outra flecha que representará a variável comandada. É preciso estar atento a esta sutileza, ao passar de desenhos de processos reais a esquemas funcionais que apenas conduzem o fluxo das informações. No caso, pois, do segundo exemplo, teremos o esquema funcional representado na figura I.5.

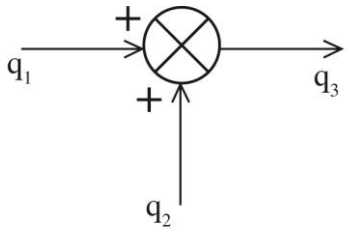


Fig. I.5

Examinemos agora o caso do terceiro exemplo. Como a altura h do reservatório varia em função da diferença entre as vazões q_1 e q_2, teremos a representação na figura I.6.

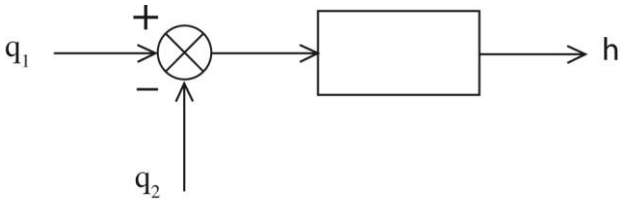


Fig. I.6

Mas h comanda a variável q_2, fato que se traduz pelo esquema constante da figura I.7.

