

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Elétrica
ENG04037 Sistemas de Controle Digitais

Introdução ao Controle Digital

Prof. Walter Fetter Lages

15 de março de 2009

1 Sistema de Controle

1. malha aberta
2. malha fechada
 - (a) rejeição a perturbações
 - (b) robustez
 - (c) estabilidade
 - (d) tipicamente se está interessado também na resposta dinâmica do sistema, mas isto pode ser obtido apenas com compensadores, sem realimentação.

sistema contínuo: sinais contínuos no tempo

sistema discreto: sinais discretos no tempo

sistema amostrado: alguns sinais contínuos e outros discretos no tempo

sistema digital: sinais discretos no tempo e quantizados (discretos nos valores)

Em controle digital usualmente se trata com sistemas amostrados, pois na grande maioria das vezes se deseja controlar uma planta contínua através de um computador digital.

Os motivos para utilizar controle digital incluem:

1. flexibilidade

2. facilidade de implementação de leis de controle complexas
3. facilidade de ter interface com o usuário sofisticadas, inclusive através da *Web*
4. microprocessador já disponível no sistema

2 Topologia Típica

Em geral, a topologia de um sistema de controle digital é a mostrada na Fig. 1.

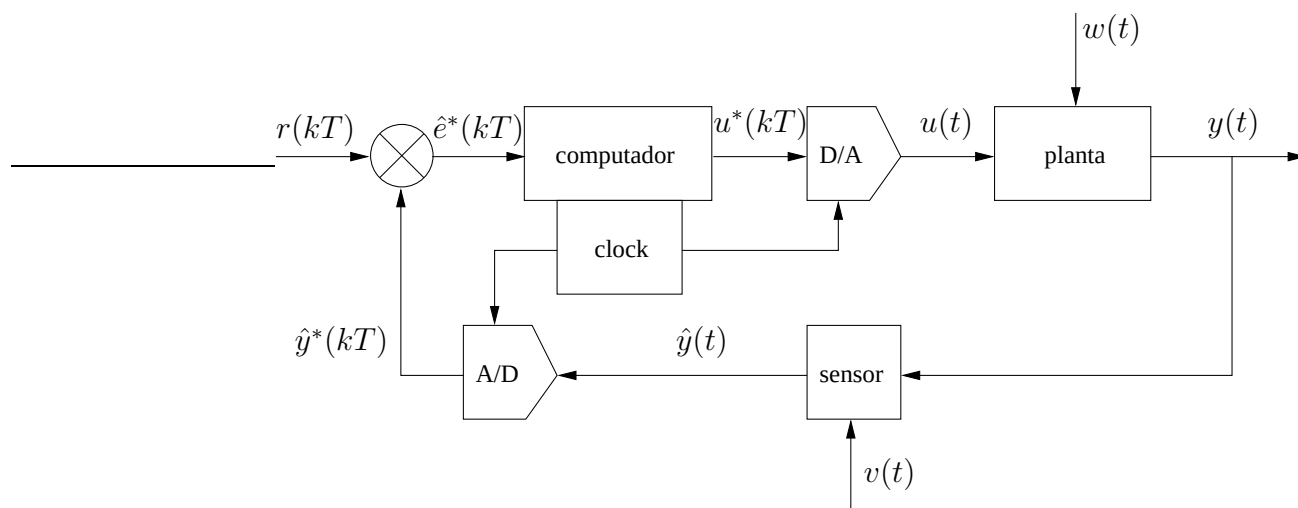


Figura 1: Topologia de um sistema de controle digital.

$r(kT)$: referência

$u(t)$: sinal de controle (contínuo)

$u^*(kT)$: sinal de controle (discreto)

$y(t)$: saída da planta (contínuo)

$\hat{y}(t)$: saída da planta medida (contínuo)

$\nu(t)$: ruído de medida (contínuo)

$\omega(t)$: ruído de processo (contínuo)

$\hat{y}^*(kT)$: saída medida (discreto)

$e^*(kT)$: erro

$\hat{e}^*(kT)$: erro medido

Quanto tem-se $r(kT) \equiv 0$, diz-se que é um problema de regulação. Caso contrário, tem-se o problema de controle, cujo objetivo é rastrear $r(kT)$.

O fato do sinal de controle ser gerado digitalmente confere ao sistema diversas características que não existem em sistemas analógicos. O conversor A/D¹ converte grandezas analógicas, normalmente tensão, em uma sequência de números. A taxa com que estes números são gerados é denominada período de amostragem (T).

Tipicamente, assume-se que T é fixo, usualmente gerado por um sinal de *clock* que dispara o A/D e gera interrupções para que a rotina que calcula o sinal de controle seja executada.

É possível trabalhar no modo *free-running*, se o *software* for conhecido em detalhes e puder determinar um período de amostragem fixo, mas normalmente é mais conveniente trabalhar-se com uma temporização por interrupção.

A opção de trabalhar com um período de amostragem variável muito raramente é utilizada, pois complica bastante a análise matemática do sistema.

Por outro lado, o conversor A/D gera dados quantizados e portanto com precisão finita, como mostra a Fig. 2. Adicionalmente, a quantização é uma operação não linear.

O problema de controle digital consiste em considerar os efeitos da amostragem e da quantização. Se o período de amostragem e a quantização forem extremamente pequenos (pelo menos $50 \times$ largura de banda e 16 bits[1]), os sinais digitais serão quase contínuos e métodos de análise e projeto desenvolvidos para sistemas contínuos poderão ser utilizados. O projeto do controlador contínuo pode então ser convertido para um equivalente digital através de aproximações. Este enfoque é denominado *projeto por emulação* ou *digitalização do controlador*.

Se o período de amostragem e/ou a quantização não poderem ser suficientemente pequenos (por fatores como custo, ou *hardware* já existente), os seus efeitos deverão ser levados em conta através de um projeto de controlador digital. Este enfoque é denominado *projeto digital do controlador*.

Com o *hardware* atual é fácil ter-se intervalos de quantização pequenos, especialmente utilizando-se ponto flutuante. O padrão IEEE-754 define o formato de ponto flutuante em precisão simples com 32 bits, onde 24 bits são utilizados para a mantissa, o que permite um erro de quantização menor do que $6 \times 10^{-6}\%$. No formato de precisão dupla são 64 bits, com 54 bits de mantissa, o que significa

¹supondo que este inclui o amostrador, o conversor propriamente dito, o quantizador e o codificador.

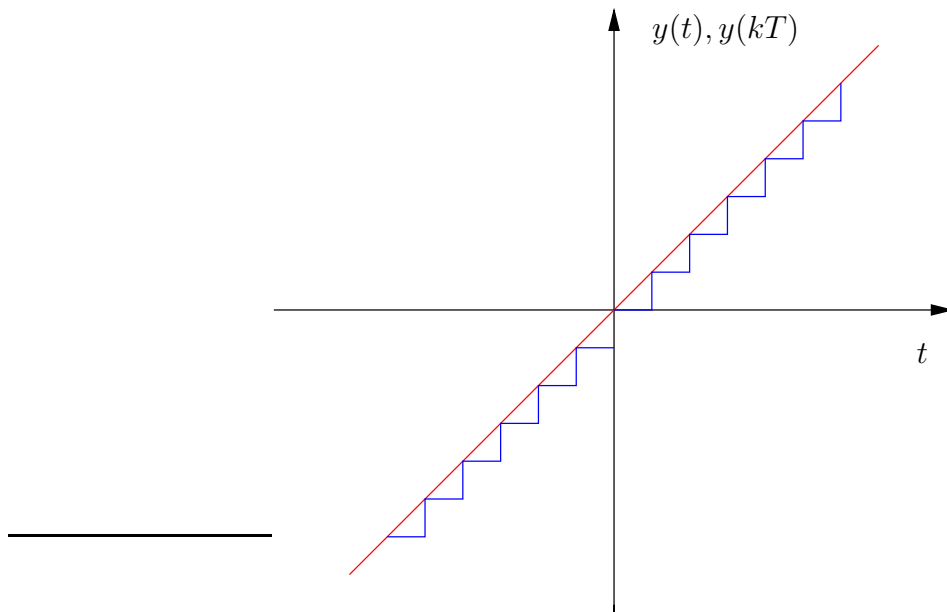


Figura 2: Sinal contínuo (vermelho) e quantizado (azul).

um erro de quantização menor do que $6 \times 10^{-15}\%$. É importante notar que alguns processadores (tipicamente DSPs) podem utilizar aritmética em ponto-fixado, e neste caso, com o mesmo número de bits erro de quantização seria maior. Por outro lado, mesmo processadores que não possuem *hardware* para ponto flutuante, podem suportar operações em ponto flutuante através de bibliotecas de emulação, ao custo de um maior tempo de processamento. Assim, normalmente a limitação no intervalo e quantização ocorre em função dos conversores A/D e D/A utilizado e não devido ao computador propriamente dito.

O fenômeno mais importante individualmente em um sistema de controle digital é o atraso associado ao conversor D/A. Isto ocorre devido à saída do D/A ser mantida constante até que haja um novo valor. Isto causa no sinal um atraso de $T/2$, como mostra a Fig. 3. Este atraso significa uma variação de fase com implicações na estabilidade do sistema. Devido a este fenômeno, usualmente a frequência de amostragem de um sistema de controle digital deve ser bem maior do que a frequência de Nyquist para a largura de banda que se deseja.

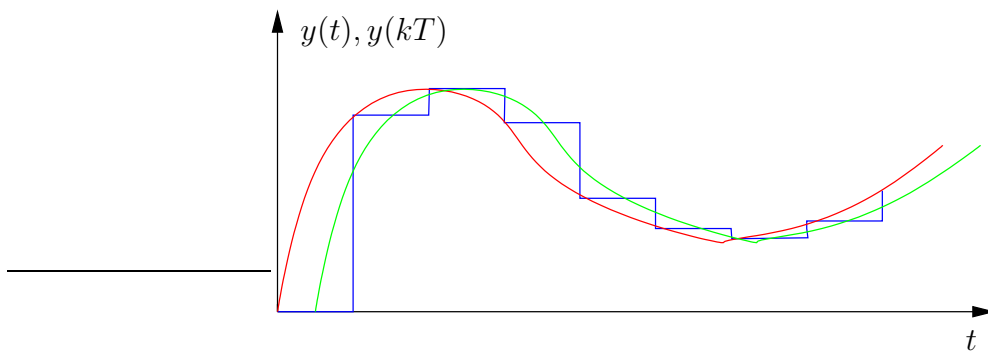


Figura 3: Atraso causado pelo conversor D/A: sinal original (vermelho), sinal amostrado (azul) e sinal recuperado (verde).

Referências

- [1] G. F. Franklin, J. D. Powell, and M. L. Workman. *Digital Control of Dynamic Systems*. Addison-Wesley Series in Electrical and Computer Engineering: Control Engineering. Addison-Wesley, second edition, 1989.