ELT330 – Sistemas de Controle I
Prof. Tarcísio Pizziolo

Aula 5 – Diagramas de Blocos

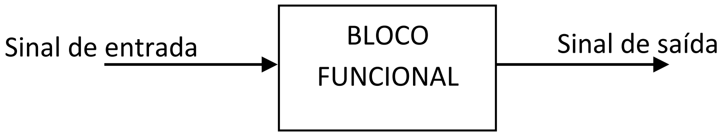
1. Diagrama de Blocos

Um diagrama de blocos de um sistema é uma representação gráfica das funções desempenhadas por cada um dos componentes e do fluxo de sinais entre eles.

Em um diagrama de blocos, todas as variáveis do sistema são ligadas umas às outras através de Blocos Funcionais.

1.1 Bloco Funcional

É um símbolo da operação matemática sobre o sinal de entrada do bloco que produz o sinal de saída.



As funções de transferência dos componentes são usualmente introduzidas nos blocos funcionais correspondentes, que são conectados por setas para indicar o sentido do fluxo dos sinais.

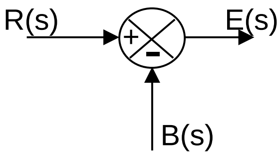
O segmento orientado (seta) que aponta para o bloco indica o sinal de entrada, e o segmento orientado que sai do bloco representa o sinal de saída. Tais setas são citadas como sinais.

Um diagrama de blocos contém informação relativa ao comportamento dinâmico, mas não inclui nenhuma informação sobre a construção física do sistema.

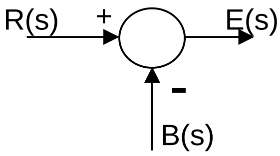
Sistemas totalmente diferentes e sem nenhuma relação entre si podem ser representados por um mesmo diagrama de blocos.

1.2 Bloco Somador

É um símbolo dado por um círculo com um “x” que indica uma operação de soma algébrica. O sinal de mais (+) ou de menos (-) relativo a cada segmento orientado indica se este sinal deve ser adicionado ou subtraído. Estes sinais de mais (+) ou de menos (-) também podem ser colocados fora do círculo contendo ou não o “x”.



ou

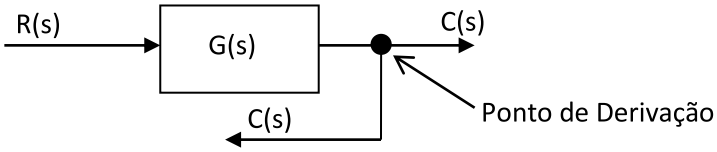


$$E(s) = R(s) - B(s)$$

É importante que as grandezas a serem somadas ou subtraídas tenham as mesmas grandezas dimensionais e as mesmas unidades.

1.3 Ponto de Derivação

É um símbolo representado por um ponto de derivação a partir do qual o sinal proveniente de um bloco vai simultaneamente para outros blocos ou pontos de soma.

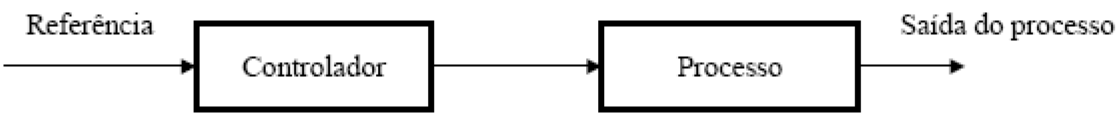


2. Diagrama de Blocos de um Sistema a Malha Aberta

Consiste em um sistema que não possui realimentação. Mais detalhadamente, o controle em malha aberta consiste em aplicar um sinal de controle na entrada de um sistema, esperando-se que na saída a variável controlada consiga atingir um determinado valor ou apresente um determinado comportamento desejado.

Nesse tipo de sistema de controle não observamos a variação do sinal de saída para determinarmos o sinal de controle. A entrada não depende da saída, na verdade espera-se que na saída tenhamos o sinal desejado sem que possamos tirar informações deste para modificarmos a entrada. O problema de um sistema de controle desse tipo é que só teremos a saída desejada se não ocorrerem perturbações tanto de ordem externa como internas (modificação dos parâmetros), pois o controlador atuará como se não tivesse ocorrido qualquer perturbação e a resposta não terá valor para as novas características do sistema.

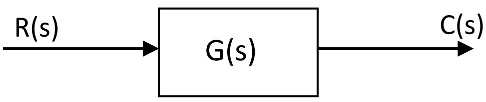
A seguir apresentamos um esquema de um controle em malha aberta.



Como um exemplo considere o controle de um forno onde um operador, com uma determinada experiência, estima o tempo que o forno deve ficar ligado a plena potência para que a temperatura chegue a um determinado valor. Obviamente, apenas com muita sorte, a temperatura do forno ao final do tempo pré-determinado será exatamente a desejada. De uma maneira geral, a temperatura ficará um pouco acima ou um pouco abaixo do valor desejado. Além disto, a temperatura final do forno provavelmente irá variar dependendo de variações da temperatura ambiente, ou seja, a temperatura interna final do forno será diferente se a temperatura externa for de 5 ºC (inverno) ou 30 ºC (verão).

Este exemplo ilustra a característica básica de um sistema de controle que opera em malha aberta: imprecisão, nenhuma adaptação a variações externas (perturbações), dependência do julgamento e da estimativa humana. Por outro lado, este tipo de sistema é em geral simples e barato, pois não envolve equipamentos sofisticados para a medição e/ou determinação do sinal de controle.

A seguir apresentamos um diagrama de blocos de um controle em malha aberta.

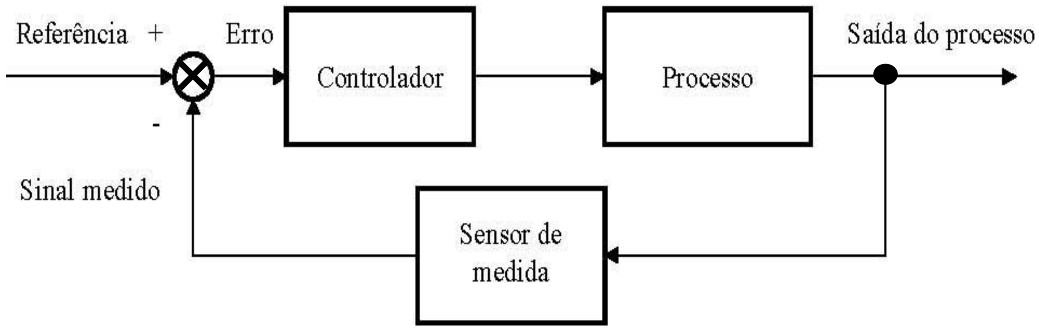


3. Diagrama de Blocos de um Sistema a Malha Fechada

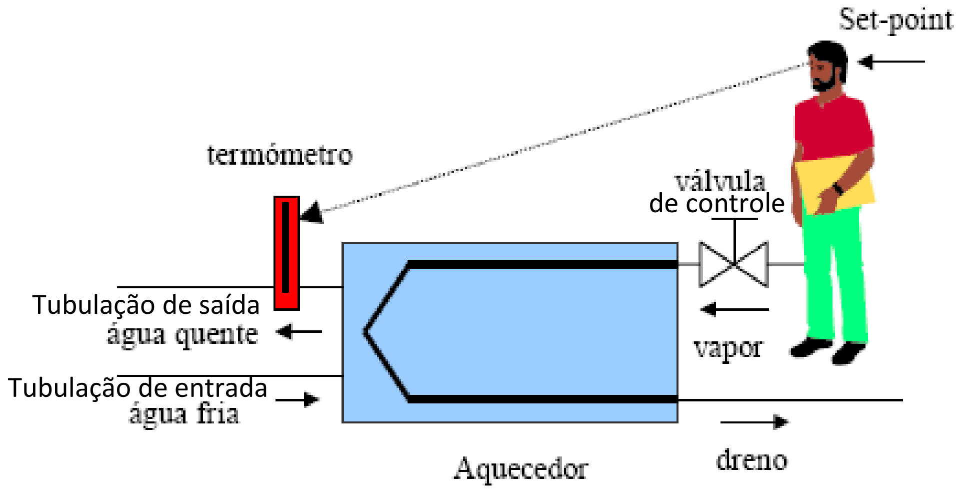
No sistema em malha fechada o sinal de saída possui um efeito direto na ação de controle, pelo que poderemos designá-los por sistemas de controle com realimentação ou retroação *(feedback)*.

Neste tipo de sistema, o sinal de erro que corresponde à diferença entre os valores de referência e de realimentação (que pode ser o sinal de saída ou uma função do sinal de saída), é introduzido no controlador de modo a reduzir o erro e a manter a saída do sistema em um determinado valor, pretendido pelo operador.

A seguir apresentamos um esquema de um controle em malha fechada.

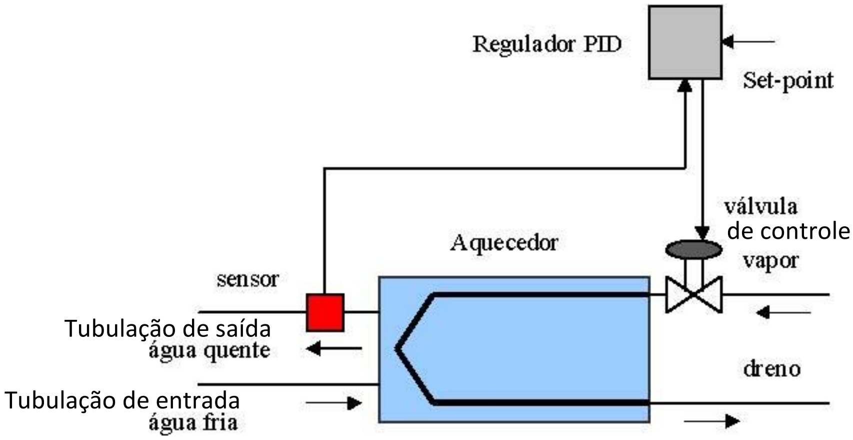


Para exemplificar um sistema de controle em malha fechada, vamos considerar o sistema térmico dado abaixo.



O operador pretende manter constante a temperatura da água na saída de um aquecedor. Na tubulação de saída, está montado um termômetro (elemento de medida) que mede a temperatura real da água quente (variável de saída do sistema). Deste modo, em função das indicações fornecidas pelo termômetro, o operador irá manipular a válvula de controle de vazão de vapor de aquecimento, de modo a manter a temperatura da água o mais próxima possível do valor desejado.

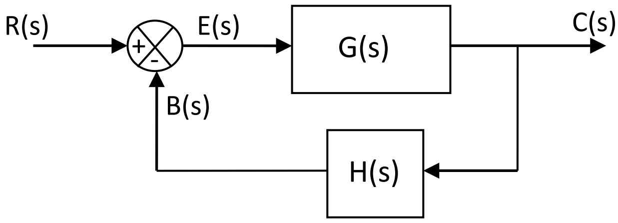
Se ao invés do operador, for utilizado um controlador, conforme apresentado abaixo, o sistema de controle passa a designar-se por automático.



Neste caso, o operador seleciona a temperatura de referência (*set-point*) no controlador. A saída do processo (temperatura real da água quente na saída do aquecedor), é medida pelo sensor de temperatura, e comparada no controlador com a temperatura de referência de modo a gerar um sinal de erro. Tomando como base este sinal de erro, o controlador gera um sinal de comando para a válvula de controle de vazão de vapor (atuador).

Este sinal de comando permite variar gradualmente a abertura da válvula, e, por conseguinte a vazão de vapor no aquecedor. Deste modo, é possível controlar automaticamente a temperatura da água na saída do aquecedor, sem que seja necessária a intervenção do operador.

A seguir apresentamos um diagrama de blocos de um controle em malha fechada.



4. Comparação entre os Sistemas em Malha Aberta e em Malha fechada

A vantagem dos sistemas de controle em malha fechada em relação aos de malha aberta consiste no fato da realimentação tornar a resposta do sistema relativamente insensível a perturbações externas e a variações internas dos parâmetros do sistema.

Deste modo, é possível utilizar componentes mais baratos e de menor precisão, para obter o controle preciso de um dado processo. Esta característica é impossível de obter com um sistema em malha aberta.

Do ponto de vista da estabilidade, os sistemas de controle em malha aberta são mais robustos, uma vez que a estabilidade não constitui um problema significativo. Nos sistemas de controle em malha fechada, a estabilidade constitui um problema de primordial importância, visto que o sistema pode tender a sobrepor erros, produzindo oscilações de amplitude constante ou variável.

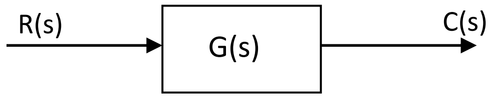
Assim, podemos concluir que os sistemas em que são conhecidas as variáveis de entrada antecipadamente no tempo, e nos quais não haja perturbações muito significativas, é aconselhável a utilização do controle em malha aberta. Para sistemas que estejam sujeitos a perturbações imprevisíveis e/ou variações não previstas nos componentes do sistema, deve-se utilizar o controle em malha fechada.

Sempre que possível, é aconselhável utilizar uma combinação apropriada de controle em malha aberta e fechada, visto ser normalmente a solução mais econômica, e que fornece um desempenho global do sistema mais satisfatório.

5. Funções de Transferência em Malha Aberta e em Malha Fechada

5.1 Malha Aberta

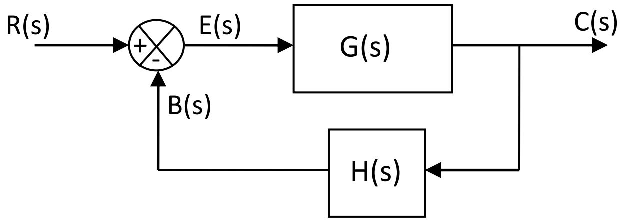
Para os sistemas em malha aberta, a função de transferência será dada pela relação da saída pela entrada do mesmo conforme o diagrama de blocos a seguir.



$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$$

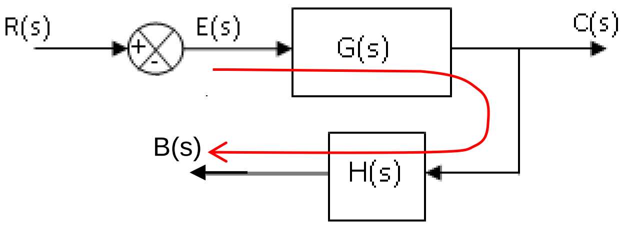
5.2 Malha Fechada

Nos sistemas de malha fechada quando o sinal de saída retroage ao ponto de soma para comparação com a entrada, é necessário converter sua natureza física na mesma natureza do sinal de entrada. O diagrama de blocos a seguir ilustra este tipo de sistema.

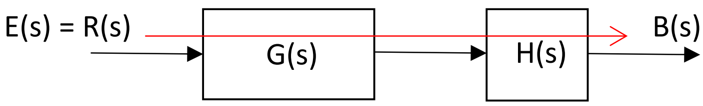


A conversão da natureza física do sinal de saída na mesma natureza do sinal de entrada, antes que estes sejam comparados, é realizada pelo elemento de retroação cuja função de transferência é denominada H(s).

Quando o sinal de retroação B(s) em um sistema em malha fechada é apenas medido (feita sua leitura) sem efetuar a comparação com o valor de entrada R(s), ou seja, a malha é desconectada em B(s), a relação entre o sinal de retroação B(s) e o sinal de erro E(s) é denominada **função de transferência de malha aberta** neste sistema de malha fechada. Deve-se notar que neste caso o valor de E(s) será igual ao valor de R(s). Então,



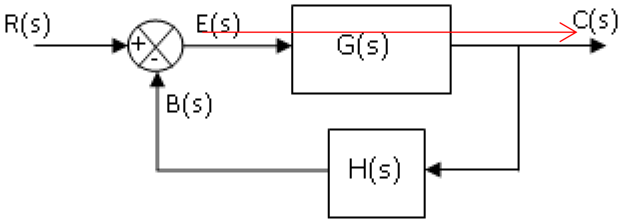
Seguindo o caminho da linha vermelha tem-se,



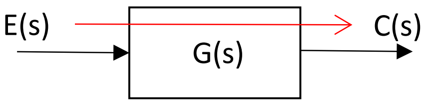
Daí:

$$\frac{B(s)}{E(s)} = \frac{B(s)}{R(s)} = G(s)H(s)$$

A relação entre o sinal de saída C(s) e o sinal de erro E(s) é chamada **função de transferência de ação direta**.

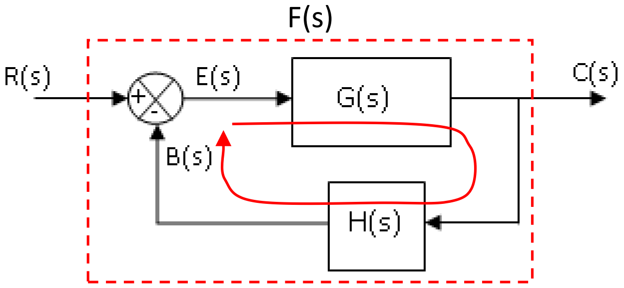


Segundo o caminho da linha vermelha tem-se,



Daí, $\frac{C(s)}{E(s)} = G(s)$

Quando o sinal de retroação B(s) em um sistema em malha fechada está conectado no bloco somador (comparador), a relação entre o sinal de saída C(s) e o sinal de entrada R(s) é denominada **função de transferência de malha fechada**. Então,



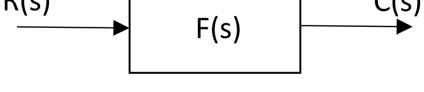
$$F(s) = \frac{C(s)}{R(s)}$$

$$C(s) = E(s)G(s)$$
$$E(s) = R(s) - B(s)$$
$$B(s) = H(s)C(s)$$

Substituindo as variáveis;

$$C(s) = E(s)G(s) = [R(s) - B(s)]G(s) = [R(s) - H(s)C(s)]G(s) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow C(s) = R(s)G(s) - H(s)C(s)G(s) \Rightarrow C(s)[\,1 + G(s)H(s)] = R(s)G(s) \Rightarrow$$
$$\Rightarrow \boxed{F(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}}$$

Substituindo os blocos que estão dentro da linha tracejada vermelha por um bloco F(s)tem-se;



Daí:

$$F(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$$

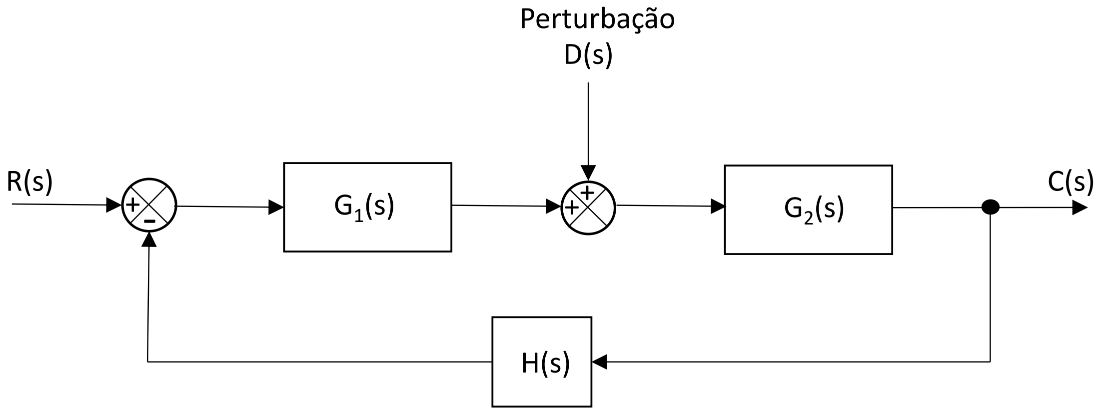
Esta função de transferência relaciona a dinâmica do sistema a malha fechada à dinâmica dos elementos de ação direta e dos elementos de retroação.

O sinal de saída do sistema de malha fechada depende claramente da função de transferência da malha fechada quanto ao tipo do sinal de entrada.

5.3 Sistema a Malha Fechada Sujeito a uma Perturbação

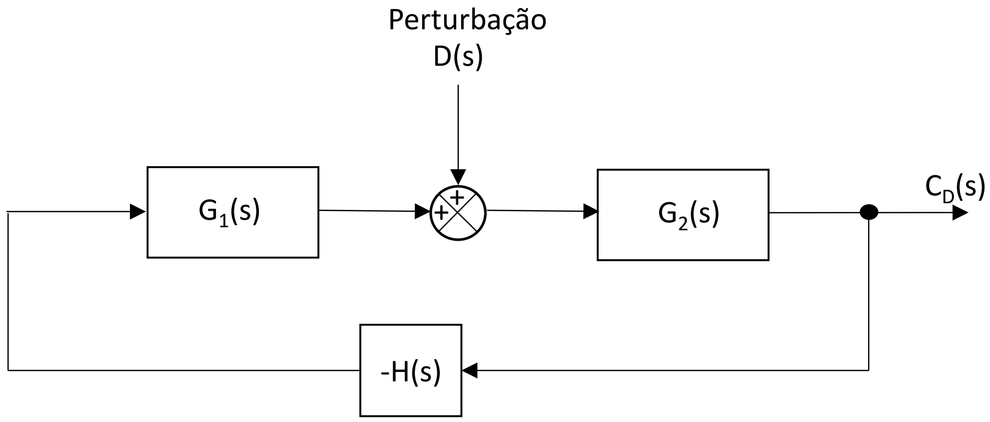
Quando um sistema de controle em malha fechada estiver sujeito a dois sinais de entrada, sendo um o sinal de referência e outro sendo uma perturbação, pode-se aplicar o Princípio da Superposição tratando independentemente cada saída do sistema devido a cada entrada e em seguida os sinais de saída correspondentes a cada um dos sinais de entrada podem ser adicionados para obter o sinal de saída completo.

Seja o diagrama de blocos para um sistema de controle em malha fechada sujeito a uma perturbação D(s).

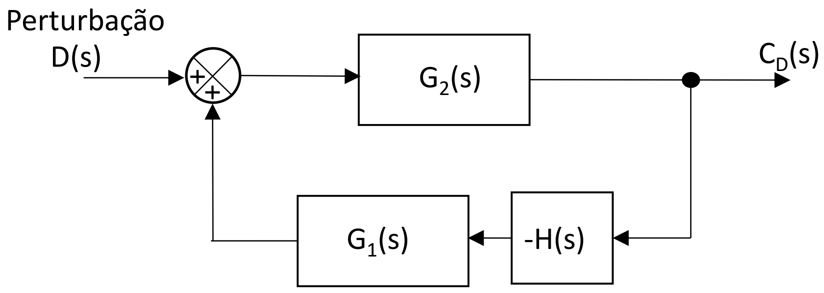


Admitindo-se que o sistema esteja inicialmente em repouso, com entrada nula, ou seja R(s) = 0, mas com D(s) atuando, pode-se então determinar a saída $C_D(s)$ devida unicamente à perturbação.

O diagrama de blocos para esta situação será,



Rearranjando o diagrama e blocos temos,



Daí, a função de transferência que relaciona $C_D(s)$ com D(s) é dada por,

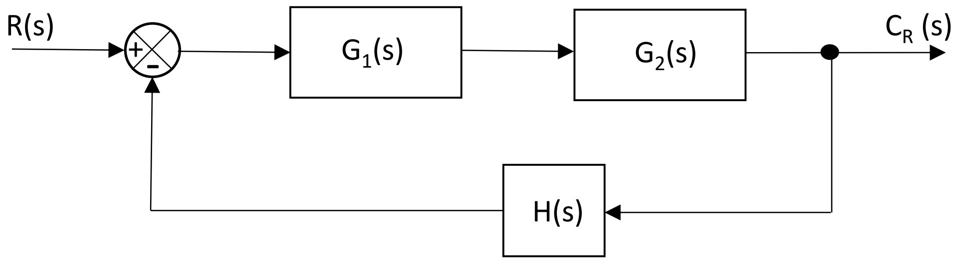
$$\frac{C_D(s)}{D(s)} = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

E a saída $C_D(s)$ será,

$$C_D(s) = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \times D(s)$$

Admitindo-se agora que o sistema esteja sem perturbação, ou seja D(s) = 0, mas R(s) atuando, pode-se então determinar a saída $C_R(s)$ devida unicamente à entrada R(s).

O diagrama de blocos para esta situação será,



Daí, a função de transferência que relaciona $C_R(s)$ com R(s) é dada por,

$$\frac{C_R(s)}{R(s)} = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)}$$

E a saída $C_R(s)$ será,

$$C_R(s) = \frac{G_1(s)G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \times R(s)$$

A saída C(s) para a aplicação simultânea da entrada de referência R(s) e da perturbação D(s) será a soma das duas saídas $C_D(s)$ e $C_R(s)$. Então,

$$C(s) = C_D(s) + C_R(s) = \frac{G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)} \times D(s) + + \frac{G_1(s)G_2(s)}{1+G_1(s)G_2(s)H(s)} \times R(s) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow C(s) = \frac{G_2(s)}{1 + G_1(s)G_2(s)H(s)} \times [G_1(s)R(s) + D(s)]$$

6. Construção de Diagramas de Blocos

Os diagramas de blocos devem ser construídos a partir do sistema físico que se quer controlar. Tais sistemas poderão estar representados por sistemas mecânicos, hidráulicos, térmicos ou eletromecânicos.

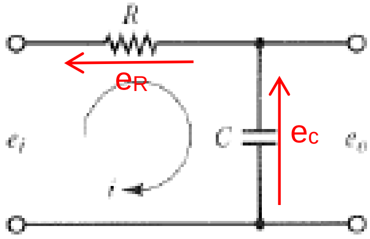
Nas primeiras aulas estudamos os sistemas análogos elétricos onde realizamos a transformação de sistemas físicos em circuitos eléricos lineares. Desta forma, analisaremos agora um método para a construção de diagramas de blocos a partir de circuitos elétricos, considerando que os mesmos podem estar representando os demais sistemas físicos a serem controlados.

Para a construção de diagramas de blocos iremos aplicar os seguintes procedimentos:

1. Escreve-se primeiro as equações que descrevem o comportamento dinâmico de cada um dos componentes.
2. Obtém-se, em seguida, a transformada de Laplace destas equações, supondo condições iniciais nulas.
3. Representa-se individualmente, em forma de blocos, cada equação transformada por Laplace.
4. Determinam-se a entrada e a saída do diagrama de blocos a ser construído.
5. Finalmente, conectam-se os elementos em um diagrama de blocos completo considerando que cada bloco somente pode ser aplicado uma vez.

Exemplo

Construir o diagrama de blocos para o circuito RC série dado. Deve-se considerar a entrada sendo a tensão e_i e a saída sendo a tensão e_0 no capacitor.



1. Escreve-se primeiro as equações que descrevem o comportamento dinâmico de cada um dos componentes.

As relações de corrente e tensão nos elementos são:

$$e_R = Ri \qquad \text{e} \qquad e_C = e_0 = \frac{1}{C}\int idt$$

Aplicando a LKT na malha tem-se:

$$e_i = e_R + e_C \Rightarrow e_i = e_R + e_0 \Rightarrow e_R = e_i + e_0$$

2. Obtém-se, em seguida, a transformada de Laplace destas equações, supondo condições iniciais nulas.

a) $\mathcal{L}\{e_R\} = \mathcal{L}\{Ri\} \Rightarrow E_R(s) = RI(s)$

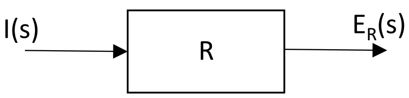
b) $\mathcal{L}\{e_C\} = \mathcal{L}\{e_0\} = \mathcal{L}\{\frac{1}{C}\int idt\} \Rightarrow E_0(s) = \frac{1}{sC}I(s)$

c) $\mathcal{L}\{e_i\} = \mathcal{L}\{e_R\} + \mathcal{L}\{e_C\} \Rightarrow E_i(s) = E_R(s) + E_C(s) \Rightarrow$

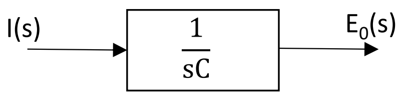
$\Rightarrow E_R(s) = E_i(s) - E_0(s)$

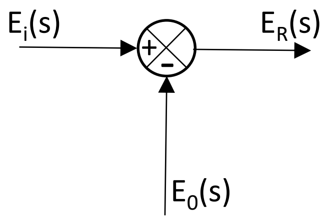
3. Representa-se individualmente, em forma de blocos, cada equação transformada por Laplace, considerando a função de entrada e de saída.

a)



b)

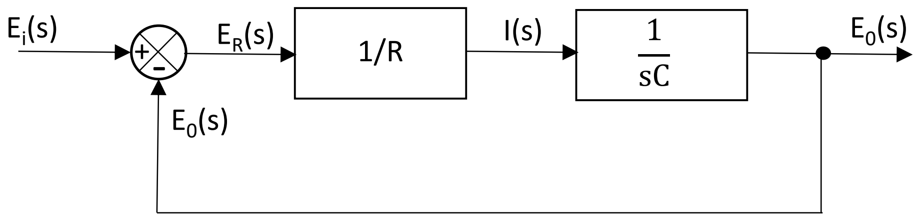




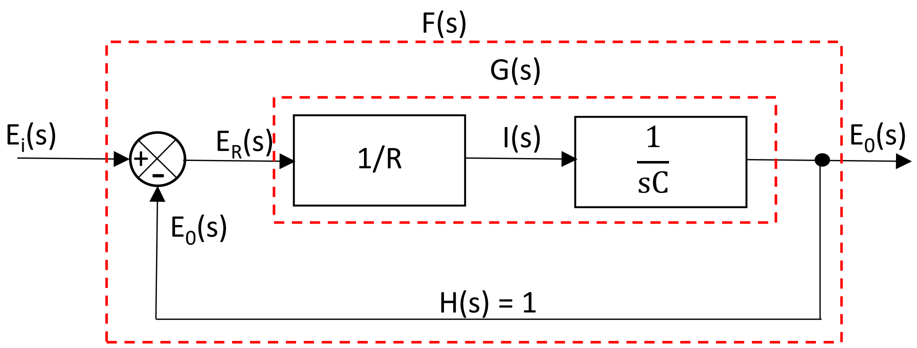
c)

4. Determinam-se a entrada e a saída do diagrama de blocos a ser construído.

5. Finalmente, conectam-se os elementos em um diagrama de blocos completo considerando que cada bloco somente pode ser aplicado uma vez.



A função de transferência que relaciona a saída $E_0(s)$ e a entrada $E_i(s)$, $F(s) = \frac{E_0(s)}{E_i(s)}$, denominada **função de transferência de malha fechada,** para este diagrama de blocos será dada por $F(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G(s)}{1+G(s)H(s)}$. Assim,



A função G(s) é calculada por $G(s) = \frac{1}{R} \times \frac{1}{sC} \Rightarrow G(s) = \frac{1}{RCs}$

Como a função H(s) = 1, substituindo tem-se:

$$F(s) = \frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{\frac{1}{RCs}}{1 + \frac{1}{RCs} \times 1} \Rightarrow \boxed{\frac{E_0(s)}{E_i(s)} = \frac{1}{RCs + 1}}$$