

# Controle II

Márcio J. Lacerda

Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de São João del-Rei

2º Semestre 2016

# Integral

- $P_1$  (100 pontos) - 22 de Setembro.
- $P_2$  (100 pontos) - 3 de Novembro.
- $P_3$  (100 pontos) - 7 de Dezembro.
- $E$  Exame (100 pontos) - 15 de Dezembro.

A avaliação será baseada em três provas  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ . A média é calculada por

$$M = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (1)$$

$M \geq 60$ , aprovado.

$M < 40$ , reprovado.

$40 < M < 60$ , **Exame** (Matéria toda!).

$$NF = \frac{M+E}{2}$$

$NF \geq 60$ , aprovado,  $NF < 60$ , reprovado

# Noturno

- $P_1$  (100 pontos) - 22 de Setembro.
- $P_2$  (100 pontos) - 3 de Novembro.
- $P_3$  (100 pontos) - 6 de Dezembro.
- $E$  Exame (100 pontos) - 15 de Dezembro.

A avaliação será baseada em três provas  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ . A média é calculada por

$$M = \frac{P_1 + P_2 + P_3}{3} \quad (2)$$

$M \geq 60$ , aprovado.

$M < 40$ , reprovado.

$40 < M < 60$ , **Exame** (Matéria toda!).

$$NF = \frac{M+E}{2}$$

$NF \geq 60$ , aprovado,  $NF < 60$ , reprovado

# Referências

## Referências Principais:

- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5a. ed. São Paulo: Pearson, 2012.[Ogata]
- DORF, R.; BISHOP, R. **Sistemas de Controle Modernos**. 11a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. [Dorf]
- NISE, N. **Engenharia de Sistemas de Controle**. 6a. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.[Nise]

# Contato

**Contato:**

Márcio J. Lacerda – [marciojr.lacerda@gmail.com](mailto:marciojr.lacerda@gmail.com)

Sala 4.35 – EL

## Sistema

- Um arranjo, conjunto ou coleção de componentes conectados ou relacionados de maneira a formar ou agir como uma unidade.
- Não é algo necessariamente físico.
- O termo pode ser usado em referência a sistemas econômicos, biológicos, mecânicos, entre outros.

## Controle

- O termo controle é usualmente empregado no sentido de regulação, direcionamento ou comando.
- Um sistema de controle seria um arranjo de componentes conectados ou relacionados de maneira a se auto-regular (direcionar, comandar), ou regular (direcionar, comandar) um outro sistema

## Exemplo

Controle da economia: Banco Central fixa a meta da inflação em 5% ao ano. Esse "5%" é **valor de referencia**. Para alcançar esse valor referencia, o Banco Central **atua**: aumenta/diminui juros.

Resumo: para Controlar inflação, Banco Central atua nos juros.

## Sistema

- Um arranjo, conjunto ou coleção de componentes conectados ou relacionados de maneira a formar ou agir como uma unidade.
- Não é algo necessariamente físico.
- O termo pode ser usado em referência a sistemas econômicos, biológicos, mecânicos, entre outros.

## Controle

- O termo controle é usualmente empregado no sentido de regulação, direcionamento ou comando.
- Um sistema de controle seria um arranjo de componentes conectados ou relacionados de maneira a se auto-regular (direcionar, comandar), ou regular (direcionar, comandar) um outro sistema

## Exemplo

Controle da economia: Banco Central fixa a meta da inflação em 5% ao ano. Esse "5%" é **valor de referencia**. Para alcançar esse valor referencia, o Banco Central **atua**: aumenta/diminui juros.

Resumo: para Controlar inflação, Banco Central atua nos juros.

## Sistema

- Um arranjo, conjunto ou coleção de componentes conectados ou relacionados de maneira a formar ou agir como uma unidade.
- Não é algo necessariamente físico.
- O termo pode ser usado em referência a sistemas econômicos, biológicos, mecânicos, entre outros.

## Controle

- O termo controle é usualmente empregado no sentido de regulação, direcionamento ou comando.
- Um sistema de controle seria um arranjo de componentes conectados ou relacionados de maneira a se auto-regular (direcionar, comandar), ou regular (direcionar, comandar) um outro sistema

## Exemplo

Controle da economia: Banco Central fixa a meta da inflação em 5% ao ano. Esse "5%" é valor de referencia. Para alcançar esse valor referencia, o Banco Central atua: aumenta/diminui juros.

Resumo: para Controlar inflação, Banco Central atua nos juros.



## Sistema

- Um arranjo, conjunto ou coleção de componentes conectados ou relacionados de maneira a formar ou agir como uma unidade.
- Não é algo necessariamente físico.
- O termo pode ser usado em referência a sistemas econômicos, biológicos, mecânicos, entre outros.

## Controle

- O termo controle é usualmente empregado no sentido de regulação, direcionamento ou comando.
- Um sistema de controle seria um arranjo de componentes conectados ou relacionados de maneira a se auto-regular (direcionar, comandar), ou regular (direcionar, comandar) um outro sistema

## Exemplo

Controle da economia: Banco Central fixa a meta da inflação em 5% ao ano. Esse "5%" é valor de referencia. Para alcançar esse valor referencia, o Banco Central atua: aumenta/diminui juros.

Resumo: para Controlar inflação, Banco Central atua nos juros.

## Sistema

- Um arranjo, conjunto ou coleção de componentes conectados ou relacionados de maneira a formar ou agir como uma unidade.
- Não é algo necessariamente físico.
- O termo pode ser usado em referência a sistemas econômicos, biológicos, mecânicos, entre outros.

## Controle

- O termo controle é usualmente empregado no sentido de regulação, direcionamento ou comando.
- Um sistema de controle seria um arranjo de componentes conectados ou relacionados de maneira a se auto-regular (direcionar, comandar), ou regular (direcionar, comandar) um outro sistema

## Exemplo

Controle da economia: Banco Central fixa a meta da inflação em 5% ao ano. Esse "5%" é **valor de referencia**. Para alcançar esse valor referencia, o Banco Central **atua**: aumenta/diminui juros.

Resumo: para Controlar inflação, Banco Central atua nos juros.

## Sistema

- Um arranjo, conjunto ou coleção de componentes conectados ou relacionados de maneira a formar ou agir como uma unidade.
- Não é algo necessariamente físico.
- O termo pode ser usado em referência a sistemas econômicos, biológicos, mecânicos, entre outros.

## Controle

- O termo controle é usualmente empregado no sentido de regulação, direcionamento ou comando.
- Um sistema de controle seria um arranjo de componentes conectados ou relacionados de maneira a se auto-regular (direcionar, comandar), ou regular (direcionar, comandar) um outro sistema

## Exemplo

Controle da economia: Banco Central fixa a meta da inflação em 5% ao ano. Esse "5%" é **valor de referencia**. Para alcançar esse valor referencia, o Banco Central **atua**: aumenta/diminui juros.

Resumo: para Controlar inflação, Banco Central atua nos juros.

## Sistema

- Um arranjo, conjunto ou coleção de componentes conectados ou relacionados de maneira a formar ou agir como uma unidade.
- Não é algo necessariamente físico.
- O termo pode ser usado em referência a sistemas econômicos, biológicos, mecânicos, entre outros.

## Controle

- O termo controle é usualmente empregado no sentido de regulação, direcionamento ou comando.
- Um sistema de controle seria um arranjo de componentes conectados ou relacionados de maneira a se auto-regular (direcionar, comandar), ou regular (direcionar, comandar) um outro sistema

## Exemplo

Controle da economia: Banco Central fixa a meta da inflação em 5% ao ano. Esse "5%" é **valor de referencia**. Para alcançar esse valor referencia, o Banco Central **atua**: aumenta/diminui juros.

Resumo: para Controlar inflação, Banco Central atua nos juros.

## Planta

O termo planta (ou processo, ou sistema controlado) é usado para designar o sistema que é objeto da ação do sistema de controle.

## Variável de referência

A variável de referência (ou comandada) serve de referência (no sentido de comportamento desejado) para a variável controlada.

## Variável controlada

A variável controlada (ou regulada) é qualquer variável que se deseja controlar. A variável controlada é geralmente representada pela variável de saída do sistema de controle.

## Variável de controle

A variável de controle (ou manipulada) é a quantidade determinada pela ação de um controlador. A variável de controle é geralmente identificada como a variável de entrada da planta.

## Planta

O termo planta (ou processo, ou sistema controlado) é usado para designar o sistema que é objeto da ação do sistema de controle.

## Variável de referência

A variável de referência (ou comandada) serve de referência (no sentido de comportamento desejado) para a variável controlada.

## Variável controlada

A variável controlada (ou regulada) é qualquer variável que se deseja controlar. A variável controlada é geralmente representada pela variável de saída do sistema de controle.

## Variável de controle

A variável de controle (ou manipulada) é a quantidade determinada pela ação de um controlador. A variável de controle é geralmente identificada como a variável de entrada da planta.

## Planta

O termo planta (ou processo, ou sistema controlado) é usado para designar o sistema que é objeto da ação do sistema de controle.

## Variável de referência

A variável de referência (ou comandada) serve de referência (no sentido de comportamento desejado) para a variável controlada.

## Variável controlada

A variável controlada (ou regulada) é qualquer variável que se deseja controlar. A variável controlada é geralmente representada pela variável de saída do sistema de controle.

## Variável de controle

A variável de controle (ou manipulada) é a quantidade determinada pela ação de um controlador. A variável de controle é geralmente identificada como a variável de entrada da planta.

## Planta

O termo planta (ou processo, ou sistema controlado) é usado para designar o sistema que é objeto da ação do sistema de controle.

## Variável de referência

A variável de referência (ou comandada) serve de referência (no sentido de comportamento desejado) para a variável controlada.

## Variável controlada

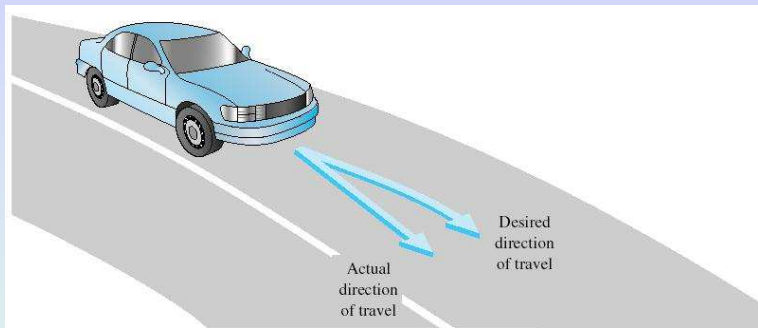
A variável controlada (ou regulada) é qualquer variável que se deseja controlar. A variável controlada é geralmente representada pela variável de saída do sistema de controle.

## Variável de controle

A variável de controle (ou manipulada) é a quantidade determinada pela ação de um controlador. A variável de controle é geralmente identificada como a variável de entrada da planta.



# Onde usamos Controle?



**Figura:** Sistema de controle automotivo. O motorista percebe a diferença entre a direção atual e a desejada, e ajusta o volante.

## Controlador

Um controlador (ou compensador) é qualquer sistema conectado à planta no sentido de fazer a variável controlada responder de acordo com o especificado pela variável de referência.

Se as variáveis de referência, de controle e de saída forem denotadas por  $r$ ,  $u$  e  $y$ , respectivamente, então é possível representar um sistema de controle em malha aberta



- Inexistência de realimentação.
- Variável de controle não depende da variável de saída.
- O ação de controle é uma função apenas da variável de referência.

## Controlador

Um controlador (ou compensador) é qualquer sistema conectado à planta no sentido de fazer a variável controlada responder de acordo com o especificado pela variável de referência.

Se as variáveis de referência, de controle e de saída forem denotadas por  $r$ ,  $u$  e  $y$ , respectivamente, então é possível representar um sistema de controle em malha aberta



- Inexistência de realimentação.
- Variável de controle não depende da variável de saída.
- O ação de controle é uma função apenas da variável de referência.

## Controlador

Um controlador (ou compensador) é qualquer sistema conectado à planta no sentido de fazer a variável controlada responder de acordo com o especificado pela variável de referência.

Se as variáveis de referência, de controle e de saída forem denotadas por  $r$ ,  $u$  e  $y$ , respectivamente, então é possível representar um sistema de controle em malha aberta

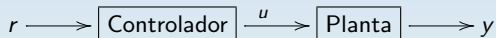


- Inexistência de realimentação.
- Variável de controle não depende da variável de saída.
- O ação de controle é uma função apenas da variável de referência.

## Controlador

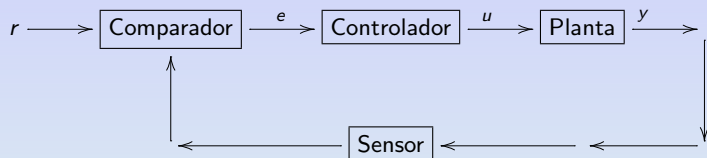
Um controlador (ou compensador) é qualquer sistema conectado à planta no sentido de fazer a variável controlada responder de acordo com o especificado pela variável de referência.

Se as variáveis de referência, de controle e de saída forem denotadas por  $r$ ,  $u$  e  $y$ , respectivamente, então é possível representar um sistema de controle em malha aberta



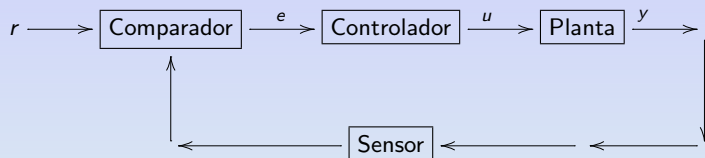
- Inexistência de realimentação.
- Variável de controle não depende da variável de saída.
- O ação de controle é uma função apenas da variável de referência.

# Sistema de controle em malha fechada



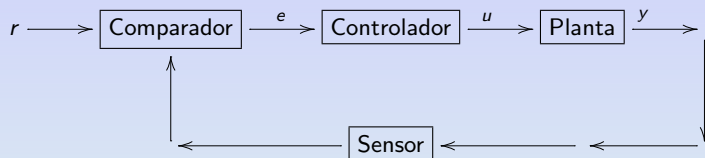
- A saída do sistema é medida através do componente representado no bloco Sensor.
- A referência é comparada com o valor medido, no bloco Comparador.
- A saída do comparador será denotada por  $e$ . Em geral, a saída do comparador é simplesmente o erro entre a referência e o valor medido, isto é,  $e = r - y$ .

# Sistema de controle em malha fechada



- A saída do sistema é medida através do componente representado no bloco Sensor.
- A referência é comparada com o valor medido, no bloco Comparador.
- A saída do comparador será denotada por  $e$ . Em geral, a saída do comparador é simplesmente o erro entre a referência e o valor medido, isto é,  $e = r - y$ .

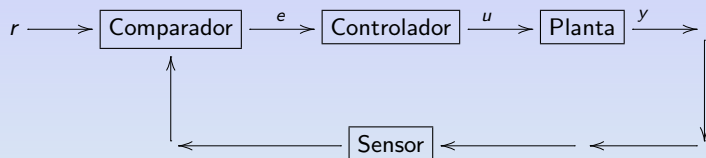
# Sistema de controle em malha fechada



- A saída do sistema é medida através do componente representado no bloco Sensor.
- A referência é comparada com o valor medido, no bloco Comparador.
- A saída do comparador será denotada por  $e$ . Em geral, a saída do comparador é simplesmente o erro entre a referência e o valor medido, isto é,  $e = r - y$ .



# Sistema de controle em malha fechada



- A saída do sistema é medida através do componente representado no bloco Sensor.
- A referência é comparada com o valor medido, no bloco Comparador.
- A saída do comparador será denotada por  $e$ . Em geral, a saída do comparador é simplesmente o erro entre a referência e o valor medido, isto é,  $e = r - y$ .

## Sistema Ideal

Se fosse possível representar a planta, o controlador e o ambiente no qual o sistema de controle está inserido com precisão infinita, não seria necessário utilizar sistemas de controle em malha fechada; sistemas em malha aberta seriam suficientes.

## Distúrbios

A principal razão para a utilização de um sistema de controle em malha fechada é a eventual presença de distúrbios agindo sobre o sistema.

O termo distúrbio designa genericamente qualquer evento que tenda a afetar o funcionamento do sistema de controle de forma adversa. Pode ser gerado internamente ou externamente ao sistema de controle.

## Sistema Ideal

Se fosse possível representar a planta, o controlador e o ambiente no qual o sistema de controle está inserido com precisão infinita, não seria necessário utilizar sistemas de controle em malha fechada; sistemas em malha aberta seriam suficientes.

## Distúrbios

A principal razão para a utilização de um sistema de controle em malha fechada é a eventual presença de distúrbios agindo sobre o sistema.

O termo distúrbio designa genericamente qualquer evento que tenda a afetar o funcionamento do sistema de controle de forma adversa. Pode ser gerado internamente ou externamente ao sistema de controle.

- Um sensor descalibrado ou sujeito a ruídos gera medidas que não refletem os valores da saída gera um **distúrbio interno**. Os valores medidos incorretamente serão realimentados, afetando o funcionamento do sistema.
- Se parte da descrição da planta é omitida na etapa de modelagem do sistema, a parte não-modelada pode agir como **distúrbio externo**. A velocidade do vento representa um distúrbio externo para os sistemas de controle de trajetória de veículos.
- Tradução dos distúrbios em termos de variáveis. Como fica o diagrama de blocos?

- Um sensor descalibrado ou sujeito a ruídos gera medidas que não refletem os valores da saída gera um **distúrbio interno**. Os valores medidos incorretamente serão realimentados, afetando o funcionamento do sistema.
- Se parte da descrição da planta é omitida na etapa de modelagem do sistema, a parte não-modelada pode agir como **distúrbio externo**. A velocidade do vento representa um distúrbio externo para os sistemas de controle de trajetória de veículos.
- Tradução dos distúrbios em termos de variáveis. Como fica o diagrama de blocos?

- Um sensor descalibrado ou sujeito a ruídos gera medidas que não refletem os valores da saída gera um **distúrbio interno**. Os valores medidos incorretamente serão realimentados, afetando o funcionamento do sistema.
- Se parte da descrição da planta é omitida na etapa de modelagem do sistema, a parte não-modelada pode agir como **distúrbio externo**. A velocidade do vento representa um distúrbio externo para os sistemas de controle de trajetória de veículos.
- Tradução dos distúrbios em termos de variáveis. Como fica o diagrama de blocos?

# Sistemas de Controle

Do ponto de vista de implementação física, classificamos um sistema de controle em malha fechada como manual ou automático

- Controle manual. Tipo de controle em malha fechada no qual a realimentação é implementada através de um operador humano, que realiza uma ou mais das funções de comparador, controlador ou sensor.
- Controle automático. Tipo de controle em malha fechada no qual as funções de comparador, controlador e sensor são executadas sem a intervenção humana, através de sistemas eletrônicos, hidráulicos ou pneumáticos, por exemplo.

# Sistemas de Controle

Do ponto de vista de implementação física, classificamos um sistema de controle em malha fechada como manual ou automático

- Controle manual. Tipo de controle em malha fechada no qual a realimentação é implementada através de um operador humano, que realiza uma ou mais das funções de comparador, controlador ou sensor.
- Controle automático. Tipo de controle em malha fechada no qual as funções de comparador, controlador e sensor são executadas sem a intervenção humana, através de sistemas eletrônicos, hidráulicos ou pneumáticos, por exemplo.

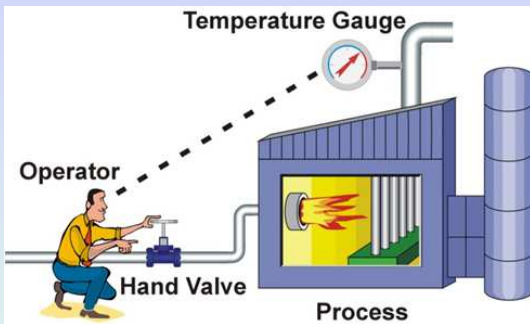


# Sistemas de Controle

Do ponto de vista de implementação física, classificamos um sistema de controle em malha fechada como manual ou automático

- Controle manual. Tipo de controle em malha fechada no qual a realimentação é implementada através de um operador humano, que realiza uma ou mais das funções de comparador, controlador ou sensor.
- Controle automático. Tipo de controle em malha fechada no qual as funções de comparador, controlador e sensor são executadas sem a intervenção humana, através de sistemas eletrônicos, hidráulicos ou pneumáticos, por exemplo.

# Onde usamos Controle?



**Figura:** Controle manual: uma pessoa controlando a temperatura do gás.

O que pode acontecer se o operador **dormir**?

## Possível solução

- Substituir o homem por uma máquina que realiza tarefas “automaticamente”.

## Automação

- É a tecnologia que usa comandos programados para operar um determinado processo, usando informações de “sensores” para gerar sinal de “realimentação”; tal sinal será usado para determinar “quais comandos” devem ser executados. A tecnologia é usada para implementar o “cérebro virtual”. Tal “cérebro” chama-se Controle.

## Controle e Automação

**Controle:** cérebro. **Automação:** tecnologia.

## Possível solução

- Substituir o homem por uma máquina que realiza tarefas “automaticamente”.

## Automação

- É a tecnologia que usa comandos programados para operar um determinado processo, usando informações de “sensores” para gerar sinal de “realimentação”; tal sinal será usado para determinar “quais comandos” devem ser executados. A tecnologia é usada para implementar o “cérebro virtual”. Tal “cérebro” chama-se Controle.

## Controle e Automação

**Controle:** cérebro. **Automação:** tecnologia.

## Possível solução

- Substituir o homem por uma máquina que realiza tarefas “automaticamente”.

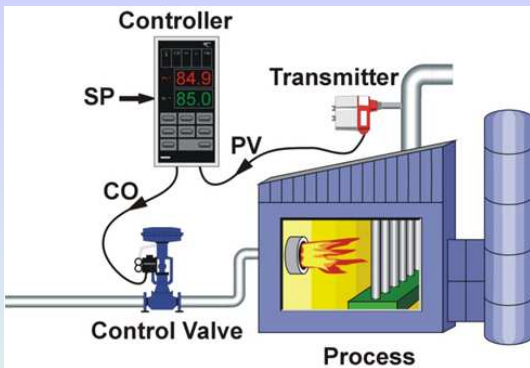
## Automação

- É a tecnologia que usa comandos programados para operar um determinado processo, usando informações de “sensores” para gerar sinal de “realimentação”; tal sinal será usado para determinar “quais comandos” devem ser executados. A tecnologia é usada para implementar o “cérebro virtual”. Tal “cérebro” chama-se Controle.

## Controle e Automação

**Controle:** cérebro. **Automação:** tecnologia.

# Usando o Controle e Automação



**Figura:** Controle automático: a temperatura do gás é controlada automaticamente. O Sensor lê temperatura e envia informação para Computador-Controller que “pensa” como um “cérebro”. Computador-Controller toma decisão, e envia a informação da sua decisão para a válvula abrir ou fechar ou não mover-se.

# Utilização de Controle Automático – Robótica



**Figura:** Os robôs à esquerda são usados para encontrar **minas terrestres** , e o robô à direita é usado em locais com contaminação química.

# Utilização de Controle Automático – Humanóide



**Figura:** Exoskeleton-passive: Tele-operation of the human robot Aila, Bremen, Germany.



# Filosofia de Projeto de Sistemas de Controle

## Modelos matemáticos

Processos físicos podem ser representados por modelos matemáticos:

- lineares ou não-lineares.
  - determinísticos ou estocásticos.
  - variantes ou invariantes no tempo.
- 
- Graduação – sistemas lineares determinísticos invariantes no tempo.
  - Pós-graduação – demais sistemas.

## Tabela de Pares de TL

Item	$f(t)$	$F(S)$
1	$\delta(t)$	1
2	$u(t)$	$\frac{1}{s}$
3	$t u(t)$	$\frac{1}{s^2}$
4	$t^n u(t)$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
5	$e^{-\alpha t} u(t)$	$\frac{1}{s + \alpha}$
6	$u(t) \sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
7	$u(t) \cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
8	$u(t) e^{-\alpha t} \cos(\omega t)$	$\frac{s + \alpha}{(s + \alpha)^2 + \omega^2}$
9	$u(t) e^{-\alpha t} \sin(\omega t)$	$\frac{\omega}{(s + \alpha)^2 + \omega^2}$

## Expansão por frações parciais

Se todos os pólos de  $Y(s)$  forem reais e distintos, pode-se reescrevê-lo como

$$Y(s) = \frac{N(s)}{D(s)} = \frac{N(s)}{(s-p_1)(s-p_2)\dots(s-p_N)}.$$

Aplicando a expansão em frações parciais, tem-se

$$Y(s) = \frac{c_1}{s-p_1} + \frac{c_2}{s-p_2} + \dots + \frac{c_N}{s-p_N},$$

sendo

$$c_k = \left[ (s-p_k) \frac{N(s)}{D(s)} \right]_{s=p_k}.$$

**Example 3.1**

Encontre a TL inversa de

$$Y(s) = \frac{-s^2 - s + 5}{s(s^2 + 3s + 2)}$$

Solução:

$$y(t) = \frac{5}{2} - 5\exp(-t) + \frac{3\exp(-2t)}{2}, \quad t \geq 0.$$

## Expansão por frações parciais - polos com multiplicidade

Seja, por exemplo, o sistema

$$Y(s) = \frac{N(s)}{D(s)(s - p_i)^r}$$

A expansão em frações parciais resulta em

$$Y(s) = \frac{\tilde{N}(s)}{D(s)} + \frac{d_r}{(s - p_i)^r} + \frac{d_{r-1}}{(s - p_i)^{r-1}} + \frac{d_{r-2}}{(s - p_i)^{r-2}} + \dots + \frac{d_1}{s - p_i},$$

sendo

$$d_r = [(s - p_i)^r Y(s)]_{s=p_i}$$

$$d_{r-1} = \frac{d}{ds} [(s - p_i)^r Y(s)]_{s=p_i}$$

$$d_{r-2} = \frac{1}{2!} \frac{d^2}{ds^2} [(s - p_i)^r Y(s)]_{s=p_i}$$

...

$$d_1 = \frac{1}{(r-1)!} \frac{d^{r-1}}{ds^{r-1}} [(s - p_i)^r Y(s)]_{s=p_i}$$

**Example 3.2**

Faça a expansão de

$$Y(s) = \frac{1}{s(s+1)^3(s+2)}$$

Solução: Se escreve  $Y(s)$  na forma

$$Y(s) = \frac{c_1}{s} + \frac{c_2}{s+2} + \frac{d_1}{s+1} + \frac{d_2}{(s+1)^2} + \frac{d_3}{(s+1)^3}$$

Quais os valores de  $c_1, c_2, d_1, d_2, d_3$ ?