

Curso de Sistemas Lineares I

Natanael Junior^{1 2}

natmourajr@lps.ufrj.br, [natmourajr.github.io](https://github.com/natmourajr)

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro

²Laboratório de Processamento de Sinais

29/04/2016

Estrutura do Curso

- 1 Objetivo do Curso
- 2 Bibliografia Adotada
- 3 Regras Gerais
- 4 Resultados Anteriores
- 5 Classificação de Sinais
- 6 Operações Básicas com Sinais
- 7 Classificação de Sistemas
- 8 Modelagem de Sistemas Elétricos
- 9 Análise de Sistemas no Domínio do Tempo
- 10 Transformada de Laplace
- 11 Análise de Sistemas no Domínio das Frequências Complexas
- 12 Resposta em Frequências de um Sistema Linear
- 13 Transformada de Fourier
- 14 Análise de Sistemas no Domínio das Frequências
- 15 Referências Bibliográficas

Objetivo do Curso

Disponibilizar e avaliar o conhecimento de uma turma do **3º período** do curso de **Engenharia Eletrônica e de Computação** da Universidade Federal do Rio de Janeiro nos seguintes tópicos: *Modelagem, analogias e análise de sistemas físicos. Resposta a entrada zero, resposta ao estado zero e convolução. Resposta a uma entrada exponencial. Transformação de Fourier. Transformação de Laplace. Função de transferência, pólos e zeros. Resposta impulsional, resposta ao degrau, resposta senoidal. Sistemas de 1^a e 2^a ordens e de ordem superior, sistemas de fase não mínima: Resposta em freqüência e Diagramas de Bode.*

Bibliografia Adotada

- ① Linear Systems and Signals, 2nd Edition, B. P. Lathi [1]
- ② Signals and systems, 2nd Edition, Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, S. Hamid Nawab [2]
- ③ Linear System Theory and Design, 3rd Edition, Chi-Tsong Chen [3]
- ④ Circuits, Signals and Systems, William Siebert [4]

Regras Gerais

- 2 Provas Escritas - P_1 (13/05) e P_2 (01/07)
- Média das Provas (MP): $\frac{P_1+P_2}{2}$
- 5 Listas de Exercícios - L_0, L_1, L_2, L_3, L_4
- 2^a Chamada (08/07) - **Substitutiva**
- Média das Listas (ML): $\frac{L_0+L_1+L_2+L_3+L_4}{5}$
- Média Inicial (MI): $MP + 0.1 \cdot ML$
- $MI \leq 3.0$ - **Reprovado**
- $MI \geq 8.0$ - **Aprovado**
- $3.0 < MI < 8.0$ - **Trabalho Final**
- Trabalho Final: Trabalho Escrito (T_e) e Trabalho Apresentado (T_a) - 05/07 a 12/07
- Rodadas de Apresentação: 15/07 - 22/07
- Média Final (MF): $\frac{2 \cdot T_e + 2 \cdot T_a + MI}{5}$
- $MF \geq 5.0$ - **Aprovado**
- $MF < 5.0$ - **Reprovado**

Resultados Anteriores

- 2015/01
 - Número de Inscritos: 43
 - Média da P_1 : 3.9
 - Média da P_2 : 3.1
 - Média da $P_{2^a Cham.}$: 1.4
 - Total de Reprovados: 18
- 2015/02
 - Número de Inscritos: 33
 - Média da P_1 : 3.4
 - Média da P_2 : 3.3
 - Média da $P_{2^a Cham.}$: 3.4
 - Total de Reprovados: 15

Lista 0

Em uma folha de papel A4, resolva os seguintes exercícios:

- ① Para a EDO descrita por $ay''(t) + by'(t) + cy(t) = 0$ com $a, b, c \in \mathbb{R}$, $a \neq 0$ e $b^2 - 4ac = 0$, mostre que $y(t) = e^{-\frac{b}{2a}t}$ é solução.
- ② Encontre a solução da EDO abaixo

$$\frac{\partial y}{\partial x} - 2xy = x$$

- ③ Utilizando o **VI** (Valor Inicial) $y(1/3) = e/3$, encontre a solução da EDO abaixo

$$\frac{\partial y}{\partial t} = e^{3t}$$

- ④ Dada a EDO abaixo, encontre a sua solução pelo **método do fator integrante**.

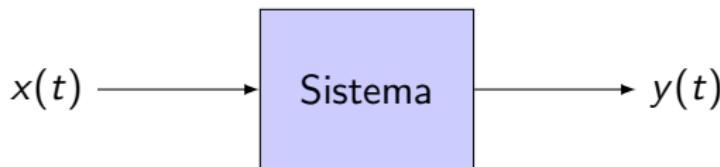
$$\frac{\partial y(t)}{\partial t} + \frac{2}{t}y(t) = t$$

Classificação de Sinais

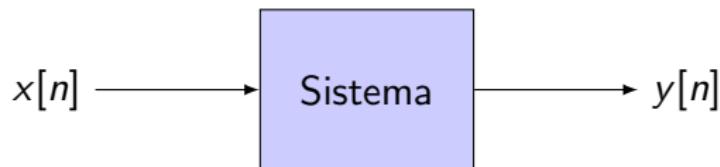
- O que é um **Sinal**?
 - Por Definição: Um função de uma ou mais **variáveis**, a qual veicula informação sobre a natureza de um fenômeno físico
- Sinal dependente de uma variável → **Sinal Unidimensional**
 - Ex: $x(t)$, geralmente t representa a variável tempo contínuo
 - Ex: $y[n]$, geralmente n representa a variável tempo discreto
- Sinal dependente de duas ou mais variáveis → **Sinal Multidimensional**
 - Ex: $\Theta(t, x, y)$: temperatura em uma sala
 - Ex $V[\alpha, n]$: Valor de um ativo α da bolsa de valores na amostra n

Classificação de Sinais

- No curso de Sistemas Lineares I, sinais serão inseridos em **sistemas**.
- O que é um **Sistema**?
 - Um sistema é uma entidade que manipula um ou mais sinais para realizar uma função, produzindo como resposta novos sinais



- Para o sistema acima a entrada é $x(t)$ e a saída é $y(t)$



- Para o sistema acima a entrada é $x[n]$ e a saída é $y[n]$

Classificação de Sinais

Sinais no Tempo Contínuo e Sinais no Tempo Discreto

- $x(t)$ é dito de **tempo contínuo** se definido para todo tempo t

Classificação de Sinais

Sinais no Tempo Contínuo e Sinais no Tempo Discreto

- Um sinal de tempo discreto é frequentemente derivado de um sinal de tempo contínuo, amostrando-se o sinal a uma taxa **uniforme**. Definindo-se T como o período de amostragem e n como sendo um **número inteiro**, tem-se para $t = nT$, $x(t) = x(nT)$
- Por conveniência, utilizamos $x[n] = x(nT)$ para $n \in \mathbb{Z}$

Classificação de Sinais

Como um sinal é uma entidade que se desenvolve ao longo de uma variável (que seja tempo ou qualquer outra) temos que o seu comprimento pode ser determinado em função da variável independente.

- Comprimento de um Sinal Contínuo - Intervalos de tempo contínuo
- Comprimento de um Sinal Discreto - quantidade de amostras no tempo discreto

Classificação de Sinais

Sinais Analógicos e Sinais Digitais

- **Sinais Analógicos** são definidos como sinais que podem assumir quaisquer valores em sua **faixa dinâmica**

Classificação de Sinais

Sinais Analógicos e Sinais Digitais

- **Sinais Digitais** são definidos como sinais que só podem assumir determinados valores em sua **faixa dinâmica**

Classificação de Sinais

Uma confusão natural (e muito frequente) é

- Sinal Analógico → Sinal em tempo contínuo
- Sinal Digital → Sinal em tempo discreto

Classificação de Sinais

Sinais Pares e Sinais Ímpares

- Um sinal $x(t)$ é chamado **par** se $x(t) = x(-t)$
- Par → Simetria em relação ao eixo das ordenadas

Classificação de Sinais

Sinais Pares e Sinais Ímpares

- Um sinal $x(t)$ é chamado **ímpar** se $x(t) = -x(-t)$
- Ímpar → assimetria em relação ao eixo das ordenadas

Classificação de Sinais

Sinais Pares e Sinais Ímpares - Propriedades

- Sinal par x Sinal ímpar = Sinal ímpar
- Sinal par x Sinal par = Sinal par
- Sinal ímpar x Sinal ímpar = Sinal par

Suponha um sinal $x_p(t)$ par e um sinal $x_i(t)$ ímpar. Sendo assim, temos:

$$\int_{-a}^a x_p(t) dt = 2 \int_0^a x_p(t) dt \quad (1)$$

$$\int_{-a}^a x_i(t) dt = 0 \quad (2)$$

Classificação de Sinais

Sinais Periódicos e Sinais Não-Periódicos

- **Sinais Periódicos** são os sinais que atendem a equação de periodicidade (equação 3) para todos os valores possíveis de T

$$x(t) = x(t + T) \quad (3)$$

- Definições secundárias:
 - Período fundamental do sinal $x(t) = T$ segundos
 - Frequência fundamental do sinal $x(t) = f$ Hz (onde $f = \frac{1}{T}$)
 - Frequência angular fundamental do sinal $x(t) = \omega$ rad/s (onde $\omega = \frac{2\pi}{T}$)
- Todo o sinal que não atende a equação 3, são chamados de **Sinais Não-Periódicos** ou **Sinais Aperiódicos**

Classificação de Sinais

Sinais Causais, Sinais Não-Causais e Sinais Anti-Causais

- **Sinais Causais** são os sinais definidos apenas para $t \geq 0$
- **Sinais Não-Causais** são os sinais definidos para $t \geq 0$ e $t < 0$
- **Sinais Anti-Causais** são os sinais definidos apenas para $t < 0$

Classificação de Sinais

Sinais de Energia e Sinais de Potência

- Um sinal é caracterizado como **sinal de energia** se satisfizer a condição abaixo:

$$0 < E_{x(t)} < \infty \quad (4)$$

- Um sinal é caracterizado como **sinal de potência** se satisfizer a condição abaixo:

$$0 < P_{x(t)} < \infty \quad (5)$$

- Condições mutuamente **excludentes**

Classificação de Sinais

Sinais de Energia e Sinais de Potência

- As unidades de Energia e de Potência dependem **diretamente** da unidade do sinal a ser medido.

Classificação de Sinais

Sinais Determinísticos e Sinais Aleatórios

- São chamados de **Sinais Determinísticos**, os sinais aos quais não existe incerteza com respeito ao seu valor em qualquer instante de tempo
- São sinais aos quais podemos encontrar um modelo que modele **perfeitamente** o sinal
- Ex: $x(t) = \sin(\pi \cdot t)$

Classificação de Sinais

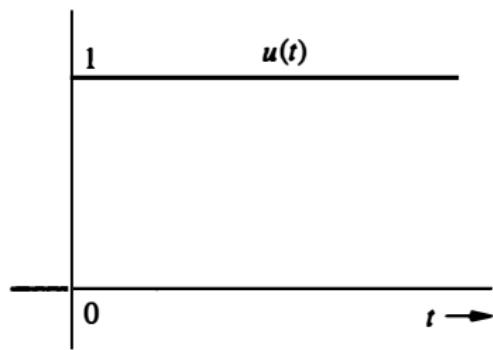
Sinais Determinísticos e Sinais Aleatórios

- São chamados de **Sinais Aleatórios**, os sinais aos quais existe **alguma** incerteza com respeito ao seu valor em qualquer instante de tempo
- São sinais aos quais não podemos encontrar um modelo que modele **perfeitamente** o sinal
- Ex: $x(t) = \sin(\pi \cdot t) + \text{ruído}$

Classificação de Sinais

Modelos básicos de Sinais: Sinal Degrau unitário ($u(t)$)

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (6)$$

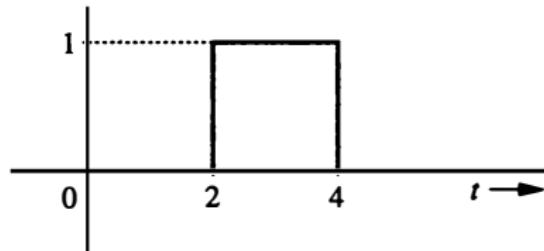
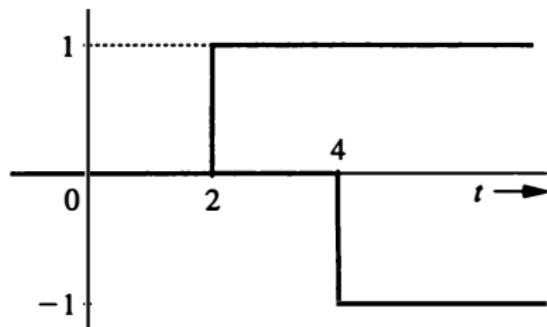


- Esse sinal também é chamado de **sinal causalizador**

Classificação de Sinais

Modelos básicos de Sinais: Sinal Degrau unitário ($u(t)$) - Composição de sinais

- Podemos unir dois degraus unitários para compor um sinal totalmente diferente, por exemplo $x(t) = u(t - 2) - u(t - 4)$

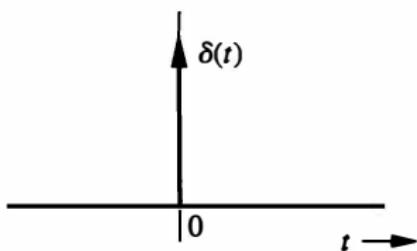


Classificação de Sinais

Modelos básicos de Sinais: Sinal Impulso unitário ($\delta(t)$)

$$\delta(t) = \begin{cases} 1 & t = 0 \\ 0 & t \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

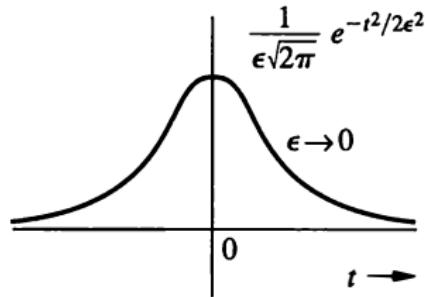
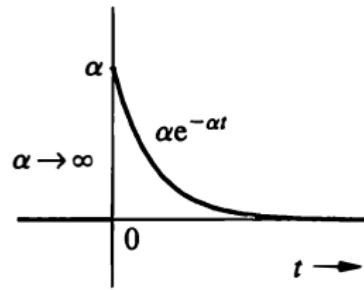
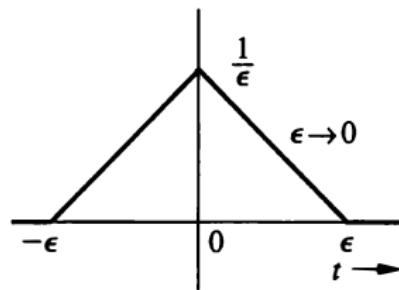
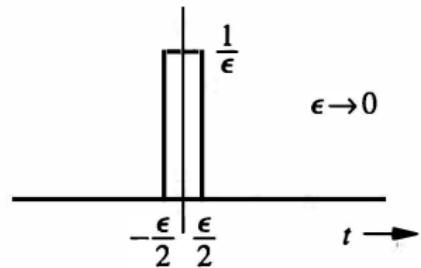
$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1 \quad (8)$$



- Esse é o impulso ideal, idealizado por **Paul Adrien Maurice Dirac**. Na prática, esse impulso é impossível de ser concebido.

Classificação de Sinais

Modelos básicos de Sinais: Sinal Impulso unitário ($\delta(t)$) - Aproximações



Classificação de Sinais

Modelos básicos de Sinais: Sinal Exponencial (e^{st})

$$s = \sigma + j\omega \quad (9)$$

$$e^{st} = e^{\sigma t + j\omega t} \quad (10)$$

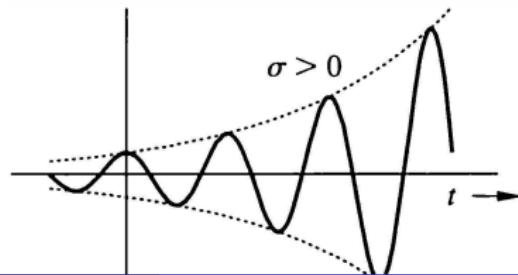
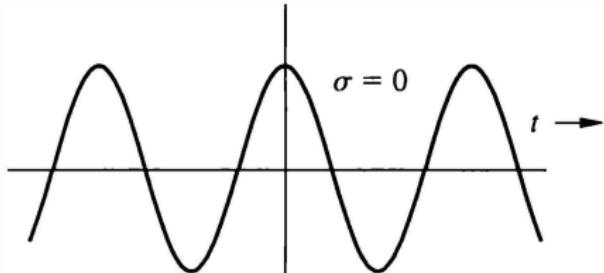
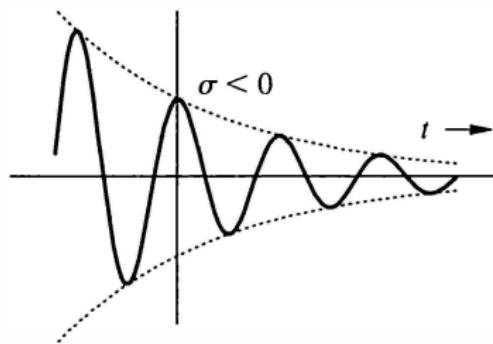
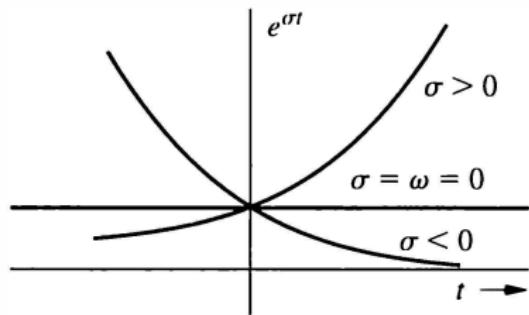
$$e^{st} = e^{\sigma t} (\cos(\omega t) + j\sin(\omega t)) \quad (11)$$

Representações mais utilizadas

- ① Valor Constante (k) $\rightarrow ke^0$ ($s = 0$)
- ② Exponencial ($e^{\sigma t}$) $\rightarrow (\omega = 0)$
- ③ Senóide ($e^{j\omega t}$) $\rightarrow (\sigma = 0)$
- ④ Senóide Descrescente $\rightarrow (\sigma < 0)$
- ⑤ Senóide Crescente $\rightarrow (\sigma > 0)$

Classificação de Sinais

Modelos básicos de Sinais: Sinal Exponencial (e^{st}) - Análise



Operações Básicas com Sinais

- Energia Total de um sinal contínuo

$$E_{x(t)} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} x^2(t) dt \quad (12)$$

- Energia Total de um sinal discreto

$$E_{x[n]} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x^2[n] \quad (13)$$

Operações Básicas com Sinais

- Potência Média de um sinal contínuo

$$P_{x(t)} = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} x^2(t) dt \quad (14)$$

- Potência Média de um sinal contínuo **periódico**

$$P_{x(t)} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} x^2(t) dt \quad (15)$$

Operações Básicas com Sinais

- Potência Média de um sinal discreto

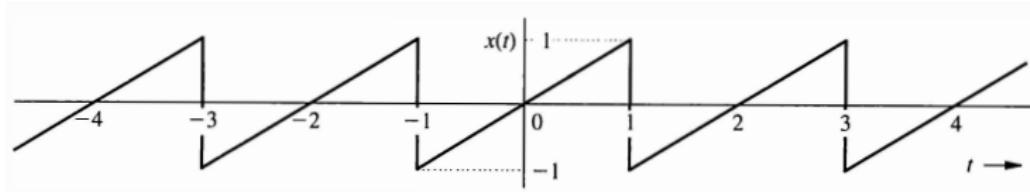
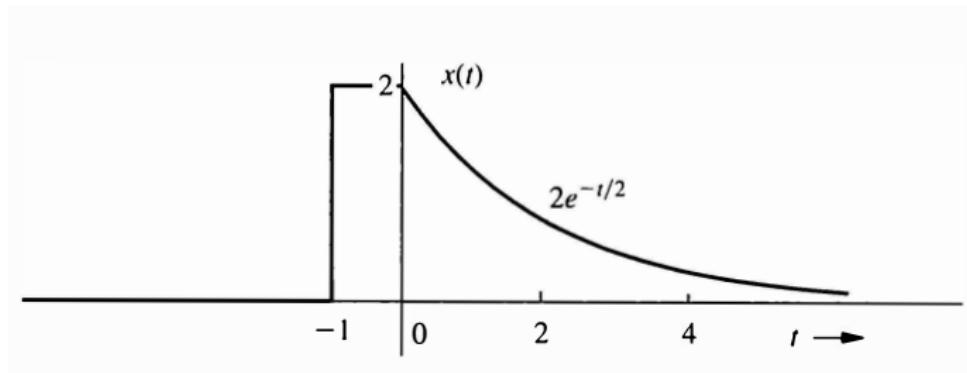
$$P_{x(t)} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N} \sum_{n=-N}^N x^2[n] \quad (16)$$

- Potência Média de um sinal discreto **periódico**

$$P_{x(t)} = \frac{1}{2N} \sum_{n=-N}^N x^2[n] \quad (17)$$

Operações Básicas de Sinais

Calcule a Energia e a Potência Média dos Sinais abaixo



Operações Básicas de Sinais

Solução:

- Para o primeiro sinal, podemos ver que para $t \rightarrow \infty$, a amplitude $\rightarrow 0$, ou seja, podemos calcular a energia da seguinte forma:

$$E_{x(t)} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2(t) dt = \int_{-1}^0 2^2 dt + \int_0^{+\infty} 4e^{-t} dt = 4 + 4 = 8 \text{ u.a.e.}$$

- Para o segundo sinal, vemos que a amplitude não tende a zero, ou seja, a energia não converge para um valor. Mas a potência média pode ser calculada através de

$$P_{x(t)} = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} x^2(t) dt = \frac{1}{2} \int_{-1}^{+1} t^2 dt = \frac{1}{3} \text{ u.a.p.}$$

Operações Básicas com Sinais

Supondo dois sinais $x_1(t)$ e $x_2(t)$

Adição de Sinais

$$y(t) = x_1(t) + x_2(t) \quad (18)$$

Multiplicação de Sinais

$$y(t) = x_1(t) \cdot x_2(t) \quad (19)$$

Mudança de Escala de Sinais

$$y(t) = \alpha \cdot x_1(t) \quad (20)$$

Operações Básicas com Sinais

Supondo um sinal $x(t)$

Diferenciação de Sinais

$$y(t) = \frac{\partial x(t)}{\partial t} \quad (21)$$

Integração de Sinais

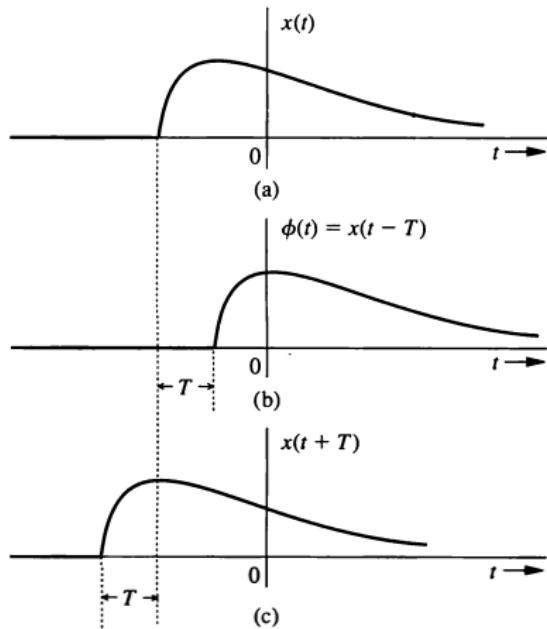
$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(t) dt \quad (22)$$

Operações Básicas com Sinais

Deslocamento no Tempo

Considere um sinal $x(t)$ (expresso na figura ao lado)

- O descolamento é expresso por:
 $x(t \pm T)$
- Na figura **b**, temos o sinal atrasado ($T < 0$)
- Na figura **c**, temos o sinal adiantado ($T > 0$)

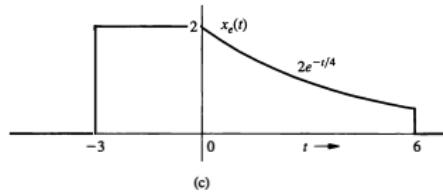
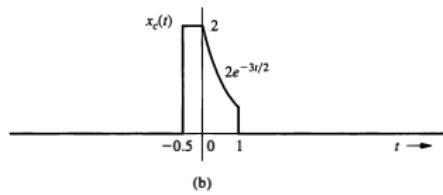
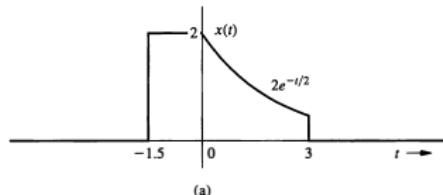


Operações Básicas com Sinais

Compactação/Expansão no Tempo

Considere um sinal $x(t)$ (expresso na figura ao lado)

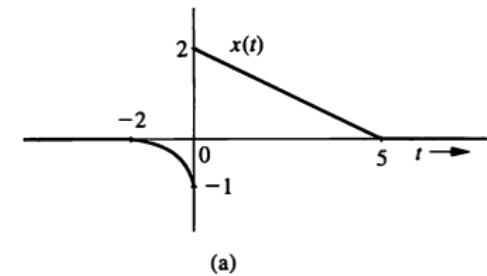
- Para $0 < \alpha < +\infty$
- A compactação é dada por $x(\alpha \cdot t)$, se $\alpha > 1$ (figura b)
- A expansão é dada por $x(\alpha \cdot t)$, se $\alpha < 1$ (figura c)



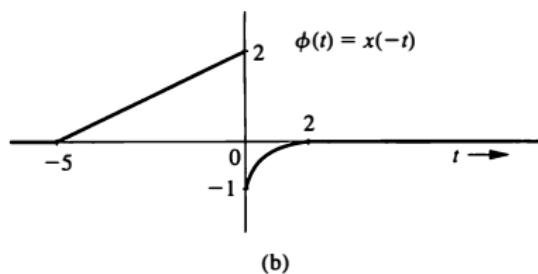
Inversão no Tempo

Considere um sinal $x(t)$ (expresso na figura ao lado)

- A inversão pode ser vista como uma complementação do processo de compactação ou expansão no tempo.
- Com $\alpha = -1$, temos a figura expressa ao lado (figura b)



(a)



(b)

Combinação entre duas ou mais operações básicas

- A combinação entre operações deve ser feito com **bastante** cuidado.
Pois o domínio e a imagem da operação deve ser observado.
- Por exemplo: $x(at - b)$, este sinal pode ser obtido de duas maneiras diferentes:
 - ① Podemos atrasar o sinal em b e depois compactar o sinal atrasado por a (uma vez que a compactação afeta somente a variável tempo)

$$x(t) \rightarrow x(t - b) \rightarrow x(at - b)$$

- ② Podemos compactar o sinal de a e depois atrasar o sinal compactado por $\frac{b}{a}$ (uma vez que o atraso afeta o argumento do sinal na sua totalidade)

$$x(t) \rightarrow x(at) \rightarrow x\left(a\left(t - \frac{b}{a}\right)\right)$$

Multiplicação por um Impulso Unitário

- Na equação 7 temos a definição do impulso unitário **ideal**. Nesta equação, vemos que para $t = 0$ o impulso unitário assume o valor 1. Com isso, podemos inferir que se um sinal $f(t)$ for multiplicado por $\delta(t)$, teremos:

$$f(t)\delta(t) = f(0)\delta(t)$$

- Ou seja, uma função contínua $f(t)$ multiplicada por um impulso unitário gera um impulso com **altura** (ou “**força**”) de $f(0)$ (valor da função na posição do impulso)
- Caso o impulso esteja atrasado de T , temos o seguinte comportamento:

$$f(t)\delta(t - T) = f(T)\delta(t - T)$$

Propriedade da Amostragem por um Impulso Unitário

- Na equação 8 temos a definição da área de impulso unitário **ideal**. De posse da equação 8 somada com a **multiplicação por um impulso unitário**, podemos montar um processo de **amostragem**. Com isso, podemos inferir que se um sinal $f(t)$ for multiplicado por $\delta(t)$ e depois integrado para todo o tempo, teremos:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\delta(t)dt = f(0) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = f(0)$$

- Caso o impulso esteja atrasado de T , temos o seguinte comportamento:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t)\delta(t-T)dt = f(T) \int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = f(T)$$

Decomposição de Sinais em partes pares e ímpares

- Todo Sinal pode ser expresso como uma soma de sinais pares e ímpares. Sendo que a sua forma final pode ser vista como:

$$x(t) = \underbrace{\frac{1}{2} [x(t) + x(-t)]}_{\text{parte par}} + \underbrace{\frac{1}{2} [x(t) - x(-t)]}_{\text{parte ímpar}}$$

Operações Básicas com Sinais

Desenhe o sinal e faça a operação pedida.

- ① $x_1(t) = \sin\left(\frac{\pi}{2}t + \frac{\pi}{2}\right)$, expandir o sinal por 2
- ② $x_2(t) = e^{-at}u(t)$, inverter o sinal no tempo
- ③ $x_3(t) = \delta(t)$, $x'_3(t) = x_3(3t - 5)$
- ④ $x_4(t) = \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right)$, multiplicação por $\delta(t)$
- ⑤ $x_5(t) = \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right)$, multiplicação por $\delta(t - 1)$ e integração no tempo
- ⑥ $x_6(t) = e^{j\omega t}$, decomposição em sinais pares e ímpares

Classificação de Sistemas

Sistemas Lineares e Sistemas Não-Lineares

- Para provar a **linearidade**, devemos provar duas características separadamente:
 - Aditividade** - É a propriedade de um sistema responder da **mesma maneira** na presença de uma ou mais entradas. Então, supondo que para a entrada $x_1(t)$, um sistema S_1 responda $y_1(t)$ e para uma entrada $x_2(t)$ o mesmo sistema responda $y_2(t)$, então a propriedade da aditividade diz que:

$$x_1(t) + x_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t) \quad (23)$$

- Homogeneidade** - É a propriedade de um sistema responder da **mesma maneira** para diferentes amplitudes de entrada. Então, supondo que para a entrada $x_1(t)$, um sistema S_1 responda $y_1(t)$, então a propriedade da homogeneidade diz que:

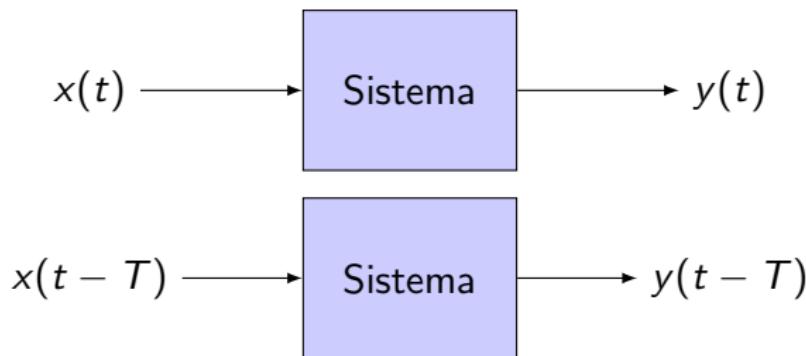
$$\alpha x_1(t) \rightarrow \alpha y_1(t) \quad (24)$$

- Sistemas que não atendem uma das propriedades acima são chamados de **Sistemas Não-Lineares**

Classificação de Sistemas

Sistemas Variantes no tempo e Sistemas Invariantes no tempo

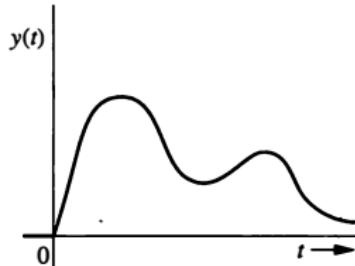
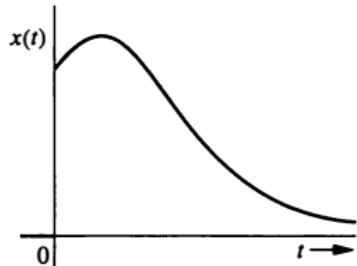
- A **propriedade da invariância no tempo** representa a capacidade do sistema não se modificar durante um intervalo de tempo T .



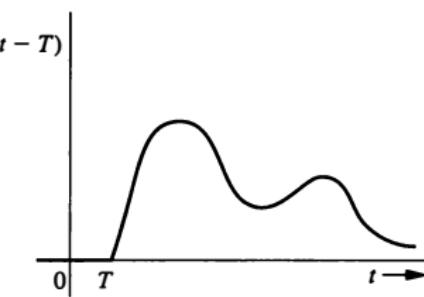
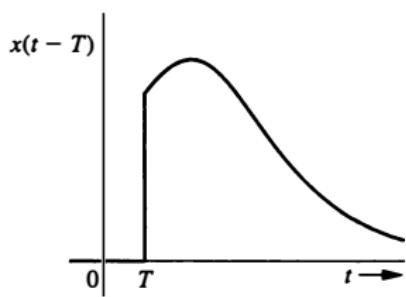
- Caso $y(t) = y(t - T)$, dizemos que o sistema é **Invariante no Tempo**.

Classificação de Sistemas

Sistemas Variantes no tempo e Sistemas Invariantes no tempo



(a)



(b)

Sistemas Instantâneos e Sistemas Dinâmicos

- **Sistemas Instantâneos** - Sistemas que dependem apenas do instante de tempo t para gerar a resposta $y(t)$. Também são chamados de **Sistemas sem Memória**, pois entradas anteriores ao tempo t são irrelevantes para a resposta $y(t)$.
- **Sistemas Dinâmicos** - Sistemas que dependem de instantes de tempo T anteriores a t para gerar a resposta $y(t)$ são chamados de **Sistemas Dinâmicos ou com memória**. Podemos ter sistemas com memória **finita** (sistemas digitais de processamento de sinais) ou memória **infinita** (sistemas analógicos de processamento de sinais).

Classificação de Sistemas

Sistemas Causais e Sistemas não-Causais

- **Sistemas Causais** (ou Sistemas Físicos ou Sistemas Não-Antecipativos) são sistemas que geram a resposta $y(t)$ somente dependendo de instantes de tempo anteriores a t .
- **Sistemas não-Causais** (ou Sistemas Antecipativos) são sistemas que geram a resposta $y(t)$ com alguma dependência de instantes de tempo posteriores a t .
- Ex: $y(t) = x(t - 2)$ é um sistema causal (a saída $y(t)$ depende apenas da entrada no instante no instante $t - 2$)
- Ex: $y(t) = x(t - 2) + x(t + 2)$ é um sistema não-causal (a saída $y(t)$ depende da entrada no instante no instante $t - 2$ e no instante $t + 2$, ou seja no futuro)
- Na prática, sistemas reais não podem ser não-causais, pois teríamos que fazer uma **predição** dos valores da entrada no **futuro**, o que geraria um erro de estimativa inerente ao processo (tornando o projeto inviável).

Classificação de Sistemas

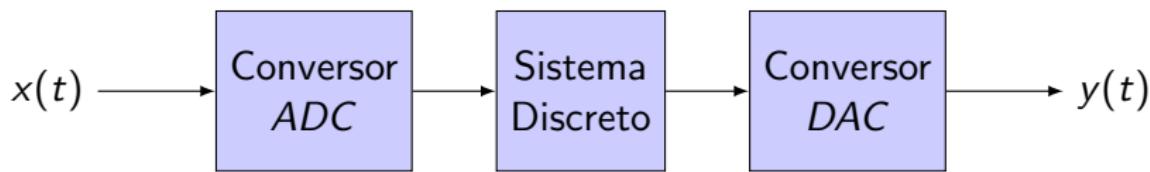
Sistemas de tempo contínuo e Sistemas de tempo discreto

- **Sistemas em tempo contínuo** são sistemas que operam em tempo contínuo
- **Sistemas em tempo discreto** são sistemas que operam em tempo discreto

Sistemas Analógicos e Sistemas Digitais

- **Sistemas Analógicos** são sistemas que operam em sinais analógicos
- **Sistemas Digitais** são sistemas que operam em sinais digitais

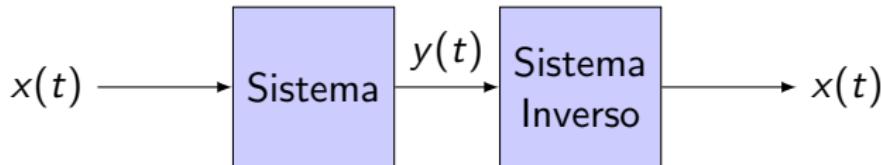
Sinais em tempo contínuo analógicos **podem** ser processados em sistemas digitais e de tempo discreto



Classificação de Sistemas

Sistemas Inversíveis e Sistemas Não-Inversíveis

- Se um sistema S processa um conjunto de operações que pode ser **desfeito**, este sistema é chamado **sistema inversível**. Ex:
 $y(t) = 2 \cdot x(t)$.
- O sistema que processa o conjunto **inverso** de operações é chamado de **sistema inverso** de S



- Se um sistema S processa um conjunto de operações que não pode ser **desfeito** (distorcendo o sinal **permanentemente**), este sistema é chamado de **sistema não-inversível**. Ex: $y(t) = |x(t)|$

Sistemas Estáveis e Sistemas Instáveis

- Sistemas Estáveis: Estabilidade Interna vs. Estabilidade Externa
 - Estabilidade Externa: Toda **entrada limitada gera saída limitada**, chamada de estabilidade **BIBO** (*bounded input - bounded output*)
 - Estabilidade Interna: Depende da estabilidade das variáveis internas do sistema (a serem analisadas mais profundamente posteriormente)
- Caso o sistema não apresente uma das estabilidades acima, o mesmo será considerado **instável** no sentido da estabilidade rompida.

Classificação de Sistemas

Responda a afirmativa, justificando (onde $y(t)$ é a saída e $x(t)$ é a entrada):

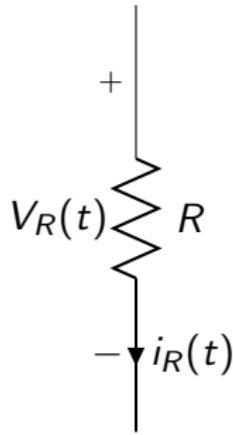
- ① $y(t) = x^2(t)$, é linear?
- ② $y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau$, é instantâneo?
- ③ $y(t) = \frac{1}{3}(x(t) + x(t - 1) + x(t - 2))$, é linear?
- ④ $y(t) = x(t) + n(t)$, onde $n(t)$ é ruído, é inversível?
- ⑤ $y(t) = \int_t^{+\infty} x(\tau) d\tau$, é causal?
- ⑥ $y(t) = \alpha^t x(t)$, onde $\alpha \leq 1$, é instável?

Leis de Kirchhoff

- Foram desenvolvidas pelo físico alemão **Gustav Robert Kirchhoff**
 - ① LKC - *Lei de Kirchhoff das Correntes ou Lei dos Nós*: Em um nó, a soma das correntes elétricas que entram é igual à soma das correntes que saem, ou seja, um nó não acumula carga.
 - ② LKT - *Lei de Kirchhoff das Tensões ou Lei das Malhas*: A soma algébrica das tensões em um percurso fechado é nula.

Equações Características de Componentes Elétricos

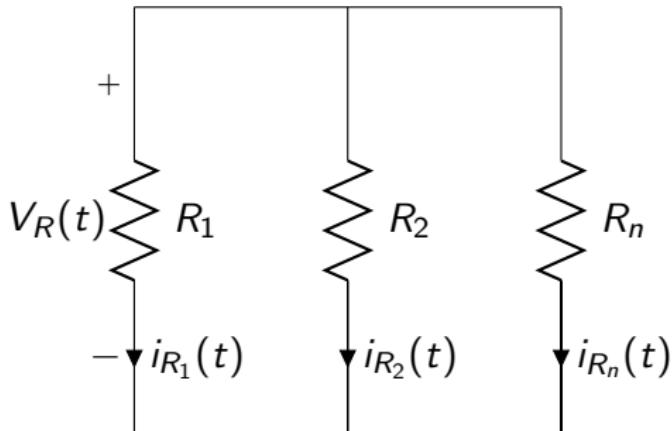
- Resistor (R)
- Unidade: Ohm (Ω)
- Lei de Ohm



$$V_R(t) = R \cdot i_R(t) \quad (25)$$

Equações Características de Componentes Elétricos

- Associação de Resistores

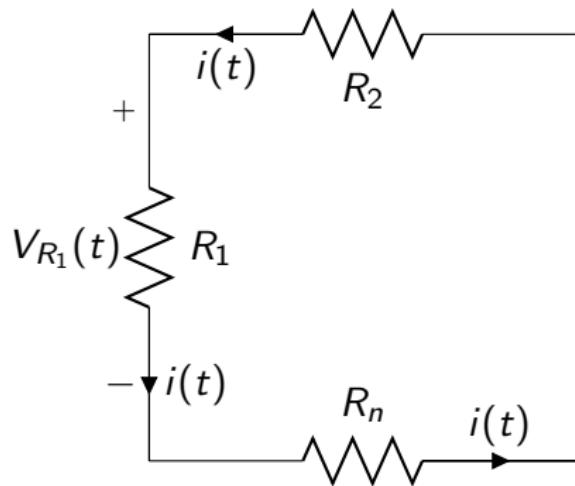


$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (26)$$

Modelagem de Sistemas Elétricos

Equações Características de Componentes Elétricos

- Associação de Resistores



$$R_{eq} = R_1 + R_2 + \cdots + R_n \quad (27)$$

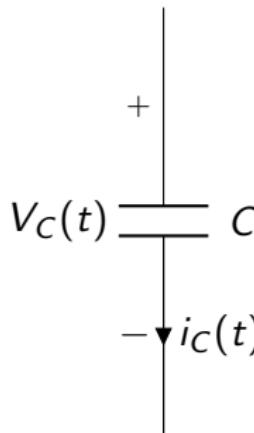
Modelagem de Sistemas Elétricos

Equações Características de Componentes Elétricos

- Capacitor (C)
- Unidade: Faraday (F)

Quantidade de Carga:

$$q(t) = C \cdot V_C(t) \quad (28)$$



Corrente em um Capacitor

$$i_C(t) = \frac{\partial q(t)}{\partial t} = C \frac{\partial V_C(t)}{\partial t} \quad (29)$$

Tensão em um Capacitor

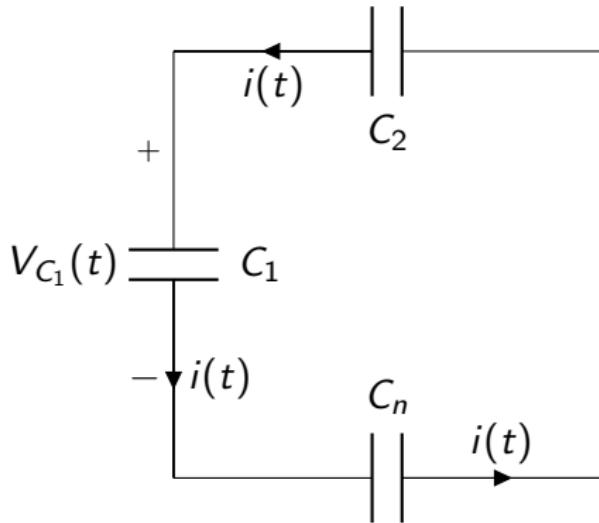
$$V_C(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i_C(t) dt \quad (30)$$

Energia armazenada

$$E_C(t) = \frac{C \cdot V^2(t)}{2} \quad (31)$$

Equações Características de Componentes Elétricos

- Associação de Capacitores

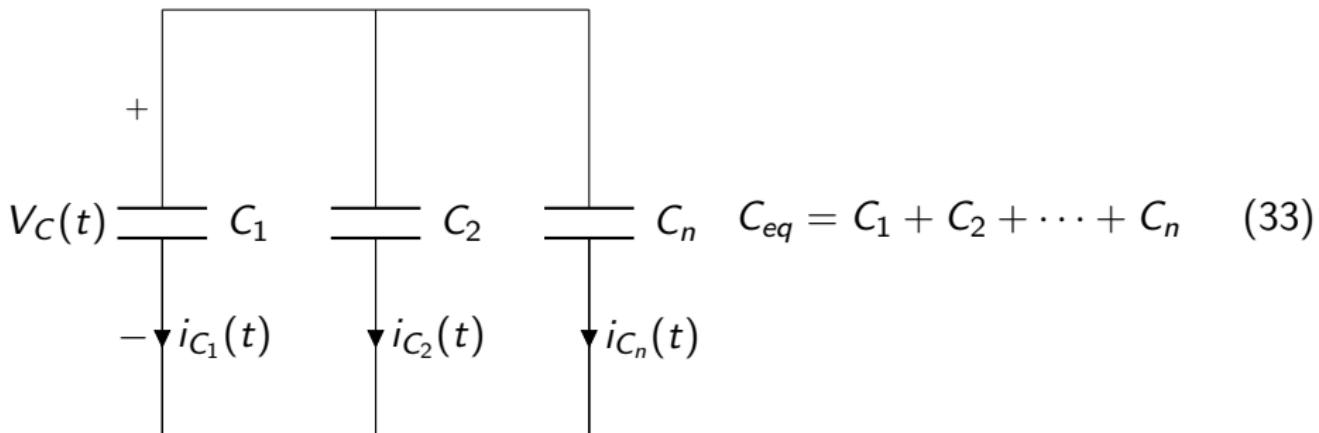


$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (32)$$

Modelagem de Sistemas Elétricos

Equações Características de Componentes Elétricos

- Associação de Capacitores



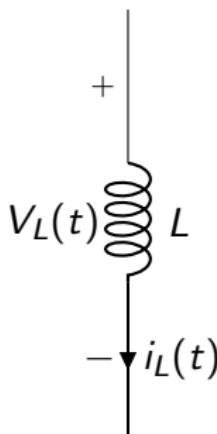
Modelagem de Sistemas Elétricos

Equações Características de Componentes Elétricos

- Indutor (L)
- Unidade: Henry (H)

Quantidade de Carga:

$$\phi(t) = L \cdot i_L(t) \quad (34)$$



Tensão em um Indutor

$$V_L(t) = \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} = L \frac{\partial i_L(t)}{\partial t} \quad (35)$$

Tensão em um Capacitor

$$i_L(t) = \frac{1}{L} \int_{-\infty}^t V_L(t) dt \quad (36)$$

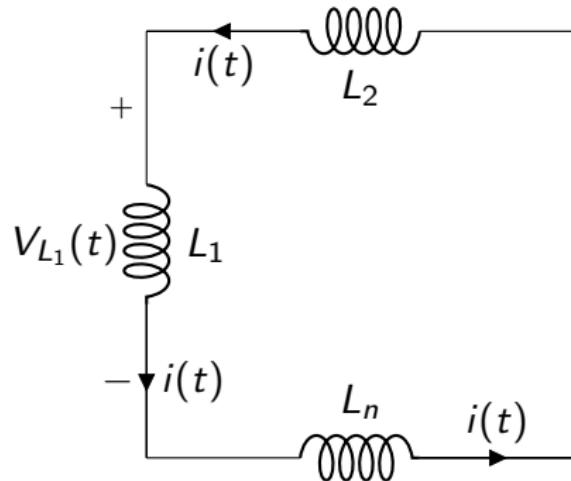
Energia armazenada

$$E_L(t) = \frac{L \cdot i_L^2(t)}{2} \quad (37)$$

Modelagem de Sistemas Elétricos

Equações Características de Componentes Elétricos

- Associação de Indutores

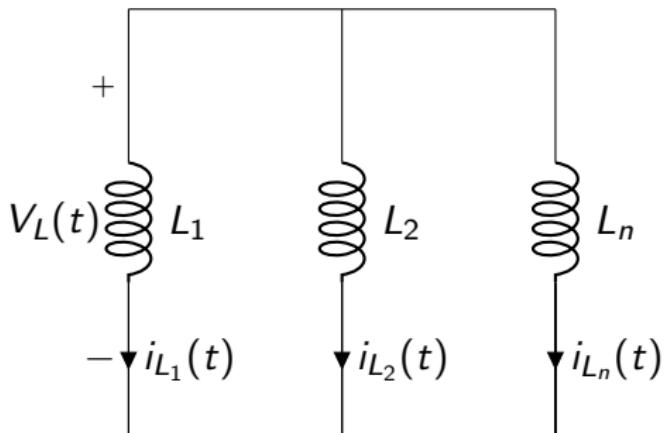


$$L_{eq} = L_1 + L_2 + \dots + L_n \quad (38)$$

Modelagem de Sistemas Elétricos

Equações Características de Componentes Elétricos

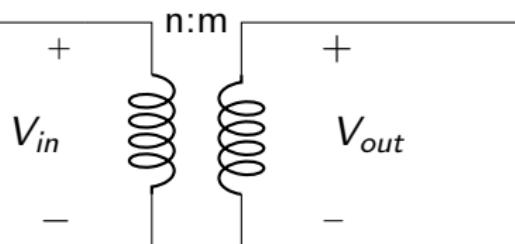
- Associação de Indutores



$$\frac{1}{L_{eq}} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} \quad (39)$$

Equações Características de Componentes Elétricos

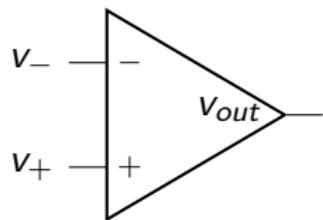
- Transformador Ideal



$$\frac{V_{in}}{V_{out}} = \frac{n}{m} = \frac{i_{out}}{i_{in}} \quad (40)$$

Equações Características de Componentes Elétricos

- Amplificador Operacional



$$v_{out} = A_v(v_+ - v_-) \quad (41)$$

Para análise:

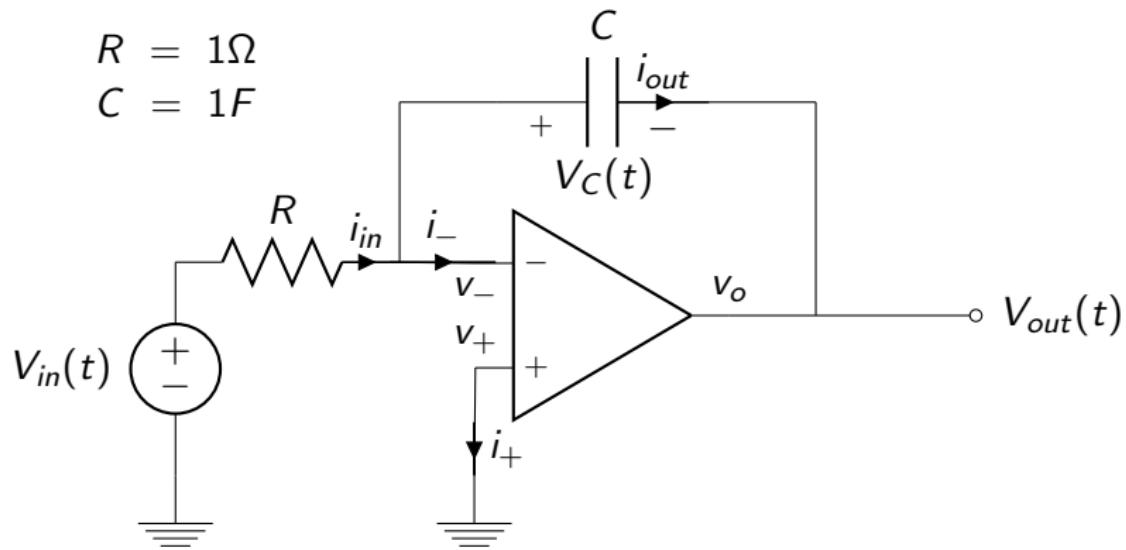
$$v_+ = v_-$$

$$A_v \rightarrow +\infty$$

Modelagem de Sistemas Elétricos

Modelagem de Circuitos

Modele o circuito abaixo



- Para a análise, vamos considerar **SLIT Diferenciais**.
- Supondo $x(t)$ como entrada e $y(t)$ como saída.
- Assim sendo, podemos descrever a relação entrada e saída como:

$$\frac{\partial^N y(t)}{\partial t^N} + a_1 \frac{\partial^{N-1} y(t)}{\partial t^{N-1}} + \cdots + a_{N-1} \frac{\partial y(t)}{\partial t} + a_N y(t) = \\ b_{N-M} \frac{\partial^M x(t)}{\partial t^M} + b_{N-M+1} \frac{\partial^{M-1} x(t)}{\partial t^{M-1}} + \cdots + b_{N-1} \frac{\partial x(t)}{\partial t} + b_N x(t)$$

Operador Linear Diferencial

- Vamos definir o Operador Linear Diferencial D
- $D = \frac{\partial}{\partial t}$
- $D^2 = \frac{\partial^2}{\partial t^2}$
- $D^N = \frac{\partial^N}{\partial t^N}$
- $Dx(t) = \frac{\partial x(t)}{\partial t}$

- Com essa definição, podemos reescrever a equação

$$\begin{aligned} & \left(D^N + a_1 D^{N-1} \cdots a_{N-1} D + a_N \right) y(t) = \\ & \left(b_{N-M} D^M + b_{N-M+1} D^{M-1} \cdots b_{N-1} D + b_N \right) x(t) \end{aligned}$$

- Fazendo:

$$Q(D) = D^N + a_1 D^{N-1} \cdots a_{N-1} D + a_N \quad (42)$$

$$P(D) = b_{N-M} D^M + b_{N-M+1} D^{M-1} \cdots b_{N-1} D + b_N \quad (43)$$

- temos:

$$Q(D)y(t) = P(D)x(t) \quad (44)$$

- Teoricamente, N e M podem assumir quaisquer valores.
- Embora, por considerações **práticas**, $M > N$ não é desejável.
- Com $M > N$ temos uma maior possibilidade de **instabilidade**
- Com $M > N$ temos uma tendência a amplificação de ruído.

- Como o Sistema é Linear, podemos decompor a saída total do sistema em **duas** partes distintas

$$y(t) = y_{\text{Entrada Zero}}(t) + y_{\text{Estado Zero}}(t) \quad (45)$$

- $y_{\text{Entrada Zero}}(t)$ é o componente da resposta que não depende da **entrada** do sistema. Geralmente, pode ser obtida na saída do sistema com $x(t) = 0$. Majoritariamente regida pelas condições iniciais do sistema.
- $y_{\text{Estado Zero}}(t)$ é o componente da resposta que não depende do **estado** do sistema. Geralmente, pode ser obtida na saída do sistema com a entrada sendo aplicada e o sistema totalmente relaxado.

Resposta à Entrada Zero

- Na equação 44, podemos ver a resposta à Entrada Zero como:

$$Q(D)y(t) = 0 \quad (46)$$

- Ou seja, a equação 44 se torna:

$$\left(D^N + a_1 D^{N-1} + \dots + a_{N-1} D + a_N \right) y(t) = 0 \quad (47)$$

- Assim devemos ter um comportamento **bastante peculiar**, onde a composição linear de $y(t)$ e suas derivadas deve ser zero.

Resposta à Entrada Zero

- Algumas funções se encaixam no comportamento descrito.
- Uma proposta: $y(t) = ce^{\lambda t}$
- $\frac{\partial y(t)}{\partial t} = c\lambda e^{\lambda t}$
- $\frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2} = c\lambda^2 e^{\lambda t}$
- $\frac{\partial^N y(t)}{\partial t^N} = c\lambda^N e^{\lambda t}$

Resposta à Entrada Zero

- Então

$$Q(D)y(t) = \left(D^N + a_1 D^{N-1} + \dots + a_{N-1} D + a_N \right) y(t) = 0$$

- se torna:

$$c \left(\lambda^N + a_1 \lambda^{N-1} + \dots + a_{N-1} \lambda + a_N \right) e^{\lambda t} = 0 \quad (48)$$

- Como $e^{\lambda t}$ não assume o valor zero, então:

$$\lambda^N + a_1 \lambda^{N-1} + \dots + a_{N-1} \lambda + a_N = 0 \quad (49)$$

- Podendo ser reescrito como:

$$Q(\lambda) = 0 \quad (50)$$

Resposta à Entrada Zero - Raízes Distintas

- Se pudermos reescrever a equação 49, como:

$$Q(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)(\lambda - \lambda_2) \cdots (\lambda - \lambda_N) = 0 \quad (51)$$

- É possível ver que a equação acima, possui N soluções, a saber:
 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$
- Cada uma das soluções, gera uma resposta $y_{\text{Entrada Zero}}(t)$, ou seja:

$$y_{\text{Entrada Zero}}(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t} + \cdots + c_N e^{\lambda_N t} \quad (52)$$

- Onde c_1, c_2, \dots, c_N são constantes arbitrárias que serão **definidas** baseadas nas **condições iniciais do sistema**

Resposta à Entrada Zero - Raízes Repetidas

- Para o caso de raízes repetidas, o efeito sobre a resposta se torna um pouco diferente.
- Supondo uma raiz que se repete r vezes, então temos:

$$Q(\lambda) = (\lambda - \lambda_1)^r = 0 \quad (53)$$

- Para $r = 2$, podemos ver que a solução se torna:

$$y(t) = c_{11}e^{\lambda_1 t} + c_{12}te^{\lambda_1 t} \quad (54)$$

- Por generalização, para r não especificado:

$$y(t) = c_{11}e^{\lambda_1 t} + c_{12}te^{\lambda_1 t} + \cdots + c_{1r}t^{r-1}e^{\lambda_1 t} \quad (55)$$

Resposta à Entrada Zero - Raízes Imaginárias

- No caso de sistemas reais, **raízes imaginárias** podem ocorrer. Embora que esse fenômeno só possa ocorrer da seguinte maneira: **duas raízes imaginárias complexas conjugadas**.
- Por exemplo: se $\alpha + j\beta$ for raiz, então $\alpha - j\beta$ também será.
- Ou seja:

$$y(t) = c_1 e^{(\alpha+j\beta)t} + c_2 e^{(\alpha-j\beta)t} \quad (56)$$

- Para um sistema real, a resposta $y(t)$ deve ser real, e isso só é possível se:

$$c_1 = \frac{c}{2} e^{j\theta}$$

$$c_2 = \frac{c}{2} e^{-j\theta}$$

- Assim sendo:

$$y(t) = ce^{\alpha t} \cos(\beta t + \theta) \quad (57)$$

Encontre a resposta à entrada zero dos sistemas abaixo

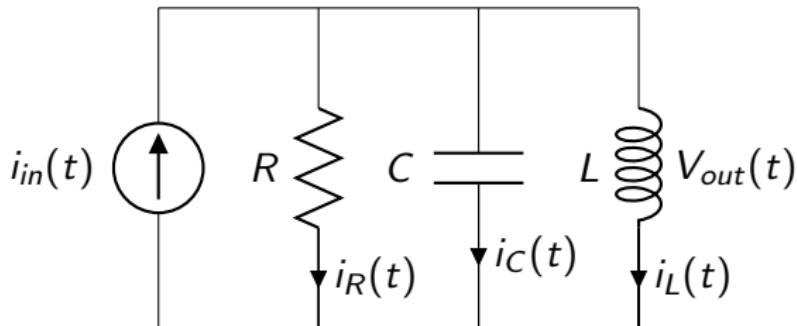
① $\frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2} + 5 \frac{\partial y(t)}{\partial t} + 6y(t) = x(t)$

② $\frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2} + 3 \frac{\partial y(t)}{\partial t} + 2y(t) = x(t)$

③ $\frac{\partial^2 y(t)}{\partial t^2} + 4 \frac{\partial y(t)}{\partial t} + 4y(t) = x(t)$

Análise de Sistemas no Domínio do Tempo

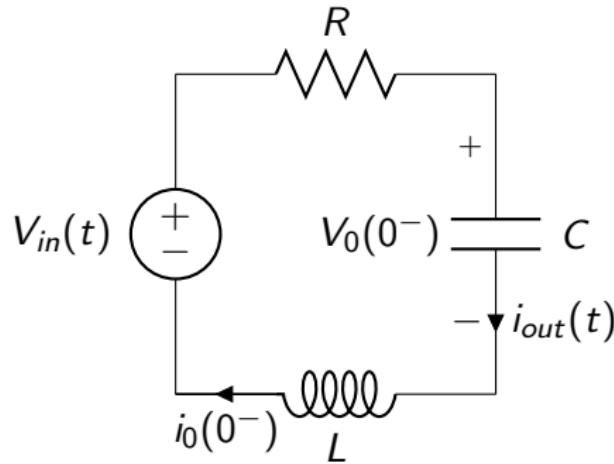
Equacione e encontre a resposta a entrada zero dos circuitos abaixo:



Suponha: $R = 1$, $C = 1$, $L = 1$, $V_C(0^-) = 1V$ e $i_L(0^-) = 1A$

Análise de Sistemas no Domínio do Tempo

Equacione e encontre a resposta a entrada zero dos circuitos abaixo:



Suponha: $R = 1$, $C = 1$, $L = 1$, $V_C(0^-) = 1V$ e $i_L(0^-) = 1A$

Resposta à Entrada Zero - Estabilidade

- Para uma análise rápida de estabilidade, podemos verificar a posição das raízes do polinomio característico do sistema.

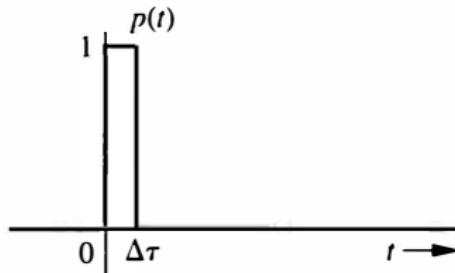
	Raízes Simples	Raízes Repetidas	Raízes Imaginárias (parte)
$\lambda > 0$	Instável	Instável	Instável
$\lambda = 0$	Assin. Estável	Instável	Instável
$\lambda < 0$	Estável	Estável	Estável

Resposta ao Estado Zero

- Para a análise da resposta ao **Estado Zero**, supomos que o sistema está relaxado, ou seja, condições iniciais (**CI's**) iguais a zero.
- Outra definição a ser adotada é a definição temporal de entrada
 - O Instante de tempo $t = 0^-$ é chamado de instante de tempo **imediatamente anterior** a entrada
 - O instante de tempo $t = 0^+$ é chamado de instante de tempo **imediatamente posterior** a entrada
 - O instante de tempo $t = 0$ é chamado de instante de tempo onde a entrada foi aplicada
- Para facilitar a análise, vamos trabalhar com a **resposta do sistema ao impulso unitário**

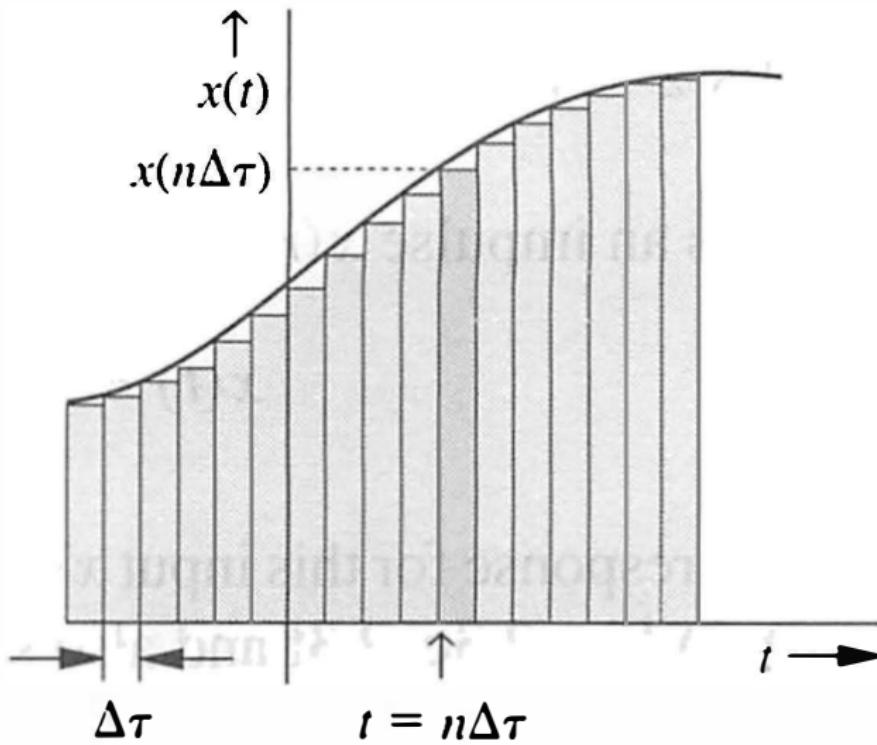
Resposta ao Impulso Unitário - $h(t)$

- Suponha uma função $p(t)$ com altura unitária, largura $\Delta\tau$ e que se inicia em $t = 0$



- Sendo assim, poderíamos decompor o um sinal $x(t)$ na soma de infinitos pulsos $p(t)$

Resposta ao Impulso Unitário - $h(t)$



Resposta ao Impulso Unitário - $h(t)$

- Assim, uma possível representação para $x(t)$ (decomposto por $p(t)$) é

$$x(t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_n x(n\Delta\tau) p(t - n\Delta\tau) \quad (58)$$

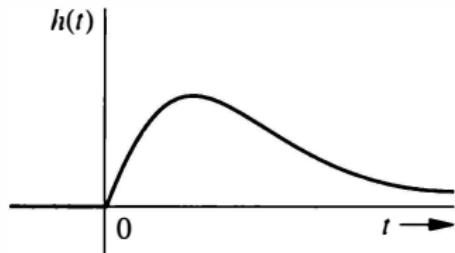
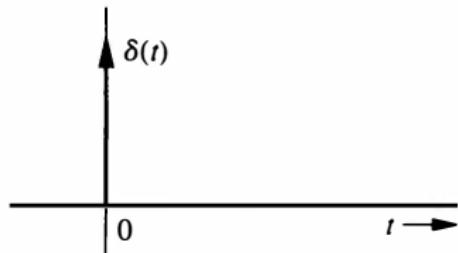
- Multiplicando-se e dividindo-se a equação 58 por $\Delta\tau$, temos:

$$x(t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_n \left[\frac{x(n\Delta\tau)}{\Delta\tau} \right] p(t - n\Delta\tau) \Delta\tau \quad (59)$$

- Na equação 59, o termo $\left[\frac{x(n\Delta\tau)}{\Delta\tau} \right] p(t - n\Delta\tau)$ representa um pulso de $p(t - n\Delta\tau)$ com altura $\left[\frac{x(n\Delta\tau)}{\Delta\tau} \right]$, ou seja, sua área é igual a $x(n\Delta\tau)$
- No limite, temos que $\left[\frac{x(n\Delta\tau)}{\Delta\tau} \right] p(t - n\Delta\tau)$, se torna $x(n\Delta\tau)\delta(t - n\Delta\tau)$

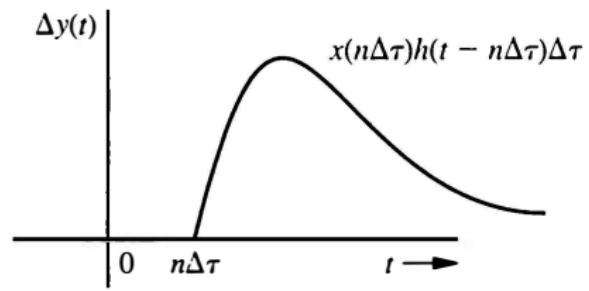
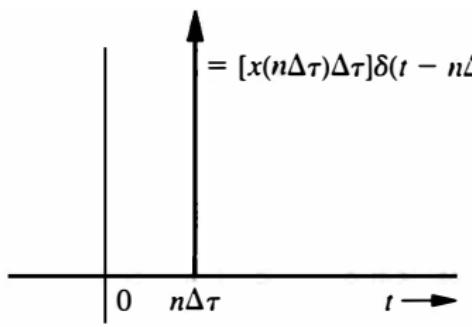
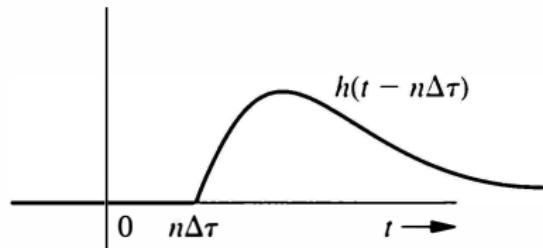
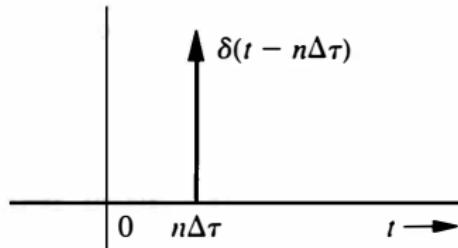
Resposta ao Impulso Unitário - $h(t)$

- Como podemos decompor todos os sinais como um somatório de impulsos atrasados, podemos determinar somente a resposta a um único impulso, e isso será suficiente para encontrarmos a resposta a toda a entrada.



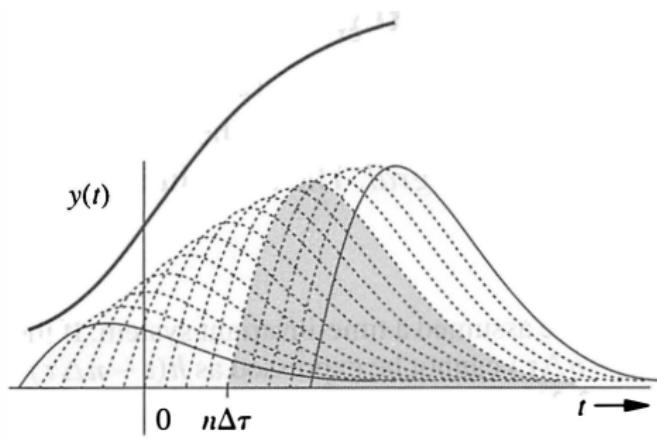
Análise de Sistemas no Domínio do Tempo

Resposta ao Impulso Unitário - $h(t)$



Resposta ao Impulso Unitário - $h(t)$

- A decomposição completa é feita quando somamos a influência de cada uma das respostas impulsas e pode ser vista abaixo.



Integral de Convolução

- $x(n\Delta\tau)\delta(t - n\Delta\tau)$ representa apenas a influência da entrada no instante $t = n\Delta\tau$ na saída (que pode ser influenciada por entradas aplicadas em outros instantes de tempo)
- Para encontrarmos toda a saída devemos fazer o somatório de todas as influências geradas por todas as entradas
- Se $\delta(t)$ gera uma saída $h(t)$ e o sistema é um **SLIT**, podemos observar que

$$y(t) = \lim_{\Delta\tau \rightarrow 0} \sum_n x(n\Delta\tau)h(t - n\Delta\tau) \quad (60)$$

- No limite, temos a chamada **Integral de Convolução**, e pode ser vista abaixo:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (61)$$

Integral de Convolução

- A integral de convolução representa um passo muito grande para a análise de SLIT.
- Uma interpretação para a equação 61 é: **Para determinarmos a saída de um SLIT à qualquer entrada, basta que conheçamos a saída do sistema para entrada impulso unitário**
- A resposta $h(t)$ pode ser vista como o comportamento do sistema a uma entrada infinitesimal (que em teoria tem todos as frequências representadas)
- $h(t)$ pode também ser vista como os **modos naturais de um sistema** ou **modos normais de um sistema**

Propriedades da Convolução

Propriedade de Comutatividade

$$x_1(t) * x_2(t) = x_2(t) * x_1(t) \quad (62)$$

Propriedade Distributiva

$$x_1(t) * [x_2(t) + x_3(t)] = x_1(t) * x_2(t) + x_1(t) * x_3(t) \quad (63)$$

Propriedade Associativa

$$x_1(t) * [x_2(t) * x_3(t)] = [x_1(t) * x_2(t)] * x_3(t) \quad (64)$$

Propriedades da Convolução

Propriedade do Deslocamento no Tempo

$$x_1(t) * x_2(t) = c(t)$$

Então:

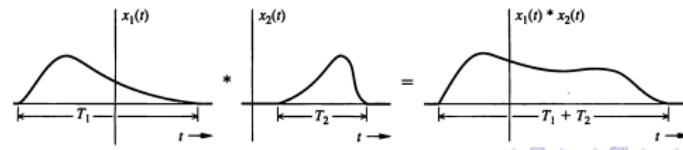
$$x_1(t) * x_2(t - T) = x_1(t - T) * x_2(t) = c(t - T) \quad (65)$$

Convolução com um impulso

$$x_1(t) * \delta(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(\tau) \delta(t - \tau) d\tau = x_1(t)$$

Propriedade Largura da Convolução

- Suponha $x_1(t)$ com largura T_1 e $x_2(t)$ com largura T_2
- Então $x_1(t) * x_2(t)$ possui largura $T_1 + T_2$



Convolução Gráfica

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_1(\tau)x_2(t - \tau)d\tau$$

O procedimento para a fazer a interpretação da convolução graficamente é

- ① Fixar um dos sinais (pela propriedade 62 não fará diferença qual dos dois) $\rightarrow x_1(\tau)$
- ② Espelhe o sinal não fixada $\rightarrow x_2(-\tau)$
- ③ Desloque o sinal não fixado em t_0 segundos $\rightarrow x_2(t_0 - \tau)$
- ④ Faça o produto entre os sinais $\rightarrow x_1(\tau) \cdot x_2(t_0 - \tau)$
- ⑤ Encontre a área sob a curva do produto
- ⑥ O valor da **área** é o valor da convolução para o instante t_0
- ⑦ Repita os passos 3 – 6 para todos os valores possíveis de t

Estabilidade pela Convolução - BIBO Estável

- Se a saída de um sistema é dada por:

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau)x(t - \tau)d\tau$$

- Ou seja:

$$|y(t)| \leq \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)||x(t - \tau)|d\tau$$

- Como $x(t)$ é limitadada (BIBO), $|x(t - \tau)| \leq K < +\infty$, assim:

$$|y(t)| \leq K \int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)|d\tau$$

- Para estabilidade:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |h(\tau)|d\tau \leq +\infty$$

Faça $x_1(t) * x_2(t)$ para:

- ① $x_1(t) = u(t)$ e $x_2(t) = \delta(t - T)$
- ② $x_1(t) = u(t)$ e $x_2(t) = u(t)$
- ③ $x_1(t) = u(t) - u(t - 2)$ e $x_2(t) = u(t) - u(t - 3)$

Transformada de Laplace

Análise de Sistemas no Domínio das Frequências Complexas

Resposta em Frequências de um Sistema Linear

Transformada de Fourier

Análise de Sistemas no Domínio das Frequências

Referências Bibliográficas I

- [1] B. P. Lathi, *Linear Systems and Signals*.
Oxford, UK: Oxford University Press, 2nd ed., 2009.
- [2] A. V. Oppenheim, A. S. Willsky, and S. H. Nawab, *Signals & Systems (2Nd Ed.)*.
Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, Inc., 1996.
- [3] C.-T. Chen, *Linear System Theory and Design*.
New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc., 3rd ed., 1998.
- [4] W. M. Siebert, *Circuits, Signals, and Systems*.
Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1986.