UNIVERSIDADE DE COIMBRA

FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE COMPUTADORES

CONTROLO DIGITAL

AULAS TEÓRICAS

"SLIDES"

2019/2020

URBANO J.C. NUNES

ÍNDICE

ÍNDICE

BIBLIOGRAFIA

1 G. F. Franklin, J. Powell, and M. Workman, "*Digital Control of Dynamic Systems*", 3ª edição, Addison – Whesley, 1997.

2 K. J. Astrom and B. Wittenmark, "*Computer-Controlled Systems: Theory and Design*", 3ª edição, Prentice-Hall, 1998.

3 U. Nunes, "*Controlo Digital: Exercícios Resolvivos, Exemplos em Matlab/Simulink*", apontamentos de apoio às aulas práticas, 2005.

4 K. Ogata, "*Modern Control Engineering*", Prentice – Hall.

5 B.P. Lathi, "*Linear Systems and Signals*".

6 J. Dabney and T. Harman, "*Mastering Simulink 2*", Prentice - Hall, Matlab Curriculum series, 1998.

7 Diversos documentos (tutoriais, manuais de Matlab e Simulink, etc) disponibilizados no inforestudante.

AULAS PRÁTICAS

- Aulas TP/Práticas (2h/semana)

- Nas aulas práticas os alunos exercitam os conceitos lecionados na componente teórica através da realização de trabalhos de simulação em ambiente Matlab/Simulink.

- Os alunos têm acesso a um conjunto vasto de problemas teórico-práticos resolvidos e outros para resolução.

AULAS PRÁTICAS

- Controlo de presenças
- Realização de trabalhos em ambiente Matlab/Simulink
- Resolução de exercícios teórico/práticos

MÉTODO DE AVALIAÇÃO

- Componentes de avaliação T/TP/PL :

- Testes incluem componente de avaliação dos PL/Simulação realizados nas aulas PL;

- Mini-testes nas aulas T/PL (2 val.) (T/TP/PL)

- Mini-projeto (facultativo; 6 val.)

- Datas dos testes/exames de avaliação (incluem componentes T/TP/PL):

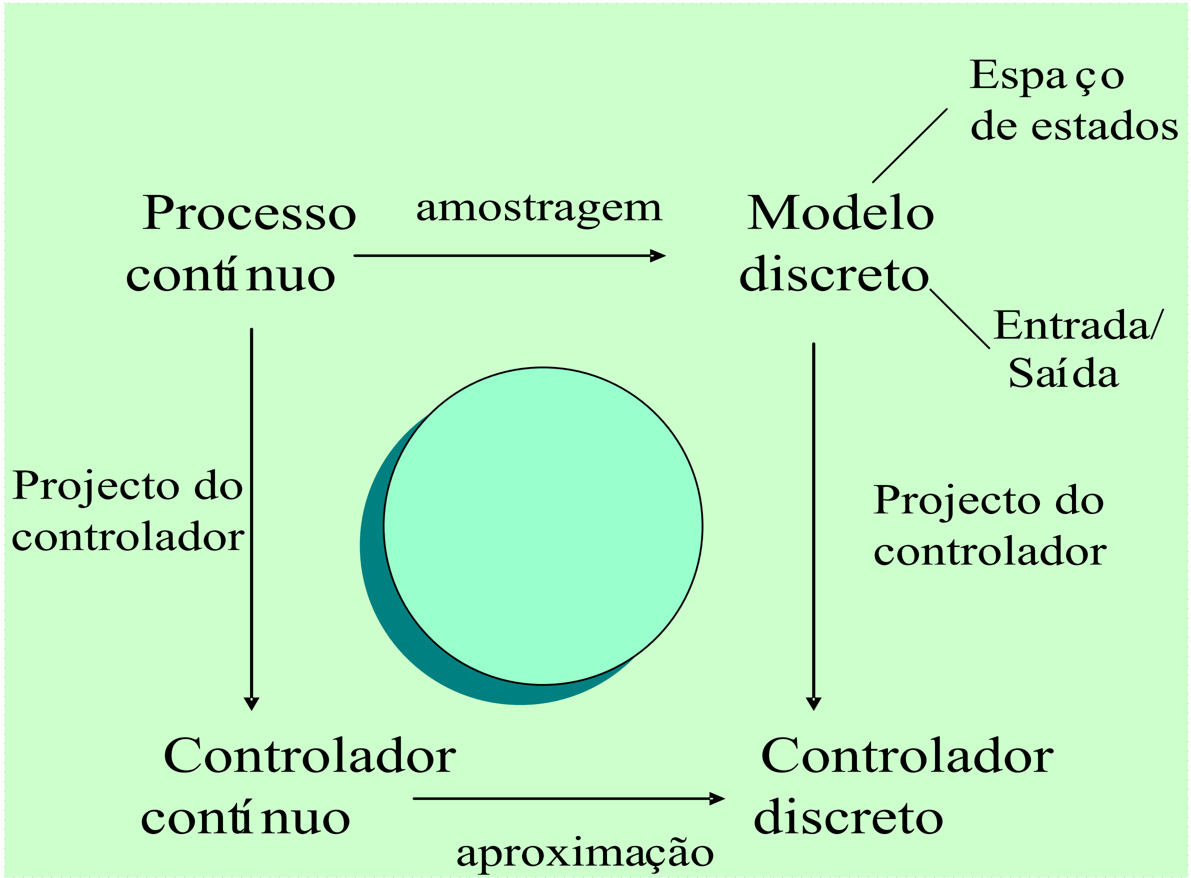
- 1º teste/1a freq: 13/nov/2019 13/11 (inclui T/TP/PL) (9 val)

- 2º teste/2a freq: jan 2020 (inclui T/TP/PL) (9 val)

- Exame de recurso: data a definir (inclui T/TP/PL) (14 ou 20 val)

CAPÍTULO I

SISTEMAS LINEARES INVARIANTES NO TEMPO CONTÍNUOS: REVISÕES



PROJECTO DO CONTROLADOR:

- Colocação de pólos
- LQC
- Métodos clássicos
- etc.

SINAIS CONTÍNUOS

Sinusóide Generalizada: $e^{st} = e^{(\sigma + j\omega)t}$ exponencial complexa

Uma sinusóide convencional é um sinal oscilatório de amplitude constante. Podemos generalizar a noção de sinusóide para incluir sinusóides com amplitudes exponenciais

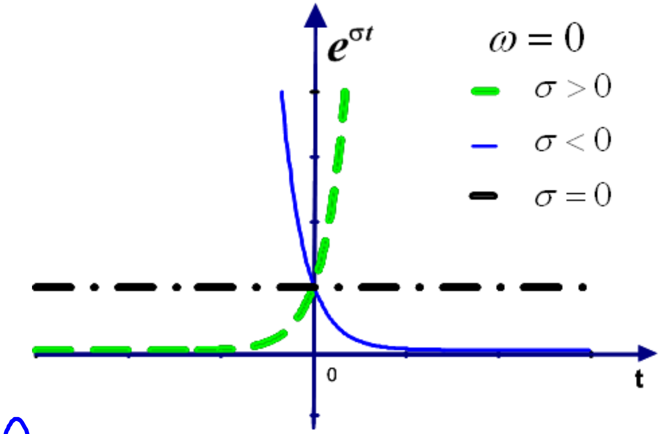
$$x(t) = Ce^{\sigma t}\cos(\omega t + \theta_0)$$

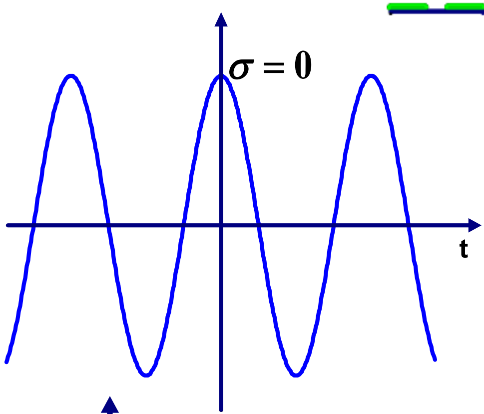
$$x(t) = De^{st} + D^* e^{s^* t}$$

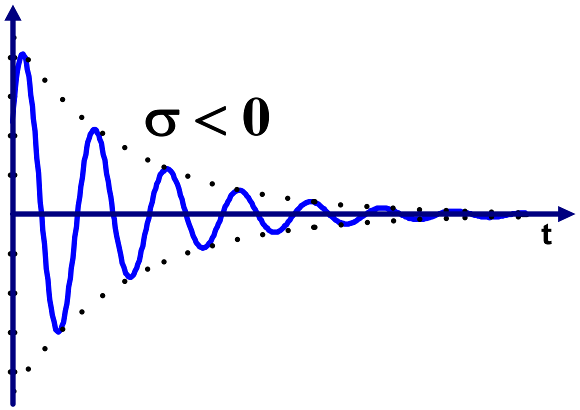
$$\begin{cases} s = \sigma + j\omega \\ s^* = \sigma - j\omega \end{cases} \wedge \begin{cases} D = \dfrac{C}{2}e^{j\theta_0} \\ D^* = \dfrac{C}{2}e^{-j\theta_0} \end{cases}$$

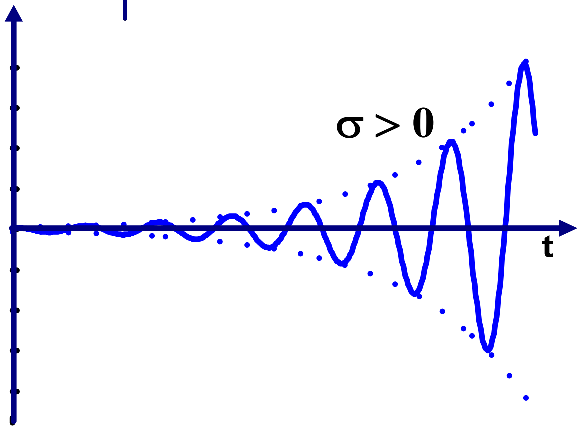
- σ caracteriza a "natureza transitória do sinal"
- ω caracteriza a frequência de oscilação do sinal.

Plano Complexo









Sinusóides de amplitude exponencial de frequência complexa: $s = \sigma + j\omega$

SLITs CONTÍNUOS

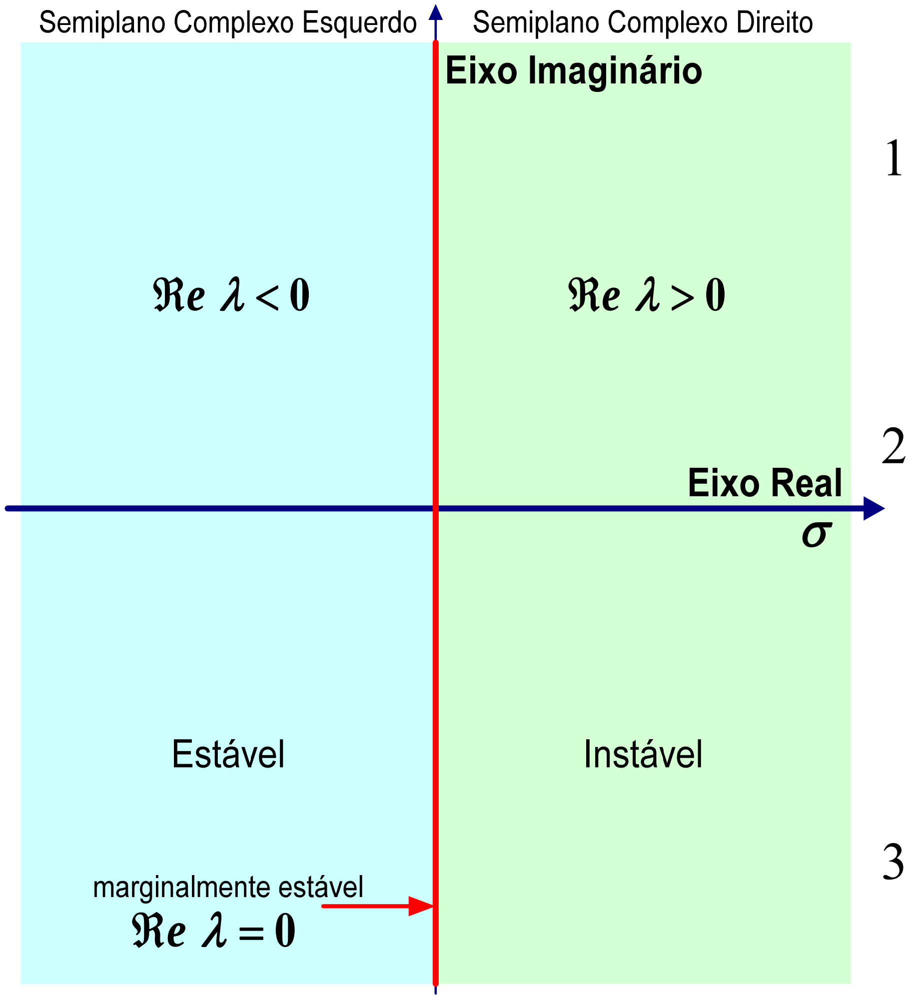
$$L(D)[y(t)] = L_A(D)[u(t)]; D \equiv \frac{d}{dt}$$

Para um SLIT com **N raízes características distintas**, a resposta total a uma entrada *u(t)* é $y(t) = y_0(t) + h(t) * u(t)$

- $y_0(t) = \sum_{i=1}^{N} c_i e^{\lambda_i t} \rightarrow$ resposta a entrada nula
- $y_u(t) = h(t) * u(t) \rightarrow$ resposta a *u(t)* para estado zero (i.e. condições iniciais nulas)

- λ_i são as raízes características do sistema (valores reais ou pares de complexos conjugados)
- a estabilidade do sistema é estabelecida pelas suas raízes características
- a resposta a entrada nula é composta por um somatório de exponenciais complexas (termos ou modos característicos do sistema)
- também *h(t)* é uma combinação linear dos termos característicos do sistema

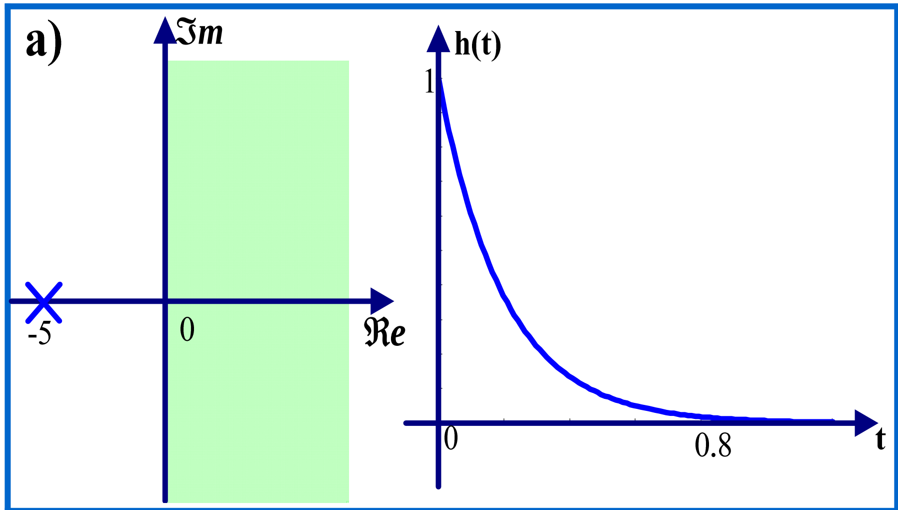
LOCALIZAÇÃO DAS RAÍZES CARACTERÍSTICAS ESTABILIDADE DO SISTEMA

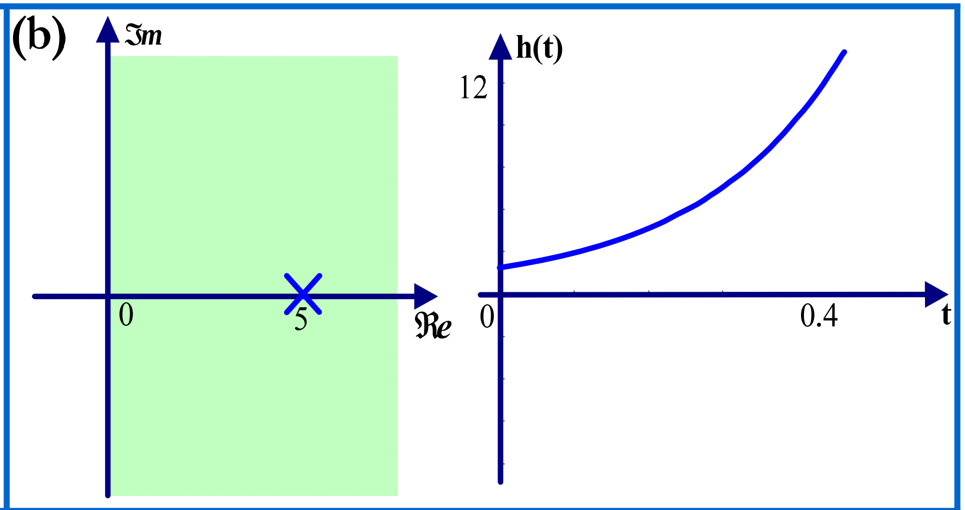


Sumário

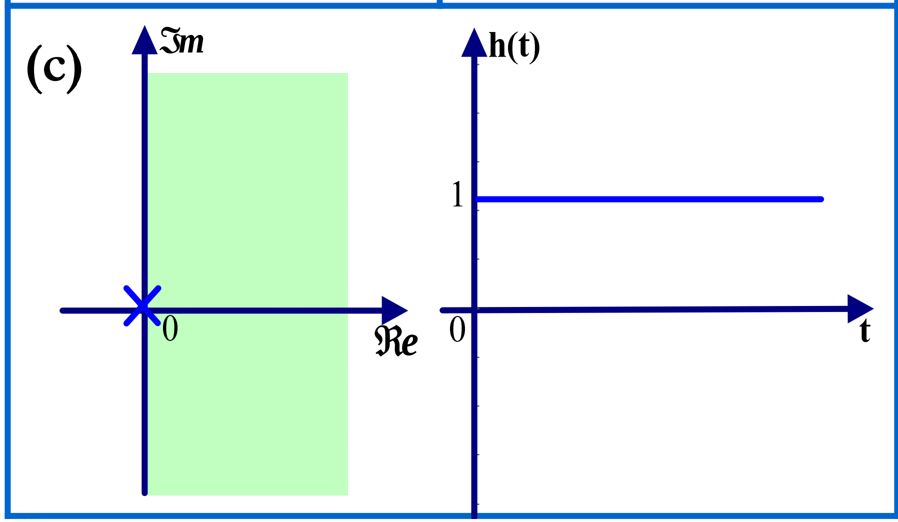
1. Um SLTIC é assimptoticamente estável, se e só se, todas as raízes características pertencem ao semiplano complexo esquerdo (SCE).
2. Um SLTIC é instável se ocorrer pelo menos uma das seguintes condições: (i) pelo menos uma raiz pertence ao semiplano complexo direito (SCD), (ii) existem raízes repetidas (de multiplicidade superior a 1) no eixo imaginário.
3. Um SLTIC é marginalmente estável, se e só se não existem raízes em SCD e existem raízes distintas (não repetidas) no eixo imaginário.

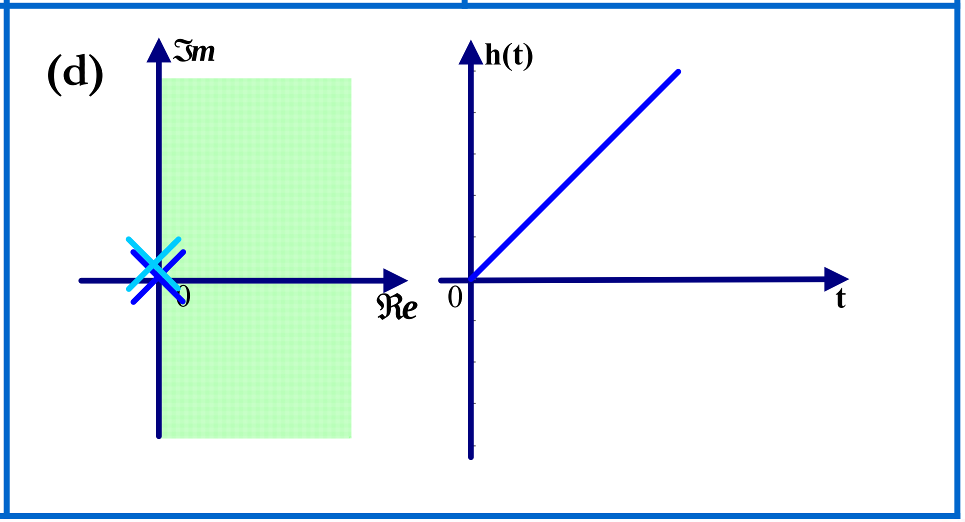
LOCALIZAÇÃO DAS RAÍZES CARACTERÍSTICAS E CORRESPONDENTE RESPOSTA A IMPULSO



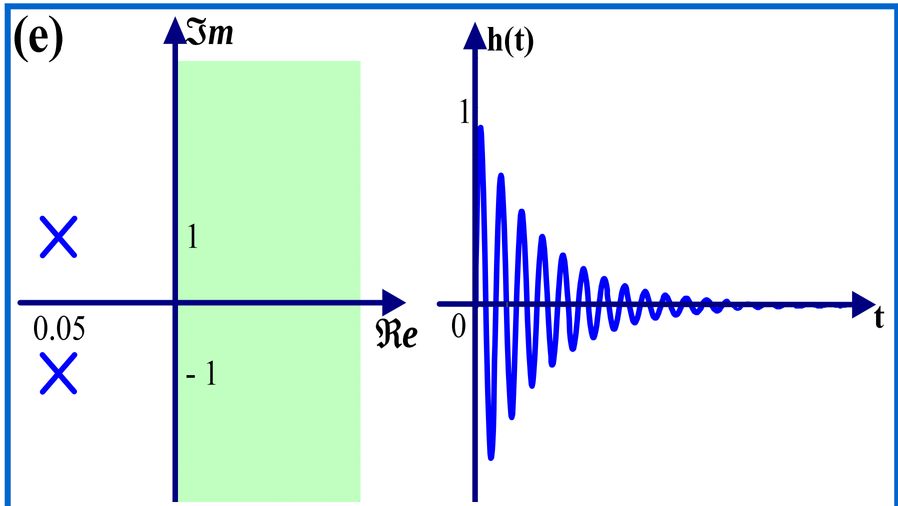


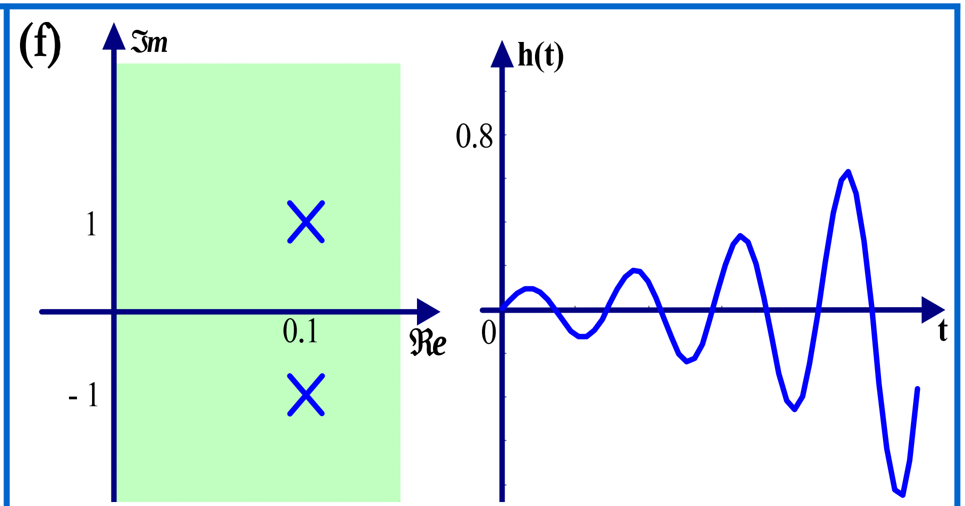
Raízes características	Resposta a Impulso	Raízes características	Resposta a Impulso



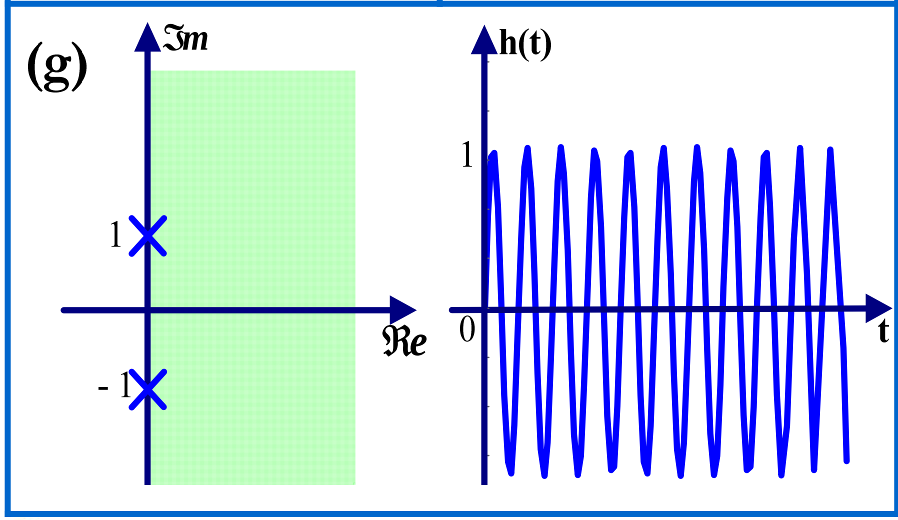


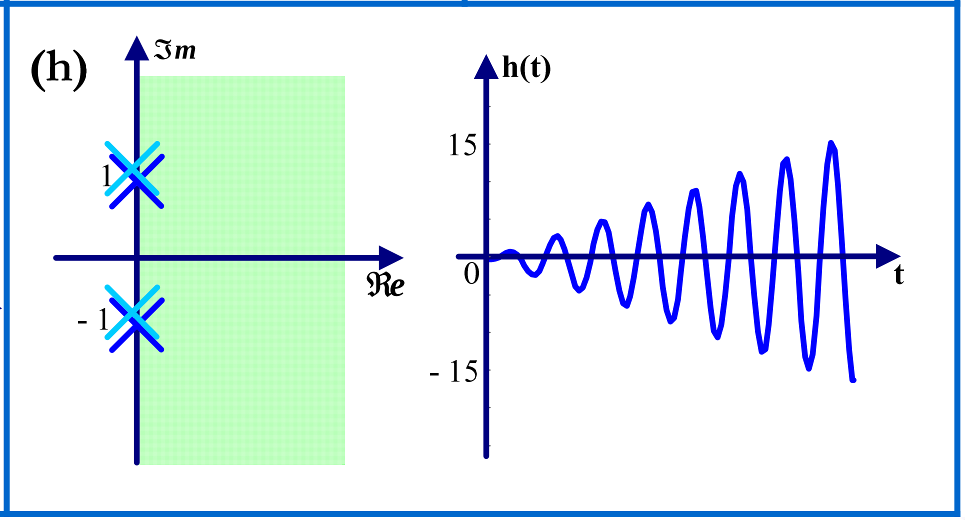
LOCALIZAÇÃO DAS RAÍZES CARACTERÍSTICAS E CORRESPONDENTE RESPOSTA A IMPULSO





Raízes características	Resposta a Impulso	Raízes características	Resposta a Impulso





- resposta **natural** contém toda a contribuição dos termos característicos do sistema, da resposta total;
- resposta **forçada** é composta pelos termos não característicos.

O conhecimento das raízes características e logo do seu posicionamento no plano complexo $\boxed{(s = \sigma + j\omega)}$ dá-nos a informação essencial do comportamento dinâmico do sistema, designadamente:

- Frequência natural não amortecida e factor de amortecimento (sistema de 2ª ordem)
- Constante de tempo (sistema de 1ª ordem)
- Pólos dominantes, ordem do sistema ...
- E daqui podemos concluir quanto à "constante de tempo do sistema", das possibilidades de ocorrência de ressonância no sistema, etc...

FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

$$\boxed{L[y(t)] = L_A[u(t)]}$$

- para condições iniciais nulas: $L(s)Y(s) = L_A(s)U(s)$

$$\boxed{H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{L_A(s)}{L(s)}}$$

$$\downarrow \mathcal{L}^{-1}$$

$y(t) = h(t) * u(t) \rightarrow$ resposta a c/ iniciais nulas

O denominador de *H(s)* é *L(s)*, ou seja o polinómio característico do sistema. Isto significa que os pólos de *H(s)* são as raízes características do sistema

RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

- resposta em frequência: $H(s)_{/s=j\omega} = H(j\omega) = |H(j\omega)| \times e^{j\phi(\omega)}$

- resposta em **regime permanente** de um SLIT estável a uma entrada sinusoidal :

$$\begin{cases} u(t) = A \times \sin(\omega_0 t) \\ y(t) = A \times |H(j\omega_0)| \times \sin[\omega_0 t + \phi(\omega_0)] \end{cases}$$

- gráfico de $|H(j\omega)|$ em função de ω: *característica de amplitude.*

em dB: $|H(j\omega)|_{dB} = 20\log|H(j\omega)|$

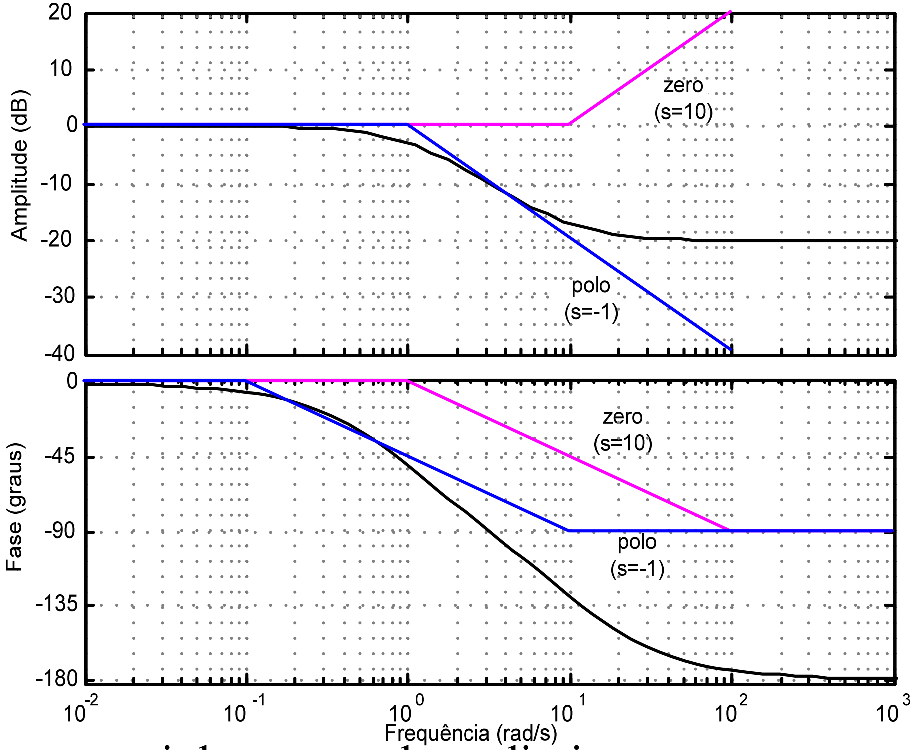
- gráfico de $\arg\left(H(j\omega)\right)$ em função de ω: *característica de fase.*

SISTEMA DE FASE NÃO MÍNIMA
(sistema com zeros no semi-plano complexo direito)

<u>Exemplo</u>:

$$H(j\omega)=\frac{1-\dfrac{j\omega}{10}}{1+j\omega}$$

$$\arg H(j\omega)=\arctan\left(-\frac{\omega}{10}\right)-\arctan\omega$$
$$=-\arctan\left(\frac{\omega}{10}\right)-\arctan\omega$$



• Observe que no que diz respeito à fase, o zero no semiplano complexo direito comporta-se como um pólo no semiplano esquerdo. O zero no semiplano complexo direito provoca uma variação de fase de –π/2 rad.

• Enquanto que um sistema de fase mínima é completamente caracterizado através da característica de amplitude da sua resposta de frequência, num sistema de fase não mínima são necessárias as características de amplitude e de fase para determinar de forma única a função de transferência do sistema.