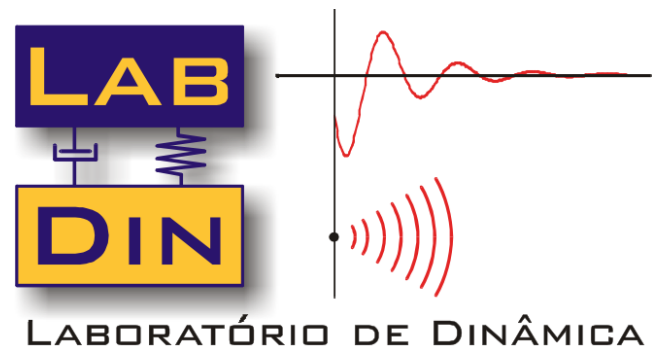


UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

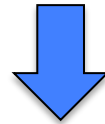


SEM 5766 – ANÁLISE MODAL DE ESTRUTURAS

Aula # 1 – Introdução

1.1- Objetivos da Disciplina

A disciplina **SEM5766 – Análise Modal de Estruturas** é uma disciplina básica da grande área de vibrações estruturais que tem como objetivo principal formar o profissional da área com conceitos e técnicas teórico-experimentais visando a construção de modelos matemáticos de estruturas a partir de sua resposta dinâmica a determinados tipos de estímulos **conhecidos**.



Característica Fundamental
da Análise Modal*

* A chamada Análise Modal Operacional reúne um outro conjunto de técnicas de identificação de sistemas dinâmicos a partir do conhecimento da resposta dinâmica da estrutura sob estudo somente !

1.2- Conteúdo

Tópicos principais:

- Introdução e filosofia da AME
- Revisão de conceitos básicos: 01 e N GDL
- Análise de sinais
- Sensores piezoelétricos (aceleração e força)
- Técnicas de excitação modal
- Técnicas experimentais em AME
- Identificação modal: domínio do tempo e da frequência
- Técnicas de correlação modal
- Técnicas de acoplamento no domínio da frequência
- Tópicos adicionais

1.3- Bibliografia

Textos recomendados:

- 1 Clough, R. e Penzien, J., Dynamics of Structures, McGraw Hill, 1993.
- 2 Craig, R., Kurdila, A., Fundamentals of Structural Dynamics, John Wiley, 2006.
- 3 Ewins, D. J., Modal Testing: Theory, Practice and Applications, RSP, 2000.
- 4 Maia, N. M. M., Silva, J. M., Theoretical and Experimental Modal Analysis, RSP, 1997.
- 5 McConnell, K. G., Varoto, P. S., Vibration Testing: Theory and Practice, Wiley, 2008.

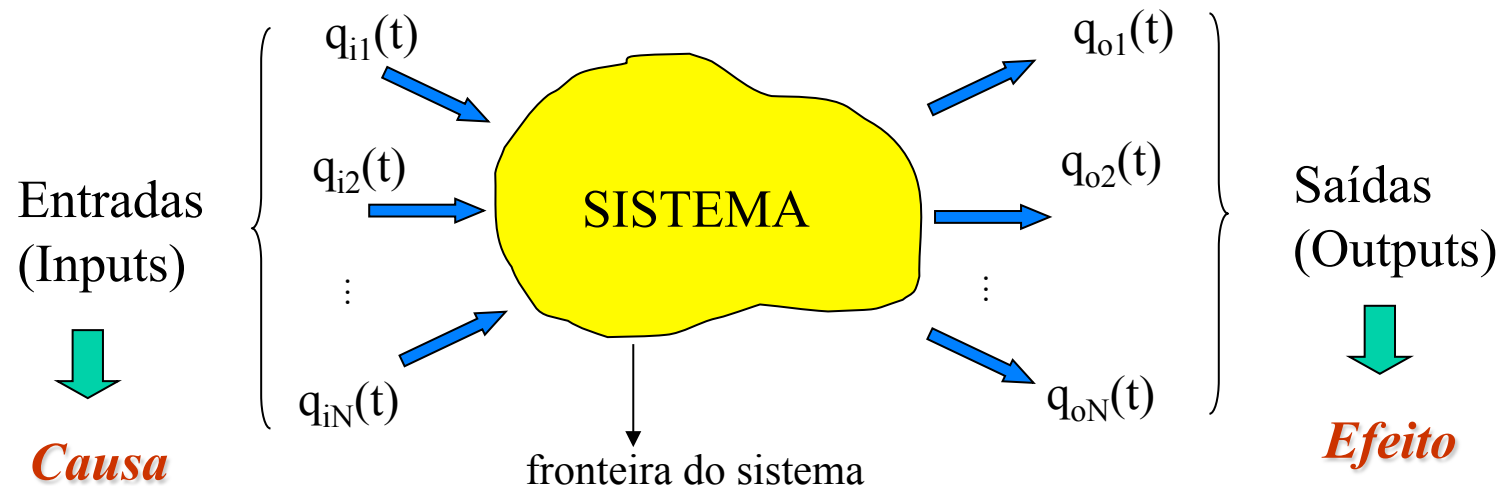
1.4- Aplicações da Análise Modal

São várias as aplicações da Análise Modal, destacando-se:

- Correlação de modelos de elementos finitos com resultados experimentais
- Modificação estrutural
- Análise de sensibilidade estrutural
- Redução de modelos matemáticos
- Determinação da resposta forçada
- Identificação de esforços dinâmicos (tempo e frequência)
- Acoplamento estrutural
- Detecção de falhas e monitoramento estrutural
- Controle estrutural
- Estruturas inteligentes

1.5 – O Conceito de Entrada e Saída (Input/Output)

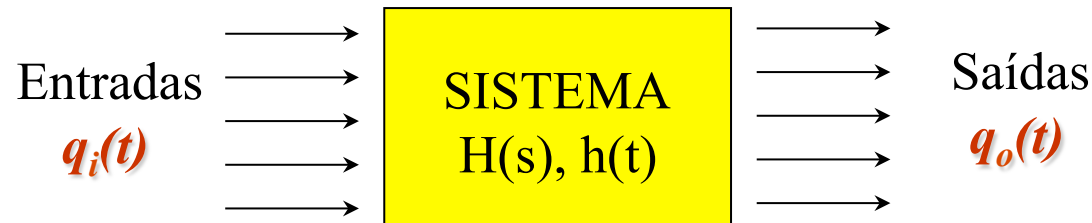
A figura abaixo mostra uma representação muito importante:



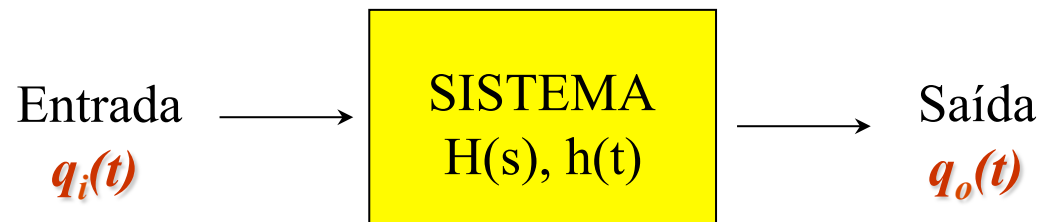
- Entradas: Agentes que provocam distúrbios no sistema. Geralmente, não dependem do sistema
- Saídas: Respostas do sistema. São na verdade “entradas” modificadas pelas características dinâmicas do sistema.

Cont. ...

Na linguagem de modelos dinâmicos e sistemas de controle, é muito comum utilizarmos o conceito de *diagrama de blocos* na visualização destas propriedades



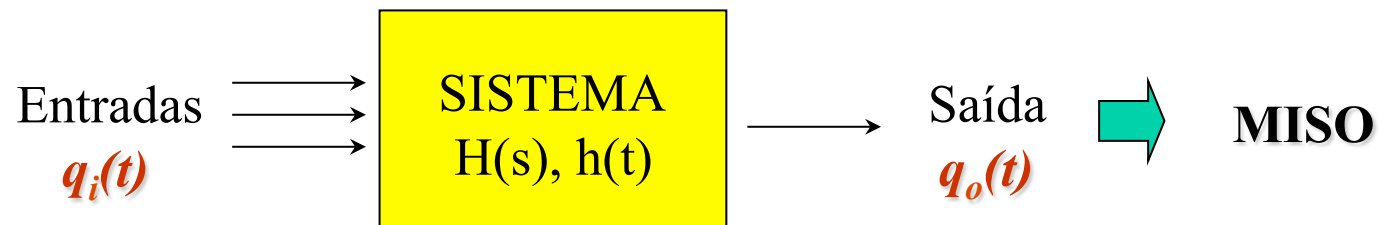
Esta representação introduz a idéia de *visão sistêmica*, onde pode-se observar o modelo do sistema bem como suas entradas e saídas. Um caso muito comum Considera apenas uma entrada e uma saída, chamado de **SISO** (*single input, single output*)



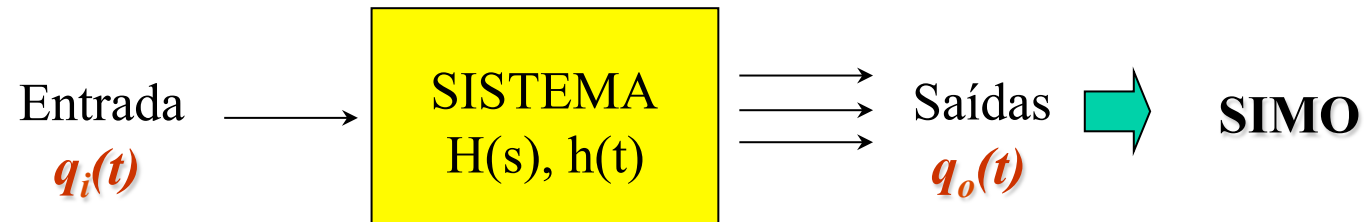
Cont. ...

Da mesma forma podemos definir outras duas configurações:

Múltiplas entradas – Uma saída

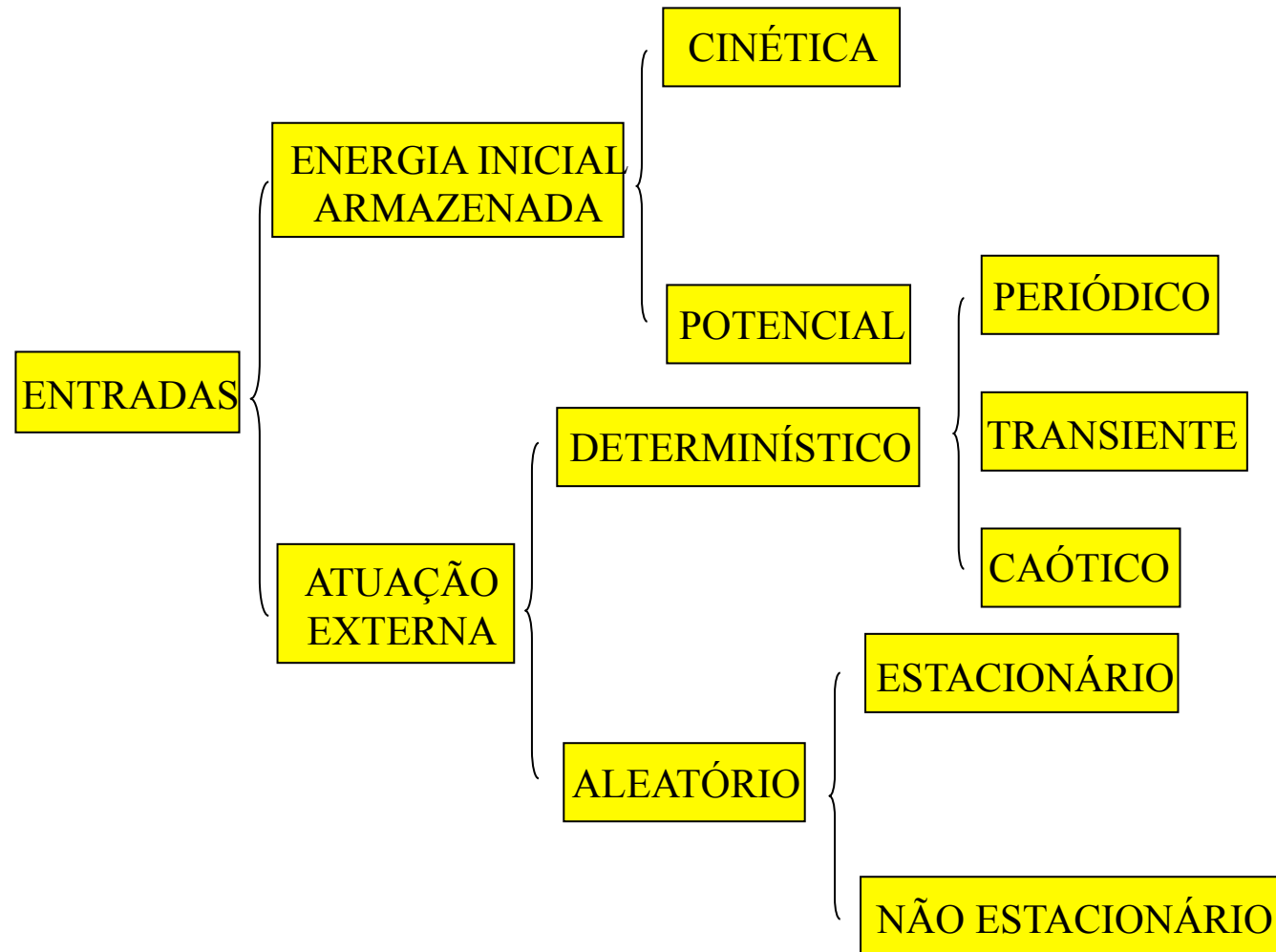


Uma entrada-Múltiplas saídas



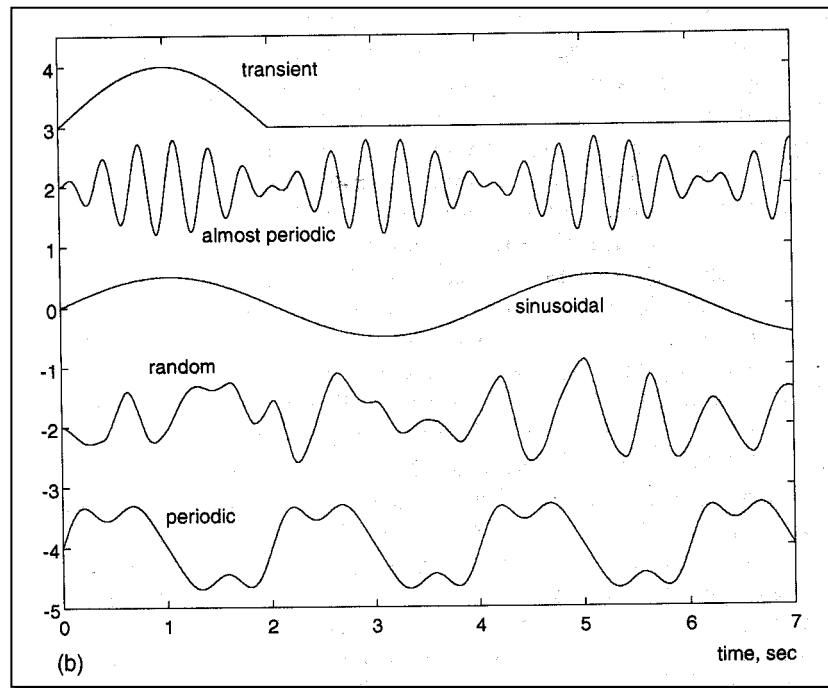
Cont. ...

O diagrama abaixo serve para classificarmos as entradas que atuam no sistema



Cont. ...

Exemplos:



Aleatório ➡

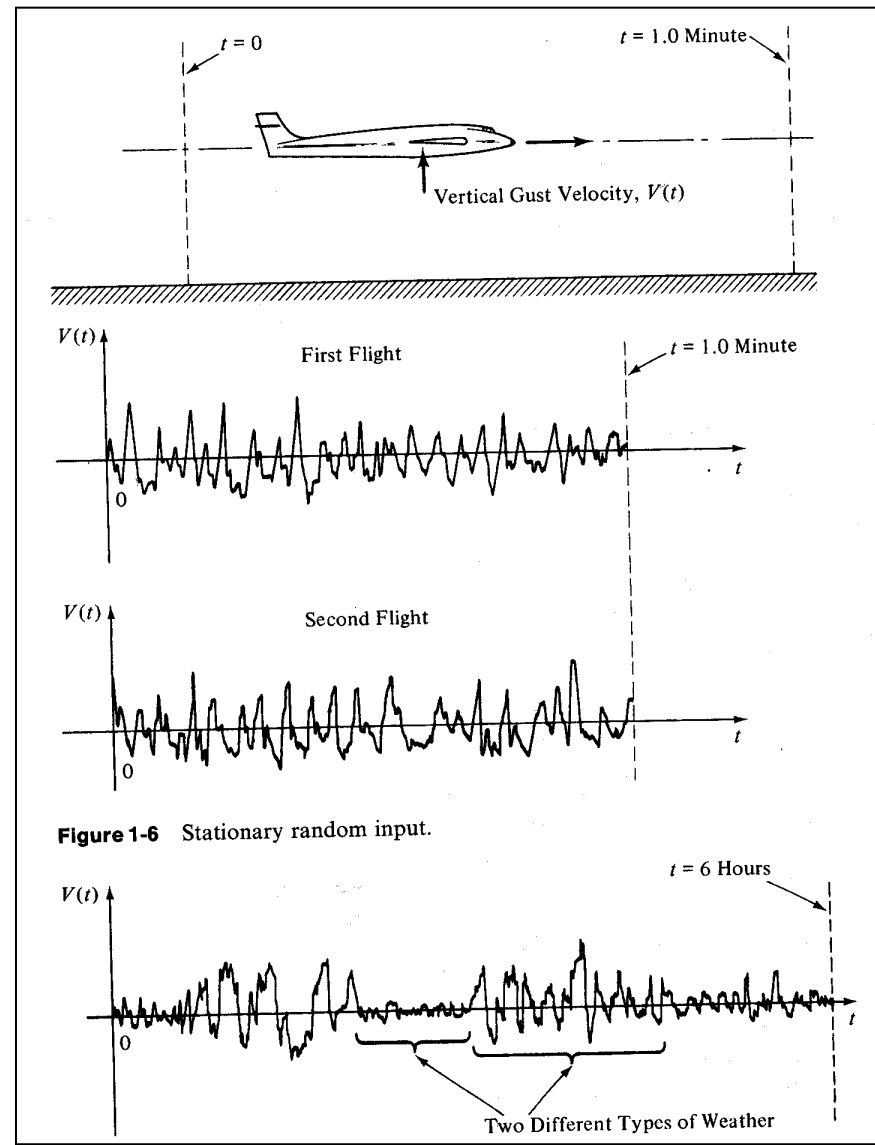
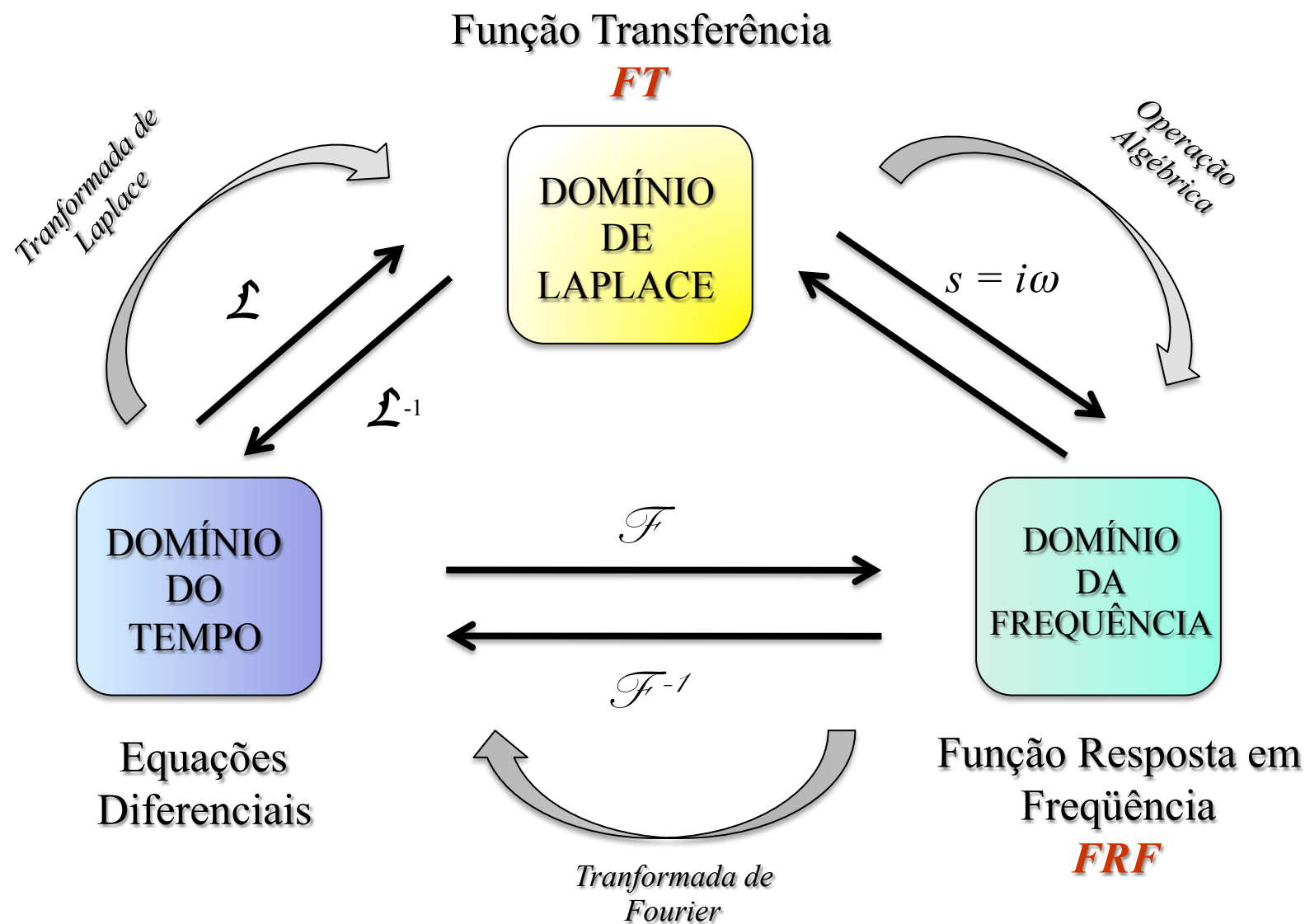


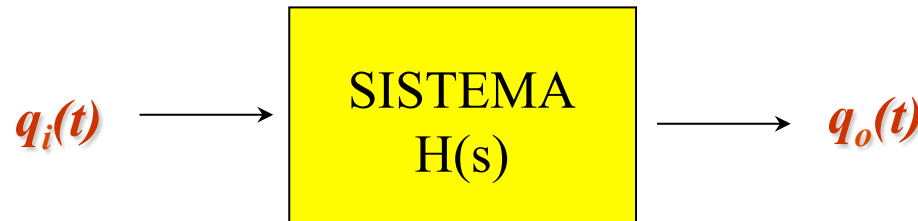
Figure 1-6 Stationary random input.

1.6 - Relação entre Domínios



1.7 – O Conceito de Função Transferência (*Transfer Function*)

A *função transferência* é um dos conceitos mais importantes em modelos dinâmicos. Considere inicialmente o sistema mais simples SISO



Definição: Função transferência é o quociente entre as *transformadas de Laplace* da saída $q_o(t)$ pela entrada $q_i(t)$, sendo *nulas* todas as demais entradas e condições iniciais do sistema. Algebricamente

$$H(s) = \frac{Q_o(s)}{Q_i(s)}$$

Eq. 1

e

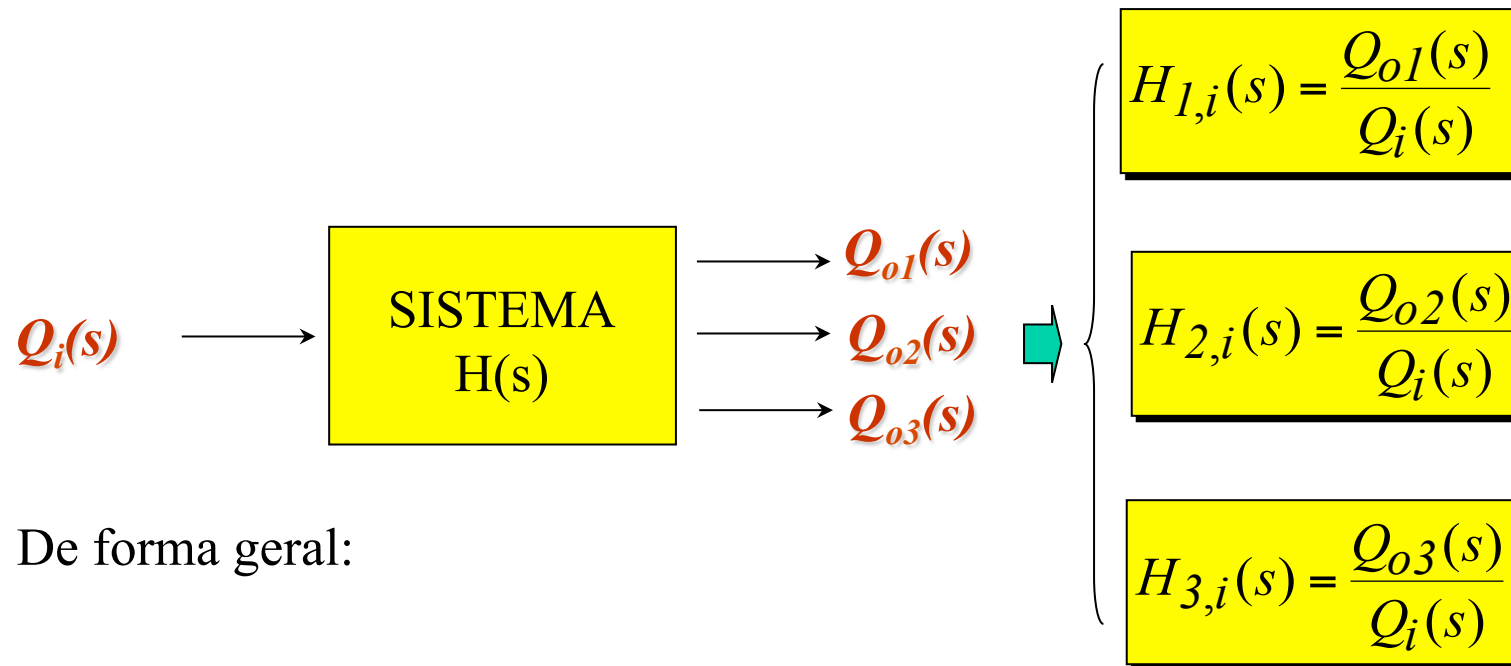
Eq. 2

$$F(s) = L(f(t)) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

Definição de Transformada de Laplace para $t > 0$!

Cont. ...

Devemos observar que a definição de FT para um dado sistema exige uma única entrada, bem como condições iniciais nulas. Para sistemas com múltiplas entradas, deve-se considerar uma entrada por vez ! Embora existam métodos sofisticados que calculam as FT para múltiplas entradas com atuação simultânea. Para o caso de várias saídas, temos



De forma geral:

Eq. 3

$$H_{p,q}(s) = \frac{Q_p(s)}{Q_q(s)}$$

FT relacionando a saída no ponto p devido a uma entrada no ponto q e zero nos demais !

Cont. ...

Uma aplicação muito importante da FT é o seu uso na determinação das características da resposta dinâmica do sistema para uma determinada entrada. Da última equação da FT temos

$$H(s) = \frac{Q_o(s)}{Q_i(s)} \quad \text{Eq. 4}$$

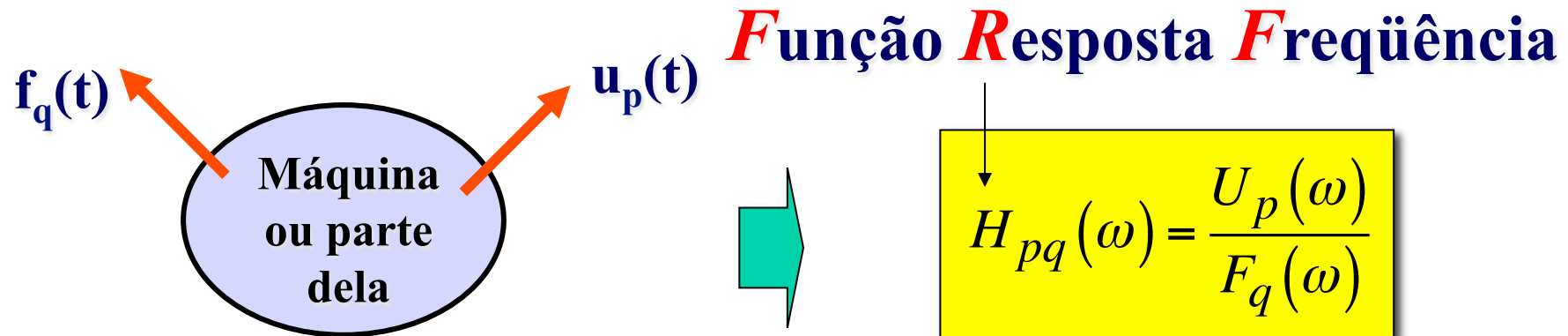
Resolvendo para a saída

$$Q_o(s) = H(s)Q_i(s) \quad \text{Eq. 5}$$

Ou seja, conhecendo-se as características do sistema ($H(s)$) bem como a entrada $Q_i(s)$, pode-se determinar a saída através de uma operação de multiplicação ! Então, o problema está em *obtermos um modelo adequado que represente de maneira fiel o sistema físico estudado.*

1.8 – Função Resposta em Frequência (*FRF*)

Um dos objetivos principais da Análise Modal Experimental

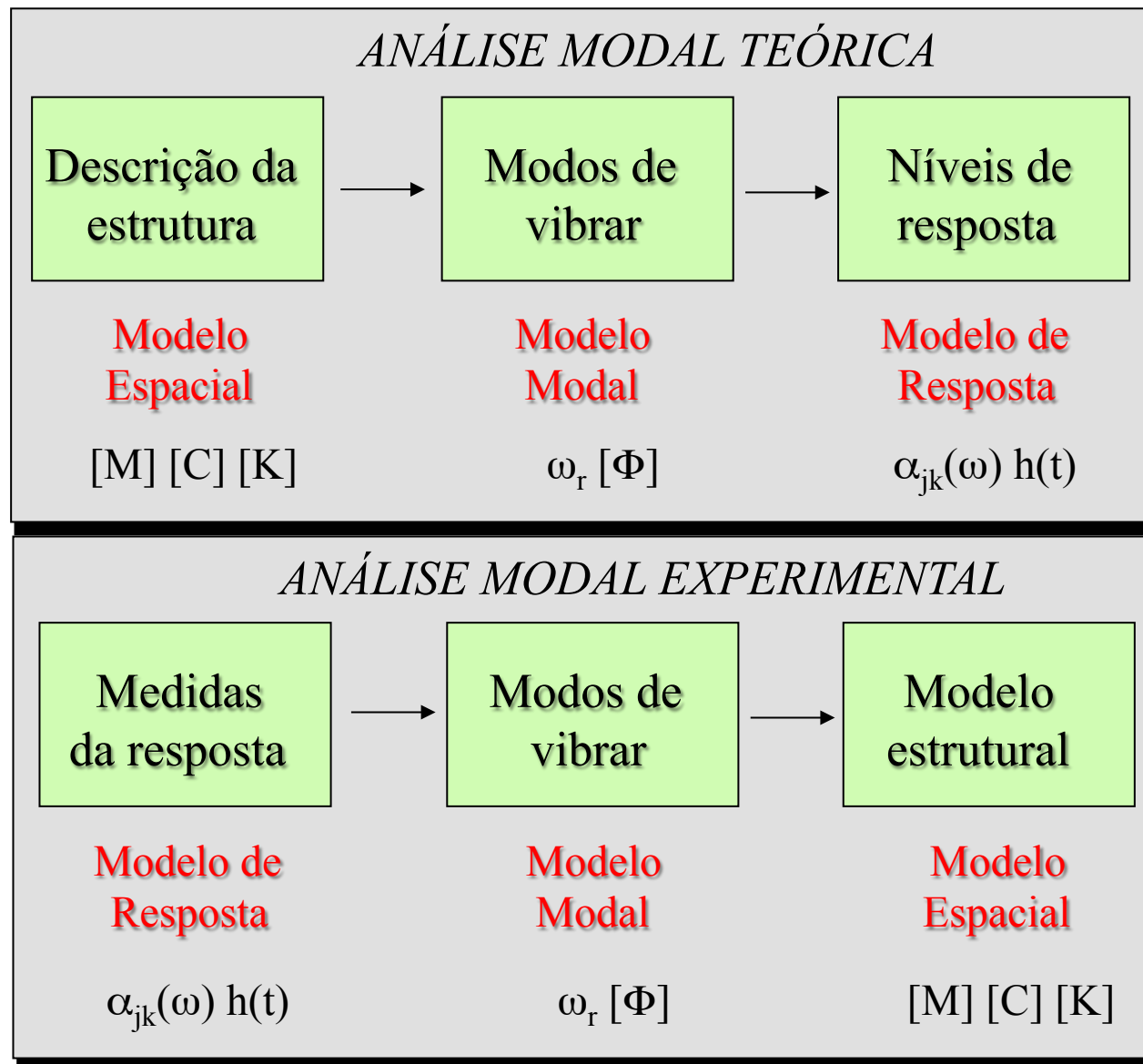


Assim realizamos no laboratório:

$$H_m(\omega) = \frac{V_u(\omega)}{V_f(\omega)} = \frac{S_u H_u^m(\omega) H_u^e(\omega)}{S_f H_f^m(\omega) H_f^e(\omega)} \frac{U_p(\omega)}{F_q(\omega)}$$

Medido
Tensões Elétricas
Propriedades da Instrumentação
Teórico

1.9 – As Rotas da Análise Modal



1.10 – Aparato de um Ensaio Modal Típico

