

# 1

## Introdução

A extração de informação a partir de observações experimentais é um processo fundamental na Engenharia Mecânica. Esta informação pode ser usada para se ter um entendimento mais exato da realidade, permitindo formular modelos e desenvolver teorias que descrevam os sistemas observados. Uma maneira de fazer isso é usando as técnicas de identificação de sistemas, as quais têm muitas aplicações na Engenharia Mecânica, aeroespacial, arquitetura naval, civil, etc. Por exemplo, a identificação paramétrica de sistemas mecânicos é uma das principais aplicações das técnicas de identificação de sistemas na Engenharia Mecânica, especificamente para a identificação de parâmetros modais (frequências naturais, fatores de amortecimento e modos de vibração) que são importantes características dinâmicas de uma estrutura flexível ou sistema mecânico.

Muitos algoritmos de identificação têm sido desenvolvidos para identificar parâmetros modais de sistemas mecânicos. Um grupo desses algoritmos no domínio do tempo são os chamados algoritmos de subespaço, alguns dos quais serão usados neste trabalho. Ainda que muitos progressos têm sido conseguidos durante duas décadas, o entendimento das características e vantagens qualitativas relativas dos métodos existentes permanece limitado, em especial o estudo da influência do ruído, sempre presente nas medições.

### 1.1

#### Objetivos do trabalho

1. Estudar a robustez na presença de ruído de alguns dos métodos no domínio do tempo aplicáveis na identificação de parâmetros modais de sistemas mecânicos lineares invariantes no tempo com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO), usando como base o modelo em espaço de estados tipicamente usado em Dinâmica e Vibrações. Os algoritmos de subespaço que serão estudados são: o Eigensystem Realization Algorithm (ERA), sem tratamento especial dos dados;

o ERA/DC (ERA/ Data Correlation) empregando funções de correlação das matrizes de Hankel; o OKID/ERA (Observer/Kalman filter identification/ ERA) no qual um observador de estado é introduzido para comprimir os dados e melhorar os resultados da identificação e o OKID/ERA/DC que além de observador usa funções de correlação. Se estuda também se dita habilidade é mantida no caso de variar no sistema o fator de amortecimento.

2. Estudar o problema da identificação de parâmetros estruturais (matrizes de massa, rigidez e amortecimento). As características e limitações do algoritmo utilizado na presença de ruído são analisados.

## 1.2

### Conceitos gerais

Identificação de sistemas pode ser definido como *a seleção de um modelo para um sistema estudado, usando um número limitado de medições de entradas e saídas, as quais podem estar contaminado com ruído* [36]. Uma definição de identificação de parâmetros foi dada por Eykhoff (1974): *A determinação experimental dos valores de parâmetros que governam a dinâmica supondo que a estrutura do modelo do sistema estudado é conhecido.*

Baseado nesses conceitos, podemos definir a *Identificação paramétrica de sistemas mecânicos* como o processo de determinar experimentalmente os valores de um número finito de parâmetros, contidos num modelo matemático conhecido, que descrevam a dinâmica de tais sistemas mecânicos, usando as medições das sinais de excitação e resposta que podem ser obtidas num experimento de vibrações.

Vários métodos têm sido desenvolvidos para identificação de parâmetros modais no domínio do tempo. Um grupo deles são os algoritmos de subespaço, que foram usados neste trabalho, eles realizam um modelo em espaço de estados e se caracterizam pela utilização da decomposição em valores singulares (SVD) dos dados, obtendo subespaços ortogonais dos modos associados ao sistema e dos modos associados ao ruído. O ERA também é conhecido como algoritmo de realização, pois está baseado na teoria de realização no espaço de estados, concebida por Ho and Kalman que introduziram o importante princípio da teoria de realização mínima.

Esses métodos no domínio do tempo podem ser subdivididos segundo à forma com que o ruído é tratado no algoritmo de identificação [2]. Portanto, os métodos determinísticos são aqueles que não dão nenhum tratamento especial ao ruído presente nos dados, ainda que se aceite o fato de que os dados estejam contaminados, como no caso do ERA e ERA/DC. Métodos que levam em consideração o ruído presente nos dados, como no OKID/ERA e OKID/ERA/DC por outro lado, são denominados estocásticos.

### 1.3

#### Revisão Bibliográfica

Fazendo um breve resumo histórico dos métodos desenvolvidos para identificação de parâmetros modais no domínio do tempo, o algoritmo CE (Complex Exponential, 1974) foi um dos primeiros métodos no domínio do tempo para identificação modal de sistemas com múltiplas graus de liberdade, uma versão melhorada usando solução por mínimos quadrados para sistemas SIMO (Single-Input Multi-Output) foi o algoritmo LSCE (Least Squares Complex Exponential, 1977) [10, 4]. No mesmo ano o ITD (Ibrahim Time Domain) foi desenvolvido, primeiro como um método SIMO [17] mas que também mostrou ser aplicável para sistemas MIMO. O primeiro algoritmo MIMO de identificação de parâmetros modais foi o PCE (Polyreference Complex Exponential, 1982) [43], uma versão superior ao LSCE.

A aplicação formal da teoria de realização mínima para identificação de parâmetros modais foi primeiro introduzida em 1984 por Juang e Pappa [19], com o Eigensystem Realization Algorithm (ERA). Em 1987, o PCE foi melhorado usando correlação dos dados, aparecendo o IPCE (Improved Polyreference) [45]. De igual maneira, em 1988, uma extensão do ERA usando correlação dos dados deu origem ao ERA/DC [20]. Com o propósito de aplicações em control de sistemas mecânicos foi desenvolvido uma versão recursiva do ERA para identificação em malha fechada [32]. Logo depois, Juang e outros [21], apresentaram um novo algoritmo que calcula os parâmetros de Markov do sistema usando o OKID.

Os primeiros a introduzir o nome *subespaço* foram Verhaegen e Dewilde [41], em 1992, que desenvolveram o MOESP (Multiple-Output Error State Space); assim, foram agrupados nesta classe o N4SID (Numerical Algorithm For State Space System Identification) [38] que surgira, como o MOESP, da adaptação dos tradicionais PEM (Predictor Error Method, [31]) e o IVM (Instrumental Variable Method) respectivamente, para identificação de

sistemas MIMO em espaço de estados usando a teoria de mínima realização [42]; o ERA; ERA/DC; OKID/ERA; e o algoritmo ORSE (Observability Range Space Extraction) [28, 29] que foi desenvolvido como generalização do ERA e o Q-Markov COVER (Q-Markov Covariance Equivalent Realization) [25]; entre outros.

Dado a variedade de métodos de identificação de parâmetros modais no domínio do tempo que foram desenvolvidos, mas com pobre entendimento dos possíveis resultados das ramificações das decisões tomadas durante as múltiplas etapas no algoritmo, alguns estudos foram realizados para unificar os métodos, como o feito por Yang e outros [44] que apresentaram a unificação do ERA e ITD. Outros estudos relevantes de unificação dos métodos foram feitos por Juang [23]; Allemang e Brown [5] que unifica métodos no domínio da frequência e no domínio do tempo como o ERA baixo uma formulação usando matrizes polinomiais; Zhang e outros [46].

Estes estudos foram logo usados para determinar características similares e incrementar o entendimento das vantagens e desvantagens dos diferentes algoritmos, como por exemplo sua robustez ao ruído nos dados, assim, Juang [22] fez um extenso estudo do método ERA e de suas variantes mostrando muitos casos práticos bem sucedidos estudando a maneira de selecionar o número necessário de parâmetros de Markov do sistema e o número necessário de parâmetros de Markov do observador para um sistema particular de forma de obter a maior quantidade de dados com pouca contaminação por ruído. Lew e outros [27] estudaram o método ERA e ERA/DC para identificação de parâmetros modais, comparando-os com outros métodos, testando os métodos para vários níveis de ruído e porcentagens de amortecimento maiores a 1%. Já Abdelghani [1] e outros compararam o OKID/ERA com outros métodos que não precisam do cálculo dos parâmetros de Markov diretamente, também para vários níveis de ruído, mas sem variar o amortecimento do sistema. Bazán [8] e Bavastri [9], compararam o ERA com o algoritmo OPIA (Optimised Pseudo-Inverse Algorithm) para identificação de parâmetros modais de sistemas MIMO, estudando o uso da sobre determinação do número de modos relevantes do modelo para mitigar os efeitos do ruído. No DEM-PUC-Rio, Aliaga [3] estudou o ERA e o OKID/ERA variando os níveis de ruído nos dados, mas sem variar o amortecimento. Petsounis e Fassois [34] fizeram uma extensa comparação de vários métodos estocásticos e também determinísticos para identificação de parâmetros no domínio do tempo, incluindo o ERA, quando as medições estão contaminados com ruído.

## 1.4 Organização do trabalho

No Capítulo 2, será apresentada a teoria básica de sistemas lineares invariantes no tempo e as equações matemáticas que descrevem tais sistemas. São definidos os parâmetros modais e parâmetros de Markov e sua relação com a dinâmica do sistema, expressado em espaço de estados.

No Capítulo 3, é descrita a maneira de caracterizar estocasticamente os ruídos dentro do modelo dinâmico, para o qual será apresentado o modelo estocástico em espaço de estados e a teoria dos filtros de Kalman.

No Capítulo 4, serão apresentados os quatro algoritmos de subespaço que serão estudados: o ERA, o ERA/DC, o OKID/ERA e o OKID/ERA/DC.

No Capítulo 5, será estudada a robustez, na presença de ruído, dos métodos para identificação de parâmetros modais de sistemas mecânicos no domínio do tempo descritos no capítulo 4. Outro complicador que será introduzido no processo de identificação é o baixo amortecimento. Assim, o objetivo deste capítulo é comparar a eficácia dos métodos para identificar bem os parâmetros modais de um sistema MIMO (estrutura Mini-Mast), com alguns dos modos do sistema muito próximos associados a frequências quase idênticas, na presença de níveis de ruídos baixos e altos, e se dita habilidade é mantida no caso de variar no sistema o fator de amortecimento, estudando-se para porcentagens de amortecimento pequeno e grande a vários níveis de ruído.

No Capítulo 6, o problema de identificação de parâmetros estruturais (matrizes de massa, rigidez e amortecimento) será estudado, sendo que o método para identificar tais parâmetros estruturais precisa da identificação prévia das matrizes de estado usando um dos algoritmos de subespaço estudados, as características e limitações do método utilizado são analisados, em especial sua eficácia na presença de ruído.

No Capítulo 7, um exemplo de aplicação prática dos algoritmos de subespaço para identificar os parâmetros modais de um rotor flexível será apresentado. O ERA/DC será empregado para identificar o amortecimento viscoso e as frequências naturais de um rotor flexível usando dados experimentais.

No Capítulo 8, serão descritas as recomendações e conclusões gerais do trabalho.