

# 1

## INTRODUÇÃO

Turbomáquinas são, cada vez mais, sistemas complexos. Um trem de máquinas é um conjunto de máquinas que trabalham acopladas para um propósito específico.

**Os rotores** de uma turbomáquina, caracterizados por parâmetros como inércia, velocidades de rotação, características geométricas, amortecimento e elasticidade, que se linear é caracterizada pela rigidez, interagem com os elementos que os suportam, **os mancais**. Estes parâmetros, por sua vez, podem se modificar ao longo do tempo de operação das máquinas.

Em uma análise mais complexa, mancais devem ser analisados através de modelos que levem em conta equações hidrodinâmicas. Forçamentos no sistema rotor-mancal podem excitar modos de vibração nas frequências em que coincidam com as frequências naturais do sistema, de forma que podem afetar a integridade da máquina e interromper o processo produtivo, como também podem causar danos ao homem ou ao meio-ambiente. As características geométricas e do óleo lubrificante em mancais radiais e de escora influem decisivamente na dinâmica do sistema, como se pode observar das referências [26], [6], [7].

Vibração axial em máquinas rotativas não é comumente um problema abordado em simpósios de Manutenção e mesmo nos de Dinâmica de Rotores. A referência [28], que trata do problema industrial desta Dissertação, e a referência [32], que trata de excitações na direção axial de uma turbina a gás, são exemplos de estudos de casos que abordam problemas de vibrações na direção axial das máquinas. As ações corretivas em ambos casos foram no sentido de alterarem-se parâmetros de amortecimento e elasticidade dos mancais para que se modificassem as faixas onde as vibrações se amplificavam.

Quando a vibração axial se manifesta em níveis perigosos, colocando em risco a operação da máquina, podendo mesmo até interromper o processo produtivo, é normalmente fruto de um projeto inadequado ou de montagem inadequada, ou de ambos.

## 1.1 Objetivos da Dissertação

Esta Dissertação apresenta e analisa um problema industrial de vibração axial em um compressor-de-ar doravante chamado de **compressor bp**, de uma fábrica de fertilizantes. Aplica-se um modelo para a dinâmica do rotor, discretiza-se o modelo pelo Método de Elementos Finitos para executarem-se simulações numéricas de forma a reproduzir alguns aspectos básicos do problema. Simula-se um carregamento axial acoplado à rotação do eixo, utilizando-se o modelo de [6], que simula uma vibração supersíncrona à rotação do eixo da máquina, representando o problema apresentado em campo: ressonância axial, assumindo-se elasticidades e rigidezes do mancal de escora, considerando-se em especial informações destes parâmetros nas referências bibliográficas [26], [6], [7].

A discretização do modelo do sistema rotativo flexível pelo método de elementos finitos, utilizando-se como base a referência [25], [31], [14] é feita em níveis de complexidade progressiva, à medida que se incorporarem mais elementos ao modelo.

É objetivo também desta Dissertação proporcionar uma apostila para o curso de especialista em Análise Modal, baseada no Capítulo 5 desta Dissertação, com o intuito de contribuir para uma melhor qualificação da mão-de-obra especializada. O processo de investigação do problema é um elemento importante que conduziu a esta Dissertação e seus passos devem ser estudados e avaliados para orientar futuras investigações em problemas de Máquinas.

## 1.2 Organização da Dissertação

Esta dissertação é composta de sete Capítulos e um Anexo, sendo o presente, o **Primeiro Capítulo**, dedicado à Introdução, à apresentação dos objetivos e à organização da dissertação.

No **Capítulo 2**, é apresentado o problema industrial, relatado na referência [28]. São fornecidos dados técnicos do compressor, o histórico de suas falhas, a cronologia da investigação do problema, os instrumentos utilizados na coleta de dados, as medidas tomadas para solucionar o problema e a possível causa que levou o rotor a vibrar na direção axial.

No **Capítulo 3** apresenta-se a classificação comercial dos mancais, os desenhos ampliados de mancais radiais e mancais de escora e uma suscinta

descrição do princípio de lubrificação hidrodinâmica.

No **Capítulo 4** apresenta-se a teoria de vibrações para sistemas de três graus de liberdade, a Transformada de Laplace que gera funções de transferência, e apresenta gráficos de resposta em frequência dos sistemas. A Análise Modal Clássica é apresentada para sistemas com amortecimento proporcional.

No **Capítulo 5** apresenta-se o método de elementos finitos. Mais adiante apresenta-se a solução do problema de uma viga engastada, amortecida, com uma força concentrada aplicada perpendicularmente e daí se extraem modos de vibração e frequências naturais.

No **Capítulo 6** apresenta-se a modelagem do rotor, que é discretizado pelo método de elementos finitos e simulado via MATLAB®. A discretização por elementos finitos é utilizada para que se obtenham as frequências naturais e modos de vibração radiais e axial do eixo do compressor que sofreu o acidente. Estes valores numéricos são comparados com os dados medidos. Apresenta-se o erro relativo das primeiras três frequências naturais em relação ao calculado, idem aos três primeiros modos de vibração. Verifica-se que a simulação numérica está coerente com as medidas de campo.

No **Capítulo 7** comparam-se os resultados de campo com os da simulação numérica, discutem-se as possibilidades de se melhorar o modelo matemático, incorporando-se esforços aerodinâmicos nos impelidores, a interação do rotor de forma não-linear com os mancais de escora, incorporando-se a variação da rigidez e amortecimento com a variação da viscosidade do óleo no mancal hidrodinâmico.

Nos **Anexos** apresentam-se a teoria de energia cinética e de deformação de uma viga de Timoshenko, utilizados no modelo do rotor para posteriormente ser discretizado pelo método de elementos finitos; apresenta-se um modelo simplificado de rotor, de Laval, com massa concentrada no meio do eixo, sendo a massa do eixo considerada desprezível e o rotor rígido. O objetivo é mostrar que embora este modelo simples ainda seja usado para entedimento da dinâmica de um rotor, nem sequer considera o forçamento axial, que na verdade é parte importante desta Dissertação.