1
Introdução

A análise de sistemas rotativos, tipo mancais-eixo-rotor, requer, como em outras áreas da engenharia, uma relação muito estreita entre a teoria e a experimentação. Além de empregar ferramentas matemáticas e computacionais para a modelagem de sistemas simples e complexos, é necessária a experimentação para validação de modelos e avaliação dos métodos numéricos empregados.

O estudo de máquinas rotativas tem uma relevância especial para a industria devido à grande variedade de aplicações. Entre elas, podemos citar: hidrogeradores, turbinas, motores elétricos, bombas centrífugas, compressores, etc. Muitas delas são estudadas baseado nos modelos bem simples de rotores flexíveis, tendo como base o modelo de Jeffcott, Fig. 1.

A existência de um sistema rotativo apoiado em mancais e transmitindo potência, gera uma serie de problemas característicos para as máquinas com componentes rotativos, que são estudados utilizando a dinâmica de rotores e a teoria de vibrações.

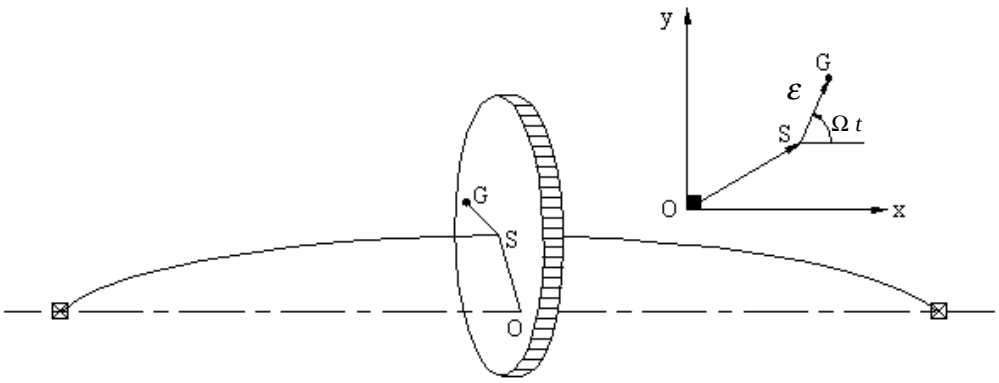

Figura 1 – Rotor tipo Jeffcott

Uma das aplicações recentes e importantes de sistemas rotativos ocorre na perfuração de poços de petróleo, Fig. 2. Neste contexto, o presente trabalho estuda a dinâmica de um rotor vertical em balanço que pode representar o movimento lateral de uma broca quando interage com uma parte estática (parede do poço).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

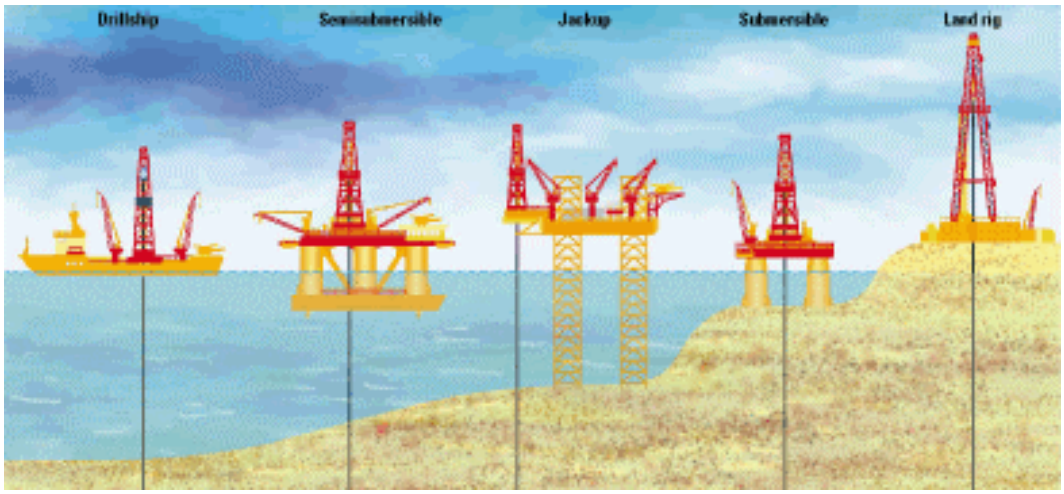

Figura 2 – Perfuração em diferentes níveis de profundidade

1.1. Mecânica das Colunas de Perfuração

1.1.1. Análise Estática

O objetivo fundamental da coluna de perfuração é transmitir torque assim como transportar o fluido necessário para a perfuração. Jansen [1] afirma que os valores de torque que se desenvolvem na broca oscilam entre 0.5 e 10 kN-m, mas devido ao atrito com a parede do poço, que atua ao longo do comprimento da coluna, o torque requerido para movimentar a coluna na parte superior pode chegar a valores de até 50 kN-m.

Outra carga que atua na coluna é seu peso próprio; a maior parte do peso da coluna é suportada na parte superior, o que implica que esta parte está sob uma tração que pode chegar a vários MN. Só a parte inferior da coluna (*Bottom Hole Assembly, BHA*), que tem poucas centenas de metros de comprimento, está suportada sobre a broca, estando carregada à compressão, Fig. 3.

No tramo inferior da coluna, a flambagem será evitada pela alta rigidez lateral e pela colocação de estabilizadores muito próximos entre si (com afastamentos que variam de 5 a 50m.).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

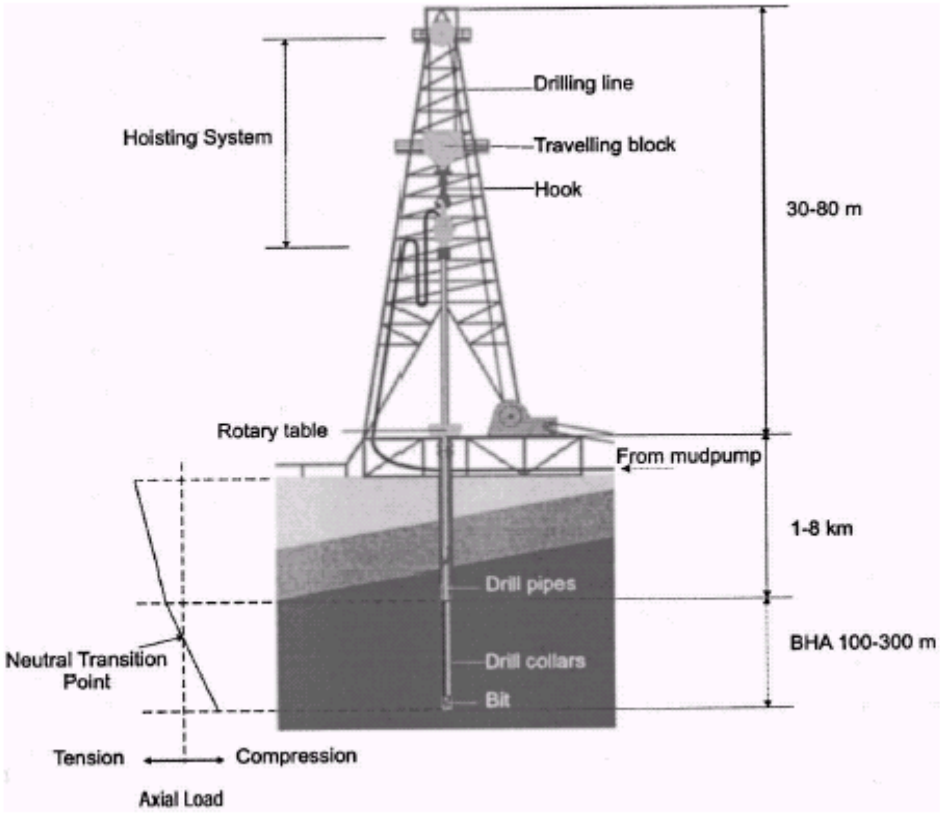

Figura 3 – Coluna de perfuração típica

A análise mecânica dos componentes da coluna é restrita geralmente à análise estática de tensões. Para a coluna, um bom projeto da máxima tensão efetiva, causada pela combinação de tração, torção e flexão é comparado com a tensão de fluência do material. Embora seja feita uma boa análise estática, é necessário realizar, também, uma análise dinâmica para diminuir a possibilidade de falhas que possam ocorrer no processo de perfuração.

1.1.2.
Análise Dinâmica

Sendo a coluna um elemento esbelto que possui um diâmetro menor que a parede do poço, ela pode vibrar lateralmente. A vibração lateral é mais relevante na parte inferior da coluna, nesta zona a coluna pode entrar em contato com a parede do poço em diferentes partes.

Uma das causas que originam as vibrações laterais são as forças não balanceadas dos colares da coluna (usados para unir dois tubos). Estas forças são capazes de excitar a precessão retrograda quando existe uma assimetria na rigidez

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

ou amortecimento do sistema. A vibração lateral também é induzida pelo atrito existente entre a coluna rotativa e a parede do poço, o que pode originar uma precessão retrógrada ao longo da parede do poço. Valores típicos de freqüências da vibração lateral são encontrados entre 0.5 e poucas dezenas de Hz.

Outro tipo de vibração que ocorre na coluna de perfuração é a das vibrações torcionais. No caso mais crítico, a broca que está em contato com a rocha fica sem girar, enquanto a parte superior da coluna continua girando com velocidade de rotação constante, o que acrescenta mais torque na coluna de perfuração, até que a broca repentinamente se solta; isto é conhecido como fenômeno *Stick-Slip*. Este tipo de vibração torcional tem freqüências típicas entre 0.05 a 0.5 Hz, Jansen [1].

O terceiro tipo de vibração que pode ocorrer na coluna é a vibração axial; no caso mais crítico, a broca periodicamente perde contato com a parte inferior do poço. Esta forma de movimento é chamado *Bit-Bounce*.

Uma análise dinâmica global da coluna de perfuração geralmente é complicada, visto que os três tipos de vibrações citadas anteriormente podem estar presentes, assim como as disfunções associadas a cada tipo de vibração: precessão direta e retrógrada (*Forward or Backward Whirl*) associada à vibração lateral, *Stick-Slip* associada à vibração torcional e *Bit-Bounce* associada à vibração axial, Fig. 4.

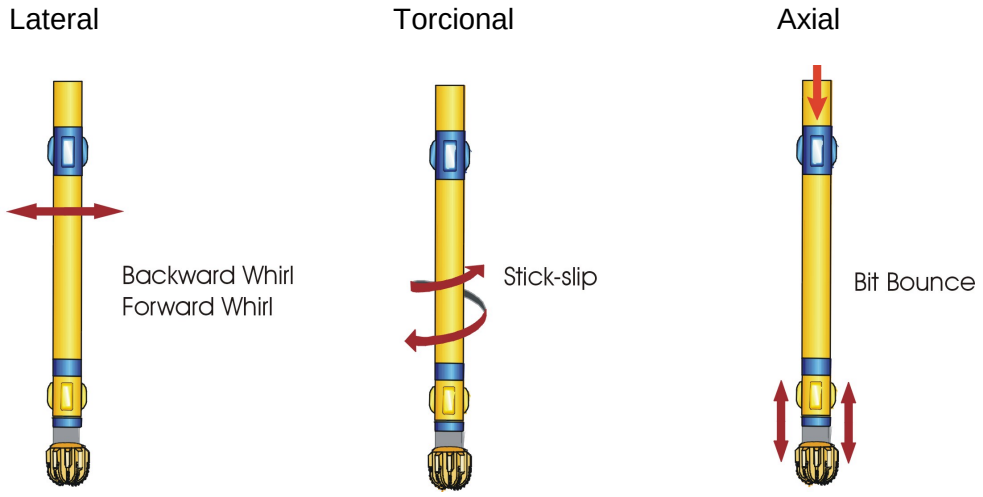

Figura 4 – Disfunções que podem ocorrer na coluna de perfuração

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

1.1.3.
Semelhança com uma Broca de Perfuração

A dinâmica de um rotor vertical em balanço, com impacto, pode descrever satisfatoriamente a dinâmica lateral da broca de uma coluna de perfuração, considerando um disco de secção circular que está girando dentro de uma parede tubular, Figs. 5 e 6.

Uma boa aproximação para a análise da broca é considerar um sistema do tipo eixo-rotor-estator (rotor vertical em balanço). Nesta configuração, o eixo representa a coluna de perfuração, o disco a broca e o estator a parede do poço.

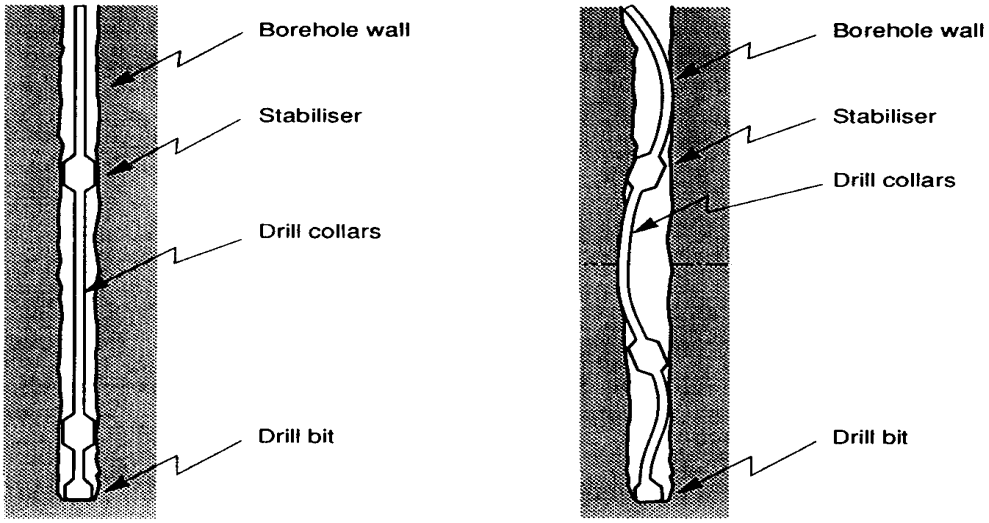

Figura 5 – Coluna de perfuração não deformada e deformada (Jansen [1])

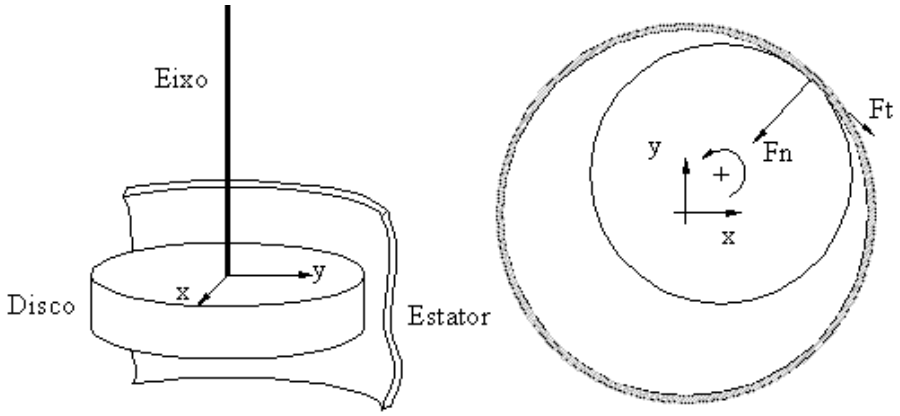

Figura 6 – Modelo simplificado para o estudo dinâmico da broca

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

1.2.
Estudo Sobre o Fenômeno de *Rubbing*

O *Rubbing* é o fenômeno que ocorre quando um elemento rotativo entra em contato eventual com uma parte estacionaria do sistema. Dependendo do tipo de contato o *Rubbing* pode ser parcial ou completo (*Partial or Full Rubbing*).

O ***Parcial Rubbing*** caracteriza-se por ser um contato do tipo intermitente, isto é: o rotor entra em contato e em seguida o mesmo se desfaz; este contato ocorre ocasionalmente durante uma fração do período de precessão de rotor.

O ***Full Rubbing*** caracteriza-se por ser um contato do tipo permanente, neste caso, o rotor entra em contato contínuo com a parede do estator e permanece assim durante o ciclo completo do seu período de precessão ($360°$).

1.3.
Revisão Bibliográfica

Yigit & Christoforou [2] apresentam um modelo dinâmico para estudar as vibrações laterais e torcionais acopladas numa coluna de perfuração, também apresentam um modelo para a força e o torque sobre a broca. Este modelo é função da velocidade de rotação da broca. Seus resultados mostram que o acoplamento não linear afeta significativamente a resposta do sistema, e que instabilidades podem ocorrer em velocidades não consideradas críticas em uma análise linear não acoplada.

Nos últimos anos, estudos de sistemas de perfuração são orientados com o objetivo de diminuir ou controlar a amplitude das vibrações. Neste contexto, Tucker & Wang [3] projetaram um mecanismo de controle para diminuir as vibrações torcionais, Fig. 7, chamado *Torsional Rectification* baseado na teoria de ondas de torção transitória (*Travelling Torsional Waves*). A idéia principal é que a interação da broca com a rocha é uma fonte de perturbações torcionais que se reflete na parte superior da coluna de perfuração. Neste trabalho demonstram que o mecanismo de controle sugerido é altamente superior ao controle tradicional. No controle tradicional, o torque é usado como parâmetro de realimentação, *Soft-Torque*.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

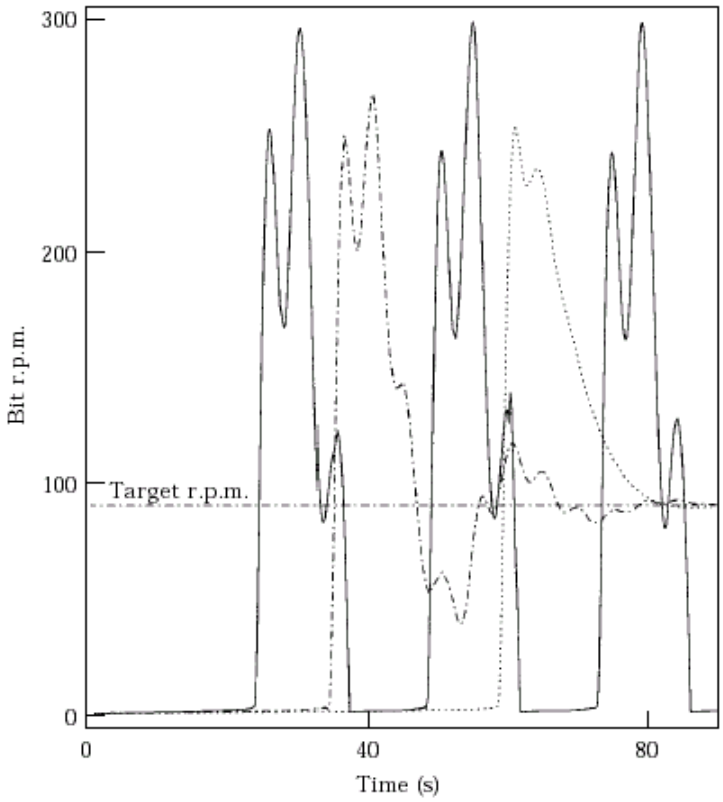

Figure 18. This figure exhibits the predictions of bit r.p.m. as a function of time from a simple model simulation (based on data set 2) that exhibits slip–stick oscillations in the absence of torque feedback. The results of three simulations are superimposed. The removal of unwanted oscillations is clearly evident with increasing torque rectification feedback. Key: —, $\lambda = 0$; – · – ·, $\lambda = 0{\cdot}3$; · · · ·, $\lambda = 1$.

Figura 7 – Copia dos resultados de Tucker & Wang [3] (λ é um parâmetro de controle que modifica a magnitude do torque do motor)

O impacto entre o rotor e estator é um fenômeno indesejado, já que ele pode ser uma importante fonte de falha em sistemas rotativos. O impacto é basicamente causado por elevadas amplitudes no deslocamento do rotor; este deslocamento é devido ao desbalanceamento da massa do rotor, a mancais defeituosos, a desalinhamentos na montagem, etc.

O movimento de precessão do rotor pode ser afetado de maneira significante; no caso de contato permanente, as grandes forças de atrito podem causar uma troca brusca na direção da precessão: de direta para precessão retrograda continua. A precessão do rotor, no modo retrogrado, está associada a altas freqüências, altas tensões e grandes deformações, que eventualmente levam ao dano e incluso à destruição do eixo e de toda a máquina, Muszynska [4].

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

Um estudo teórico e experimental sobre precessão retrograda por atrito seco (*Dry Friction Backward Whirl*) num rotor horizontal tipo Jeffcott é apresentado por Bartha [5]. Ele mostra que as freqüências da precessão aumentam com a velocidade de rotação do rotor. Para velocidades de rotação entre 15 a 40Hz, as freqüências de precessão estão entre 400 a 600Hz. Também afirma que o comportamento qualitativo durante o movimento de precessão é o mesmo para diferentes freqüências de rotação do rotor. As diferentes etapas (Fig. 8) do movimento são: movimento livre; excitação, que na maioria dos casos é seguido por uma serie de impactos intermitentes; contato contínuo do rotor com a parede interna do estator; uma aceleração rápida até altas freqüências, 550Hz; uma faixa com freqüências altas e finalmente uma vibração livre amortecida depois que o rotor chega a deter-se e perder contato com o estator.

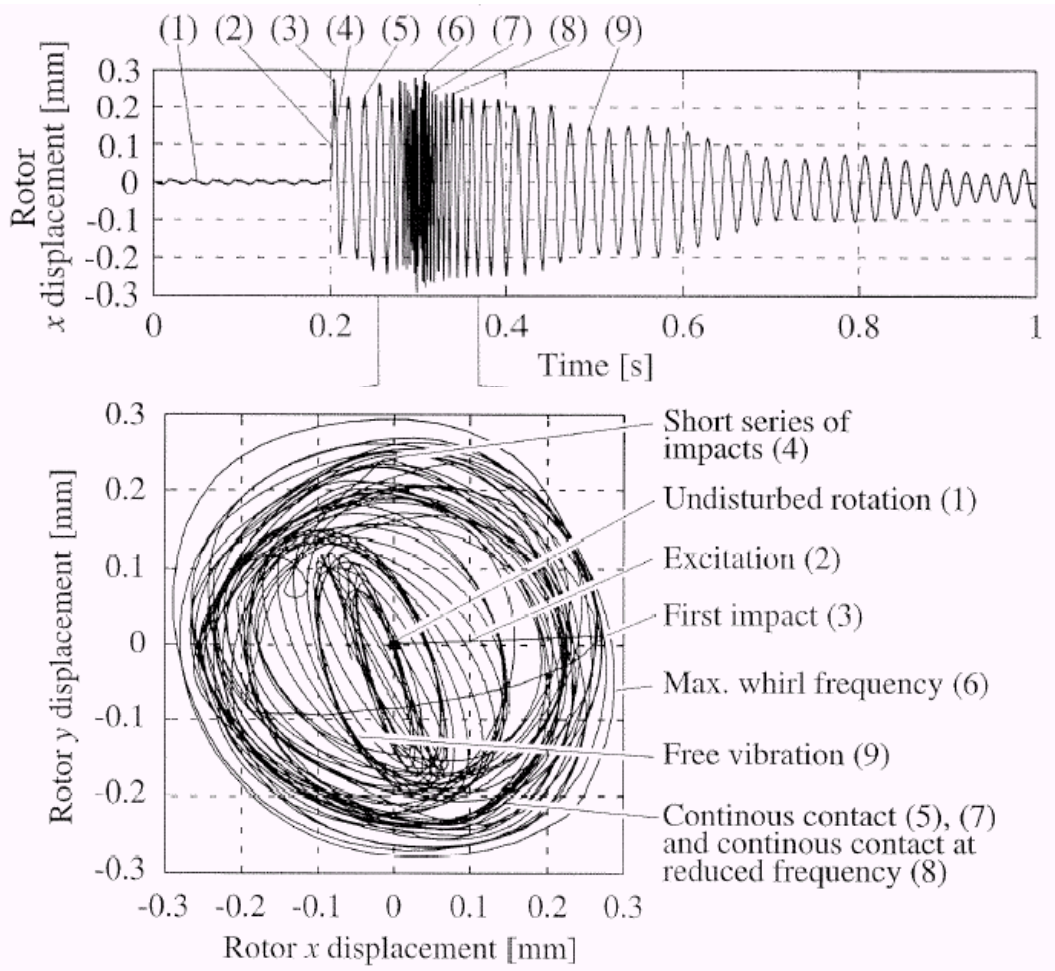

Figure 5.11: Orbit of the rotor for a whirl in a rigid stator, started at a rotational velocity of 40 Hz (2,400 rpm). The different phases of the motion that are described in the text are clearly visible.

Figura 8 – Copia dos resultados de Bartha [5]

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

Muitas vezes, devido ao contato do rotor em uma parte estacionaria, é possível que o sistema realize uma precessão, sendo que um estudo numérico do fenômeno da precessão direta e retrógrada é feito por Yanabe [6]. Ele usa um rotor vertical tipo Jeffcott, e seus resultados numéricos mostram que para pequenas excentricidades no rotor, este pode passar a velocidade crítica depois entrar em contato com o estator e realizar uma precessão direta. Para excentricidades medias, o rotor primeiro realiza precessão direta com grande amplitude, que é igual à folga radial, na freqüência natural de flexão do rotor, e finalmente realiza precessão retrógrada (cuja freqüência de precessão é alta) com grandes amplitudes de deslocamento que chegam a superar a folga radial entre o rotor e estator. Para grandes excentricidades ele mostra que o rotor realiza precessão direta com contato permanente, e não chega a realizar precessão retrógrada, Fig. 9.

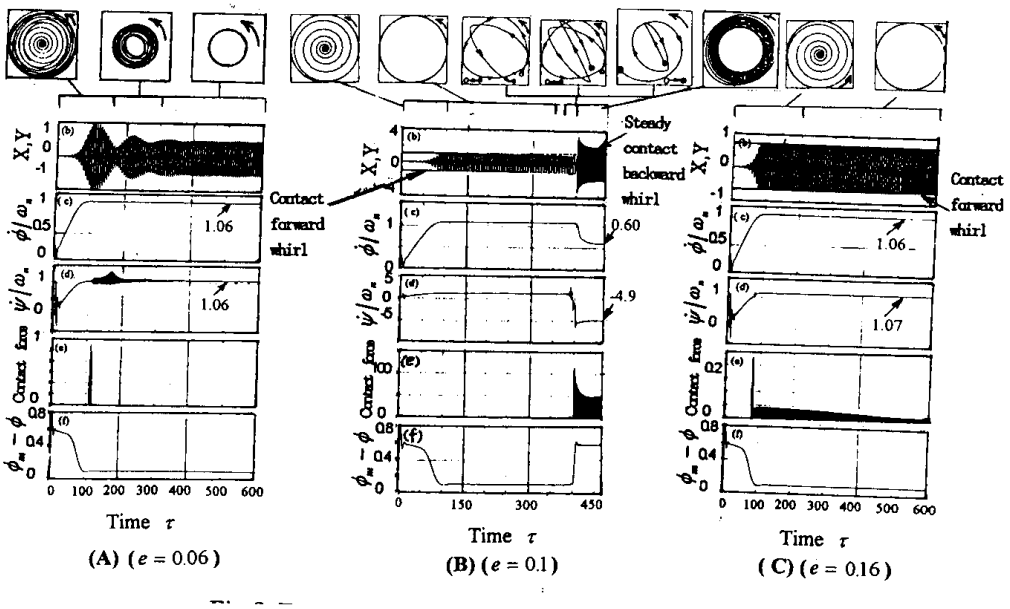

Figura 9 – Copia dos resultados de Yanabe [6] (*e* = excentricidade adimensional)

Na área de sistemas rotativos, são muitos os trabalhos desenvolvidos para estudar o fenômeno de impacto, precessão direta e retrógrada, contato parcial e permanente, velocidades críticas, freqüências naturais, etc.

Muitos modelos matemáticos consideram que a parte estacionaria do sistema é um subsistema rígido, o que não é verdade. Toda estrutura mecânica tem um certo grau de flexibilidade, que deve ser levado em consideração quando se realiza uma análise mais rigorosa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA

No presente trabalho, estuda-se a dinâmica de um rotor vertical em balanço, assim como os diferentes fenômenos que podem ocorrer quando ele interage com a sua contenção. Com esse fim, usam-se as teorias da dinâmica de rotores, vibrações, a física e a experimentação.

Este trabalho divide-se em 7 capítulos: no capítulo 2, apresentam-se as relações mais importantes para a modelagem do sistema rotativo em estudo, propõe-se um modelo para a força de impacto e obtêm-se as equações do movimento a partir da formulação Lagrangeana. No capítulo 3, descrevem-se as ferramentas numéricas a empregar para resolver o sistema não linear de equações (especificamente é usado o método de Runge-Kutta Fehlberg). Dois tipos de solução são investigados, um quando o sistema está acelerando e outro quando o sistema gira com velocidade de rotação constante. No capítulo 4 descrevem-se as características construtivas da bancada experimental e o equipamento utilizado para a aquisição de dados. No capítulo 5 estuda-se o comportamento da estrutura suporte da bancada: este capítulo compreende uma revisão da análise modal e a identificação de sistemas mecânicos, tendo a dinâmica da estrutura suporte representada através de uma função de transferência. Também, analisa-se a interação do rotor com a estrutura e se determina o instante do impacto. Neste capítulo usam-se os dados experimentais obtidos por Reis [7]. No capítulo 6 apresentam-se os resultados numéricos e experimentais, e, finalmente, as conclusões e algumas sugestões são apresentadas no capítulo 7.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0115594/CA