



Identificação de Falhas em Sistemas Rotativos

Entende-se por máquina rotativa qualquer maquinário que apresente partes girantes. De forma geral, uma máquina rotativa é constituída de eixos, discos, mancais e acoplamentos. Esse tipo de sistema rotativo representa a maior e mais importante classe de maquinário, utilizada para o transporte de meios fluídos, usinagem e conformação de materiais, geração de energia, propulsão naval e aeronáutica, dentre tantas outras aplicações.

Assim como qualquer outro sistema, estas máquinas estão sujeitas a falhas que podem comprometer seu correto funcionamento. Desta forma, dentro do novo conceito da Indústria 4.0, diversos sensores monitoram os diferentes componentes destas máquinas. Dentro dos sensores utilizados, os sensores que medem a vibração destas máquinas, são os que podem apresentar os melhores indicativos de algum tipo de falha nos componentes do sistema.

E dentre as diversas falhas que ocorrem em sistemas rotativos, as que ocorrem de maneira mais recorrente são: o desgaste dos mancais, o empenamento do eixo, o surgimento de trinca no eixo e o desalinhamento nos acoplamentos. Estes sinais têm características no espectro de frequências que permitem identificá-los e analisar o seu desenvolvimento de forma a estabelecer critérios para uma manutenção preventiva antes que um problema mais grave ocorra.

A análise do espectro de frequência de sinais oriundos da vibração de sistemas rotativos tem uma particularidade, frequências negativas são úteis, uma vez que indicam modos operacionais de vibração do sistema quando a direção do movimento de precessão acontece em sentido oposto ao movimento de giro próprio (também conhecido como '*spin*'). Sendo assim, é necessário que se faça uma análise do espectro completo do sistema ('também conhecido como '*fullspectrum*').

Desta forma, para avaliar o conteúdo em frequência dos sinais de vibração oriundos de sistemas rotativos, deve-se fazer o seguinte procedimento:

- ✓ montar um vetor girante complexo na forma $p = x + jy$, onde x é a vibração do sistema na direção horizontal e y é a vibração do sistema na direção vertical;
- ✓ aplicar a transformada de Fourier para o sinal complexo p ;
- ✓ avaliar as frequências com maior relevância na amplitude do sinal.

Um ponto importante a se considerar, é como fazer a transformada de Fourier de maneira correta, principalmente quando for utilizada diretamente a função *fft* do software Matlab. Desta forma, deve-se seguir o seguinte procedimento para se obter o *fullspectrum* de um dado sinal:

- ✓ para remover os ganhos em frequência 0 dos sinais, subtraia a respectiva média de todos os pontos dos vetores x e y antes de montar o vetor complexo p ;
- ✓ utilize a função *fft* do Matlab para o sinal p/N , onde N é o tamanho do seu vetor p ;
- ✓ corrija o espectro, uma vez que a resposta da função *fft* do Matlab é dada de 0 a frequência final, mas devido às propriedades de simetria da FFT, na verdade esta deve ser de $-(\text{frequência final})/2$ a $+(\text{frequência final})/2$. Para fazer esta correção no Matlab, basta usar a função *fftshift*;
- ✓ corrija a fase do sinal, porque a parte negativa do espectro é o complexo conjugado do que interessa, ou seja, a parte negativa deve ser convertida para seu complexo conjugado.

Feito o procedimento descrito anteriormente, a saída será um vetor complexo contendo o *fullspectrum* do sinal. Para efeitos práticos, analisa-se o módulo deste espectro.

Tendo as informações descritas anteriormente, o objetivo deste trabalho é identificar, através de uma metodologia a ser decidida pelo grupo, qual falha está presente em um determinado sinal de vibração medido e fornecido do sistema. O problema aqui é que estes sinais foram corrompidos por ruídos de medição e outras influências externas inerentes ao ambiente de funcionamento das máquinas.

A tarefa de cada grupo será, a partir de um conjunto de dados de uma determinada falha, identificar um padrão próprio da falha, excluindo os outros efeitos não aleatórios e inerentes ao sistema. Para isso, provavelmente, será necessária aplicação de filtros e outros ajustes no sinal, de forma a eliminar os conteúdos indesejados, deixando somente as informações úteis para a identificação da falha.

Serão fornecidos os seguintes dados para os grupos:

- ✓ dados do sistema sem nenhum tipo de falha e sem estar corrompido por nenhum tipo de interferência para ser usado como referência. A pasta contendo estes dados está nomeada como ‘*Dados sem Falha*’. Obs: Os grupos deverão notar que este sinal sem falha deve apresentar um conteúdo em frequência somente relativo ao desbalanceamento inerente presente em sistemas rotativos;
- ✓ dados do sistema com a falha 1, que está em uma pasta nomeada como ‘*Dados Falha 1*’;
- ✓ dados do sistema com a falha 2, que está em uma pasta nomeada como ‘*Dados Falha 2*’.

Uma observação importante a se fazer aqui: todos os dados foram adquiridos com a mesma frequência de amostragem e com a mesma quantidade total de tempo. Além disso, a velocidade de rotação da máquina foi a mesma para todos os casos, $\omega_r = 80\text{Hz}$ ou $\omega_r = 4800\text{rpm}$. Isso implica que a mesma energia estava sendo fornecida para todos os casos.

Com os dados fornecidos, cada grupo deverá seguir o seguinte procedimento:

- ✓ escolher 6 casos dentre os 10 fornecidos na pasta de cada uma das falhas, ou seja, serão analisados um total de 12 casos com falhas;
- ✓ para cada um do conjunto de 6 casos de uma determinada falha, analisar o espectro do sinal de forma a identificar o que é o padrão daquela falha e o que é somente ruído ou interferência;
- ✓ identificado o padrão, aplicar as técnicas de processamento de sinais vistas durante a disciplina para ‘limpar’ o sinal, ou seja, retirar todo tipo de ruído e interferência e deixar somente o conteúdo relativo ao padrão daquela determinada falha.

Após fazer este procedimento, o grupo deve identificar qual o tipo da falha presente em cada um dos dois conjuntos de dados. Para isso, utilize a Tabela 1, que contém as características típicas das principais falhas em sistemas rotativos no *fullspectrum* dos sinais de vibração. Vale destacar que, a maioria das falhas apresentam conteúdos no espectro em frequências que são funções diretas da velocidade de rotação. Por exemplo, na Tabela 1, ao falar que a falha por desalinhamento apresenta conteúdos em $2x$ e $3x$, significa que ela vai apresentar conteúdo em 2 vezes a velocidade de rotação e em três vezes a velocidade de rotação, que para o caso analisado aqui seriam em 160Hz e 240Hz.

Tabela 1: Sintomas no Conteúdo em Frequência de Falhas Típicas de Sistemas Rotativos

Tipo de Falha	Sintomas no Conteúdo em Frequência
Desalinhamento	Surgimento de Componentes em $2x$ e $3x$
Empenamento	Surgimento de Componentes em $0,5x$ e $1,5x$
Desgaste do Mancal	Surgimento de Componentes em $-1x$ e $-2x$
Trinca do Eixo	Surgimento de Componentes em $2x$ e $-1x$

Outras informações importantes com relação a este trabalho:

- ✓ os trabalhos devem ser desenvolvidos em grupos de até duas pessoas;
- ✓ os trabalhos devem ser entregues em uma versão escrita, contendo o detalhamento de tudo que foi feito, apresentando gráficos, discussões e conclusões acerca do que é pedido. Além disso, em anexo, deve ser colocado o código em Matlab, ou software semelhante, utilizado para gerar os resultados;
- ✓ os trabalhos também serão brevemente apresentados pelos grupos nos dias 21/11 ou 26/11 (apresentações de cerca de 10 minutos). As datas de apresentação de cada grupo serão definidas em sorteio realizado na sala de aula;

- ✓ será valorizada a capacidade criativa dos grupos para resolver o problema e forma detalhada como o procedimento for realizado e detalhado tanto na versão escrita como na apresentação;
- ✓ como cada grupo utilizará somente 12 dos 20 dados com falha fornecidos, e também, a forma de se chegar as conclusões corretas pode ser bem diversa, estatisticamente é praticamente impossível que se tenham dois trabalhos iguais simplesmente por ‘coincidência’.

Por fim, peço a todos que façam um esforço para comparecerem na próxima aula (terça-feira, dia 12/11), uma vez que separei esta aula para discutirmos o trabalho com maiores detalhes. Tentem também ler o conteúdo deste arquivo antes da aula de forma a levantar possíveis dúvidas que possam ser esclarecidas durante a discussão sobre o trabalho.