

XXXVII IBERIAN LATIN AMERICAN CONGRESS
ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING
BRASÍLIA - DF - BRAZIL

ANÁLISE DA APLICAÇÃO DA FFT (FAST FOURIER TRANSFORM) NO DIAGNÓSTICO DE FALHA EM MÁQUINAS ROTATIVAS

Mauro Lucio Martins

Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior

Gilmar Cordeiro da Silva

Viviane Cordeiro Almeida

Norberto Martins

Daniel de Castro Maciel

Thais Roberta Campos

mauromartins1963@gmail.com

paamjr@gmail.com

gilmarcord@gmail.com

viviane@vmcontabil.com

norbertoengmec@gmail.com

Trcampos@pucminas.br

Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

Avenida Dom José Gaspar, 500, bairro Coração Eucarístico, Belo Horizonte, 30.535-901, Minas Gerais, Brasil.

Resumo. A decomposição de um sinal de vibração periódico complexo em suas diferentes componentes senoidais, representadas cada uma delas por sua amplitude (A_i) e sua frequência (F_i), é feita por uma transformação tempo x frequência chamada de Transformada de Fourier, objeto deste estudo e a demonstração que será apresentada utilizando os analisadores digitais modelo CSI 2130, equipado com o acelerômetro modelo 622A01 e o software MHM da CSI. Também utilizou-se o software Matlab R 2016, para a simulação dos pontos de vibração separados e demonstrado neste trabalho. Esta tecnologia foi aplicada no motor elétrico Weg (mancal horizontal LA e LOA), da bomba de óleo lubrificante 103MP 27B fabricante Flowserve. A função matemática FFT (Fast Fourier Transform) faz

uma transposição do sinal de domínio temporal para o domínio freqüencial, a representação do sinal obtido é denominada espectro de freqüência, sendo implementada pelos analisadores de vibração atuais. Por meio dos resultados encontrados pode se inferir que, é perfeitamente possível e viável diagnosticar o estado da maioria dos equipamentos rotativos através da análise da vibração em função da aplicação do algoritmo supra citado, evidenciando que sua utilização proporciona uma redução significativa no tempo de processamento computacional, para gerar gráfico tempo x freqüência, que ao ser analisado nos sinaliza a condição do equipamento, proporcionando uma tomada de decisão precisa com relação a intervenção na máquina de forma eficaz.

Palavras chave: Vibração, Fast Fourier Transform, *Software MHM da CSI*, Freqüência,

.1 INTRODUÇÃO

A criação da transformada rápida de Fourier foi uma das grandes conquistas da humanidade. Em 1965, J. W. Cooley e J. W. Tukey, publicaram na revista *Mathematics of Computation* um método que requeria em torno de $m \cdot \log_2 m$ multiplicações e adições, desde que fosse escolhido uma quantidade apropriada de termos, o que possibilita a diminuição de número de cálculos de milhões para milhares, por isso recebendo o nome de “Algoritmo da Transformada Rápida de Fourier”. Por meio da utilização da Transformada Rápida de Fourier, tornou-se possível diminuir o tempo de processamento em aplicações que variam desde resolução de equações diferenciais, equações integrais, problemas inversos até incluir problemas de teoria dos números.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é apresentar a aplicação FFT (Fast Fourier Transform) na medição e análise de vibrações, utilizando medidores de vibração, bem como os seus benefícios.

3 EMBASAMENTO TÉCNICO

Segue um resumo teórico sobre os assuntos mais importante de forma a dar embasamento sobre as diversas áreas abordadas no desenvolvimento deste trabalho.

3.1 Transformada De Fourier

A Transformada de Fourier, em essência, uma ferramenta matemática que realiza a transição entre o variável tempo e freqüência de sinais. Neste item temos como objetivo principal resumir as principais propriedades da Transformada de Fourier e apresentar técnicas computacionais para sua determinação na forma discreta, chamada DFT (do inglês “Discrete Fourier Transform”), e alguns de seus algoritmos rápidos, chamados coletivamente de FFT (do inglês “Fast Fourier Transform”).

Existe uma vasta literatura que trata das características da transformada de Fourier. Na forma contínua há inúmeras obras, onde se encontram textos resumidos e baseados em aplicações como em Spiegel, M. R. *Fourier Analysis with applications to boundary value problems*. Mc Graw Hill, New York, 1974. Spiegel, M. R. *Fourier Analysis with applications*

to boundary value problems. Mc Graw Hill, New York, 1974. É pertinente lembrar que Jean-Baptiste Joseph Fourier descobriu no início do século XIX que qualquer função periódica, por mais complicada que seja, pode ser representada como a soma de várias funções seno e cosseno com amplitudes, fases e períodos escolhidos convenientemente. Existem alguns requisitos para que essa afirmação seja totalmente verdadeira. Portanto, qualquer função $f(x)$ pode, segundo Fourier, ser escrita na forma da soma de uma série de funções seno e cosseno da seguinte forma geral descrita na equação 1:

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{L} + b_n \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (1)$$

Fourier conseguiu achar uma forma simples e elegante de calcular esses coeficientes a_0 , a_1 , a_2 , ..., b_1 , b_2 ... da seguinte forma. Por exemplo: para se determinar o coeficiente a_3 , multiplicam-se ambos os lados da equação por $\sin(3x)$.

Assim:

$f(x) \cdot \sin(3x) = a_0 \cdot \sin(3x) + a_1 \cdot \sin(x) \sin(3x) + a_2 \cdot \sin(2x) \sin(3x) + a_3 \cdot \sin^2(3x) + \dots$
 $b_1 \cdot \cos(x) \sin(3x) + b_2 \cdot \cos(2x) \sin(3x) + \dots$, verifica-se que todas as médias do lado direito da equação são nulas, exceto o termo correspondente a a_3 . Então se descreve a equação 2 :

$$f(x) \cdot \sin(3x) = \frac{1}{2} \cdot a_3 \quad (2)$$

Fazendo-se o mesmo para todos os valores de n em $\sin(nx)$ e $\cos(nx)$, verifica-se.

que:

$$a_0 = f(x) = \text{média de } f(x);$$

$$a_n = 2 \cdot f(x) \cdot \sin(nx) = 2 \text{ vezes a média de } f(x) \cdot \sin(nx);$$

$$b_n = 2 \cdot f(x) \cdot \cos(nx) = 2 \text{ vezes a média de } f(x) \cdot \cos(nx);$$

Calculando todas essas médias, encontram-se todos os coeficientes da Série de Fourier.

A Transformada de Fourier de um sinal $x(t)$ é definida pela equação 3 :

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (3)$$

onde $x(t)$ é uma função real no tempo e $X(\omega)$ é uma função complexa da frequência. As condições para a existência da Transformada de Fourier são complicadas, porém é suficiente que a função $x(t)$ seja absolutamente integrável. Os sinais encontrados na prática não apresentam esta dificuldade. Entretanto, sinais idealizados, tais como sinais senoidais que atuam indefinidamente no tempo, apresentam dificuldades para sua normalização.

A Transformada de Fourier é a ferramenta essencial para se obter a transformação do sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. Esta representação, denominada espectro de frequência, é a maneira mais usual de representar as características de um sinal captado. Através do espectro de frequência podem-se avaliar as diversas frequências componentes do sinal e a magnitude de cada um destes componentes. Em um ensaio dinâmico, a resposta à excitação captada pelo acelerômetro, que é um sinal analógico, é discretizada em uma série de pontos no tempo pelo hardware utilizado, como por exemplo, a placa coletora de dados. No entanto, a obtenção da função que caracteriza o sinal utilizando diretamente a Transformada de Fourier, como indicado na equação 4, torna-se, às vezes, muito difícil. Uma solução encontrada para se obter o espectro de frequência, denominada Transformada Discreta de Fourier (DFT), na qual a integral da equação 4 é substituída pelo somatório:

$$X(m) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{\frac{i2\pi nm}{N}} \quad m = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (4)$$

Onde $x(n)$ é o conjunto de pontos que representa o sinal no tempo e N é o número de pontos amostrados. Evidentemente, que quanto maior o número de pontos amostrados melhor a resolução do espectro de frequências e maior o tempo computacional gasto. Visando-se otimizar a utilização da Transformada Discreta de Fourier, J. W. Cooley (IBM) e J. W. Tukey (Bell Labs) desenvolveram em 1965 um algoritmo para executar a equação 26 de forma mais rápida, reduzindo o trabalho computacional, que foi denominado de Transformada Rápida de Fourier. O algoritmo da FFT divide a sequência $x(n)$ em duas sequências menores, uma com os coeficientes de índices par e outra com os coeficientes de índices ímpares. Calculando a DFT para cada uma delas e depois combinando-as de modo a se obter a DFT da sequência completa. Para se resolver a DFT de uma amostra de N pontos são necessárias $2 \cdot N^2$ 30 multiplicações reais, enquanto utilizando-se o algoritmo da FFT são necessárias $4 \cdot N \cdot (\log_2 N)$ multiplicações reais. Portanto, para uma amostra de 1000 pontos o número de multiplicações para se resolver a DFT é de 2.000.000, enquanto para se resolver utilizando FFT são necessárias 39.863 multiplicações, isto é aproximadamente 50 vezes menor.

Com o advento da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transform - FFT), o trabalho de obtenção de bandas espectrais tornou-se mais eficiente. Sua finalidade consiste em permitir a mudança em um sinal obtido no domínio do tempo para o domínio da frequência. Isso se faz necessário uma vez que, em geral, os gráficos obtidos no domínio do tempo contêm um excesso de informação, já que são influenciados por diferentes amplitudes que se repetem em diferentes períodos de tempo. Ocorre então, a superposição de diferentes amplitudes oriundas de ressonâncias excitadas nos componentes do mancal, tornando o sinal excessivamente complexo. Com a mudança de domínio, é possível filtrar o sinal evitando essa repetição e superposição das amplitudes. A figura 1 representa a mudança de um sinal obtido no domínio do tempo para o domínio da frequência

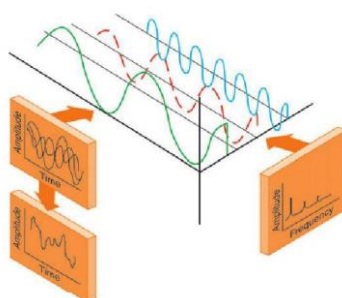


Figura 1. Abaixo mostra um desenho esquemático representativo de tal mudança (HP Agilent,1995 .)

4. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

Para desenvolvimento deste trabalho utilizou-se de analisadores digitais de espectro de sinais modelo CSI 2130, equipados com o acelerômetro modelo 622A01 e o software MHM da CSI, pretendendo calcular as equações em um menor intervalo de tempo possível, permitindo assim, a análise rápida das falhas em equipamentos dinâmicos, a exemplo do equipamento mencionado abaixo. Esta tecnologia foi aplicada em uma bomba de recírculo de Nafta pesada do fabricante Flowserve.

4.1 Descrições da bomba analisada

A máquina rotativa analisada neste trabalho e uma bomba óleo lubrificante, fabricante Flowserve, funciona a partir de um motor de 27cv a turbina em uma rotação de 1800 rpm. O dado de vazão do equipamento não fornecido pelo fornecedor. A figura 2 mostra o conjunto motor bomba em estudo.



Figura 2. Imagem do conjunto motor bomba objeto do estudo.

4.2 Descrições do equipamento de medição de vibração

O equipamento utilizado para analisar as vibrações, modelo CSI A2130A2 de 2 canais

com os acessórios possui as seguintes características:

- 02 Adaptadores modelo A06290V (dois canais, volt)
- 06 Acelerômetros
- 04 Bases magnéticas
- 02 Cabos, turck para BNC (Verm.)
- 02 Cabos, turck para BNC (azul)
- 02 Adaptadores de 2 canais de sensores
- 02 Cabos helicoidais
- 02 Cabos comunicação coletor com micro (USB)
- 02 Cabos comunicação coletor com micro (USB)
- 02 Alças de ombro
- 02 Maletas para transporte
- 01 Fone de ouvido
- 01 Adaptador para fone modelo A649P
- Manual e software em português

A figura 3 mostra o equipamento utilizado para analisar as vibrações.



Figura 3. Analisador de vibração utilizado na medição

4.3 Descrições do software utilizado no trabalho

Software MHM da CSI, que tem como base matemática a transformada de FFT (Fast Fourier Transform), gerando o gráfico abaixo indicando a falha do equipamento, através da análise dos sinais de vibração captados pelo acelerômetro e transformado em sinal elétrico sendo processado no tempo e na frequência com a base matemática da FFT.

4.4 Demonstrações dos pontos de coleta de dados.

Para este trabalho coletamos os dados de vibração utilizando os equipamentos supracitados, e para melhor elucidação segue o descritivo dos pontos.

LOA – Lado oposto ao acoplado

LA- Lado acoplado

H- Ponto horizontal

V- Ponto vertical

A - Axial

Segue a figura 4, que destaca o desenho esquemático dos pontos de coleta.

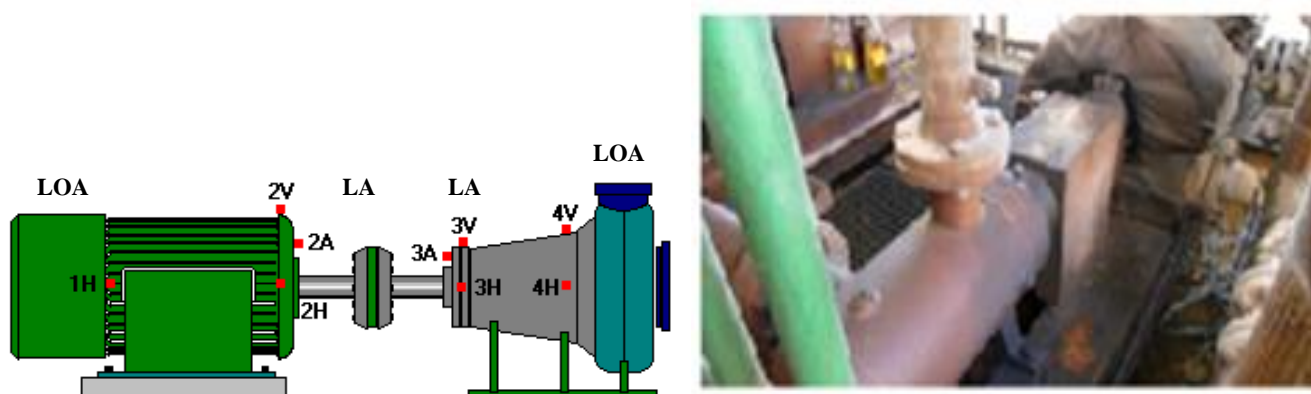


Figura 4. Desenho esquemático dos pontos de coleta

4.5 Dados coletados e espectro

Utilizando-se de analisadores digitais de espectro de sinais modelo CSI 2130, equipados com o acelerômetro modelo 622A01 e o software MHM da CSI, coletaram-se os dados que serão apresentados a seguir com os respectivos espectros de vibração gerados a partir da transformada rápida de Fourier, uma vez que a sua utilização, proporciona a geração dos gráficos em um tempo significativamente menor.

Foram analisados e coletados 4.096 pontos gerando 1024 linhas.

Pontos coletado: (1H,1V,2H,2V,2A,3H,3V,3A,4H,4V)

Para não ficar muito extenso iremos apresentar a tabela reduzida do estudo 1H e os gráficos waveform (forma de onda) e o spectrum, porém estarão disponíveis para consulta na base de construção deste artigo as tabelas e gráficos completos.

4.5 Pontos 01H – Motor Horizontal LOA- Planilha e Gráfico

Waveform Amplitudes

Maquina: (ST0A) BOMBA DE ÓLEO

Meas. Point: 103MP 27B -01H --> MOTOR HORIZ. LOA

Date/Time: 08-abr-16 05:58:11 Amplitude: Velocity in mm/Sec

Time (mS) Amplitude Time (mS) Amplitude Time (mS) Amplitude Time (mS) Amplitude
Amplitude

Abaixo segue os valores coletados no ponto 01H no tempo e na amplitude coletamos 4096 pontos distribuídos em 1024 linhas como citado anteriormente e assim demonstrado na tabela reduzida abaixo gerando o “spectrum e waveform” que será apresentado a seguir na figura 5.

Waveform Amplitudes							

Maq	uina:	(ST0A) BC	MBA DE CO	LUBRIF	03TG01		
Mea	s, Point:	103MP 27I	-01H -->	MOTOR MNCAL	HOF, LOA		
Dat	e/Time:	0 8-abr-16 1	05:58:11	Amplitude:	Velocity	in mm/Sec	
Time (mS)	Amplitude	Time (mS)	Amplitude	Time (mS)	Amplitude	Time (mS)	Amplitude
0	-0,127	800	-0,333	1600	0,144	2400	0,355
0,781	-0,218	800,8	0,013	1600,8	-0,703	2400,8	0,084
1,563	-0,435	801,6	-0,609	1601,6	-0,542	2401,6	0,079
2,344	-0,302	802,3	-0,33	1602,3	-0,0012	2402,3	0,27
3,125	0,279	803,1	-0,043	1603,1	-0,387	2403,1	0,024
3,906	-0,157	803,9	-0,305	1603,9	-0,584	2403,9	-0,129
4,688	-0,115	804,7	0,129	1604,7	-0,156	2404,7	-0,137
5,469	0,531	805,5	0,269	1605,5	-0,109	2405,5	-0,297

Figura 5. Tabela dos pontos de vibração coletados 1H

4.6 Pontos 01H – Motor Horizontal LOA- Spectrum e Wavefom

Espectro gerado a partir da base matemática FFT faz uma transposição do sinal de domínio temporal para o domínio freqüencial. A representação do sinal obtido é denominada espectro em frequências. Desta forma podemos acompanhar o comportamento de cada ponto na sua correspondente posição identificando o real status do equipamento e predizendo as falhas eliminando os custos com perdas de produção e manutenção não programada.

Spectrum e Wavefom obtidos a partir dos dados coletados no ponto 1H estão demonstrados na figura 6.

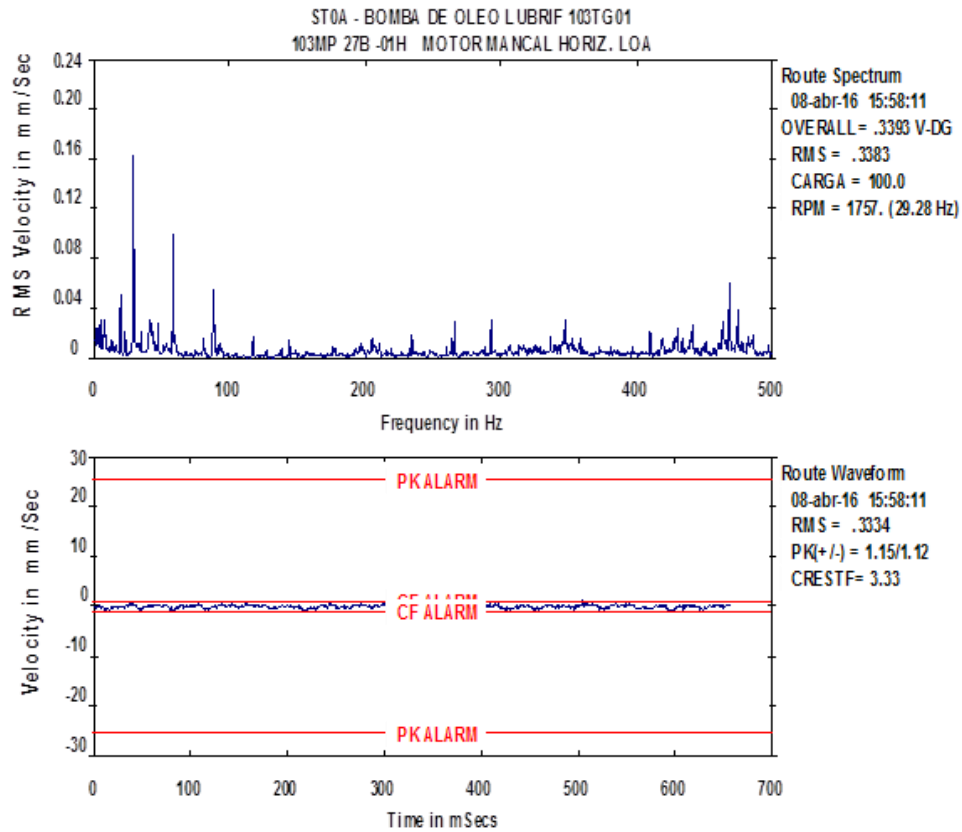


Figura 6. Spectrum e Waveform 1H

5 SPECTRUM DE ANÁLISE

Conforme indica o gráfico abaixo, no dia 24/03/2016 às (2h:25m) duas horas e vinte e cinco minutos, o rolamento da bomba falhou catastroficamente. Antes, porém que ocorressem danos piores, a máquina foi parada, evitando assim, outras intercorrências envolvendo demais componentes da máquina. Caso a intervenção de parar a máquina não fosse realizada, aumentaria as possibilidades de alteração dos custos do processo tornando-os mais elevados, bem como a probabilidade de ocorrer um incêndio, em função do aquecimento provocado pelo dano do rolamento que falhou.

Demonstramos a falha no gráfico abaixo bem como o componente danificado na figura 16 abaixo.

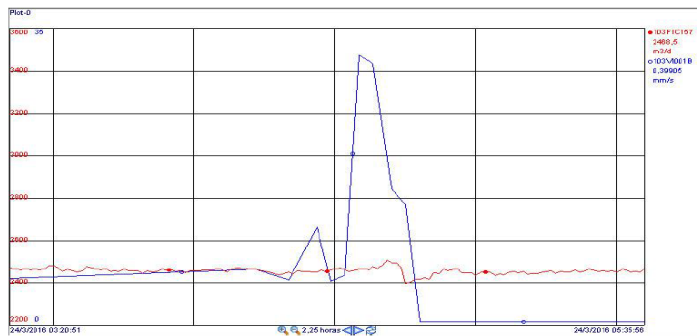


Figura 16, Gráfico gerado pelo aparelho.

A figura 17 a baixo mostra ilustra os diversos pontos da bomba bem como o mancal objeto do nosso estudo

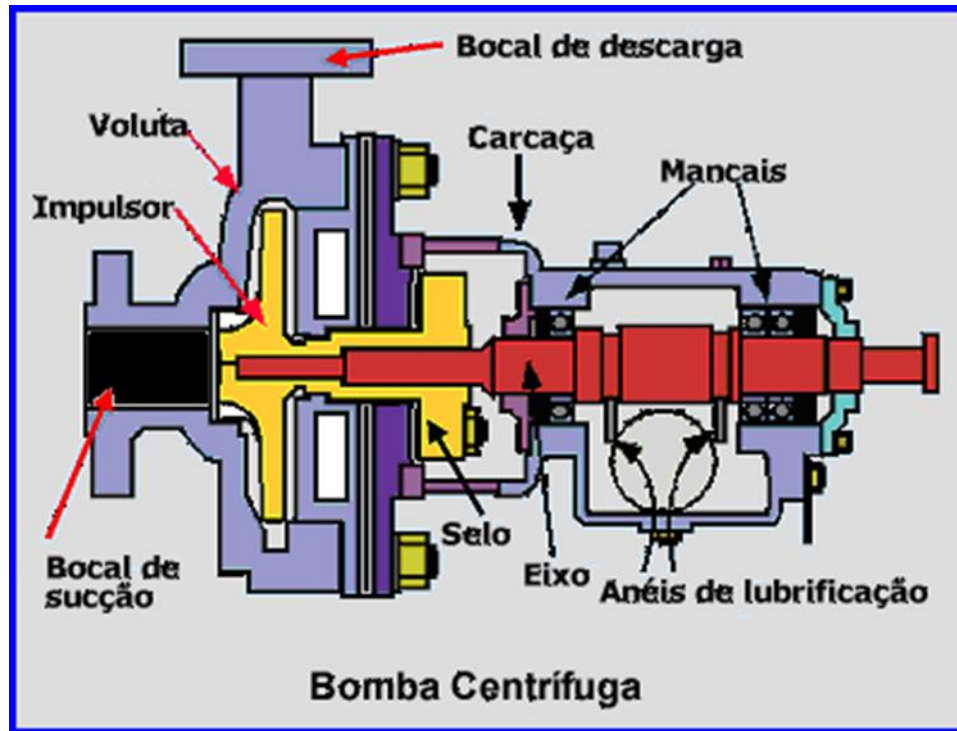


Figura 17, Bomba em corte (ilustração)

6 CONCLUSÃO

A decomposição de um sinal de vibração periódico complexo em suas diferentes componentes senoidais, representadas cada uma delas por sua amplitude A_i e sua frequência F_i é feita por uma transformação tempo – frequência, chamada de Transformada de Fourier. Esta função matemática faz uma transposição do sinal de domínio temporal para o domínio freqüencial. A representação do sinal obtido é denominada espectro em frequências.

A Transformada de Fourier é implementada pelos analisadores de espectros modernos e são denominados de FFT (Fast Fourier Transform ou Transformada Rápida de Fourier), sua utilização proporciona analisar um número muito grande de dados em tempo mínimo, bem como a transformação do sinal no tempo em espectro de frequência.

Por meio da análise do espectro é possível conhecer o status do equipamento em tempo real, aumentando a probabilidade de se ter o controle sobre as máquinas rotativas. Deste modo, as falhas podem ser mais facilmente previstas, os custos de manutenção passam ser reduzidos e confiabilidade do equipamento pode ser levada a patamares muito próximos a 100% (cem por cento) e com custos mais viáveis.

AGRADECIMENTO

A Deus por ter me dado esta oportunidade e me sustentado até aqui, ao Professor Pedro Américo Almeida Magalhães Júnior pela amizade, paciência e ensinamentos, a todos os colegas do COMAU, VITEK, MGS E REGAP que ajudaram direta ou indiretamente, a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, aos Senhores Eduardo Pereira Sarto e Delmer Cesario pelas oportunidades indiretas de desenvolvimento do meu trabalho, ao Cilamce pela oportunidade de apresentar o trabalho.

REFERENCES

Addison-Wesley Publishing Company, Massachussets, 1993.

Blahut, R.E. Fast algorithms for digital signal processing. Addison - Wesley Publishing Company, 1985.

Brigham, E. The Fast Fourier Transform. Prentice Hall, New Jersey, 1974.

Estelle L. Basor, K. E. M. The fisher-hartwig conjecture and toeplitz eigenvalues. Tech. rep., California Polytechnic State University, 1992.

Gonzalez, R. C., and Woods, R. E. Digital Image Processing, 2nd ed.

Iserles, A. Numerical analysis lecture 17. Tech. Rep., Cambridge Numerical Analysis Group, 2004.

J. W. Cooley e J. W. Tukey, 1965

Singiresu RAO, Vibrações Mecânicas, quarta edição, 2008.

Spiegel, M. R. Fourier Analysis with applications to boundary value problems. Mc Graw Hill, New York, 1974.

