



18 a 21 de novembro de 2014, Caldas Novas - Goiás

APLICAÇÃO DE FFT PARA A DETECÇÃO DE DEFEITOS EM MÁQUINAS ELÉTRICAS

Erik Leandro Bonaldi, erik@institutognarus.com.br¹

Levy Ely de Lacerda de Oliveira, levy@institutognarus.com.br¹

Germano Lambert-Torres, germanoltorres@gmail.com¹

Jonas Guedes Borges da Silva, jonas@institutognarus.com.br¹

Luiz Eduardo Borges da Silva, leborges@unifei.edu.br²

Marcela Ribeiro, marcelaribeiro@suapecnergia.com.br³

Alexandre Venceslau, alexandresilva@suapecnergia.com.br³

¹Instituto Gnarus – Diretoria de Pesquisa & Desenvolvimento - Rua Cel. Francisco Braz, 185 - Itajubá - MG

²Universidade Federal de Itajubá - IESTI/GPCI - Av. BPS 1303 - Itajubá - MG

³Energética SUAPE II - Rodovia PE-60, km -10 - Cabo de Santo Agostinho - PE

Resumo: Este artigo apresenta a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (Fast Fourier Transformer - FFT) na detecção precoce de defeitos em máquinas elétricas rotativas. Os sinais de corrente e de tensão são coletados externamente ao conjunto em análise (motor-carga ou gerador-máquina primária) através de transdutores especiais desenvolvidos para esta finalidade durante sua operação normal. Estes sinais, inicialmente adquiridos no domínio do tempo, carregam não só dados operativos do conjunto, mas também suas características típicas e informações sobre defeitos (incluindo sua severidade), contudo estes são de difícil análise nesta condição; Assim, os sinais são então tratados diretamente pela FFT, gerando sinais no domínio da frequência. Desta forma, é possível criar uma “assinatura elétrica” para cada conjunto e separar suas características típicas, ruídos e possíveis defeitos. Estas assinaturas elétricas definem o estado geral do conjunto e, somente através de medidas externas de correntes e tensões elétricas, é possível intervir problemas elétricos no motor (ou gerador) e/ou mecânicos na carga (ou máquina primária) e acoplamento. Este tipo de inferência é bastante útil para diversas empresas, pois em várias delas o acesso ao conjunto pode ser perigoso ou mesmo impossível (como em bombas petrolíferas submersas), pois sinais de corrente e tensão podem ser tomados em qualquer ponto da instalação mesmo bastante distante do conjunto alimentado por eles. Estes sinais, no domínio da frequência, são então apresentados por um banco de dados em problemas típicos e com seus históricos de assinaturas, produzindo informações sobre o tipo de defeito que está ocorrendo no conjunto e sua evolução. Este artigo apresenta em detalhe como os sinais são tratados e como as assinaturas elétricas são obtidas. Um exemplo ilustrativo de aplicação de FFT em sinais elétricos com detecção de defeitos precoces é também apresentado.

Palavras-chave: Transformada Rápida de Fourier, Assinatura Elétrica, Máquinas Elétricas, Manutenção Preditiva

1. INTRODUÇÃO

Diferentemente da maioria das especialidades das engenharias, tais como mecânica, civil, aeronáutica, a engenharia elétrica trabalha com modelos de elementos que nunca puderam ser observados diretamente na prática. Com os elementos da engenharia mecânica podem-se construir máquinas; com a engenharia civil, prédios e pontes; com a engenharia aeronáutica, aviões e naves espaciais; entretanto a engenharia elétrica trabalha com o movimento de elétrons, denominado corrente elétrica, e que ocorre devido a uma diferença de potencial, chamada de tensão.

Baseado nessas duas grandezas básicas e inteiramente imaginárias, toda a teoria elétrica pode ser construída e derivada, mesmo sabendo que os elétrons até então nunca foram, por exemplo, fotografados. Assim, a partir destes modelos, obtém-se outras grandezas, tais como diversos tipos de potência (ativa e reativa), de energia, fator de potência, resistência, entre outros. E mais, mesmo sendo somente modelos, as grandezas básicas e suas grandezas derivadas podem ser medidas e utilizadas na prática. É sobre toda esta formulação que se consegue “gerar” energia elétrica, transportá-la desde os pontos de geração até os locais de consumo, como as indústrias e nossas casas, e transformá-la

em algum tipo de energia útil (acústica, térmica, luminosa, ...). Este conjunto de geração, transporte e transformação compreende o que é chamado na engenharia elétrica de sistema elétrico de potência, que é uma de suas especialidades.

Outra forma de se compreender a energia elétrica, de maneira simplista, é de se defini-la como a forma mais fácil de se transportar energia de um ponto a outro. As usinas tem-se algum tipo de energia (mecânica nas hidráulicas, térmica nas de óleo ou carvão, ou de reações químicas nas nucleares) que seria muito difícil de ser transportada até o seu destino de uso final. Imagine-se só a dificuldade em se transportar água (energia mecânica) para se mover as pás de um ventilador diretamente. Assim, a utilização da energia elétrica facilita diversos processos de nossa vida quotidiana, porém também introduz alguns problemas, como, por exemplo, a necessidade de construir e manter funcionando os equipamentos responsáveis pelas transformações de energia.

A aplicação mostrada neste artigo trabalha exatamente nesta área, ou seja, como verificar possíveis defeitos em geradores de energia e em motores elétricos. Os geradores de energia são os responsáveis pela conversão de um tipo de energia, dita primária, em energia elétrica; enquanto os motores elétricos transformam energia elétrica em energia mecânica. Na realidade, os geradores elétricos transformam energia mecânica em energia elétrica. Esta energia mecânica que impulsiona o gerador é fornecida por uma turbina, a qual é impulsionada normalmente pelo movimento de água ou vapor d'água. Nas usinas hidráulicas, a água passa diretamente pela turbina criando seu movimento de rotação; enquanto nas usinas térmicas (carvão, óleo ou nucleares), a água é aquecida gerando seu movimento. Neste artigo, sempre que se mencionar gerador elétrico, deve-se entender o conjunto gerador-turbina, pois os defeitos podem ser encontrados nestes dois componentes.

O artigo está estruturado com as seguintes seções. Inicialmente, apresenta-se o problema a ser tratado e a forma que os sinais de corrente e tensão são medidos. Em seguida, são abordadas as técnicas de amostragem e matemáticas que foram utilizadas pelo sistema proposto. Finalmente, são apresentados alguns resultados práticos obtidos.

2. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA PARA DETECÇÃO DE DEFEITOS

O sistema desenvolvido para a detecção de defeitos em máquinas elétricas pode ser dividido em quatro principais etapas: (a) transdução dos sinais de interesse; (b) aquisição dos dados; (c) processamento dos dados colhidos; e (d) diagnóstico. Cada uma das etapas do processo de monitoração está intrinsecamente ligada com a outra, pois a qualidade e o tipo de informação que deve ser repassado depende diretamente da manipulação que deverá ser feita na etapa seguinte.

A transdução dos sinais é feita por um dispositivo que é sensibilizado por uma grandeza de entrada que se deseja monitorar (no caso no sistema desenvolvido, sinais de corrente e de tensão, mas poderiam ser de aceleração, temperatura, ...), e o disponibiliza em forma de um sinal condicionado de saída que representa a entrada dentro de uma faixa pré-estabelecida. Este sinal é então enviado ao sistema de aquisição de dados. No sistema desenvolvido, os transdutores de corrente são do tipo transformadores de corrente ou de efeito Hall (Tavner *et al.*, 2008), enquanto os transdutores de tensão são do tipo diferencial.

A aquisição de dados é uma etapa de fundamental importância, pois cabe a ela garantir a integridade e precisão dos dados coletados. A precisão dos dados exigida da aquisição é determinada pelas futuras manipulações matemáticas que serão aplicadas ao conjunto de dados. A coleta e a transmissão dos dados devem ser feitas de modo a minimizar ao máximo o efeito do ruído, com o objetivo de tornar os dados bastante consistentes e confiáveis.

A tarefa do processamento dos dados colhidos é a de se obter a representação dos dados coletados em forma de vetores de pontos (sinais amostrados) e manipulá-los e/ou transformá-los visando a disponibilização desses dados para o sistema de diagnóstico de forma mais rápida e de fácil análise. O processamento pode ser feito *on-line* ou *off-line*. A escolha depende do processo que está sendo monitorado e da velocidade com que as características e defeitos de interesse desse processo se modificam com tempo. No caso do sistema desenvolvido, a análise é *off-line*, pois as características de evolução dos defeitos (e propriedades da máquina) que se deseja detectar e monitorar, evoluem de forma lenta e exigem um conjunto de medidas tomadas com certo período de tempo.

Existem diversas técnicas de processamento usadas para monitorar máquinas elétricas. A mais simples delas é a que examina a amplitude do sinal de entrada da função no tempo, comparando-a com um valor pré-determinado. Além disso, existem outras técnicas mais elaboradas que ganharam espaço graças ao avanço conseguido pelos computadores tais como análise espectral, correlação, médias, análise cepstral, envoltória, etc (Leite *et al.*, 2014).

Finalmente, pode-se dizer que o diagnóstico é a parte mais crítica do sistema, pois envolve tomada de decisão. Atualmente, muitas técnicas de inteligência artificial, como sistemas especialistas e redes neurais, estão sendo utilizadas (Lambert-Torres *et al.*, 2009, e da Silva Filho *et al.*, 2010).

As etapas (a) transdução dos sinais e (b) aquisição dos dados ocorrem através de hardwares desenvolvidos especificamente para esta aplicação e são ilustrados na Fig. 1. Na Fig. 1(a), tem-se a caixa azul que concentra o sistema de aquisição de dados e as três caixas em cinza que são os transdutores de tensão para as três fases do sistema, com suas “pontas de prova” (conectores) em vermelho e preto. Na Fig. 1(b), tem-se os transdutores de corrente que são para se ligar nos cabos que alimentam o motor ou nos cabos do secundário do transformador de corrente.

Já as etapas (c) processamento dos dados colhidos e (d) diagnóstico ocorrem dentro do computador que analisa os dados colhidos. Este artigo aborda com maior detalhe parte da etapa (c), para outros detalhes consultar as referências (Bonaldi *et al.*, 2012, Bonaldi *et al.*, 2014a e Bonaldi *et al.*, 2014b).

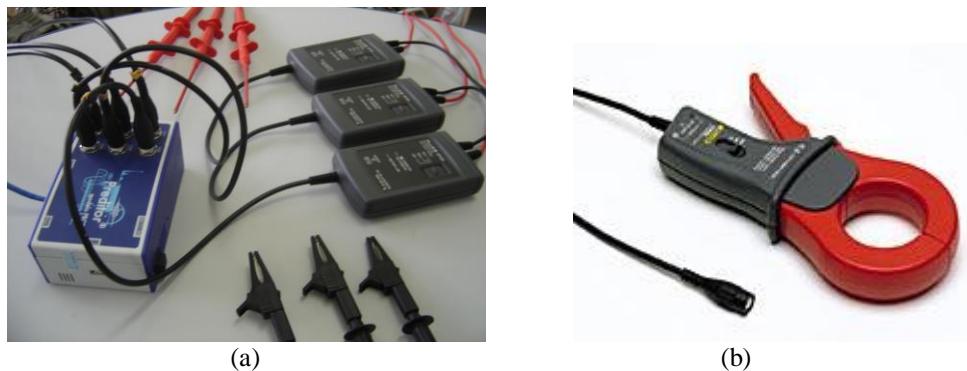


Figura 1. (a) Hardware do sistema desenvolvido e transdutores de tensão; (b) transdutores de corrente.

3. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER

A Transformada Rápida de Fourier (“*Fast Fourier Transform*” – FFT) é o termo genérico que cobre diferentes algoritmos com diferentes características. Entretanto, todos os algoritmos têm a mesma finalidade, isto é, acelerar o cálculo de saída de uma DFT (“*Discrete Fourier Transform*”). Desta forma, o estudo de qualquer algoritmo de FFT deve se iniciar pelo entendimento da Transformada Discreta de Fourier. Porém antes de iniciar a explanação de como a FFT foi utilizada, uma seção sobre o problema a ser tratado e a razão da utilização da FFT como solução é apresentado.

3.1. Definição do Problema

Os sinais de tensão e de corrente que estão coletados tem a forma básica senoidal e são coletados nas três fases, conforme mostrado na Fig. 2(a) para uma máquina “saudável” (sem defeitos). O problema é que quando ela apresenta defeitos, muitas vezes eles se manifestam em pequenas deformações no sinal trifásico que são muito difíceis de observar ou medir no domínio do tempo. A Fig. 2(b) apresenta a mesma máquina com um problema de curto-circuito nas espiras do estator do gerador, conforme marcado.. A diferença se apresenta neste caso basicamente na fase A.

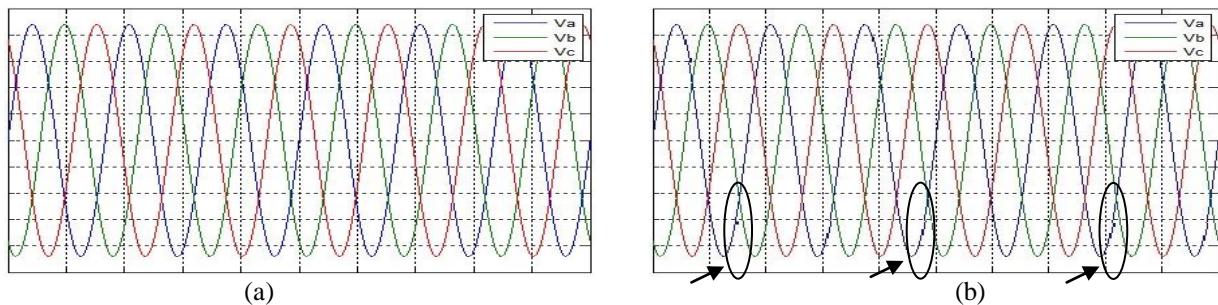


Figura 2. Sinais de tensão no domínio do tempo: (a) máquina “saudável” e (b) máquina com defeito.

Assim, como a observação do defeito (mudança na curva) no domínio do tempo pode ser bastante difícil, pois pode ocorrer de maneira muito sutil, optou-se por observar o sinal não na base tempo e sim na base do seu espectro de frequências, escolhendo-se desta forma a FFT para realizar desta transformação. Por exemplo, se os sinais da Fig. 2 forem submetidos a esta transformação, as Fig. 3(a) e (b), respectivamente representam os espectros de frequências encontrados e o defeito (mudança na curva) claramente identificado.

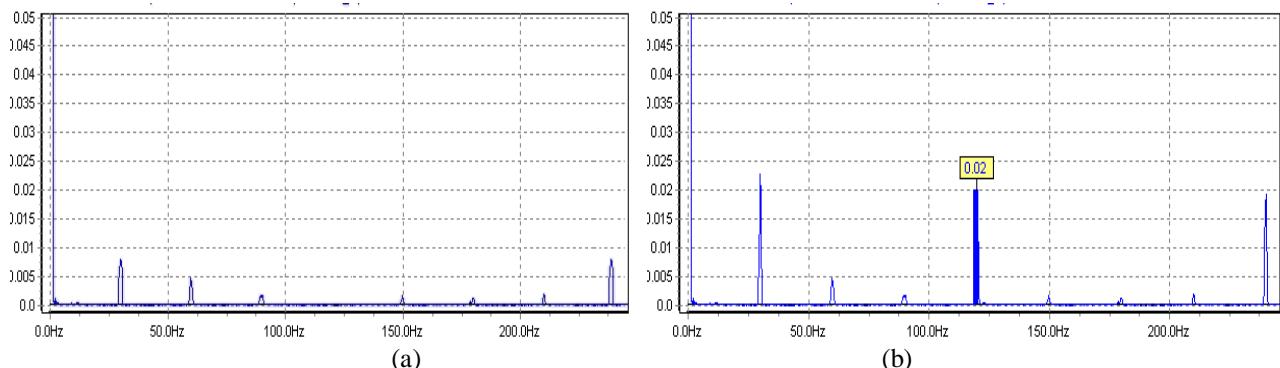


Figura 3. Sinais de tensão no domínio da frequência: (a) máquina “saudável” e (b) máquina com defeito.

3.2. Notação e Formato da DFT Real

Uma DFT Real transforma um sinal de entrada de N pontos no domínio do tempo em dois sinais de saída de $N/2 + 1$ pontos no domínio da frequência. Os sinais de saída contêm as amplitudes das componentes senoidais e cossenoidais escalonadas de uma forma a ser descrita adiante. A Fig. 4 ilustra este processo. Recomenda-se ainda que o número de amostras da entrada (N) seja uma potência de dois. Os motivos são: (a) o tamanho da amostra em potência de dois facilita o armazenamento de dados digitais que se utilizam de endereçamento binário e (b) os algoritmos de FFT normalmente utilizam-se da simetria oriunda de N sendo potência de dois para acelerar o processo da transformação. Normalmente N é escolhido entre 32 e 4096. Contudo, em aplicações como a detecção de falhas em motores de indução, onde se necessita de alta resolução, o número de amostras é consideravelmente maior.

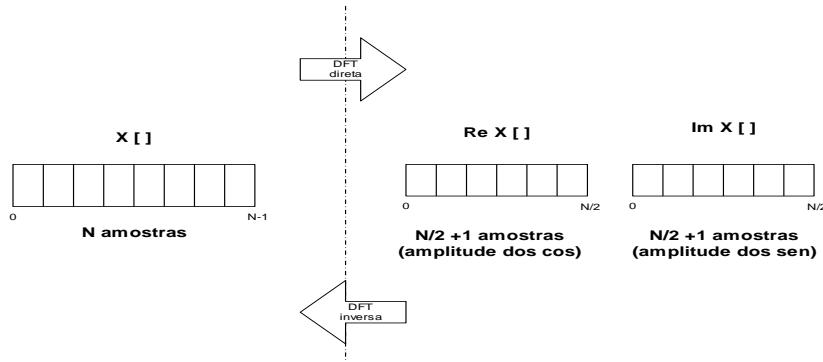


Figura 4. Saída da DFT direta e inversa.

3.3. Funções Fundamentais da DFT

A saída de uma DFT é um conjunto de números que representam amplitudes. As funções fundamentais são um conjunto de senos e cossenos com amplitudes unitárias. Se amplitudes forem atribuídas às ondas senoidais ou cossenoidais apropriadas, o resultado é um conjunto de senos e cossenos com amplitudes e frequências diferentes que, quando somados, compõem o sinal no domínio do tempo. As Eq. (1) geram as funções fundamentais de uma DFT:

$$C_k[i] = \cos(2\pi k i / N) \quad \text{e} \quad S_k[i] = \sin(2\pi k i / N) \quad (1)$$

Onde: C_k é a onda cossoidal para a amplitude presente em $\operatorname{Re}\bar{X}[k]$ e S_k é a onda senoidal para a amplitude presente em $\operatorname{Im}\bar{X}[k]$.

Estes sinais senoidais devem ter o mesmo número de pontos N que o sinal de entrada. Assim i varia de 0 a $N-1$. O parâmetro k estabelece a frequência de cada senoide, ou seja, indica que a onda senoidal completa k ciclos em N pontos.

Outro ponto importante é que para N pontos na entrada de uma DFT real têm-se $N+2$ pontos na saída. Na verdade, duas das amostras de saída não contêm informação, permitindo que as outras N amostras sejam completamente independentes.

3.4. Cálculo da DFT Inversa

A equação de síntese da DFT Inversa pode ser expressa pela Eq. (2):

$$x[i] = \sum_{k=0}^{N/2} \operatorname{Re}\bar{X}[k] \cdot \cos(2\pi k i / N) + \sum_{k=0}^{N/2} \operatorname{Im}\bar{X}[k] \cdot \sin(2\pi k i / N) \quad (2)$$

Onde: $x[i]$ é o sinal que está sendo sintetizado, i varia de 0 a $N-1$, $\operatorname{Re}[k]$ e $\operatorname{Im}[k]$ são vetores contendo as amplitudes dos senos e cossenos e k varia de 0 a $N/2$.

É importante observar que as amplitudes necessárias para se efetuar o processo de síntese, $\operatorname{Re}[k]$ e $\operatorname{Im}[k]$, diferem das amplitudes no domínio da frequência $\operatorname{Re}\bar{X}[k]$ e $\operatorname{Im}\bar{X}[k]$. A conversão é dada pelas Eq. (3):

$$\operatorname{Re}\bar{X}[k] = \frac{\operatorname{Re}X[k]}{N/2} \quad \text{e} \quad \operatorname{Im}\bar{X}[k] = \frac{-\operatorname{Im}X[k]}{N/2} \quad (3)$$

Exceto para:

$$\operatorname{Re}\bar{X}[0] = \frac{\operatorname{Re}X[0]}{N} \quad \text{e} \quad \operatorname{Re}\bar{X}[N/2] = \frac{\operatorname{Re}X[N/2]}{N} \quad (4)$$

A diferença nas amplitudes ocorre já que o domínio da frequência é definido como uma densidade espectral que, por sua vez, descreve quanto do sinal está presente por unidade de largura de faixa. Para converter as amplitudes senoidais em densidade espectral, basta multiplicar cada amplitude pela largura de faixa correspondente. É importante ressaltar que a largura de faixa pode ser definida construindo-se linhas divisórias entre as amostras. De forma gráfica, a Fig. 5 ilustra este comentário. Observa-se ainda que em termos da largura de faixa total ($N/2$), a largura de faixa de cada amostra é $2/N$. Exceto para a primeira e a última amostras nas quais as larguras de faixa são de $1/N$.

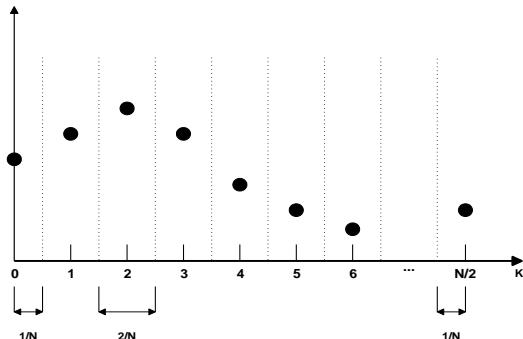


Figura 5. Ajuste de Amplitude.

3.5. Cálculo da DFT Direta

Existem três formas de se calcular uma DFT: equações simultâneas, correlação, ou FFT. Como a FFT é centenas de vezes mais rápida que os outros métodos, ela será adotada e estudada adiante. Entretanto, se a DFT tem menos de 32 pontos, costuma-se utilizar o método da correlação para se calcular a DFT.

a) DFT por Equações Simultâneas

Por este método, o que se deseja é partir de N valores tomados no domínio do tempo e obter os N valores no domínio da frequência. Para a obtenção dos N valores desconhecidos deve-se estabelecer N equações linearmente independentes. Para tal, deve-se tomar a primeira amostra de cada senóide e somá-las. O resultado deve ser igual à primeira amostra no domínio da frequência. O processo se repete para as demais amostras.

b) DFT por Correlação

Para se detectar se uma forma de onda conhecida está contida em outro sinal, multiplicam-se os dois sinais e somam-se todos os pontos do sinal resultante. O resultado da soma exprime uma indicação de quão similar são estes dois sinais são. No cálculo da DFT, cada amostra do domínio da frequência pode ser calculada através das Eq. (5) de análise:

$$\operatorname{Re} X[k] = \sum_{i=0}^{N-1} X[i] \cdot \cos(2\pi k i / N) \quad \text{e} \quad \operatorname{Im} X[k] = -\sum_{i=0}^{N-1} X[i] \cdot \sin(2\pi k i / N) \quad (5)$$

Ou seja, cada amostra no domínio da frequência é calculada multiplicando-se o sinal no domínio do tempo pela onda senoidal ou cossenoidal que está sendo inspecionada. Para este método funcionar, as funções fundamentais que serão inspecionadas devem ser independentes entre si, ou seja, devem ter a propriedade da ortogonalidade, pois é desejado-se determinar qual a contribuição delas no sinal total.

c) FFT (Fast Fourier Transform)

O terceiro método para se calcular uma DFT é a transformada rápida de Fourier que produz os mesmos resultados dos métodos anteriores, mas com um desempenho muito maior, reduzindo consideravelmente o tempo de processamento. A FFT está baseada na DFT Complexa, ou melhor, a FFT é um algoritmo para se calcular uma DFT Complexa. Por essa razão é importante saber como se transferir os dados de uma DFT Real, discutida até o momento, para uma DFT Complexa. Como visto, a DFT Real transforma um sinal de N pontos no domínio do tempo em dois sinais de $N/2 + 1$ pontos no domínio da frequência. Já a DFT Complexa transforma dois sinais de N pontos no domínio do tempo em dois sinais de N pontos no domínio da frequência. A Fig. 6(a) apresenta as diferenças entre DFT Real e Complexa.

Se a necessidade é de se calcular uma DFT Real por meio da DFT Complexa, ou seja, se empregando um algoritmo de FFT, deve-se proceder da seguinte forma: (a) movem-se os N pontos do sinal em estudo para a parte real do domínio do tempo da DFT Complexa, (b) zeram-se todas as N amostras da parte imaginária e (c) na saída da DFT Complexa, extraem-se as amostras de 0 a $N/2$ da parte real e da parte imaginária. Isso corresponde ao espectro da DFT Real. O terceiro passo é realizado em virtude da DFT Complexa incluir as frequências negativas, conforme ilustrado na Fig. 6(b).

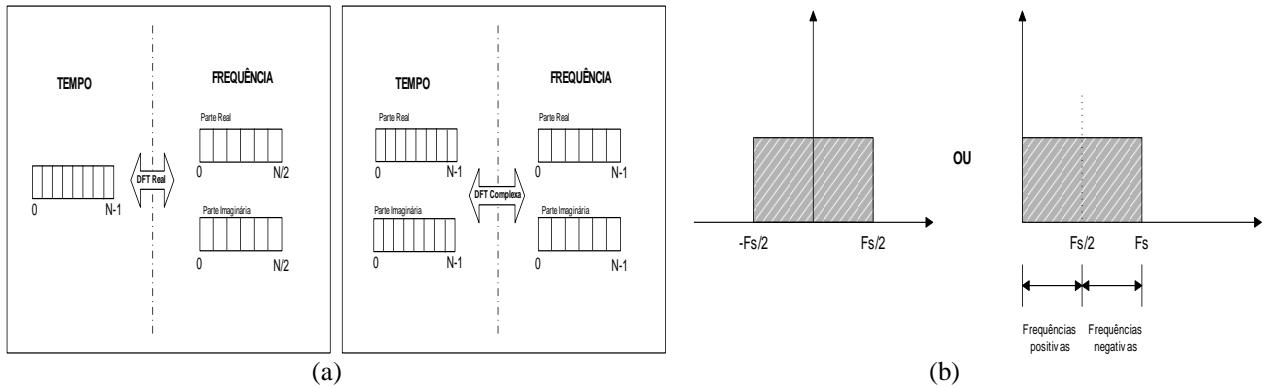


Figura 6. FFT: (a) DFT Real x DFT Complexa e (b) Espectro de frequências da DFT Complexa.

Normalmente, os algoritmos de FFT a serem implantados são simples. Entretanto, a teoria associada é extremamente complicada. A FFT tem seu funcionamento baseado em um processo de decomposição e um processo de síntese. Inicialmente, decompõe-se o sinal de N pontos no domínio do tempo em N sinais de um ponto ainda no mesmo domínio. Tendo-se os N sinais de um ponto, inicia-se o processo de síntese aplicando-se primeiramente a transformação para o domínio da frequência. Esta tarefa é a mais simples, pois o espectro de frequências de um sinal de um ponto é o próprio ponto, ou seja, não é necessário cálculo algum. Tem-se neste momento N espectros de frequências que precisam ser sintetizados em um espectro de frequências de N pontos. Isto é feito através do elemento básico de cálculo da FFT conhecido como *butterfly*. Este elemento toma dois pontos de entrada e gera dois pontos de saída já executando a síntese no domínio da frequência. Tal elemento está representado na Fig. 7(a). Onde xS representa a multiplicação por uma senoide com uma frequência apropriada.

Resumidamente, para se executar uma FFT deve-se seguir os seguintes passos: (a) decompor um sinal de N pontos no domínio do tempo em N sinais de um ponto no mesmo domínio, (b) calcular os N espectros de frequências correspondentes a esses N sinais temporais e (c) sintetizar os N espectros em um único espectro de frequências.

É importante salientar que o processo de decomposição do sinal nada mais é que a reordenação das amostras do sinal. Ou seja, separam-se os sinais em amostras pares e ímpares até que se tenham N sinais de um ponto. Esta operação pode ser mais bem entendida pelo exemplo seguinte, ilustrado na Fig. 7(b), que apresenta o processo de decomposição de um sinal com dezenas amostras.

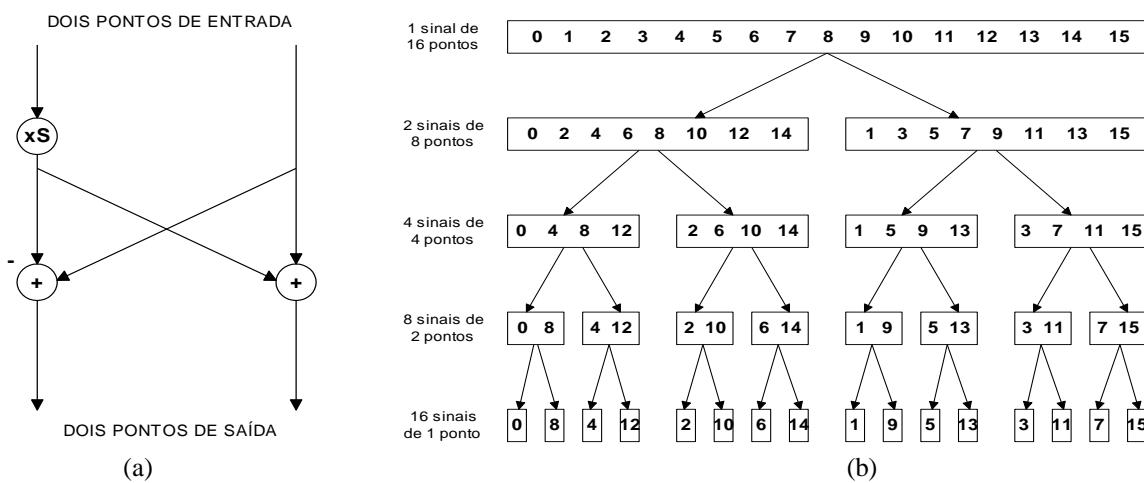


Figura 7. FFT: (a) Elemento básico de cálculo da FFT e (b) Decomposição de um sinal de 16 pontos

3.6. Notação Polar

Como foi visto até o momento, o domínio da frequência é um conjunto de amplitudes de ondas senoidais e cossenoidais. Esta notação é chamada de retangular. A notação polar é uma forma alternativa de se representar o domínio da frequência. Nesta notação, os vetores $\text{Re}X[\bullet]$ e $\text{Im}X[\bullet]$ são substituídos pelos vetores magnitude ($\text{Mag}X[\bullet]$) e fase ($\text{Phase}X[\bullet]$). A conversão é feita através das Eq. (6).

$$\text{Mag}X[k] = \sqrt{(\text{Re}X[k]^2 + \text{Im}X[k]^2)} \quad \text{e} \quad \text{Phase}X[k] = \arctan\left(\frac{\text{Im}X[k]}{\text{Re}X[k]}\right) \quad (6)$$

Já a conversão de polar para retangular é dada pelas Eq. (7):

$$\operatorname{Re} X[k] = \operatorname{Mag} X[k] \cdot \cos(\operatorname{Phase} X[k]) \quad \text{e} \quad \operatorname{Im} X[k] = \operatorname{Mag} X[k] \cdot \sin(\operatorname{Phase} X[k]) \quad (7)$$

Apesar de conterem a mesma informação, existem ocasiões em que o uso de uma delas é mais apropriado. A notação retangular é a melhor escolha para cálculos (equações e programas). Já a notação polar é mais utilizada em aplicações práticas, sobretudo quando um representação gráfica é necessária.

3.7. Propriedades da Transformada de Fourier Discreta

a) Linearidade

Dizer que a transformada de Fourier possui a propriedade da linearidade é o mesmo que dizer que ela possui as propriedades da homogeneidade e superposição. A homogeneidade significa que uma variação de amplitude em um domínio produz uma variação de amplitude idêntica no outro domínio. A superposição significa que adição em um domínio corresponde a adição no outro domínio. Apesar de ser linear, a transformada de Fourier não apresenta a propriedade da invariância ao deslocamento. Ou seja, um deslocamento no domínio do tempo não significa um deslocamento no domínio da frequência.

b) Características da Fase e Natureza Periódica da DFT

Um deslocamento no domínio do tempo de s amostras não provoca mudanças na amplitude no domínio da frequência, mas altera a fase somando $2\pi sf$. Para a DFT, os domínios do tempo e da frequência são periódicos. Isto pode trazer alguns problemas, já que a maioria dos sinais não é periódica ou deixa de ser quando se digitalizam esses sinais (que passam a ter um domínio finito). Seja o sinal da Fig. 8(a). O sinal representa um sinal tipicamente digital amostrado com N amostras tomadas em intervalos regulares de tempo. A DFT enxerga o sinal acima como um simples período de um longo sinal periódico. Desta forma, o lado direito do sinal é conectado ao lado esquerdo do sinal e vice-versa, conforme ilustrado na Fig. 8(b).

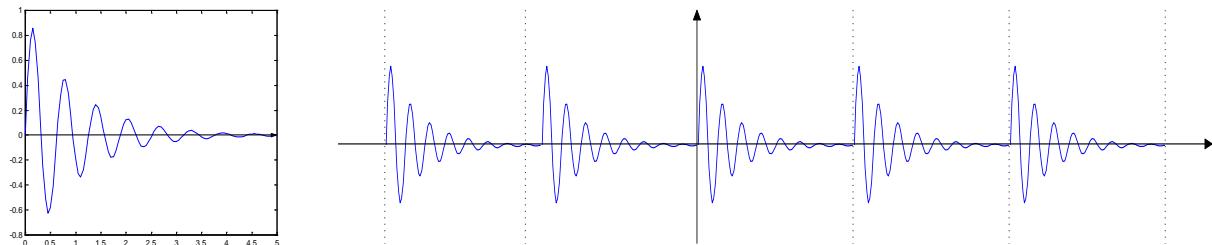


Figura 8. Sinal digital: (a) amostrado com N amostras e (b) Periodicidade da DFT no domínio do tempo

A periodicidade também ocorre no domínio da frequência, contudo há algumas diferenças com relação à periodicidade no tempo. Na frequência, o espectro entre 0 e $f_s/2$ aparece refletido entre 0 e $-f_s/2$. E essa característica se repete quando se considera a periodicidade do espectro de frequências, conforme ilustrado na Fig. 9.

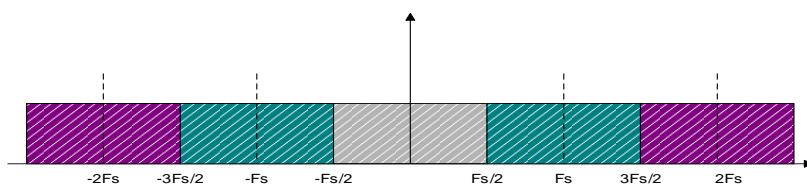


Figura 9. Periodicidade da DFT no domínio da frequência

Levando-se em consideração as frequências negativas, a DFT vê o domínio da frequência como periódico. O problema mais grave da periodicidade, tanto no tempo quanto na frequência, é o *aliasing*, ou seja, a perda de informação quando o sinal no tempo ou na frequência excede o período determinado e, graças a natureza circular da DFT, o que excede a direita do período reaparece à esquerda, se misturando com o sinal presente no início do período.

Para algumas aplicações (como análise espectral e resposta em frequência) é suficiente observar o domínio do tempo de 0 a $N-1$, e o domínio da frequência de 0 a $f_s/2$. Contudo, em outras aplicações (como convolução circular e conversão A/D) deve-se considerar como os sinais se excedem nos seus períodos. Sejam alguns exemplos onde a natureza periódica da DFT é importante:

1. Compressão e Expansão: A compressão de um sinal em um domínio implica na expansão do sinal no outro domínio. Os extremos se comportam da seguinte forma: se o sinal no tempo é comprimido até se tornar um impulso, o sinal na frequência é expandido até se tornar um valor constante e vice-versa. Sinais discretos apresentam comportamento semelhante, mas com algumas peculiaridades. A primeira delas é o *aliasing*, ou seja, uma compressão exagerada em um domínio resulta em uma expansão proporcional no outro domínio podendo fazer com que o sinal “invada” os períodos vizinhos neste último domínio.

2. Multiplicando Sinais: Sabe-se da teoria da transformada de Fourier que a convolução em um domínio corresponde a multiplicação no outro domínio. No caso específico da modulação em amplitude, a multiplicação no domínio do tempo corresponde a uma convolução no domínio da frequência. Assim, as frequências negativas, outrora sem importância, tornam-se bastante relevantes. Isto porque o espectro resultante apresentará três componentes: a onda portadora, a banda lateral superior e a banda lateral inferior. A banda superior resulta das frequências positivas, enquanto que a banda inferior resulta das frequências negativas.

4. ANÁLISE ESPECTRAL DE SINAIS

Muitas informações estão codificadas nas senóides que compõem um sinal qualquer. Em muitos casos, a forma do sinal no domínio do tempo não é importante, pois a informação principal está na frequência, fase e amplitude de suas componentes senoidais. Desta forma, a FFT é usada para extrair estas informações.

A primeira ação a ser tomada após a amostragem do sinal é a multiplicação do sinal amostrado com N pontos por uma curva suave como, por exemplo, uma janela de Hamming ou Blackman (Ribeiro *et al*, 2014). Após a multiplicação tem-se um sinal de N pontos onde as amostras do início e do final do sinal foram reduzidas em amplitude. Isto é feito com o propósito de se eliminar “saltos” no inicio e fim do período do sinal amostrado, fazendo com que não ocorra a falsa interpretação de presença de componentes de alta frequência no sinal em estudo. Além disso, a escolha de uma janela adequada pode reduzir significativamente o *leakage*, que é o “espalhamento” da amplitude de uma determinada frequência em outras raias espectrais devido à característica discreta da DFT.

Realizando-se agora a FFT, tem-se o espectro do sinal amostrado. Evidentemente, o aparecimento de ruído é inevitável. Para se minimizar o problema pode-se proceder de duas formas:

1. Dividir o sinal de entrada em muitos segmentos de N pontos. Cada segmento é multiplicado por uma janela de Hamming ou Blackman, passado por uma FFT de N pontos e depois convertido para a forma polar. Finalmente, extrai-se a média dos espectros resultantes para se formar um único espectro.
2. Fazer uma FFT de muitos pontos, por exemplo, 16.384 pontos. O espectro resultante será de alta resolução e bastante ruidoso. Um filtro digital passa-baixa é usado para “suavizar” o espectro, reduzindo o nível de ruído.

O primeiro método é mais fácil, contudo o segundo método apresenta uma melhor desempenho. Entretanto, esta melhor desempenho é raramente vantajosa para o problema em questão, preferindo-se utilizar a facilidade do primeiro método. Outro problema que ocorre na análise espectral é a presença de picos muito próximos no espectro. Seja a Fig. 10(a). No primeiro caso, a resolução espectral não é suficiente para separar os dois picos. O mesmo problema não ocorre no segundo caso que possui maior resolução. Existem dois fatores que limitam a resolução espectral. O primeiro fator é o tamanho da DFT. Uma DFT de N pontos produz um espectro de $N/2 + 1$ pontos igualmente espaçados de 0 a $F_s/2$. Para separar picos bastante próximos, o espaçamento entre as amostras deve ser menor, ou seja, o número de pontos da DFT deve ser maior. O segundo fator limitante ocorre quando dois sinais têm frequências muito próximas. Isto porque quanto mais próximas são as frequências, maior deve ser o segmento inspecionado para se concluir que há mais de um sinal envolvido.

Um recurso para se aumentar a resolução sem ampliar o número de amostras do sinal temporal é preencher o sinal amostrado no tempo com zeros e aplicar a DFT. Além disso, quando um sinal de entrada contém uma senóide com frequência entre as frequências de duas raias espectrais, seu pico no espectro de frequências aparece com um rastro que se estende por uma distância considerável (o chamado *leakage*). A representação deste conceito de forma gráfica está ilustra na Fig. 10(b). No primeiro caso existe uma raia espectral para a frequência presente no sinal de entrada. Já no segundo caso a frequência presente no sinal de entrada está entre duas raias espectrais resultando num espalhamento do pico ao longo do espectro de frequência.

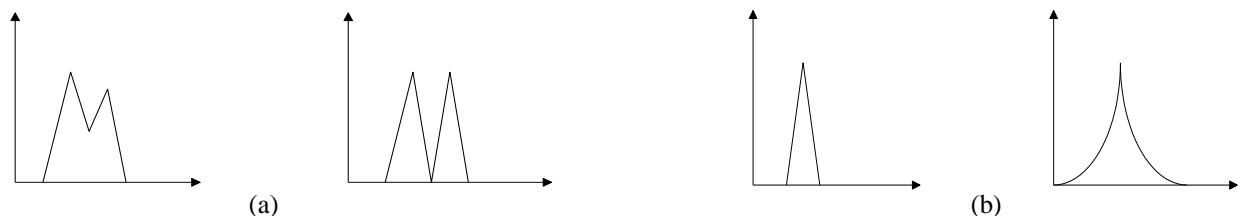


Figura 10. Análise Espectral: (a) Problema de resolução espectral e (b) Comportamento do espectro na presença de frequências sem raia espectral

5. A FFT NO SISTEMA DE DETECÇÃO DE DEFEITOS

A FFT se constitui como a ferramenta mais importante para o sistema desenvolvido. Toda a análise da condição da máquina é feita em função do aspecto do espectro de frequências, ou seja, o trabalho de avaliação da saúde da máquina é feita com base no estudo de determinadas frequências que têm sua amplitude modificada quando da presença de mecanismos de falha. Nesta seção, é apresentado um exemplo de desalinhamento vertical detectadas pelo sistema proposto. Para tal, testaram-se dois graus de severidade da falha: $dv_1 = 2\text{mm}$ e $dv_2 = 4\text{mm}$, ou seja, como se o defeito de desalinhamento estivesse evoluindo. Estes desalinhamentos foram impostos rebaixando-se a base na parte posterior do gerador. A Fig. 11(a) auxilia a compreensão do procedimento. As Fig. 11(b) a 11(d) apresentam os espectros referentes

à condição normal e as condições de falha dv_1 , dv_2 , respectivamente, sendo possível verificar o aumento das amplitudes dos sinais espectrais.

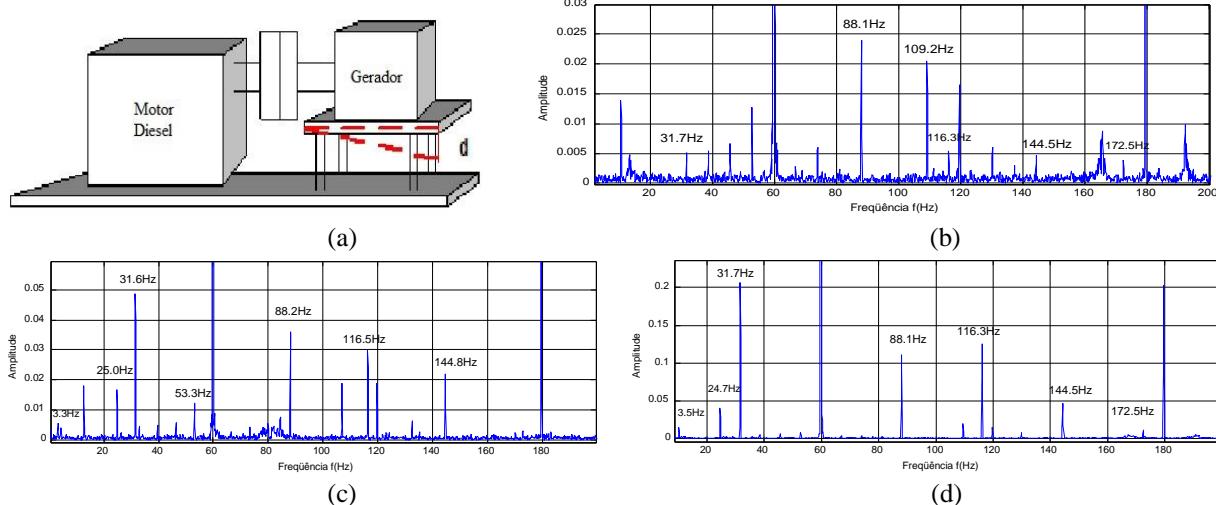


Figura 11. Desalinhamento vertical: (a) Ilustração do procedimento, (b) sem desalinhamento, (c) com desalinhamento de $dv_1 = 2$ mm e (d) com desalinhamento de $dv_2 = 4$ mm.

6. CONCLUSÕES

O sistema desenvolvido mostrou a utilidade da Transformada Rápida de Fourier para a análise de sinais, no caso, elétricos. A transformação do domínio no tempo para o domínio da frequência permitiu que variações nos sinais pudessem ser melhor identificadas e acompanhadas. Este artigo apresentou alguns cuidados tomados para a aplicação desta transformada em sinais elétricos e que foram utilizadas no desenvolvimento do sistema de detecção de defeitos precoces. O exemplo mostrado ilustra a aplicação desta transformada e como ela contribui para o acompanhamento da evolução de um defeito.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a SUAPE, ANEEL P&D, CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- Bonaldi, E. L., de Oliveira, L. E. L., Borges da Silva, J. G., Lambert-Torres, G. e Borges da Silva, L. E. 2012. Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors (pp. 487-520), In: Araujo, R. *Induction Motors - Modelling and Control*, Rijeka, Croácia: InTech., 558 p.
- Bonaldi, E. L., de Oliveira, L. E. L., Borges da Silva, J. G., Borges da Silva, L. E., Lambert-Torres, G., Pellicel, A., Cassio, G. e Lopes, M. A. A. 2014a. *Predictive Maintenance System for Thermal Generator Units*. *Int. J. Advanced Research in Computer Science & Technology*, vol. 2, No. 2, 170-175.
- Bonaldi, E. L., de Oliveira, L. E. L., Moreira, F. S., Borges da Silva, L. E., Borges da Silva, J. G. Lambert-Torres, G. 2014b. Monitoring System for Auxiliary Motors in Thermal-Power Plants. *Int. J. Automation and Power Engineering*, vol. 3, No. 1, 53-57.
- da Silva Filho, J. I., Lambert-Torres, G. e Abe, J. M. 2010. *Uncertainty Treatment using Paraconsistent Logic*, Amsterdam, Holanda: IOS Press. 328 p.
- Lambert-Torres, G., Abe, J. M., da Silva Filho, J. I. e Martins, H. G. 2009. *Advances in Technological Applications of Logical and Intelligent Systems*. Amsterdam, Holanda: IOS Press. 285 p.
- Leite, V. C. M. N., Borges da Silva, J. G., Veloso, G. F. C., Borges da Silva, L. E. e Lambert-Torres, G. 2014. Detection of Localized Bearing Faults in Induction Machines by Spectral Kurtosis and Envelope Analysis of Stator Current. *IEEE Trans Industrial Electronics*. (em prelo)
- Ribeiro, L. C., de Oliveira, L. E. L., Bonaldi, E. L., Borges da Silva, L. E., Salomon, C. P., Borges da Silva, J. G., e Lambert-Torres, G. 2014. Automatic System for Failure Detection in Hydro-Power Generators. *J. Power and Energy Engineering*, vol. 2, 36-46.
- Tavner, P. J., Ran, L., Penman, J. e Sedding, H. 2008. *Condition Monitoring of Rotating Electrical Machines*. 2ndt ed. Londres, Inglaterra: IET Press. 304 p.

RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

APPLICATION OF FFT TO DETECT FAILURES IN ELECTRICAL MACHINES

Erik Leandro Bonaldi, erik@institutognarus.com.br¹

Levy Ely de Lacerda de Oliveira, levy@institutognarus.com.br¹

Germano Lambert-Torres, germanoltorres@gmail.com¹

Jonas Guedes Borges da Silva, jonas@institutognarus.com.br¹

Luiz Eduardo Borges da Silva, leborges@unifei.edu.br²

Marcela Ribeiro, marcelaribeiro@suaapenergia.com.br³

Alexandre Venceslau, alexandresilva@suaapenergia.com.br³

¹Instituto Gnarus – Diretoria de Pesquisa & Desenvolvimento - Rua Cel. Francisco Braz, 185 - Itajubá - MG

²Universidade Federal de Itajubá - IESTI/GPCI - Av. BPS 1303 - Itajubá - MG

³Energética SUAPE II - Rodovia PE-60, km -10 - Cabo de Santo Agostinho - PE

Abstract. This paper presents the application of Fast Fourier Transformer (FFT) on early detection of failures in rotating electrical machines. The current and voltage signals are collected outside the set in analysis (motor-load or generator-primary machine) through special transducers developed for this purpose during its normal operation.. These signals, initially in the time domain, contain operating data of the set, but also their typical characteristics and information about problems and their evolution. However the analysis in this formatting is very hard. Thus, the signals are then processed directly by the FFT, generating signals in the frequency domain. In this way, it is possible to create an “electrical signature” for each set and separate its typical characteristics, noise and possible defects. These electrical signatures define the general status of the unit and only through external measures of electrical voltages and currents is possible to establish electrical problems in the motor (or generator) and/or mechanical problems in the load (or primary machine) and coupling. This type of inference is quite useful for various companies, since in many of them the access to people can be dangerous or even impossible (as in oil submerged pumps) because of current and voltage signals can be taken at any point in the installation even quite distant from the set powered by them. These signals, in frequency domain, are then presented for a database on typical problems and with their signatures, producing historical information about the type of defect that is occurring in the set and their evolution. This paper presents in detail with the signs are treated and how the electrical signatures are obtained. An illustrative example of application of FFT in electrical signals with early defect detection is also reported.

Keywords: Fast Fourier Transformer, Electrical signature, Electrical machines, Predictive maintenance