



## A Análise de Fourier utilizando o software Proteus Isis: Um estudo de caso sobre as harmônicas

José Ailton Batista da Silva<sup>1</sup>, Renan Nunes Pinheiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Graduando do Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial no IFCE Campus Cedro. e-mail: ailton.ifce@gmail.com

<sup>2</sup>Graduando do Curso de Tecnologia em Mecatrônica Industrial no IFCE Campus Cedro. e-mail: renanpinheiroxyz@hotmail.com

**Resumo:** Neste artigo apresenta-se a técnica de análise de Fourier utilizando o software de circuitos elétricos Proteus Isis para simulação de sinais harmônicos em um sistema elétrico de potência. Para tanto, faz-se um introdutório sobre sistemas elétricos de potência, harmônicos, séries e transformada de Fourier.

**Palavras-chave:** Análise de Fourier, Harmônicas, Proteus Isis, Sistema Elétrico de Potência

### 1. INTRODUÇÃO

Até pouco tempo atrás não havia preocupação com a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. Isso porque a carga dos consumidores eram basicamente cargas de características resistivas. No caso das indústrias, as cargas também tinham características indutivas e capacitivas, mas em geral eram cargas lineares.

Isso tudo mudou com o avanço da eletrônica e os dispositivos eletrônicos de potência. As cargas elétricas comandadas eletronicamente possuem uma característica intrínseca que é a não-linearidade das mesmas, ou seja, não requerem a corrente elétrica constantemente, mas solicitam apenas picos de energia em determinados momentos. Dependendo da topologia do conversor eletrônico empregado, a corrente de entrada é disparada em determinado período ou ângulo da oscilação senoidal. Com isto, as cargas eletrônicas acabam por distorcer a forma de onda (tensão e corrente) que lhe é entregue e como consequência gerando uma “poluição” na rede de energia elétrica. Esta poluição é traduzida por diversos tipos de problemas ou distúrbios.

Um dos distúrbios causados ao sistema elétrico de potência é os harmônicos e interharmônicos. As distorções harmônicas são um tipo específico de energia “suja” (poluída ou contaminada) que, diferentemente dos transientes de corrente e tensão, estão presentes de forma contínua, associadas ao crescente número de acionamentos estáticos (inversores de frequência, variadores de velocidade, etc.), fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos de acionamento (lâmpadas eletrônicas, por exemplo).

O estudo sobre harmônicos e a Análise de Fourier é o que será abordado neste artigo, enfatizando um pouco os sistemas elétricos de potência e mostrando um pequeno estudo de caso usando o software Proteus *Intelligent Schematic Input System* (Proteus-ISIS) para geração e análise de gráficos no domínio da frequência (Gráfico de espectro de frequência).

### 2. ANÁLISE DE FOURIER

As técnicas de engenharia em geral sempre são necessárias de funções que representam fenômenos físicos, e na maioria dos casos usam-se senos e cossenos. No estudo de fenômenos físicos um dos objetivos é que a notação matemática seja a mais compacta possível para melhor facilidade de manipulação nos cálculos.

Uma das formas de compactar as expressões trigonométricas é o uso do cálculo complexo através da fórmula de Euler:

$$e^{\pm j\theta} = \cos \theta \pm j \sin \theta, \quad (1)$$

A expressão acima é denominada *phasor*, pois pode ser representada por um vetor que roda no espaço dos números complexos, tendo o eixo das abscissas a parte real e o eixo das ordenadas a parte imaginária.



Os sinais harmônicos, por apresentar-se de forma periódica e sinusoidal, podem ser representados usando funções trigonométricas conforme Equação (2):

$$v(t) = v_p \cos(2\pi ft + \theta), \quad (2)$$

Joseph Fourier, antes de 1930, com sua teoria de análise de frequência, afirmou que qualquer sinal periódico pode ser expresso por uma somatória de senos e cossenos, ou seja, uma série infinita que ficou conhecida como *Séries de Fourier*. A equação (3) mostra essa série com os coeficientes  $a_0$ ,  $a_k$  e  $b_k$  onde as mesmas são mostradas nas equações (4), (5) e (6). Sinais harmônicos são amplamente mostrados e calculados usando a série de Fourier.

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(kx) + b_k \sin(kx)), \quad (3)$$

$$a_0 = \frac{2}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx, \quad (4)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx, \quad (5)$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx, \quad (6)$$

A análise de sinais harmônicos usando o domínio do tempo na maioria dos casos é de complexa resolução e com muitas integrais. Uma forma mais fácil de analisar sinais é usando o domínio da frequência fazendo o uso da *Transformada de Fourier*.

A Transformada de Fourier é uma ferramenta útil, pois através dela equações diferenciais e integrais são reduzidas a simples equações algébricas. Seu uso é de grande importância para saber análise da energia total da série-temporal. A mesma está mostrada na Equação (7):

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (6)$$

Na Equação (6) podemos perceber que as funções trigonométricas estão representadas na forma complexa. Também percebemos o princípio de *Convolução* da função  $f(x)$  com o núcleo da transformada.

Aplicando-se a Transformada Fourier, temos um gráfico normalmente chamado de Espectro de Energia ou Frequência com no eixo das abcissas tendo a frequência e no eixo das ordenadas a energia. Na Figura 1 está mostrando o espectro de frequência onde o sinal é representado por todas as barras. Cada barra é um *phasor* com determinada frequência e amplitude. Usando então o gráfico de espectro de frequência podemos representar um sinal não-periódico como soma de seus componentes fasoriais.

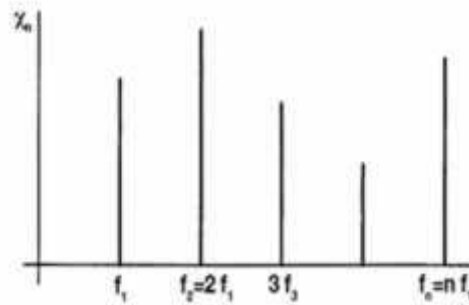


Figura 1 – Representação de três sinais sinusoidal de 1, 5 e 10 Hz.

### 3. SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Na geração, transmissão e utilização de energia elétrica em alta potência normalmente envolve sistemas polifásicos, ou seja, sistema onde estão disponíveis diversas fontes de mesma amplitude com uma diferença de fase entre ela. Por possui vantagens econômicas e operacionais, o sistema trifásico é o mais difundido.

O sistema trifásico possui três fontes de tensões defasadas  $120^\circ$  uma das outras. Onde a primeira fase(R) tem  $0^\circ$ , a segunda fase(S) tem  $120^\circ$  e a terceira fase(T) tem  $240^\circ$ . Os geradores podem está ligados em forma estrela ou Y e triangulo ou  $\Delta$ . As Equações (7), (8) e (9) são mostrados abaixo, onde representam cada fase do sistema trifásico cearense .

$$v_r = 311 \text{ sen}(377t) \text{ V}, \quad (7)$$

$$v_s = 311 \text{ sen}(377t + 120^\circ) \text{ V}, \quad (8)$$

$$v_t = 311 \text{ sen}(377t + 240^\circ) \text{ V}, \quad (9)$$

Nos Sistemas Elétricos de Potência ideal tem-se amplitude e frequência constantes, as três fases encontram-se balanceadas e simétricas, conforme mostra a Figura 2 . O diagrama de fasores é mostrado na Figura 3.

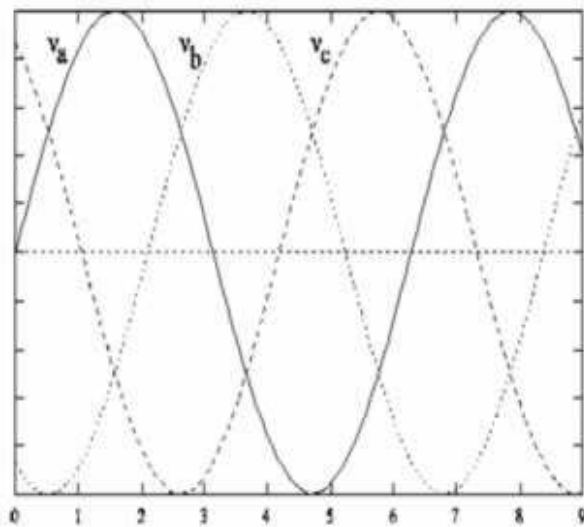


Figura 2- Sistema trifásico ideal.

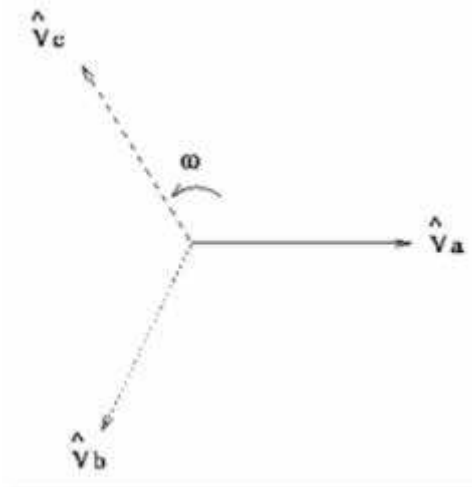


Figura 3 – Diagrama fasorial da rede trifásica.

#### 4. HARMÔNICOS

Sabemos que o sistema elétrico de potência ideal não existe e o sistema atual está com diversos problemas no que desrespeito a qualidade de energia.

Os distúrbios em geral causados à rede elétrica são: perturbações na amplitude da tensão, na frequência do sinal, desequilíbrios de tensão ou corrente e perturbações na forma de onda do sinal.

As perturbações de amplitude são causados por variações de tensão como, por exemplo: afundamento (“sag”), interrupção, sobretensão, sobretensão transitória, flutuação, cintilação (“flicker”) e subtensão.

As perturbações de frequência são variações em torno do valor nominal e são causados, por problemas nos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica.

Os desequilíbrios de tensão são produzidos nos sistemas trifásicos quando existem diferenças significativas entre os valores rms das tensões presentes na instalação.

As perturbações na forma de onda são causados pelos harmônicos, que como já foi dito, são perturbações causados por cargas não-lineares e uso de equipamento eletrônicos .

A definição de harmônicas em Instalações Elétricas geralmente é definida como sinal senoidal cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação. Na Figura 4, por exemplo, temos o sinal 1 como a frequência fundamental, ou seja, a frequência da rede. O sinal 5 é uma distorção harmônica adicionada ao sinal, onde tem-se um sinal final distorcido.

Um dos problemas causados pelos harmônicos, por exemplo, são no uso dos instrumentos usuais de medição de tensão e corrente, que em alguns equipamentos, podem apresentar erros grosseiros que levam o profissional a tirar conclusões erradas do circuito analisado .

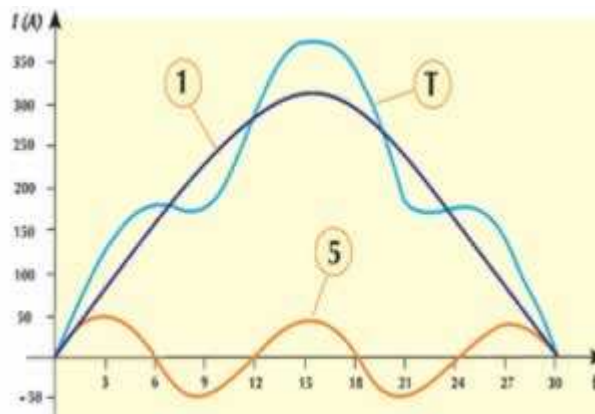


Figura 4 – Gráfico de distorção harmônica.

## 5. SIMULAÇÃO USANDO PROTEUS ISIS

O pequeno estudo de caso tem como objetivo mostrar a utilização do software Proteus Isis para utilização em análise de Fourier. Esse poderoso software, em geral, é usado em modelagem de circuitos digitais e microcontrolados em tempo real, sendo desconhecidas por muitos usuários a sua utilização em análise avançada de circuitos e análise de transiente.

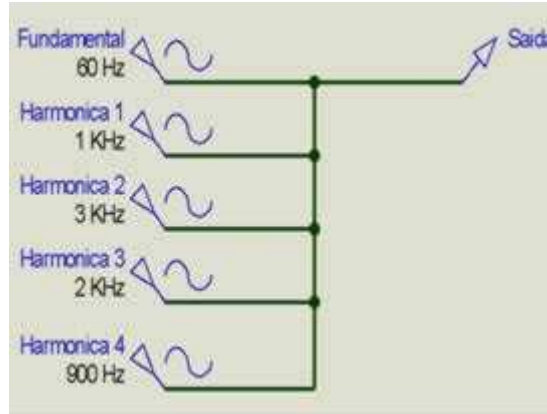


Figura 5 – Circuito soma de harmônicos usando o software Proteus Isis.

O circuito simulado está mostrado na Figura 5, e representa a adição de sinais harmônicos à rede trifásica, cujo mesmo é representada pelo sinal de label “Fundamental” frequência de 60 Hz. Os sinais harmônicos adicionados são mostrados na Tabela 1.

Uma análise de transiente foi submetida o circuito modelado da Figura 5, para obter a resposta no domínio do tempo. O gráfico obtido está mostrado na Figura 6.

Tabela 1 – Harmônicos adicionados ao sinal fundamental de 60 Hz

Harmônica	Frequência	Porc. Da fundamental
1	1 kHz	20%
2	3 kHz	10%
3	2 kHz	5%
4	900 Hz	1%

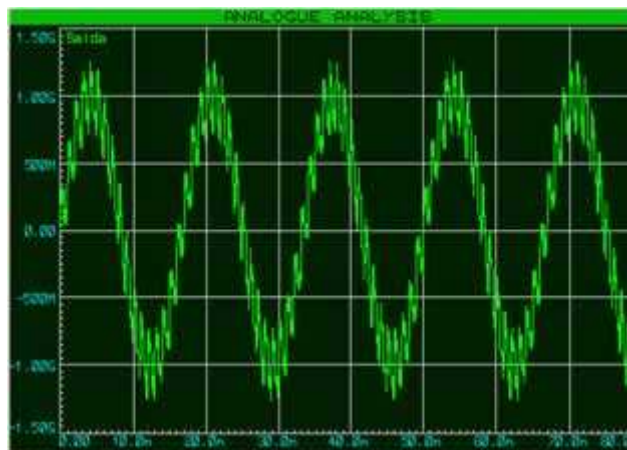


Figura 6 – Gráfico no domínio do tempo do sinal gerado usando o Proteus Isis

Observando o gráfico gerado na análise de transiente fica notória a alteração da onda fundamental. O sinal, que representa a rede trifásica, está distorcido com a presença dos harmônicos. Um sinal desse tipo aplicado em equipamentos eletrônicos gera muitas perdas e acaba por reduzir a vida útil do equipamento.

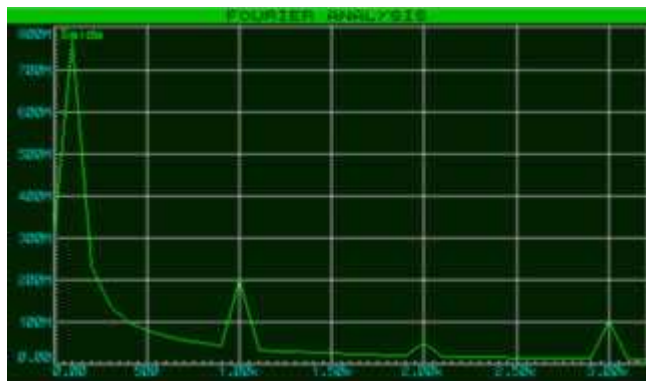


Figura 7 – Gráfico no domínio da frequência do sinal gerado usando o Proteus Isis

Na Figura 7 mostra a análise de Fourier submetida ao circuito simulado. Observe que o phasor de cada harmônica é representado como pico de energia no gráfico. Fica de fácil visualização cada harmônico no espectro (menos a harmônica 4, pois tem pouca energia e está próxima da de 1 kHz).

## 6. CONCLUSÕES

O estudo de sinais harmônicos é de fundamental importância para saber como é o comportamento desses sinais, fazendo assim a prevenção nos sistemas. A qualidade de energia elétrica é um tema que deve ser levado a sério hoje em dia, pois cada vez mais dependemos de equipamentos eletrônicos que requerem uma energia limpa de distorções.

A análise de Fourier é uma ferramenta poderosa usada em diversas aplicações de engenharia e muito complexo de ser estudado sem os conhecimentos necessários de cálculo, por isso não foi aprofundado o assunto, passando somente uma base teórica.

Os resultados obtidos no pequeno estudo de caso foi que o software Proteus Isis pode e deve ser usado para análise avançada de circuitos, apesar de não ter muitas funcionalidades.

## REFERÊNCIAS

- BONDUKI, N. **Origens da habitação social no Brasil**. 4. ed. São Paulo: Estação Liberdade, 2004.
- CARDOSO, R. **Uma introdução à história do design**. 2. ed. rev. e amp. São Paulo; Edgard Blücher, 2004.
- DAY, R.A. **Como escrever e publicar um artigo científico**. 5. ed. São Paulo: Santos Editora, 2001. 275 p.
- DIAS, G. **Harmônicas em Sistemas Industriais**, 2ª ed, 2002.
- EWALDO L. M, **Qualidade da Energia Elétrica**, p. 1.
- HERMES, M. G. C. A Aplicação da Transformada Wavelet packet para a Identificação de Componentes Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência.
- BOLZAN, M, **Análise da transformada em ondeletas aplicada em sinal geofísico**, 2004.
- BOLZAN, M, **Transformada em ondeleta: Uma necessidade**, 2006.



MORENO, H. **Harmônicas nas Instalações Elétricas**, PROCOBRE, 1ª ed. 2001.

SODRÉ, U. **Séries de Fourier**, 2003.

SODRÉ, U. **Transformadas de Fourier**, 2003.

MACEDO, Valquíria Gusmão. **Sistema Trifásico**, 2006.