

## HARMÔNICAS ANALISADAS ATRAVÉS DO ESPECTRO DE FREQUÊNCIA

Camila Alice Silva Santos <sup>1</sup>  
Romero Álamo Oliveira de Medeiros <sup>2</sup>

### RESUMO

O presente artigo trata sobre a análise da formação de harmônicas na rede elétrica pela teoria de Fourier, que se caracteriza por transformar qualquer sinal, desde que seja periódico, em uma soma de senos e cossenos, mesmo que seja uma soma de sinais de frequências diferentes, o que faz essa aplicação particularmente útil no estudo das harmônicas. Intrinsecamente ligado com as componentes harmônicas, está a qualidade de energia elétrica, de modo que esta é afetada diretamente por esses distúrbios de tensão. Com o passar dos anos a preocupação com a qualidade da energia entregue aos consumidores cresceu, tornando este tema de extrema importância no fornecimento de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Harmônicas, Qualidade de Energia Elétrica, Série de Fourier, Proteus.

### INTRODUÇÃO

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) “As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental”. Estas distorções são um dos problemas inerentes à qualidade do produto (energia elétrica) distribuído, que neste caso específico, será o foco deste artigo.

A demanda de energia elétrica no Brasil aumenta consideravelmente a cada ano, e, conseqüentemente, aumenta também, a necessidade de um sistema mais eficiente que opere com a menor quantidade possível de perdas. É preocupação crescente, para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e todos que usufruem do Sistema Interligado Nacional (SIN), a melhoria da Qualidade de Energia Elétrica (QEE), tendo em vista o aumento da demanda de energia e a inserção, na rede, de aparelhos mais sensíveis e de alto custo. Para que a QEE seja preservada, o sistema de distribuição deve ser capaz de atender ao consumidor com continuidade e confiabilidade, ou seja, com o mínimo de faltas, qualidade de atendimento e com o mínimo de perturbações. Para Santos (2007), a preocupação com a QEE, tem início já na geração da energia, passando pelas linhas de transmissão até a distribuição final para o

---

<sup>1</sup> Graduando do Curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Vale do Ipojuca - UNIFAVIP, [camilaalice108@gmail.com](mailto:camilaalice108@gmail.com);

<sup>2</sup> Professor orientador: Mestre, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, [romero.medeiros@unifavip.edu.br](mailto:romero.medeiros@unifavip.edu.br).

consumidor, esse caminho longo dificulta o melhor atendimento. Deste modo, as harmônicas e os problemas ocasionados por elas são cada vez mais alvos de estudo e atenção.

Um dos fatores da crescente injeção de harmônicas na rede do SIN, é o aumento da diversificação da matriz energética através da inserção de geração distribuída (GD), boa parte advinda de fontes renováveis, como eólica e solar. Por serem fontes de geração de energia irregular, geram flutuações de tensão maiores quando comparadas a formas tradicionais de geração, acarretando a injeção, principalmente, de harmônicas de 5ª e 7ª ordem, na rede. A GD, principalmente, por energia solar, vem se destacando como método alternativo de geração (Ministério de Minas e Energia, 2017). Dos 81 MWp<sup>1</sup> em 2016, 57 foram através da geração distribuída. Por não ser controlada diretamente pelas concessionárias e ser altamente irregular, não produz uma energia de tão boa qualidade e, conseqüentemente, gera harmônicas na rede.

Com a evolução dos componentes eletrônicos, a partir da década de 40 com a construção do primeiro transistor, os consumidores residenciais passaram, também, a contribuir, de forma significativa com a inserção de harmônicas na rede, através de aparelhos que contam com a contínua evolução da eletrônica. Silva (2012), “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”.

Tendo em vista os pontos apresentados, o objetivo principal deste artigo é a análise, através da teoria de Fourier, das componentes harmônicas e calcular sua Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT). O espectro de frequência plotado através da transformada rápida de Fourier, demonstra facilmente a presença das harmônicas, e como calcular o nível de distorção a qual está sendo submetido o sinal, sendo básico e necessário a todo sistema de distribuição que preze pela QEE.

## **METODOLOGIA**

No presente artigo, foi utilizado um software para simular componentes harmônicas derivadas da tensão de fornecimento de baixa tensão usual em boa parte do país (220 V), com frequência natural de 60 Hz. O software utilizado foi o Proteus, um software de simulação de circuitos especialmente utilizado em eletrônica, neste trabalho foi o meio usado para somar os componentes do sinal distorcido, onde as fontes  $v_1$ ,  $v_2$  e  $v_3$  são as componentes com frequências múltiplas a original. A montagem é mostrada na Figura 1.

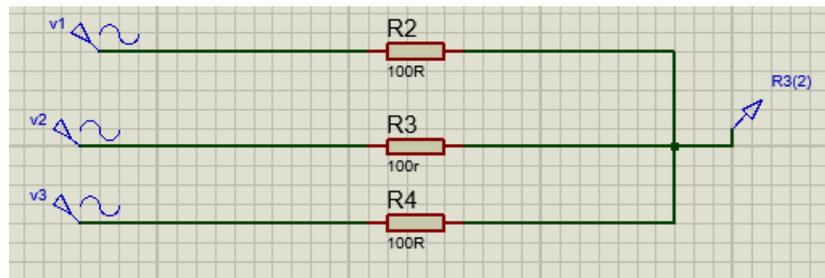


Figura 1 – Montagem no proteus (Fonte: Autoria própria)

Na simulação são plotados separadamente, os gráficos do sinal original e os sinais das harmônicas componentes do mesmo. Assim fica perceptível a diferença do sinal afetado. Para comprovar a interferência de componentes de outras frequências no sinal, é utilizado o espectro de frequência do sinal, derivado direto da série de Fourier.

## DESENVOLVIMENTO

No campo da Engenharia Elétrica faz-se necessário diversas vezes trabalhar com sinais e sistemas, de modo que os conceitos de Fourier estão presentes no dia a dia para facilitar as operações, seja em um diodo retificador, sinais de ondas eletromagnéticas ou senoides produzidas na propagação de corrente alternada.

A ideia de Fourier, ao deduzir a equação (1) foi aproximar qualquer função através de uma soma de senos e cossenos, ou seja, funções senoides, e destrinchar um sinal de modo a analisar os sinais que formam a onda. Desta maneira, podemos aplicá-la na identificação e tratamento de sinais harmônicos que por definição são justamente sinais senoidais de tensão ou corrente que sofreram algum tipo de alteração por outras formas de onda.

Apresentado a teoria de Fourier, podemos separá-la em duas partes, nas séries, que utilizam de funções trigonométrica e de forma exponencial, e na transformada. Neste artigo faremos uso da série de Fourier na sua forma harmônica dada por:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_n - \phi_n) \quad (1)$$

Sejam os coeficientes  $A_n$  e  $A_0$  função de  $f(t)$ .

Na Figura 2 pode-se visualizar em gráfico confeccionado no software Proteus, senoides sobrepostas de diferentes amplitudes e frequência; a Figura 3 apresenta um gráfico representando a soma das senoides do gráfico da Figura 2. É perceptível observar uma distorção de amplitude e frequência em relação a uma senoide perfeita, mas não se pode mensurar visualmente o quanto é essa distorção.

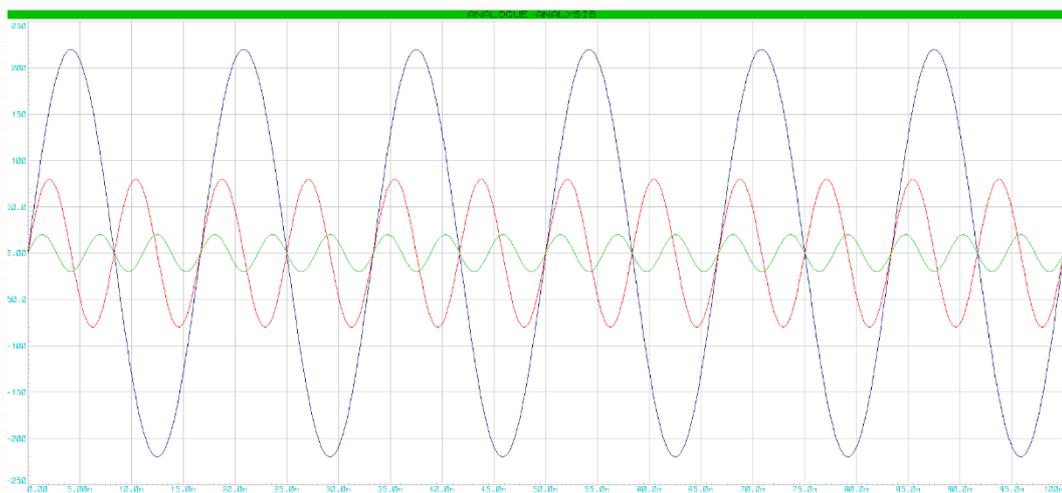


Figura 2 – Componentes harmônicas (Fonte: Autoria própria)

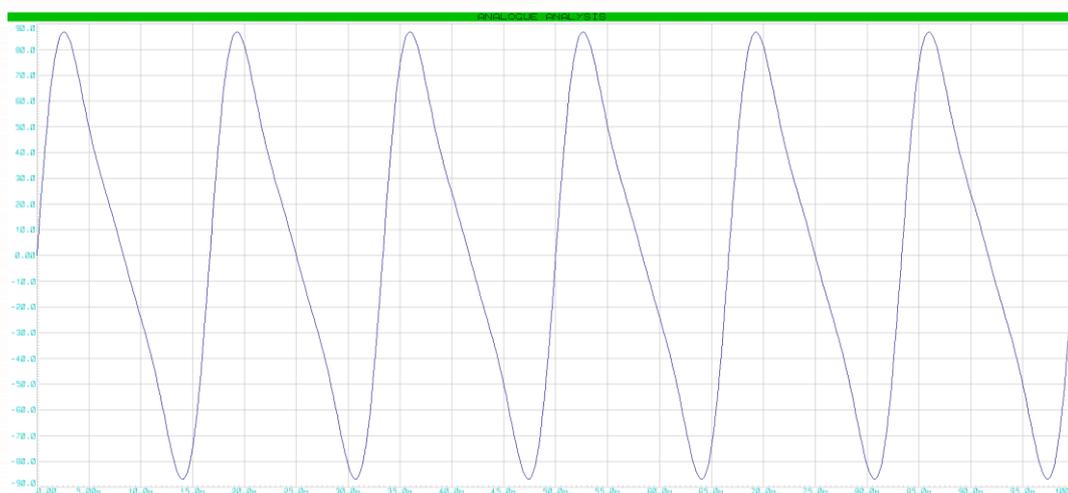


Figura 3 – Sinal original (Fonte: Autoria própria)

A soma das senoides forma uma função distorcida, como pode ser visualizado na Figura 3. Para um sinal sem ruídos, como uma senoide perfeita, seria possível observar apenas a frequência principal na forma de um único pico de nível de tensão. Porém, no espectro de frequência da senoide em questão, Figura 4, vê-se alguns outros picos, cada qual, com sua contribuição para a distorção.



Figura 4 – Espectro de Frequência (Fonte: Autoria própria)

As componentes harmônicas surgem de cargas não lineares. Na área industrial, equipamentos como motores de indução, transformadores, fontes chaveadas, pontes retificadoras etc. são responsáveis pelo crescimento de cargas não lineares. Instalações residenciais devido ao aumento de aparelhos eletrônicos, também tem contribuído negativamente com a QEE.

A formação de harmônicas, reduz a qualidade da energia transmitida. Além disso, também são responsáveis pela redução da vida útil dos aparelhos, rompimento do dielétrico do banco de capacitores, aquecimento da fiação através de sobretensões e sobrecorrentes com consequente perda de carga e, segundo Santos (2007), podem ocasionar o fenômeno da ressonância, grande responsável pela causa de sobrecorrentes em bancos de capacitores.

O sinal de saída global será a soma das componentes harmônicas mais o sinal fundamental. As componentes harmônicas são múltiplos inteiros da frequência fundamental, ou seja, para uma frequência habitual de 60Hz, são formadas harmônicas de 120 Hz, 180 Hz e assim por diante, afetando diretamente a quantidade de energia transformada em trabalho útil, limitada pelo fator de potência, mensurado pela equação (4).

$$FP = \frac{P}{S} \quad (2)$$

$$FP = \frac{VI \cos \theta}{VI} \quad (3)$$

$$FP = \cos \theta \quad (4)$$

Onde:

*FP*: Fator de potência

$\theta$ : Ângulo entre o sinal de tensão e corrente

*P*: Potência Ativa

*S*: Potência Aparente

Devido a maioria das cargas serem de natureza indutiva, o fator de potência das instalações costuma ser indutivo. O fator de potência mínimo aceitável para uma instalação, segundo a ANEEL, deve ser 0,92. Abaixo desse percentual, pode ser penalizada pela concessionária, pois injeta harmônicas na rede que reduzem a QEE. Por exemplo, no caso dos consumidores industriais, que devido à grande quantidade de máquinas de indução e outros equipamentos eletrônicos possuem alto nível de cargas não-lineares. Ocasionalmente pelo ritmo crescente da geração distribuída, também inspira maiores atenções da concessionária os consumidores residenciais, de forma manter o fator de potência sempre elevado.

O nível de distorção pode ser definido pela taxa de distorção harmônica (DDT), regulamentado pela a ANEEL o nível da distorção varia de 5 a 10% a depender da tensão nominal, acima disso a poluição produzida pelas harmônicas afeta consideravelmente o sinal.

Uma ferramenta matemática extraída diretamente da transformada de Fourier é a Transformada Rápida de Fourier (FFT), encontrada facilmente em osciloscópios digitais e em software de simulação. Pode ser utilizada para tratar o sinal e influência das harmônicas na rede, medindo inclusive a DTT, dada pela equação (5). A FFT mostra separadamente a influência de cada harmônica no sinal através de picos, sendo o maior pico a frequência fundamental, como mostrado na Figura 3.

$$DDT = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} \quad (5)$$

Onde *h* é a magnitude do sinal da harmônica equivalente.

Logo, através do espectro de frequência da Figura 3, podemos encontrar dados suficientes para calcular a DTT exposta na equação (6) da senoide da Figura 2:

$$DDT = 20,4\% \quad (6)$$

Um sistema que seja afetado por componentes harmônicas, terá seu fator de potência, apresentado na equação (7), alterado com acréscimo da parcela que leva em conta a DTT. Desta maneira, pode ser apresentado por:

$$FP = \frac{\cos\theta}{\sqrt{DDT^2 + 1}} \quad (7)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir do dado exposto na equação (6) conclui-se que o sinal exemplificado destoa dos padrões estabelecidos pela ANEEL. Visualmente, na Figura 1 foi possível notar esse provável alto índice de distorção, com a diferenciação das componentes harmônicas no espectro da Figura 3 e um cálculo realizado com a equação (5) foi possível constatar esse fato.

Desta maneira mostramos a importância da utilização da teoria de Fourier através do espectro de frequência, para a detecção rápida de um sinal harmônico através de uma ferramenta acessível e fácil de ser utilizada e a partir deste a constatação do seu nível real de distorção. Uma maneira didática de se fazer compreender qualidade de energia e como são formadas as distorções harmônicas.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o aumento na demanda de carga na rede crescente a cada ano no país, crescem, entre outras, as dificuldades relacionadas a distribuição e qualidade do produto entregue ao consumidor final. Neste aspecto a distorção harmônicas, objeto de estudo deste artigo, torna-se uma das principais causas de distúrbios de qualidade.

A partir das observações aqui feitas chega-se a reafirmação que o estudo das harmônicas a partir das equações formuladas por Fourier é simples e altamente funcional, podendo ser difundida em todas aplicações para melhor perceber a real influência das componentes harmônicas em um sinal, tal como sua participação efetiva negativamente no fator de potência de instalação levando a possíveis perdas materiais.

## REFERÊNCIAS

SILVA, J.; PINHEIRO, R. A Análise de Fourier utilizando o software Proteus Isis: Um estudo de caso sobre as harmônicas. VII CONNEPI, TO: Palmas, 2012

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, Módulo 8, Revisão 9, ANEEL, 2018

NASCIMENTO, R. Energia Solar no Brasil: Situação e Perspectivas. Câmara dos Deputados, Brasília, 2017

SANTOS, F. Qualidade de Energia – Comparação das Normas IEC 61000-3-2 e IEEE 519. Rio de Janeiro, 2007

ANEEL, Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010