

Atribuição de Responsabilidades por Conteúdo Harmônico em Redes de Distribuição utilizando-se das Definições de Fator de Consumo e Fator De Geração de Harmônicos

Adelan de P. N. Martens^{1,*}, Newton da Silva²

^{1,2} Universidade Estadual de Londrina (UEL), Departamento de Engenharia Elétrica, Londrina – PR, Brasil..

e-mail: adelan.martens@gmail.com*; newton.silva@uel.br.

*Corresponding author.

RESUMO A circulação de conteúdo harmônico é um fenômeno presente nas redes de distribuição de energia elétrica e a atribuição de responsabilidade é compartilhada entre o consumidor e a concessionária. Este artigo apresenta um método de cálculo das Responsabilidades por Conteúdo Harmônico em redes monofásicas, através da dedução do “Fator de Geração de Harmônicos” e do “Fator de Consumo de Harmônicos” utilizando-se da Teoria de Potências Conservativas. O trabalho apresenta o equacionamento completo destes dois fatores que são obtidos a partir da decomposição do sinal da corrente em suas componentes ortogonais, obtendo-se assim, uma metodologia para o cálculo dos fatores e atribuição de percentuais de responsabilidade em relação ao conteúdo harmônico de uma carga conectada à rede elétrica entre a distribuidora de energia e o consumidor. Resultados de simulação e experimentais são apresentados validando as equações obtidas.

PALAVRAS-CHAVE Processamento digital de Sinais, Qualidade de Energia, Responsabilidades por conteúdo Harmônico, Teoria de Potências Conservativas.

Assignment of Responsibilities for Harmonic Content in Distribution Networks Using the Definitions of Consumption Factor and Harmonic Generation Factor

ABSTRACT The circulation of harmonic content is a phenomenon present in electricity distribution networks and the assignment of responsibility is shared between the consumer and the utility company. This paper presents a method for calculating the responsibilities for harmonic content in single-phase networks, through the deduction of the “Harmonic Generation Factor” and the “Harmonic Consumption Factor” using the Conservative Power Theory. The work presents the complete equation of these two factors that are obtained from the decomposition of the current signal into its orthogonal components, thus obtaining a methodology for calculating the factors and assigning percentages of responsibility in relation to the harmonic content of a load connected to the electricity grid between the energy distributor and the consumer. Simulation and experimental results are presented validating the equations obtained.

KEYWORDS Conservative Power Theory, Digital Signal Processing, Power Quality, Responsibilities for Harmonic Content.

I. INTRODUÇÃO

Um sinal elétrico de corrente ou tensão no tempo pode ser decomposto como uma soma das suas componentes múltiplas de sua frequência fundamental, conhecido como espectro harmônico [1] com suas respectivas amplitudes, embora existam também as defasagens em relação à componente fundamental, quando considerada a representação em um plano complexo.

Denomina-se conteúdo harmônico todas componentes de um sinal que apresentem frequências que diferem da frequência fundamental do sinal original [1-3].

Em sistemas típicos de distribuição em corrente alternada são utilizados sinais senoidais de tensão, e a presença de

múltiplos harmônicos nestes sinais podem causar distorções na corrente, assim como, cargas não lineares geram correntes com componentes que diferem da frequência fundamental, tratando-se de um fenômeno natural quando consideradas as aplicações não ideais do mundo real [4].

A presença de conteúdo harmônico, em redes de distribuição tem aumentado ao longo dos anos. Este crescimento relaciona-se com a popularização de dispositivos eletrônicos, desde os celulares, microcomputadores, até veículos elétricos, conversores de energia e inversores de frequência. Sabe-se que estes equipamentos possuem, em suas etapas de conversão, sistemas de filtragem, chaveamento, entre outros, que são responsáveis por consumo de correntes com conteúdo harmônico [5]. Além disso, existem distorções proveniente

das etapas de geração onde, por exemplo, o desbalanceamento mecânico de um gerador provoca deformação na forma de onda da tensão.

Quando uma carga de características ativa e/ou reativa, sem compensadores de harmônicos ou sistema de filtragem, é alimentada por tensão não senoidal, surgem na corrente, os múltiplos harmônicos presentes na tensão.

Em uma rede de distribuição podem existir várias configurações de circuitos, sendo as principais:

- Alimentadores Individuais - circuitos com fornecimento de energia elétrica por ramal dedicado em média tensão.

- Alimentadores Compartilhados - ramais de uso coletivo para fornecimento em média ou baixa tensão com vários consumidores conectados em vários pontos de acoplamento. A presença de distorções nestes pontos de acoplamento pode ser proveniente das correntes das cargas ou da tensão de fornecimento sendo que, cargas lineares, resistivas ou reativas, apresentam correntes com forma de onda da tensão elétrica distorcida, em menor escala.

Além disso, as correntes não senoidais interagem com as impedâncias de linha, provocando quedas de tensão distorcidas. Sendo assim, o transporte da energia entre geradores e consumidores também propaga sinais distorcidos de tensão e corrente.

Embora a presença de sinais harmônicos possa ser um fenômeno natural, o seu excesso na forma de onda da tensão, pode provocar um comportamento indesejável em um equipamento, principalmente quando é projetado para funcionar em uma rede elétrica não distorcida.

A distorção harmônica demasiada apresenta efeitos danosos aos equipamentos, tais como: aquecimento, mau funcionamento e queima. Isto acontece quando não há filtros na rede elétrica que atenuam os seus efeitos. Neste contexto, existem normas para regulamentação da presença de conteúdo harmônico, entre elas, o PRODIST – Procedimentos de Distribuição - Módulo 8 (Nacional) [2] e a IEC 61000 - 4 - 7 [6] que se referem à metodologia de avaliação da qualidade de energia, fornecendo parâmetros percentuais de distorção admissíveis para os casos de distribuição e consumo de energia elétrica.

Contudo, devido ao uso compartilhado das redes entre múltiplos geradores e múltiplos consumidores, a presença de distorção harmônica geralmente apresenta mais de um responsável, sendo necessário avaliar e identificar os causadores de tais distorções.

Uma das formas de identificar os causadores de distorção harmônica se dá pela atribuição de percentuais de Responsabilidade por Conteúdo Harmônico, obtida através do cálculo do Fator de Consumo de Harmônicos e do Fator de Geração de Harmônicos e suas respectivas relações.

Sob a perspectiva de fornecimento e consumo de energia elétrica onde existe distorção harmônica, podem-se classificar os sinais, quanto ao seu comportamento harmônico, em duas categorias, sendo elas:

- Consumo de Harmônicos, para os casos onde o consumidor é alimentado por uma tensão distorcida e suas correntes não diferem em frequência das frequências presentes no sinal de tensão, por exemplo: carga linear alimentada por rede com tensão distorcida.

- Geração de Harmônicos, para os casos onde o consumidor é alimentado por uma tensão distorcida ou não, e

uma ou mais de suas componentes de corrente diferem, em frequência, das frequências presentes no sinal de tensão, exemplo: carga não linear alimentada por rede com tensão, com ou sem distorção.

A determinação das responsabilidades por conteúdo harmônico [6-10] se dá pelo cálculo das relações entre os valores eficazes das correntes que representam o consumo e a geração de harmônicos, onde os valores percentuais de responsabilidade entre consumidor e a distribuidora de energia elétrica são expressos através de dois fatores de responsabilidade.

Denominando-se Fator de Consumo Harmônico – FCH, a razão entre o resultado da subtração do valor eficaz da corrente de distorção harmônica e o valor eficaz da corrente gerada, pela corrente de distorção harmônica. Este fator é referente à parcela de responsabilidade da distribuidora, e relaciona-se diretamente com as correntes originadas pela parcela distorcida da tensão, denominadas correntes harmônicas consumidas. Outra denominação é o Fator de Geração Harmônico - FGH, que corresponde à razão entre os valores eficazes das correntes de geração de harmônicos e da distorção harmônica. As correntes geradas possuem frequências diferentes das frequências das tensões que compõem o espectro harmônico da tensão. Este fator refere-se à parcela de responsabilidade do consumidor, relacionando-se com as correntes geradas pelo uso de cargas não lineares.

Para o cálculo das componentes de corrente necessárias para a determinação dos fatores FCH e FGH, utiliza-se a Teoria de Potências Conservativas devido ao seu método matemático de separação do sinal da corrente em componentes ortogonais, em especial, a corrente gerada.

II. TEORIA DE POTÊNCIAS CONSERVATIVAS

Proposta em 2003 [11] e revista pelo autor em 2011 [5], [7], a Teoria de Potências Conservativas – CPT, apresenta uma metodologia para análise de circuitos no domínio do tempo, onde é possível decompor o sinal da corrente em suas componentes ortogonais utilizando-se dos sinais no tempo da tensão aplicada na carga e da corrente que circula por ela [3], [12], [13]. As representações genéricas dos fundamentos e abordagens da CPT podem ser verificadas pelos equacionamentos a seguir:

A. Equações gerais:

As representações genéricas dos fundamentos e abordagens da CPT podem ser verificadas pelos equacionamentos a seguir:

O valor médio da variável x é dado por:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (1)$$

A integral no tempo para a variável x é dada por:

$$x_f(t) = \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (2)$$

A integral imparcial de x é dada por:

$$\hat{x}(t) = x_f(t) - \bar{x}_f(t) \quad (3)$$

A integral imparcial (3) é um artifício matemático que mantém o formato e a amplitude do sinal original, porém com um desfasamento angular de noventa graus (atraso), calculado através da subtração entre a integral do sinal original

(2) e sua componente contínua, o valor médio (4).

O Produto interno de x e y dado por:

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) y(t) dt \quad (4)$$

O produto interno pode ser descrito como o valor médio resultante da multiplicação de dois sinais no tempo.

A derivada no tempo, para a variável x é dada por:

$$\check{x} = \frac{dx}{dt} \quad (5)$$

As propriedades das integrais imparciais e derivadas no tempo são dadas por:

$$\begin{aligned} \langle x, \check{x} \rangle &= 0 \\ \langle x, \hat{x} \rangle &= 0 \\ \langle x, \check{y} \rangle &= -\langle \check{x}, y \rangle \\ \langle x, \hat{y} \rangle &= -\langle \hat{x}, y \rangle \\ \langle x, y \rangle &= \langle \check{x}, \hat{y} \rangle = -\langle \hat{x}, \check{y} \rangle \end{aligned} \quad (6)$$

A Norma Euclidiana, valor de média da soma quadrática ou valor eficaz de x é dado por:

$$\|x\| = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = \sqrt{\langle x, x \rangle} = X_{eficaz} \quad (7)$$

B. Equações de tensão:

As equações (8), (9) e

(10) apresentam as formas de cálculo da integral imparcial para casos senoidais e não senoidais.

A integral imparcial do sinal de tensão senoidal é dada por:

$$\hat{v}(t) = v_f(t) - \bar{v}(t) \quad (8)$$

A integral imparcial do sinal de tensão de uma dada harmônica de frequência k é dada por:

$$\hat{v}_k(t) = v_{kf}(t) - \bar{v}_{kf}(t) \quad (9)$$

$$k \in \mathbb{N} \neq 0$$

A integral imparcial de um sinal de tensão distorcido, composto por múltiplas harmônicas é dada por:

$$\hat{v}(t) = \sum_k^K \hat{v}_k(t) \quad (10)$$

Onde $k \in \mathbb{N} \neq 0$ e K é a maior ordem presente no sinal.

A integral imparcial, expressa em

(10), apresenta a expressão matemática para o um sinal de tensão distorcida, sendo necessário decompor o sinal original em suas componentes de frequência k , obtendo-se os valores individuais para cada componente de tensão e o resultado final será a soma de todos estes valores.

Em termos visuais, a integral imparcial possui amplitude e formato de onda igual ao do sinal original, porém com atraso de fase de noventa graus para a frequência fundamental.

C. Equações de corrente:

Na CPT a corrente de um sistema monofásico pode ser decomposta e representada através da soma de várias componentes, separadas de forma ortogonal.

O sinal da corrente $i(t)$ é dado por:

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_v(t) \quad (11)$$

Onde $i_a(t)$ representa a corrente ativa, $i_r(t)$, a corrente reativa e $i_v(t)$, a corrente vazia

A Corrente Ativa $i_a(t)$ para sinais de tensão e corrente senoidais ou não senoidais é dada por:

$$i_a(t) = \frac{\langle v(t), i(t) \rangle}{\|v(t)\|^2} \cdot v(t) \quad (12)$$

Nota-se, em (12), que a determinação da corrente ativa se dá pelo valor resultante do produto interno da tensão e a corrente, dividido pelo valor da norma euclidiana da tensão elevada ao quadrado, resultando um valor de escala que multiplica o sinal original de tensão. Deste modo, a forma de onda da corrente ativa é exatamente igual à forma de onda da tensão, porém com amplitude diferente, de acordo com o fator de escala.

O cálculo da corrente reativa é análogo ao da corrente ativa, porém utilizando-se a integral imparcial da tensão que é considerando-se as equações (8), (9) e (10).

Para os casos de sinais de tensão e corrente senoidais ou não, o cálculo da corrente reativa $i_r(t)$ é dado por:

$$i_r(t) = \frac{\langle \hat{v}(t), i(t) \rangle}{\|\hat{v}(t)\|^2} \cdot \hat{v}(t) \quad (13)$$

A divisão do valor resultante do produto interno do sinal da integral imparcial da tensão com o sinal de corrente pelo valor eficaz da integral imparcial da tensão ao quadrado resulta em um fator de escala.

Ao considerar-se um sinal de corrente com distorção harmônica, a diferença do sinal original de corrente com a soma dos sinais da corrente ativa e a corrente reativa, resulta no sinal da corrente vazia.

Ao manipular a equação (11) obtém-se, como resultado, uma parcela de corrente cujo trabalho é descrito como nulo.

A expressão para o cálculo da corrente vazia, $i_v(t)$, é dada por:

$$i_v(t) = i(t) - i_a(t) - i_r(t) \quad (14)$$

A corrente vazia pode ser decomposta em três parcelas de correntes ortogonais. O cálculo de $i_v(t)$ através da soma de suas parcelas ortogonais é dado por:

$$i_v(t) = i_{sa}(t) + i_{sr}(t) + i_g(t) \quad (15)$$

Sendo, $i_{sa}(t)$, a corrente ativa dispersa, $i_{sr}(t)$, a corrente reativa dispersa e $i_g(t)$, a corrente gerada. O significado destas correntes é descrito a seguir.

A) Equações de Correntes harmônicas:

Denomina-se, corrente ativa de ordem harmônica k , a corrente ativa calculada para um determinado valor de frequência k em relação à uma tensão de ordem k .

Portanto quando um sinal de tensão distorcido é filtrado em uma determinada frequência de ordem k , resultará em um sinal de tensão correspondente a esta frequência k e este sinal de tensão originará um sinal de corrente na mesma ordem harmônica da tensão de ordem k .

A corrente ativa de ordem harmônica k , $i_{ak}(t)$, é dada por:

$$i_{ak}(t) = \frac{\langle v_k(t), i(t) \rangle}{\|v_k(t)\|^2} \cdot v_k(t) \quad (16)$$

A soma das correntes ativas de ordem k , calculadas individualmente em cada ordem harmônica, é denominada corrente ativa harmônica, $i_{ha}(t)$, é dada por:

$$i_{ha}(t) = \sum_{k \in K} i_{ak}(t) \quad (17)$$

A diferença entre a corrente ativa harmônica, $i_{ha}(t)$, e a corrente ativa, $i_a(t)$, é denominada corrente ativa dispersa.

A corrente ativa dispersa, $i_{sa}(t)$, é dada por:

$$i_{sa}(t) = i_{ha}(t) - i_a(t) \quad (18)$$

Similar às correntes ativas, as correntes reativas harmônicas possuem sistemática de cálculo parecida, diferenciando-se pela utilização da integral imparcial da tensão calculada para cada ordem harmônica k .

A corrente reativa harmônica k , $i_{rk}(t)$, é dada por:

$$i_{rk}(t) = \frac{\langle \hat{v}_k(t), i(t) \rangle}{\|\hat{v}_k(t)\|^2} \cdot \hat{v}_k(t) \quad (19)$$

A corrente reativa harmônica, $i_{hr}(t)$, é dada por:

$$i_{hr}(t) = \sum_{k \in K} i_{rk}(t) \quad (20)$$

A corrente reativa dispersa, $i_{sr}(t)$, é calculada pela diferença entre a corrente reativa harmônica $i_{hr}(t)$ e a corrente reativa $i_r(t)$, equação dada por:

$$i_{sr}(t) = i_{hr}(t) - i_r(t) \quad (21)$$

Por fim, a corrente gerada refere-se à parcela de corrente que possui frequências harmônicas que diferem das frequências harmônicas presentes na tensão e na integral imparcial da tensão, sendo comumente encontradas em cargas não lineares.

A corrente gerada, $i_g(t)$, obtida através da corrente vazia, é dada por:

$$i_g(t) = i_v(t) - i_{sa}(t) - i_{sr}(t) \quad (22)$$

A corrente gerada, $i_g(t)$, também pode ser calculada pelas correntes ativas e reativas harmônicas, dada por:

$$i_g(t) = i(t) - i_{ha}(t) - i_{hr}(t) \quad (23)$$

Os dois métodos de cálculo são equivalentes, expressões (22) e (23). A equação (23) pode ser reescrita definindo-se a corrente harmônica, $i_h(t)$, por:

$$i_h(t) = i(t) - i_g(t) = i_{ha}(t) + i_{hr}(t) \quad (24)$$

Dadas as considerações o sinal de corrente pode ser decomposto em cinco parcelas ortogonais.

A corrente, $i(t)$, decomposta em cinco parcelas, conforme a CPT, é dada por:

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_{sa}(t) + i_{sr}(t) + i_g(t) \quad (25)$$

Dentre os equacionamentos da CPT, destaca-se a equação (22), que determina o sinal de corrente gerada. O valor eficaz deste sinal está diretamente ligado à contribuição de conteúdo harmônico provocado pelo consumidor.

III. ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES POR CONTEÚDO HARMÔNICO

É possível analisar os contextos de conteúdo harmônico em redes de distribuição através de quatro casos distintos, sendo eles:

- Tensão senoidal e Carga linear:** Quando uma carga de característica linear é alimentada por uma tensão senoidal, a corrente consumida pela carga terá frequência idêntica à do sinal de tensão, logo o conteúdo harmônico é igual a zero.
- Tensão senoidal e Carga não linear:** Quando uma carga de característica não linear é alimentada por uma tensão senoidal, a corrente consumida pela carga terá componentes de frequência que diferem da frequência do sinal de tensão, logo o conteúdo harmônico é diferente de zero, e atribuído ao consumidor.
- Tensão Distorcida e Carga linear:** Quando uma carga de característica linear é alimentada por uma tensão distorcida, as correntes consumidas pela carga terão frequências iguais às do sinal de tensão, isto é, uma carga ativa ou reativa produzirá correntes distorcidas em frequências correspondentes às correntes presentes na tensão de alimentação, logo a distorção harmônica é diferente de zero, e a responsabilidade pelo conteúdo harmônico presente nas correntes é da distribuidora de energia elétrica.
- Tensão Distorcida e Carga não linear:** Este caso corresponde aos efeitos dos casos “b” e “c” somados, onde existem componentes harmônicos no sinal de tensão que diferem dos componentes harmônicos de corrente e existem componentes harmônicos no sinal de corrente que diferem dos componentes harmônicos de

tensão, portanto, consumidor e distribuidora são responsáveis pela distorção harmônica, sendo necessário obter os valores percentuais de responsabilidade de cada parte.

Determinam-se os valores percentuais das responsabilidades da presença de conteúdo harmônico em redes monofásicas através do cálculo do valor eficaz da corrente gerada e sua relação com o valor eficaz da corrente de distorção harmônica.

A. Corrente de Distorção Harmônica:

Denomina-se Corrente de Distorção harmônica, a diferença entre o sinal de corrente e sua parcela de corrente fundamental.

O sinal de Corrente de Distorção Harmônica, $i_{dh}(t)$, é dado por:

$$i_{dh}(t) = i(t) - i_1(t) \quad (26)$$

Onde $i_1(t)$ é o sinal de corrente na frequência fundamental.

A corrente fundamental corresponde à soma da corrente ativa e reativa, ambas de ordem unitária.

A corrente fundamental, $i_1(t)$, é dada por:

$$i_1(t) = i_{a1}(t) + i_{r1}(t) \quad (27)$$

A corrente de distorção harmônica compreende todos os sinais de corrente em todas as frequências que diferem da frequência fundamental.

Logo, as correntes ativas e reativas de ordens harmônicas diferentes de 1 juntamente com a corrente gerada, estão contidas no sinal de distorção harmônica de corrente $i_{dh}(t)$.

B. Fator de Geração de Harmônicos:

Para calcular o valor de responsabilidade por conteúdo harmônico do consumidor, divide-se o valor eficaz da corrente gerada pelo valor eficaz da corrente de distorção harmônica.

A razão entre os valores eficazes da corrente gerada e da de distorção harmônica é denominada de Fator de Geração de Harmônicos F_{GH} .

O Fator de Geração de Harmônicos, F_{GH} , é dado por:

$$F_{GH} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_g^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{dh}^2(t) dt}} = \frac{I_G}{I_{DH}} \quad (28)$$

Onde I_G é o valor eficaz da corrente gerada, $i_g(t)$, e I_{DH} é o valor eficaz da corrente de distorção harmônica, $i_{dh}(t)$.

C. Fator de Consumo de Harmônicos:

Para calcular o valor de responsabilidade por conteúdo harmônico da distribuidora de energia elétrica, divide-se a diferença do valor eficaz da corrente de distorção harmônica

com o valor eficaz da corrente gerada pelo valor eficaz da corrente de distorção harmônica.

Denomina-se o valor desta razão como Fator de Consumo de Harmônicos F_{CH} .

O Fator de Consumo de Harmônicos, F_{CH} , é dado por:

$$F_{CH} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{dh}^2(t) dt} - \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_g^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{dh}^2(t) dt}} = \frac{I_{DH} - I_G}{I_{DH}} \quad (29)$$

D. Fatores complementares

O Fator de Geração de Harmônicos, F_{GH} , e o Fator de Consumo de Harmônicos, F_{CH} , são complementares e adimensionais. Em ambas as expressões (28) e (29) a razão é sempre em relação ao valor eficaz da corrente de distorção harmônica.

A equivalência unitária da soma de fatores harmônicos é dada pela equação:

$$F_{GH} + F_{CH} = 1 \quad (30)$$

E. Responsabilidades

Os valores de reponsabilidades, apresentados em números percentuais, podem ser obtidos conforme as equações a seguir:

A responsabilidade por conteúdo harmônico do consumidor $R_{CH \text{ consumidor}}$ em valor percentual é dada por:

$$R_{CH \text{ Consumidor}} = F_{GH} \times 100\% \quad (31)$$

A responsabilidade por conteúdo harmônico da distribuidora $R_{CH \text{ distribuidora}}$ em valor percentual é dada por:

$$R_{CH \text{ distribuidora}} = F_{CH} \times 100\% \quad (32)$$

IV.RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para obtenção dos resultados de simulação consideram-se sinais de tensão e corrente ideais, expressos no tempo para a realização do cálculo dos valores eficazes das correntes, distorção harmônica total e responsabilidades.

A Tabela 1 apresenta os sinais utilizados referentes aos quatro casos teóricos distintos, conectados ao PAC – Ponto de acoplamento comum.

TABELA 1. Sinais de Tensão e Corrente.

Sinais de Tensão e Corrente decompostos	
Caso 1	180cos(wt) [V]
	18cos(wt) [A]
Caso 2	180cos(wt) [V]
	18cos(wt)+3,6cos(3wt)+0,9cos(7wt) [A]
Caso 3	180cos(wt)+18cos(5wt)+6cos(9wt) [V]
	18cos(wt)+1,8cos(5wt)+0,6cos(9wt) [A]
Caso 4	180cos(wt)+36cos(3wt)+6cos(9wt) [V]
	18cos(wt)+3,6cos(3wt)+1,8cos(5wt)+0,9cos(7wt)+0,6cos(9wt) [A]

O caso 1 refere-se ao comportamento de um circuito, contendo uma carga linear, alimentado por uma tensão senoidal. Ambos os sinais não apresentam distorção.

No caso 2 a carga linear é substituída por uma carga não linear, mantendo-se a tensão senoidal. Neste caso a corrente representada no tempo é distorcida.

Para o caso 3 considera-se uma carga linear alimentada por uma tensão que possui componentes harmônicas que diferem da fundamental.

Por fim, o caso 4 apresenta distorções em ambos os sinais, representado uma rede distorcida alimentando uma carga não linear.

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

TABELA 2. Resultados de Simulação do Equacionamento Matemático

Casos	I[A]	DHTi	IDH[A]	IG[A]	RCHdist[%]	RCHcons[%]
Caso 1	12,73	0,00	0,00	0,00	-	-
Caso 2	13,00	0,21	2,62	2,62	0,00	100,00
Caso 3	12,80	0,11	1,34	0,00	100,00	0,00
Caso 4	13,06	0,23	2,95	1,42	51,71	48,29

Sendo:

- IA - valor eficaz da corrente;
- DHTi - valor da Distorção Harmônica Total do sinal de corrente;
- IDH - valor eficaz da Corrente de Distorção Harmônica
- IG - valor eficaz da Corrente Gerada;
- RCH dist – percentual de Responsabilidade por Conteúdo Harmônico do Distribuidor;
- RCH cons – percentual de Responsabilidade por Conteúdo Harmônico do Consumidor.

Como esperado, o Caso 1 apresenta o comportamento ideal, sem distorções, em que as responsabilidades do consumidor e concessionária são nulas. A tabela 2 não apresenta valores calculados pois, para este caso, não há componente harmônica e, matematicamente, o cálculo das responsabilidades não deve ser executado pois resulta em uma divisão por zero.

No Caso 2, na Tabela 1, percebe-se que todos os valores de correntes, que são diferentes da frequência fundamental, não possuem sinais de tensão em frequências correspondentes logo, a RCHcons, vide Tabela 2, é de 100%, indicando que é a presença da carga não linear, de responsabilidade do consumidor, que provoca a distorção.

Para o Caso 3, notam-se que as correntes de distorção harmônica possuem sinais correspondentes de tensão distorcidos, em frequências correspondentes, sendo a distorção harmônica de corrente deste caso, proveniente da Distribuidora de Energia logo, o valor de RCHdist é de 100%.

O Caso 4 é a situação mais comum, onde ambos, consumidor e distribuidora contribuem para distorção, devido à carga não linear e a tensão distorcida respectivamente.

Nota-se que a corrente do caso 4 possui frequências diferentes da fundamental que abrangem os dois casos anteriores, casos 2 e 3, ou seja, correntes que possuem e não possuem sinais de tensão de frequências correspondentes, e, portanto, há um compartilhamento de responsabilidades. No caso c comprova-se que $RCHcons + RCHdist = 100\%$, o que concorda com a equação (30) em valores percentuais.

V.RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As equações para o cálculo dos fatores de geração de harmônicos e consumo de harmônicos, juntamente com as demais expressões apresentadas da CPT são implementadas em um controlador digital de sinais (DSC), modelo TMS320F28335 da “Texas Instruments” que realiza todo o cálculo em tempo real.

Para a extração de uma única componente harmônica de ordem k de um sinal distorcido [7], utilizou-se um Filtro Digital de Transformada Discreta de Fourier com Janela Deslizante SWR-DFT [14], onde, além de realizar a separação das componentes harmônicas de tensão é adaptado [15] para sintetizar os sinais das equações: (8) e (9) derivadas das equações gerais (29), (30) e (3), [5], [3], [8].

Devido às características do controlador digital de sinais, tais como espaço de memória, velocidade de processamento, opta-se pela filtragem das harmônicas ímpares que são as mais presentes nos sinais distorcidos.

Quando instalado em um PAC com múltiplos consumidores, o valor de RCHcons representa a contribuição mútua de todas as cargas conectadas.

A Tabela 3 refere-se aos tipos de cargas usadas para os testes de cálculo de responsabilidades.

TABELA 3. Tabela de Cargas.

Tabela de Cargas		
Número	Carga	Descrição
1	R	Lâmpada 100W 127V
2	RL	Motor de indução monofásico 52W 115V
3	Não_linear	Ponte retificadora de onda completa - Carga RC Paralelo

A Tabela 4 apresenta os valores eficazes das correntes para os distintos tipos de carga, onde as correntes harmônicas com frequências diferentes das calculadas pelo filtro digital são classificadas como correntes geradas, já que não é possível implementar muitos filtros de ordem k para separar um sinal distorcido em seus múltiplos harmônicos de forma infinita.

TABELA 4. Valores Eficazes

Valores Eficazes de Tensão e Corrente					
Linhas	Cargas	I_DH	I_G	I	V
1	R	20,60	1,38	832,15	128,58
2	RL	13,53	1,18	439,46	129,59
3	R//RL	23,52	1,18	1196,2	129,65
4	Não_Linear	788,93	350,96	943,82	126,57
5	R//RL//Não_Linear	799,53	350,80	1962,3	129,15

I_DH - Corrente de distorção Harmônica [mA]

I_G - Corrente gerada [mA]

I - Corrente [mA]

V - Tensão [V]

Com um número limitado de frequências harmônicas possíveis de serem implementadas em tempo real no DSC, opta-se pelas harmônicas de ordem ímpar, por serem mais relevantes quanto aos efeitos prejudiciais da distorção harmônica com limite igual à ordem 9.

Os valores eficazes de I_{DH} e I_G são obtidos diretamente do osciloscópio utilizando-se os sinais $i_{dh}(t)$ e $i_g(t)$ sintetizados pelo DSC em tempo real.

Os valores eficazes de corrente I e tensão V são calculados através dos sinais $i(t)$ e $v(t)$ provenientes de ponteiros externas de corrente e tensão pelo osciloscópio.

Para os sinais utilizados pelo conversor D/A do DSC, na saída do processamento digital, adiciona-se uma etapa de filtro, com objetivo de atenuar ruídos e contribuições de frequências não contempladas, contudo, um certo nível interferência pode ser visto nos resultados.

Tal comportamento é verificado ao observar as correntes geradas I_G das cargas lineares R e RL com valores que diferem de zero.

A restrição das ordens harmônicas, devido a capacidade de processamento do DSC, faz com que os valores de I_G sejam maiores que o esperado, pois, todas correntes em ordens harmônicas que diferem das ímpares de 1 a 9, são identificadas como correntes com frequências diferentes das encontradas tensão e, portanto, “geradas” pelo cliente.

Através das equações (28) e (29) calculam-se os fatores de responsabilidades e de (30) e (31), os respectivos valores percentuais de Responsabilidades para os tipos de cargas apresentados na Tabela 4 cujos resultados são apresentados na Tabela 5.

TABELA 5. Responsabilidades.

Responsabilidades por Conteúdo Harmônico [%]			
Linhas	Cargas	RCHcons	RCHdist
1	R	6,70	93,30
2	RL	8,76	91,24
3	R//RL	5,03	94,97
4	Não_Linear	44,49	55,51
5	R//RL//Não_Linear	43,88	56,12
RCHcons - Responsabilidade por Conteúdo Harmônico Consumidor			
RCHdist - Responsabilidade por Conteúdo Harmônico Distribuidora			

Os valores das linhas 1, 2 e 3 referem-se a cargas lineares e, 4 e 5 são de cargas não lineares.

Para cargas lineares, o valor da corrente gerada deve ser zero, [5], porém nota-se que, para os valores I_G (vide Tabela 4) das linhas 1, 2 e 3 entre 1,1 e 1,4mA, surge um valor percentual de RCHcons entre 5 e 8,75%, atribuem-se estes resultados aos erros de medição provocados pela limitação das ordens harmônicas e ao erro de medição dos instrumentos.

Ao variar a carga, linhas 2 e 3, os valores eficazes da corrente gerada se mantém estáveis, sugerindo uma etapa de correção do desvio. Devido às limitações de processamento, não é implementada uma etapa adicional de correção dos desvios.

Nas linhas 4 e 5 são calculadas as Responsabilidades para cargas não lineares. Nestes 2 casos, o sinal da corrente é distorcido, com alto conteúdo harmônico e desta forma, os valores de responsabilidade do consumidor e da distribuidora de energia ficam mais elevados em que se observa o compartilhamento de responsabilidades.

A Figura 1 apresenta as formas de ondas de tensão e correntes da carga não linear monofásica, linha 5 Tabelas 4 e 5, onde “C1” é o sinal calculado da corrente de distorção harmônica, $i_{dh}(t)$, “C2” é o sinal calculado da corrente gerada, $i_g(t)$, “C3” é o sinal da corrente, $i(t)$, e “C4” é o sinal da tensão, $v(t)$. A tensão possui taxa de distorção harmônica que varia entre 4,5 e 6,3%.

Comparando os formatos de onda de C1 com C3, nota-se que C3 possui a parcela referente a separação do conteúdo harmônico.

Em C2 apresenta-se a forma de onda da corrente gerada pela carga.

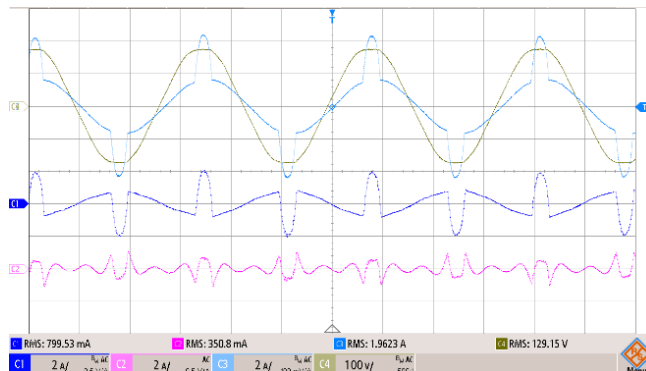


FIGURA 1. Cargas em Paralelo.

Quando comparados os casos das linhas 4 e 5, sabe-se que 4 é uma carga não linear e 5 é a associação desta carga não linear com as cargas lineares 1 e 2 (Tabelas 3 e 4) onde, o acréscimo de cargas lineares, faz com que a responsabilidade da distribuidora aumente em 0,61%, visto a interação entre a distorção harmônica da tensão e as cargas lineares.

Para os casos 4 e 5, a Responsabilidade por Conteúdo Harmônico do Consumidor indica que existem parcelas de correntes distorcidas da carga de ordem igual as das frequências encontradas na tensão distorcida, aproximando-se dos 44 por cento.

Similar ao que ocorre em [16], durante a execução do cálculo das expressões (12), (13), (16) ou (19), existe a necessidade de restringir o cálculo de divisão, quando o sinal de tensão passa pelo zero.

A obtenção dos percentuais de responsabilidade deste trabalho utiliza-se de um único ponto de aquisição de sinais, ou seja, cliente ou concessionária podem realizar a instalação de um dispositivo de aquisição de tensão e corrente na rede que se quer analisar, sem a necessidade fazer aquisição de sinais em um segundo ponto, como proposto por [13].



FIGURA 2. Experimento.

Diferente de [13], o presente trabalho propõe a utilização da corrente gerada para atribuição de responsabilidades e engloba as correntes ativas e reativas com frequências diferentes da fundamental como distorções.

A Figura 2 apresenta a imagem da bancada, com o DSC TMS320F28335, o osciloscópio, a ponteira de corrente (em azul) sensores de tensão e corrente e, mais abaixo, as cargas.

VI. CONCLUSÕES

O cálculo de Responsabilidades por Conteúdo Harmônico utilizando-se da Teoria de Potência conservativa e a Transformada Discreta de Fourier com Janela Deslizante

Recursiva é capaz de realizar a atribuição de responsabilidades para o consumidor e a distribuidora.

Toda corrente que, no seu espectro harmônico, possua frequência diferente das frequências encontradas no espectro harmônico do sinal de tensão, é classificada como corrente gerada e, portanto, responsabilidade do consumidor. Por sua vez, toda corrente que, no seu espectro harmônico, possua frequência igual às frequências presentes no espectro harmônico da tensão, é classificada como corrente consumida, e, portanto, responsabilidade da distribuidora.

A atribuição de responsabilidade por conteúdo harmônico depende da separação do sinal da corrente no tempo em suas componentes ativa, reativa e gerada. Para isto, é utilizada a CPT em conjunto com o filtro digital SWR-DFT. Somente com filtragem de alta acurácia e exata decomposição dos sinais de corrente é possível calcular os valores eficazes das correntes, necessárias para o cálculo da atribuição de responsabilidade por conteúdo harmônico em tempo real.

Os ruídos presentes no sinal da corrente comportam-se como sendo uma corrente gerada que, dependendo da sua amplitude em relação com a corrente drenada pela carga, podem ser relevantes no cálculo dos valores dos fatores de geração e consumo de harmônicos.

A relevância do trabalho se dá por sua implementação experimental não invasiva, aplicável a baixa e média tensão.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

A.P.N.MARTENS: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original. **N.D.SILVA:** Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Metodologia, Disponibilização de ferramentas, Desenvolvimento, implementação e teste de software, Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

PLÁGIO E SIMILARIDADE

O artigo foi submetido para verificação de similaridade no sistema Crossref Similarity Check (iThenticate).

DISPONIBILIDADE DE DADOS

Os dados utilizados nesta pesquisa estão disponíveis no corpo do documento.

REFERÊNCIAS

- [1] J.-B. Fourier, "Analytical Theory of Heat" pp 341-348, 1878
- [2] ANEEL, "Procedimentos de Rede-Módulo 8," pp 14-15 2020.
- [3] T. D. C. Busarello, A. Mortezaei, A. Péres e M. G. Simões, "Application of the Conservative Power Theory Current Decomposition in a Load Power Sharing Strategy among Distributed Energy Resources," IEEE Transactions on Industry Applications, pp 3-6, 2018, doi: [10.1109/TIA.2018.2820641](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2820641)

- [4] C. I. Budeanu, Puissances réactives et fictives, Institut national roumain pour l'étude de l'aménagement et de l'utilisation des sources d'énergie Impr. Cultura națională, pp 334-360, 1927.
- [5] P. Tenti, H. K. M. Paredes e P. Matavelli, "Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids," IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, vol. 26, pp. 885-893, 2011, doi: [10.1109/TPEL.2010.2093153](https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2093153)
- [6] IEEE, IEC 61000 - 4 - 7 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4: Testing and measurement techniques - Section 7: General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, IEEE, pp 20-51, 1991.
- [7] H. K. Paredes, "Teoria de Potência Conservativa: Uma abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades,," Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, pp 146-155, 2011, doi: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2011.796799>
- [8] L. J. Menezes, "Teoria da potência conservativa aplicada ao compartilhamento de responsabilidades sobre as distorções harmônicas de tensão," Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Eng. Elétrica, Uberlândia, pp 65-72, 2022, <https://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.389>
- [9] I. N. Alves, "Atribuição de responsabilidade devido à distorção harmônica em rede elétrica com geração distribuída usando a T. P. Conservativa," CBQEE Vol.1 pp 2-5, 2021, doi: 10.17648/cbqee-2021-130572
- [10] H. K. Paredes, P. H. F. Reis e S. M. Deckmann, "Caracterização de cargas lineares e não lineares em condições de tensões não senoidais" Eletrônica de Potência, vol. 22, pp. 50 - 52, 2017, <https://doi.org/10.18618/REP.2017.1.2647>
- [11] P. Tenti e P. Matavelli, "A Time-Domain Approach to Power Term Definitions under Non-Sinusoidal Conditions," em Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, Milão, pp 1-8, 2003, <https://hdl.handle.net/11577/1372122>
- [12] A. D. P. N. Martens e N. Silva, "Desenvolvimento e Implementação de um Estimador de Responsabilidades por Conteúdo Harmônico com Aplicação da Teoria de Potência Conservativa e Transformada Discreta de Fourier com Janela Deslizante Recursiva. Mestrado. UEL - Univ. Estadual de Londrina," 2023.
- [13] M. B. Arcadepani, A. C. Moreira e H. K. Morales-Paredes, "Non-Invasive Approach to Harmonic Responsibility Assignment Based on Conservative Power Theory," IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, vol. 39, n° 5, OCTOBER 2024, doi: [10.1109/TPWRD.2024.3451791](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2024.3451791)
- [14] P. M. Silveira, C. Duque, B. T. e P. F. Ribeiro, "Sliding Window Recursive DFT with Dyadic Downsampling – A New Strategy for Time-Varying Power Harmonic Decomposition," em Power & Energy Society General Meeting, Calgary, AB Canada, 2009, doi: [10.1109/PES.2009.5275212](https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275212)
- [15] M. F. Pinto, "Sistema inteligente para monitoração, gerenciamento e controle de iluminação pública e análise de parâmetros da rede elétrica," Dissertação de Mestrado. UFU - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015. <https://repositorio.ufjf.br/jspui/handle/ufjf/361>
- [16] A. D. P. N. Martens e S. Newton, "Real-Time Estimator of Resistance and Reactance Values for Linear and Nonlinear Loads in Single-Phase Electric Grids with Low Harmonic Distortion Voltages," 15th IEEE International Conference on Industry Applications INDUSCON, pp. 597-598, 2023, doi: [10.1109/INDUSCON58041.2023.10374808](https://doi.org/10.1109/INDUSCON58041.2023.10374808)

DADOS BIOGRÁFICOS

Adelan de Paula Nascimento Martens, é Engenheiro Eletricista (2018), pela Universidade Internacional – Uninter, Mestre em Engenharia Elétrica (2024) pela Universidade Estadual de Londrina – UEL. Trabalhou de 2009 a 2017 com geração de eletricidade em usinas hidrelétricas das concessionárias dos estados de São Paulo e do Paraná. De 2017 até o presente, trabalha em uma distribuidora de energia. Suas áreas de interesse são: eletrônica de

potência, qualidade de energia, sistemas de energia conectados à rede elétrica, controle digital de conversores de energia.

Newton da Silva, possui graduação em Engenharia Elétrica (1991) pela Universidade Federal de Santa Maria, mestrado em Engenharia Elétrica (1994) pela Universidade Federal de Santa Catarina e Doutorado em Engenharia Elétrica (2012) pela Unicamp. É professor da Universidade Estadual de Londrina desde 2003. Atua no Curso de Engenharia Elétrica na Graduação e Pós-graduação. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, qualidade de energia, sistemas de energia conectados à rede elétrica e controle digital de conversores.