



Universidade Estadual de Londrina

Centro de Tecnologia e Urbanismo

Departamento de Engenharia Elétrica

Adelan De Paula Nascimento Martens

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 para Sistemas Monofásicos

Londrina

2024

Adelan De Paula Nascimento Martens

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 para Sistemas Monofásicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Newton da Silva
Universidade Estadual de Londrina
Orientador

Prof. Dr. Francisco Granziera Júnior
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Jakson Paulo Bonaldo
Universidade Federal de Mato Grosso

Prof. Dr. Sebastian de Jesus Manrique Machado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Londrina, 25 de janeiro de 2024

Universidade Estadual de Londrina

Centro de Tecnologia e Urbanismo
Departamento de Engenharia Elétrica

Adelan De Paula Nascimento Martens

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 para Sistemas Monofásicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica da
Universidade Estadual de Londrina como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do
Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Newton da Silva

Londrina

2024

*Dedico este trabalho à minha família
e aos meus amigos.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e em especial minha família, Sônia, Amilton, Eugênio (em memória), Rúbia, Nathan, Ivo, Adelaine, aos meus sobrinhos, aos meus tios, primos, e amigos que fizeram parte desta conquista de forma direta ou indireta, com palavras de apoio, doses de entusiasmo, risadas e com o simples gesto de amizade.

Ao Professor Dr. Newton da Silva pela orientação, ensinamentos, amizade, atenção, dedicação e paciência durante todo o desenvolvimento deste trabalho e durante todos esses anos.

A todos os professores que contribuíram e participaram direta e indiretamente da minha pesquisa.

À banca examinadora pela disponibilidade em avaliar e contribuir com o trabalho.

Aos amigos de estudos pela amizade, troca de experiências, em especial ao Rinaldo Francisco Secundino e Paulo Henrique Codato Segura e todos os outros integrantes dos laboratórios do Departamento de Engenharia Elétrica da UEL.

À CAPES, à Universidade Estadual de Londrina, ao PPG-EE-UEL pelo suporte financeiro e por prover as ferramentas necessárias para o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

A circulação de conteúdo harmônico é um fenômeno presente nas redes de distribuição de energia elétrica. A responsabilidade pelo conteúdo harmônico é compartilhada entre o consumidor e a concessionária, devido às características da rede. A identificação exata dessa responsabilidade visa garantir a qualidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica. Neste trabalho é desenvolvido um estimador de responsabilidades por conteúdo harmônico através de técnicas de processamento digital e teorias de potência, em especial, a Transformada Discreta de Fourier em Janela Recursiva Deslizante (SWR-DFT) e a Teoria de Potências Conservativas (CPT), sendo utilizado para determinar os percentuais harmônicos e seus respectivos causadores. O trabalho contém breve fundamentação teórica sobre o tema, metodologia de estimação e apresentação dos resultados obtidos de forma experimental e simulada.

Palavras-Chave: 1. Sinais Harmônicos. 2. Qualidade de energia. 3. Filtros Digitais. 4. Responsabilidades.

Abstract

The presence of harmonic content is a phenomenon in electrical power distribution networks. The responsibility for the circulation of harmonic content is shared between the consumer and the utility company, due to the characteristics of the network. The precise identification of this responsibility aims to ensure the quality and reliability of electrical power supply. In this work, an estimator for responsibilities related to harmonic content is developed using digital processing techniques and power theories, specifically the Sliding Window Recursive Discrete Fourier Transform (SWR-DFT) and the Conservative Power Theory (CPT). These methods are employed to determine the harmonic percentages and their respective causes. The paper includes a brief theoretical foundation on the subject, estimation methodology, and presentation of the results obtained through both experimental and simulated approaches.

Keywords: 1. Harmonic Signals. 2. Power Quality. 3. Digital Filters. 4. Responsibilities

Lista de Figuras

Figura 1- Diagrama genérico da rede elétrica simulada.	31
Figura 2 – Variedade de Teorias de Potência.	35
Figura 3 – Sinais de uma carga RL alimentada por Tensão Distorcida.	43
Figura 4 - Corrente Vazia.	44
Figura 5 - Correntes ativas de frequências distintas.	46
Figura 6 - Corrente ativa harmônica e Corrente ativa dispersa.	47
Figura 7 - Correntes reativas de frequências distintas.	49
Figura 8 - Corrente reativa harmônica e Corrente reativa dispersa.	50
Figura 9 - Corrente gerada de uma carga linear.	52
Figura 10 - STFT – Implementação em Blocos e Equações das Diferenças.	55
Figura 11 – Estrutura de Filtragem baseada na SWR-DFT.	58
Figura 12 - Filtro SWR-DFT Homointegrador.	59
Figura 13 – Comparativo sinais SWR-DFT Homointegradora.	60
Figura 14 - Tensão distorcida e Espectro harmônico.	65
Figura 15 - Comparativo de sinais para uma carga resistiva	67
Figura 16- Comparativo de sinais para uma carga não linear.	68
Figura 17 – Sinal de Corrente de Distorção Harmônica.	70
Figura 18 – Carga R – Lâmpada Incandescente.	78
Figura 19 – Carga RL – Motor de Indução Monofásico.	78
Figura 20 - Carga RL2 – Motor de indução com rotor bobinado.	79
Figura 21- Carga Não_Linear – Ponte retificador de onda completa	79
Figura 22 – Cargas em Paralelo.	80
Figura 23 - Cargas em Paralelo 2	80

Lista de Tabelas

Tabela 1– Comparativo da presença de conteúdo harmônico em circuitos elétricos.	31
Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % de v_1).	33
Tabela 3 – Limites individuais para os indicadores DTHI .	33
Tabela 4 – Limites de Distorção para corrente segundo a IEEE 519 – 2014.	34
Tabela 5 - Cargas experimentais	77
Tabela 6 – Dados Experimentais	81
Tabela 7 - Fatores de Responsabilidade por conteúdo harmônico.	82
Tabela 8 –Responsabilidade por consumo harmônico	83

Lista de Siglas e Abreviaturas

CC - Corrente Contínua

CA - Corrente Alternada

IEC - Traduzido como Comissão Eletrotécnica Internacional

IEEE – Traduzido como “Instituto dos Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos”

NBR - Norma Brasileira

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CPT - Teoria de Potências Conservativas

SIN - Sistema Interligado Nacional

CDS – Controlador Digital de Sinais

Sumário

Resumo.....	11
Abstract.....	13
Lista de Figuras	15
Lista de Tabelas.....	17
Lista de Siglas e Abreviaturas	19
Sumário.....	21
1 INTRODUÇÃO	23
1.1 Objetivos	24
1.2 Estrutura do Documento	25
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1 Fontes ideais e não-ideais de energia elétrica	28
2.2 Cargas de circuitos elétricos	29
2.3 Harmônicos e interdependência de sinais	30
2.4 Responsabilidade por Conteúdo Harmônico	32
2.5 Teorias de Potência	34
2.6 Conclusões do Capítulo	36
3 TEORIA DE POTÊNCIAS CONSERVATIVAS	38
3.1 Equações fundamentais da CPT	38
3.2 Integral Imparcial de \mathbf{vk}	40
3.3 Equações de corrente da CPT	41
3.4 Equações de corrente harmônica k	45
3.5 Conclusões do Capítulo	52
4 TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER COM JANELA DESLIZANTE RECURSIVA	54
4.1 Definição da Transformada Discreta de Fourier com Janela Deslizante Recursiva	54
4.2 Algoritmo SWR-DFT Homointegrador	59
4.3 Conclusões do Capítulo 4	61
5 RESPONSABILIDADE POR CONTEÚDO HARMÔNICO	64
5.1 Distorções Harmônicas	64
5.2 Correntes harmônicas	66
5.3 Comparativo de espectro harmônico.	66
5.4 Corrente de distorção harmônica	68

5.5	Fatores de Geração e de Consumo de Harmônicos	70
5.6	Conclusões do capítulo	72
6	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75
6.1	Dificuldades encontradas e Soluções	75
6.2	Dados experimentais	77
6.3	Responsabilidades	81
6.4	Conclusões do capítulo 6	84
7	CONCLUSÕES	86
7.1	Conclusões Finais	86
7.2	Contribuições	87
7.3	Sugestões de Trabalhos Futuros	87
8	REFERÊNCIAS	89

1 Introdução

Na eletricidade faz-se o uso de sinais alternados representados através de funções trigonométricas. Essas oscilações regulares e suas formas de onda são de extrema importância para a análise e modelagem dos fenômenos elétricos. Um sinal variante no tempo, tido como periódico, pode ser decomposto através da Transformada de Fourier [1].

Através da análise de Fourier, pode-se entender melhor os fenômenos elétricos, como fenômenos transitórios, respostas em frequência de sistemas elétricos complexos e distorções harmônicas [2]. Assim, a teoria de Fourier é uma ferramenta poderosa para o estudo e a compreensão da eletricidade, permitindo a representação e análise de sinais elétricos de maneira mais eficiente e abrangente.

Existem dois principais tipos de conteúdo harmônico em sistemas elétricos: o conteúdo harmônico de corrente e o conteúdo harmônico de tensão. O conteúdo harmônico de corrente refere-se à presença de componentes de frequência múltipla da frequência fundamental na corrente elétrica que flui por um sistema ou carga, já por outro lado, o conteúdo harmônico de tensão refere-se à presença desses componentes de frequência múltipla na tensão elétrica de um sistema. Ambos os tipos de conteúdo harmônico podem causar problemas, como sobrecorrentes, sobretensões, aquecimento excessivo de equipamentos, vibrações, ruídos e falhas em dispositivos eletrônicos sensíveis [3]. Por essa razão, é importante realizar a análise e o controle do conteúdo harmônico para garantir a qualidade e a eficiência dos sistemas elétricos.

A responsabilidade pelo conteúdo harmônico em sistemas elétricos é uma questão complexa e importante tanto para as concessionárias de energia quanto para os consumidores, e diversos trabalhos sugerem metodologias para mensurar os percentuais de responsabilidades mas, ao consultar as normas que regulamentam a qualidade de energia quanto a existência de conteúdo harmônico, um padrão de avaliação de responsabilidades ainda não foi adotado [4] [3]. O conteúdo harmônico pode ser gerado tanto pelas cargas não lineares presentes nos sistemas elétricos, bem como já ser preexistente nas fontes de energia [5].

As concessionárias têm a responsabilidade de fornecer energia elétrica de qualidade e dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas [4]. Por outro lado, os consumidores também têm a responsabilidade de utilizar equipamentos e cargas elétricas que estejam em conformidade com as regulamentações e normas aplicáveis. Observa-se que a correta determinação dos causadores é um importante passo para a resolução dos problemas, atribuir

responsabilidades é também, atribuir custos. Em casos de problemas relacionados ao conteúdo harmônico, é importante que ambas as partes trabalhem em conjunto para identificar as fontes e implementar medidas corretivas. A adoção de soluções de mitigação de harmônicos e o uso de equipamentos adequados são essenciais para garantir a operação segura e eficiente dos sistemas elétricos.

Para determinar as responsabilidades pela distorção harmônica, este trabalho propõe uma metodologia baseada na Teoria de Potências Conservativas (CPT) [5] [6], que é uma abordagem teórica no campo da engenharia elétrica que se baseia na análise dos fluxos de potência através do trabalho desempenhado. A classificação de uma potência como conservativa se dá, quando analisada a natureza da força que desempenha o trabalho, quanto à capacidade de conservação ou dissipação da energia, neste caso em sistemas elétricos. Essa teoria, aplicada no desenvolvimento desta dissertação, tem como objetivo analisar e ajudar a entender o fluxo de potência em cenários de distorção harmônica, presentes na tensão ou corrente, de sistemas de distribuição de energia.

Resumidamente, entre outras contribuições, a técnica da CPT fornece subsídios matemáticos para a separação de correntes em várias componentes de corrente, tais como: correntes ativas, correntes reativas e correntes *void* (vazias – em tradução livre do idioma Inglês). Sua aplicação possibilita o aumento da compreensão e conseqüentemente, aumenta o poder de resolução de problemas referentes a sistemas de energia.

Este trabalho usa a abordagem tratada em CPT aliada ao algoritmo SWR-DFT, para determinar responsabilidades de conteúdo harmônico conforme sugere [7], trazendo mais clareza ao tema, bem como investiga alguns temas sugeridos por [8].

1.1 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo aplicar a Teoria de Potências Conservativas (CPT) e o algoritmo Transformada Discreta de Fourier em Janela Deslizante Recursiva (SWR-DFT) na determinação dos percentuais de responsabilidade por conteúdo harmônico em sistemas de energia através de:

- Simulação computacional;
- Implementação em Controlador Digital de Sinais (CDS).

A contribuição do trabalho se dá pela aplicação prática de um Estimador de Responsabilidades baseados nos modelos teorizados até então [8] [7] de maneira experimental em blocos assemelhando-se às contribuições de [9], válidos e replicáveis no contexto de controladores digitais de sinais da série **TMS320F283xx**.

Como objetivos específicos:

1. Comparar os resultados teóricos e experimentais;
2. Difundir CPT no contexto de sistemas de energia.

Espera-se evidenciar a aplicabilidade da teoria na determinação de responsabilidades, visto sua simplificação para análise de correntes frente a outras teorias de potência. Para tal é proposto um modelo de estimador de parâmetros de cargas com medição não invasiva *online* que pode ser aplicado nos mais variados nichos e setores, entre eles: testes e diagnósticos de equipamentos, análise de qualidade de energia, avaliação de resposta de conversores de potência, podendo ser utilizada como ferramenta de diagnose e/ou controle, sendo foco deste trabalho a determinação de responsabilidades.

1.2 Estrutura do Documento

A apresentação desta dissertação está dividida em capítulos, sendo:

- **Capítulo 1:** Introdução e breve comentário sobre o tema.
- **Capítulo 2:** Contextualização sobre os avanços recentes das teorias de potência.
- **Capítulo 3:** Apresentação da Teoria de Potências conservativas.
- **Capítulo 4** Apresentação da Transformada Discreta De Fourier Com Janela Deslizante Recursiva.
- **Capítulo 5:** Apresentação dos equacionamentos relevantes para a atribuição de responsabilidades, entre eles, o fator de consumo harmônico e o fator de geração harmônica.
- **Capítulo 6:** Descreve a implementação e coleta de resultados experimentais, contendo desafios e curiosidades da implementação.
- **Capítulo 7:** Faz a análise das contribuições e a relevância do trabalho frente as técnicas abordadas, as oportunidades de melhoria, incluindo possíveis recomendações para contribuições futuras e as considerações finais do trabalho.
- **Capítulo 8:** Referências bibliográficas.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo será abordada a análise de responsabilidade por conteúdo harmônico em sistemas de energia, apresentando uma síntese breve sobre os principais elementos de um sistema elétrico e sua relação com a geração de conteúdo harmônico, regulamentação do setor e principais teorias de potência da atualidade.

2.1 Fontes ideais e não-ideais de energia elétrica

Uma fonte é um dispositivo que fornece energia elétrica para outros componentes ou sistemas elétricos. É a origem da energia que alimenta o circuito. As fontes de energia elétrica podem ser classificadas como ideais ou não ideais.

As fontes ideais são modelos teóricos matematizados são aquelas que não são afetadas pelo comportamento da carga e podem possuir características especiais como energia infinita, impedâncias específicas, etc., enfim, parâmetros que definem a natureza ideal da fonte. Este modelo é útil na análise de circuitos elétricos, pois fornece uma base para comparação com fontes reais.

As fontes não ideais são aquelas que possuem certos comportamentos como saturação, queda de tensão, limitação de corrente, efeitos joule, etc. Alguns parâmetros que representam fontes não ideais [11] incluem:

- Impedância interna: É a impedância da fonte elétrica que é diferente da impedância ideal. Isso pode ser causado por fatores internos, como o núcleo de ferrite, o revestimento de isolamento, ou o material de conexão, ou por fatores externos, como a temperatura ambiente.
- Resistência interna: É a resistência interna da fonte, que resulta em perdas de energia na forma de calor.
- Reatância: Refere-se a capacitância ou indutância que acompanha a resistência, onde seus valores se alteram com a variação da frequência.
- Instabilidade: Refere-se à variação não controlada da tensão ou corrente da fonte, causando interferências no sinal elétrico.

2.2 Cargas de circuitos elétricos

Podem-se classificar as cargas de circuitos elétricos como lineares e não-lineares. As cargas elétricas lineares são aquelas que possuem um comportamento elétrico proporcional à tensão ou corrente aplicada, para amplitude e frequência quando considerado um ciclo completo, pois não geram distorções harmônicas [10].

As principais características das cargas lineares incluem:

- Impedância constante ao longo de um ciclo, independente da frequência;

Alguns exemplos comuns de cargas lineares incluem:

- Resistências elétricas, que possuem uma relação tensão-corrente linear, onde a corrente é diretamente proporcional à tensão aplicada;
- Indutores, que possuem uma relação tensão-corrente linear, onde a corrente é proporcional ao produto temporal da variação da tensão aplicada;
- Capacitores, que possuem uma relação tensão-corrente linear, onde a corrente é proporcional ao quociente temporal da variação da diferença de potencial entre seus terminais.

As considerações acima são para cargas em regime permanente, perfeito estado de construção e operando dentro da faixa prevista de operação [4].

As cargas elétricas não-lineares são aquelas que possuem um comportamento elétrico desproporcional à tensão ou corrente aplicada, para amplitude e frequência quando considerado um ciclo completo e com isso geram distorções harmônicas. Isso significa que essas cargas respondem de maneira diferente a diferentes níveis de tensão e corrente elétrica. Os harmônicos são componentes de frequência da corrente ou tensão elétrica, sendo múltiplos da frequência fundamental. Entre as cargas não lineares destacam-se:

- Aplicações com semicondutores, onde a corrente não é diretamente proporcional à tensão ao longo de todo o ciclo (visto pela fonte);
- Resistores, capacitores e indutores [11] em transitórios de energização ou desenergização fora do regime permanente. Ou ainda, com a presença de outros efeitos como: sobrecargas, descargas parciais e correntes parasitas.

2.3 Harmônicos e interdependência de sinais

Os distúrbios elétricos, quando avaliados por sua forma de onda, podem ser classificados como harmônicos, quando da repetibilidade ciclo a ciclo, tendo a onda senoidal fundamental como base referencial de comparação.

Um dos exemplos são as cargas eletrônicas, por conta da presença de conversores eletrônicos chaveados, geram muita descontinuidade de corrente ao longo do ciclo, sendo consideradas como grandes geradoras de conteúdo harmônico de corrente. Outro exemplo são as cargas indutivas com presença de núcleo ferromagnético, tais como motores e transformadores que, por conta da possível saturação de seus núcleos e dispersões do fluxo, apresentam deformações e suas tensões ou correntes não são lineares ao longo de um ciclo.

A norma técnica IEC 61000-4-7 sobre conteúdo harmônico, possui indicadores para cálculo dos valores admissíveis em um sistema elétrico, entre eles:

- Distorção harmônica total (DHT): abrange tensão e corrente;
- Distorção de demanda total (DDT): abrange somente as distorções de corrente.

A Tabela 1 tem o objetivo de relacionar a aparição de distorções harmônicas em cenários variados em que existe ou não distorção harmônica de tensão e/ou corrente considerando uma impedância de linha baixa ou alta, rede forte e rede fraca respectivamente.

Considerações sobre a Tabela 1:

- Para tensões originalmente distorcidas as cargas, lineares ou não, terão o aparecimento de correntes distorcidas nas mesmas frequências que as das tensões;
- Para cargas não lineares alimentadas com tensões distorcidas com baixa impedância de linha, a corrente contém as componentes de tensão somadas às componentes da própria carga.
- Para cargas não lineares alimentadas com tensões não distorcidas e alta impedância de linha, as correntes distorcidas da carga inserem harmônicos na tensão devido à queda de tensão das linhas portanto, no ponto de acoplamento comum, as tensões serão distorcidas.
- Para cargas não lineares alimentadas com tensões distorcidas com alta impedância de linha, as correntes de carga possuem: as componentes de tensão, as próprias componentes da carga e inserem mais harmônicos na tensão devido à queda de tensão das linhas.

Tabela 1– Comparativo da presença de conteúdo harmônico em circuitos elétricos.

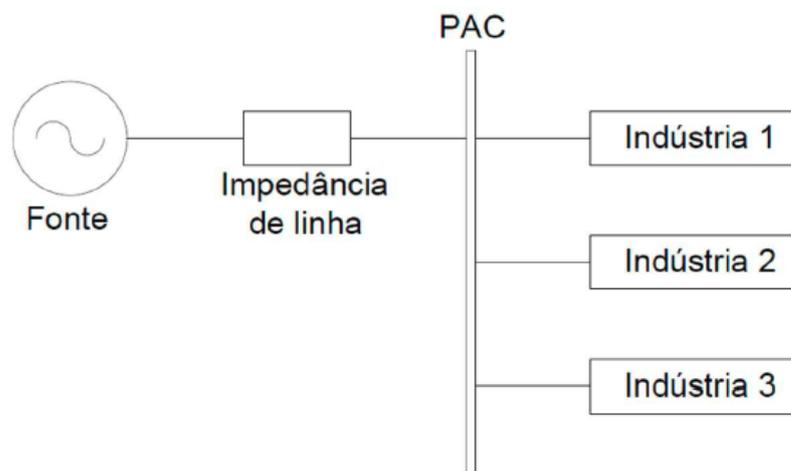
Tipo de Carga	Condições do sistema		
	Impedância de linha	Tensão	Corrente
Linear	Baixa	Sem Harmônicos	Sem Harmônicos
Linear	Baixa	Com Harmônicos	Harmônicos respectivos aos presentes na tensão
Linear	Alta	Sem Harmônicos	Sem Harmônicos
Linear	Alta	Com Harmônicos	Harmônicos respectivos aos presentes na tensão
Não Linear	Baixa	Sem Harmônicos	Com Harmônicos
Não Linear	Baixa	Com Harmônicos sem relação com a corrente	Com Harmônicos iguais aos de tensão mais os harmônicos da carga
Não Linear	Alta	Harmônicos respectivos aos presentes na corrente	Com Harmônicos
Não Linear	Alta	Harmônicos de tensão somados aos contribuídos pela corrente de carga	Com Harmônicos

Fonte: O Autor.

As definições anteriores, DHT e DDT não são capazes de mesurar o percentual de distorção separadamente entre “gerador de conteúdos harmônicos” (causador original do fenômeno) e a parte “afetada por conteúdos harmônicos”.

A Figura 1 é capaz de representar adequadamente a problemática envolvida no contexto de geração de conteúdo harmônico de um arranjo típico de fornecimento:

Figura 1- Diagrama genérico da rede elétrica simulada.



Fonte: (Menezes; 2022) -Adaptado.

Supondo que a impedância de linha seja alta, quando comparada a impedância da carga no ponto de acoplamento comum (PAC), conforme o proposto pela Tabela 1 tem-se que, para quaisquer consumidores conectados (indústria 1, 2 ou 3) Figura 1, sem importar a ordem, caso apenas um possua harmônicos de corrente capazes de provocar uma queda de tensão na impedância de linha, os demais consumidores, conectados ao PAC, serão afetados por harmônicos na tensão.

A análise harmônica identifica e mede ondas senoidais e distorções em sistemas elétricos, avaliando qualidade, desempenho e interferências. No Brasil, o Módulo 8 do PRODIST e a regulamentação da ANEEL – Procedimento 2.9 [4], regulam a qualidade da energia elétrica e o controle de harmônicos.

Tanto as cargas não lineares quanto as redes com componentes não senoidais para tensão e corrente possuem interdependência de sinais.

Utilizando-se da análise do espectro harmônico da tensão e da corrente é possível medir o percentual de variação em relação à forma de onda fundamental. Essa análise harmônica identifica e mede ondas sinusoidais e distorções em sistemas elétricos, avaliando qualidade, desempenho e interferências, sendo crucial para compreender os impactos e encontrar soluções.

2.4 Responsabilidade por Conteúdo Harmônico

A responsabilidade pelo conteúdo harmônico presente em uma rede elétrica é compartilhada entre as fontes e os usuários de energia elétrica. A responsabilidade do gerador é fornecer uma tensão elétrica de boa qualidade, dentro dos parâmetros estabelecidos pelas agências reguladoras do setor, enquanto a responsabilidade do usuário é conectar equipamentos de forma adequada e utilizá-los de forma responsável, sendo premissa que a presença de harmônicos na corrente elétrica é causada tanto pela geração de fontes harmônicas quanto pela presença de cargas não lineares de impedância. Porém, quando levados em conta os valores máximos permitidos pelas normas vigentes no Brasil [4] e afora [3], entende-se que a rede e as fontes geradoras devem estar preparadas para a circulação destas componentes. A Tabela 2 informa estes valores para o setor elétrico brasileiro de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % de v1).

Indicador	Tensão nominal		
	Vn ≤ 1,0kV	1,0 kV < Vn < 69 kV	69 kV ≤ Vn < 230kV
DTT95%	10,00%	8,00%	5,00%

DTT% - Distorção harmônica de tensão

Fonte: ANEEL (2017) [4] – Adaptado.

O Operador Nacional do Sistema (ONS) é o órgão governamental ligado ao Ministério de Minas e Energia (MME), e é responsável pela operação do Sistema Interligado Nacional (SIN). Na Tabela 3 pode-se observar quais são as diretrizes do ONS, onde fica evidente as regras mais rígidas quanto à conexão de fontes geradoras, subestações e outros.

Tabela 3 – Limites individuais para os indicadores DTHI .

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
DTHI, h ímpar		DTHI, h par		DTHI, h ímpar		DTHI, h par	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3,5,7	5%			3,5,7	2%		
		2,4,6	2%			2,4,6	1%
9,11,13	3%			9,11,13	1,50%		
			1%				0,50%
15 a 25	2%	>=8		15 a 25	1%	>=8	
>=27	1%			>=27	0,50%		

*DTHI - Distorção Harmônica de Tensão Individual

Fonte: ONS (2022) [10] – Adaptado.

Dados os referenciais normativos [4] [3] [12] de conexão individual é possível perceber que, em algum momento, até mesmo as concessionárias ou permissionárias de distribuição terão que implementar alguma metodologia para compensar estes harmônicos.

Para analisar as responsabilidades é importante considerar como as cargas se comportam ao longo do tempo, influenciadas pelas necessidades de cada consumidor. As cargas podem ser usadas ocasionalmente ou continuamente, mas raramente operam de maneira ininterrupta. Isso faz com que a distorção harmônica de tensão (DHT) varie com o tempo, o que também afeta a distorção harmônica de corrente (DDT).

Essa dinâmica se estende por todos os consumidores ligados a um PAC, e as interações são as mais variadas ao longo de um período. Nota-se que as normas brasileiras levam em

consideração os limites de distorção harmônica, contudo a IEEE 519 (2014) considera o indicador DDT para sua análise e deixa muito claro os limites totais permissíveis. A Tabela 4 apresenta estes limites.

Tabela 4 – Limites de Distorção para corrente segundo a IEEE 519 – 2014.

IEEE Std 519-2014 — Limites de distorção de						
Distorção máxima de corrente harmônica em porcentagem de IL						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares) a b						
ISC/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	DDT
< 20 c	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
> 1000	15	7	6	2,5	1,4	20

a - Harmônicos pares estão limitados a 25% dos limites de harmônicos ímpares acima.

b - Distorções de corrente que resultam em um desvio de corrente contínua, por exemplo conversores de meia onda não são permitidas.

c - Todo equipamento de geração de energia está limitado a esses valores de distorção de corrente independentemente do Isc/IL atual.

onde

Isc = corrente máxima de curto-circuito no PAC

IL = corrente de carga máxima demandada (componente de frequência fundamental) no PAC sob condições normais de operação de carga.

Fonte: [3] – IEEE 519 – 2014 Adaptado.

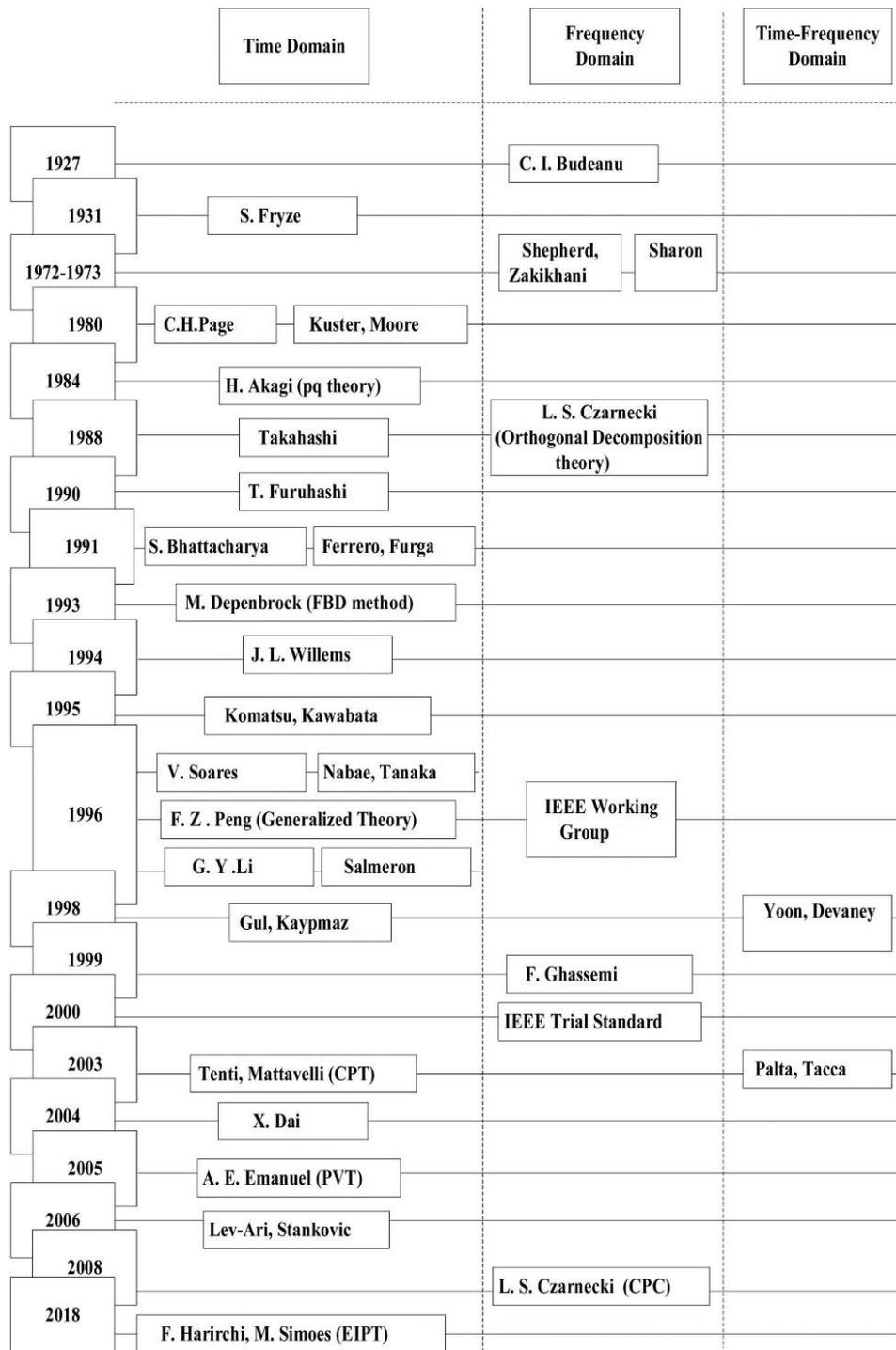
Chama a atenção a rigidez quanto à avaliação pelo critério Isc/IL – legenda do subitem c, onde aplicam-se à norma, todos os dispositivos de geração sem exceção, contemplando ainda os dispositivos já existentes independentes de data de instalação, custo de troca, entre outros. Determinar os percentuais de responsabilidades por conteúdo harmônico de cada envolvido contribuirá, inclusive para avaliar e aplicar as normas de forma mais adequada e inequívoca.

2.5 Teorias de Potência

Existem várias técnicas sistemáticas para cálculo dos fenômenos elétricos contidos em aplicações de sistemas de energia. A estas representações e metodologias matemáticas de estimação do comportamento de elementos em um circuito elétrico, denominamos: “Teorias de

Potência”. O ano de publicação, principal autor e abordagem das principais teorias de potência, podem ser apreciadas na Figura 2 [13], onde também é possível verificar uma espécie de linha do tempo de pesquisas e evoluções do tema.

Figura 2 – Variedade de Teorias de Potência.
Tradução livre de: “*Plethora of power theories*”



Fonte: Simões et al (2019) [13] – Adaptado.

Destacam-se entre as teorias de potência:

- Budeanu [14] - desenvolvida para sistemas monofásicos com representações em séries de Fourier.
- Fryze [15] – também desenvolvida para circuitos monofásicos, aborda o assunto com equacionamentos no domínio do tempo.
- Buchholz [16] – entendida como uma continuação de Fryze em que foi apresentada uma notação para sistemas polifásicos, incluindo as somas vetoriais para os casos da tensão e corrente.
- Depenbrock [17] – estabeleceu a separação das correntes por parcelas ortogonais, sendo elas classificadas como correntes do tipo:
 - Ativas;
 - Não ativa;
 - De variação, entre outras.
- Akagi et al [18] – teoria da potência instantânea (PQ), amplamente utilizada em controle, possui abordagem trifásica e faz uso das transformações de Clarke [19] e Park [20] para separação de componentes.
- Czarnecki [21] – teoria das componentes físicas de corrente (CPC), separa a corrente em várias parcelas ortogonais com alta relevância para casos não senoidais.
- Tenti Matavelli [5] – conhecida como teoria de potências conservativas (CPT), no tempo, possui abordagem similar à de Czarnecki em 1984 e Depenbrock, na frequência, em relação à divisão por parcelas ortogonais.

2.6 Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram citadas algumas teorias de potência e suas características, entre elas a CPT, que aumenta o entendimento já propiciado por outros autores, quanto a separação de correntes em componentes ortogonais.

As teorias de potência são fundamentais para o entendimento de circuitos elétricos e têm evoluído para enfrentar os desafios impostos por sistemas de energia, entre eles, as redes não senoidais, presença de cargas não lineares e a crescente injeção de harmônicos, alavancada pela crescente aplicação da eletrônica de potência em eletrodomésticos, inversores para geração de energia solar, carros elétricos, etc.

A separação de correntes previstas em CPT aparenta possuir vantagens quanto ao seu método de estimar as correntes ativas e reativas quando avaliada sobre este quesito, descrevendo-as como sinais proporcionais de suas respectivas tensões. [10] [15]

A detecção e classificação de conteúdo harmônico, com intuito de estimar os percentuais de responsabilidade do consumidor e distribuidora de energia, podem ser obtidas por uma teoria que seja capaz de fazer decomposição de correntes. Para este trabalho foi selecionada a CPT, como sugere [7], onde o autor comenta possibilidade de uso da Teoria de Potências Conservativas.

O capítulo a seguir propicia um panorama da CPT, onde se relacionam conceitos e equacionamentos, seguidos de imagens representativas dos sinais conforme a ordem de apresentação.

3 Teoria de Potências Conservativas

O presente capítulo apresenta um breve contexto histórico sobre a CPT, seguido de equacionamentos de separação de correntes e seus significados físicos.

Em 2003, Tenti et al [5]. propuseram uma abordagem para analisar circuitos não-lineares no domínio do tempo, baseada em variáveis elementares de corrente e tensão relacionadas às suas derivadas e integrais. Essa proposta foi reformulada em 2010 [6], ajustadas as componentes derivativas de estimação. A Teoria de Potências Conservativas (CPT) [22] é focada em compreender sistemas elétricos e correlacionar comportamentos com correntes e potências decompostas, introduzindo integrais sem influência da média, denominadas integrais imparciais, aplicadas na determinação de parcelas ortogonais de corrente.

A CPT demonstra-se promissora devido as suas contribuições [8] [9] [23] relacionadas a características de circuitos e comportamentos, podendo inovar no cenário elétrico do futuro. Abaixo apresentam-se equações da CPT [9], seguidas de breve comentário para os itens considerados de maior relevância:

3.1 Equações fundamentais da CPT

As equações a seguir são representações genéricas dos fundamentos que são utilizados na abordagem da teoria de potências conservativas.

O valor médio da variável x é dado por (1):

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

A integral no tempo para a variável x é dada por (2):

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

A integral imparcial de x é dada por (3):

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

A integral imparcial (3) é um artifício matemático um desfasamento angular de noventa graus (atraso).

O Produto interno de x e y dado por (4):

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

O produto **interno pode** (4) ser descrito como a média da multiplicação de dois sinais no tempo.

A derivada no tempo [22] para a variável x é dada por (5):

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

As propriedades [9] [22] das integrais imparciais e derivadas no tempo são dadas por (6):

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

A Norma Euclidiana [9] ou valor de média da soma quadrática de x é dada por (7):

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

3.2 Integral Imparcial de v_k

O cálculo do valor das integrais imparciais de tensão se dá pela aplicação de filtros do tipo (26), tema de um dos capítulos.

A integral imparcial de um sinal pode ser obtida utilizando a equação (3), na CPT são usados os sinais de tensão para estimar os valores de corrente, portanto todos os sinais de corrente dependem dos filtros digitais da tensão.

O sinal $v_k(t)$ é o sinal de tensão filtrado em uma determinada ordem k e o sinal $\hat{v}_k(t)$ é denominado como integral imparcial de da tensão k .

A integral imparcial do sinal $v_k(t)$, $\hat{v}_k(t)$ (19), adaptada de (3), é dada por (8):

$$\hat{v}_k(t) = v_{k_f}(t) - \bar{v}_{k_f}(t) \quad (8)$$

A integral imparcial da tensão também é conhecida pelo termo homotensão ou homointegral da tensão e seu significado físico, quando aplicado a um sinal senoidal, é atrasar o sinal original em 90 graus e manter a mesma amplitude do sinal.

Durante a aplicação das homotensões de ordem k , pode-se verificar que a homointegral do sinal $v(t)$, calculada de forma direta, com um único bloco integrador, resulta em erro de estimação, devido à atenuação que o processo de integração propicia, devido ao ganho. Nota-se então, que a homotensão aplicada em (15), requer cuidados especiais.

Com o intuito de contornar a atenuação causada pela integração direta do sinal de tensão $v(t)$, utiliza-se um somatório das homotensões de ordem k .

A homotensão $\hat{v}(t)$, proposta pelo autor, é dada por (9):

$$\hat{v}(t) = \sum_k^K \hat{v}_k(t) \quad (9)$$

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

Seu significado físico é a soma de sinais de tensão filtrados individualmente, para que se assemelhe o mais próximo possível do sinal original de tensão, porém com o atraso de 90 graus, conforme mencionado anteriormente.

3.3 Equações de corrente da CPT

Para Tenti et al (2011) [6], dado um sistema monofásico onde trafegam correntes alternadas, o sinal da corrente $i(t)$ pode ser decomposto em cinco correntes, dadas por (10):

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_{sa}(t) + i_{sr}(t) + i_g(t) \quad (10)$$

Onde somam-se: corrente ativa (i_a), corrente reativa (i_r), corrente ativa dispersa (i_{sa}), corrente reativa dispersa (i_{sr}) e corrente gerada (i_g).

Além das tradicionais correntes: ativa e reativa, são apresentadas três componentes adicionais conforme apresentado em (10).

De forma mais detalhada, tem-se que a corrente ativa dispersa (i_{sa}) é a corrente ativa que se encontra em uma frequência diferente da fundamental, a corrente reativa dispersa (i_{sr}), de forma similar a anterior, é a corrente reativa que se encontra em outras frequências que não a fundamental e por último a corrente gerada (i_g) que compreende todas as componentes de corrente que diferem das componentes presentes na tensão.

A soma destas três correntes é denominada “vazia”, tradução livre do inglês “*void*” que procura informar que não existe trabalho nestas parcelas de corrente, sendo classificadas como distorções.

A corrente vazia (i_v) é dada por (11):

$$i_v(t) = i_{sa}(t) + i_{sr}(t) + i_g(t) \quad (11)$$

Ou ainda, a corrente vazia (i_v) pode ser dada por (12);

$$i_v(t) = i(t) - i_a(t) - i_r(t) \quad (12)$$

A equação (12) dá uma interpretação mais clara do que é a corrente vazia, num contexto de qualidade de energia, aumentando a compreensão do que é a corrente $i(t)$ - sinal de corrente no tempo.

Logo a corrente $i(t)$ também pode ser dada por (13):

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_v(t) \quad (13)$$

Uma observação interessante da CPT é a sua abordagem para a estimação das correntes ativa e reativa.

A corrente ativa (i_a) é dada por (14):

$$i_a(t) = \frac{\langle v(t), i(t) \rangle}{\|v(t)\|^2} \cdot v(t) \quad (14)$$

Nota-se que, a corrente ativa calculada em (14) como sendo o produto interno (4) dos sinais de tensão e corrente divididos pelo quadrado da norma (7) do sinal de tensão e, ao final multiplicados pelo sinal da tensão novamente, é na realidade o cálculo de uma razão proporcional multiplicada pelo sinal de tensão. Logo, para Tenti et al (2011) a corrente ativa, em casos senoidais e não senoidais, possui a mesma forma da tensão porém, multiplicada por fator de escala, sendo a representação gráfica, de ambas, consideradas “iguais” visualmente.

Matematicamente, pode-se dizer que a média do produto entre a tensão e a corrente, quando divididos pelo quadrado do valor eficaz da tensão, resultam em um valor numérico que ao ser multiplicado novamente pelo sinal de tensão, determinam o menor valor representativo para a corrente ativa no domínio do tempo.

Em [9] denota-se que, para casos não senoidais, onde a parcela de distorção se encontra na tensão, a corrente sofrerá influência portanto, o produto interno terá resultados não nulos para as componentes de corrente que possuírem componentes de tensão na mesma ordem, para todas as ordens harmônicas (h).

De forma similar a corrente ativa, a estimação da corrente reativa (15) também segue a mesma metodologia, porém com a integral imparcial do sinal de tensão, denominada homotensão, dado em (3).

A corrente reativa (i_r) é dada por (15):

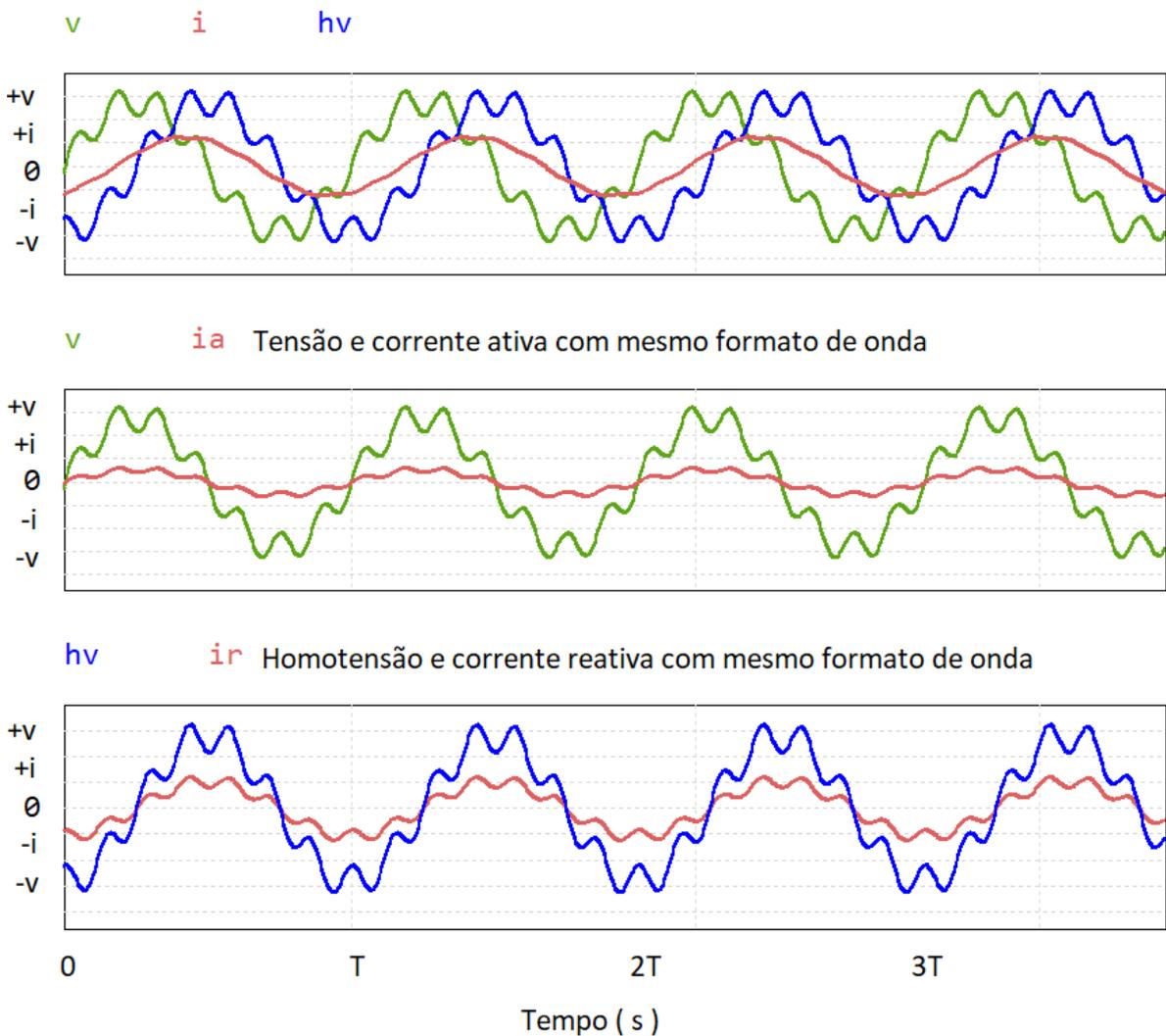
$$i_r(t) = \frac{\langle \hat{v}(t), i(t) \rangle}{\|\hat{v}(t)\|^2} \cdot \hat{v}(t) \quad (15)$$

A homotensão corresponde a um sinal de tensão, atrasado em 90 graus do sinal de tensão original, logo o produto interno resulta em um sinal que representa a potência reativa instantânea.

A divisão do sinal de potência quando dividido pelo quadrado do valor eficaz da homotensão resulta em um número escalar que pode ser multiplicado pelo sinal da homotensão de forma a representar o sinal de corrente reativa.

A Figura 3, apresenta a representação gráfica das equações (14) e (15), corrente ativa e corrente reativa, respectivamente, alimentadas por uma tensão distorcida.

Figura 3 – Sinais de uma carga RL alimentada por Tensão Distorcida.



Fonte: O Autor.

Na Figura 3, apresentam-se os sinais no domínio do tempo, onde:

- v é o sinal de tensão $v(t)$ em volts;
- i é o sinal de corrente $i(t)$ em amperes;
- hv é o sinal da homotensão $hv(t)$ em volts;
- ia é o sinal de corrente ativa $ia(t)$ em amperes;

- i_r é o sinal de corrente reativa $i_r(t)$ em amperes;

Como é possível verificar, o sinal tensão $v(t)$ possui característica não senoidal e, portanto, considerado distorcido.

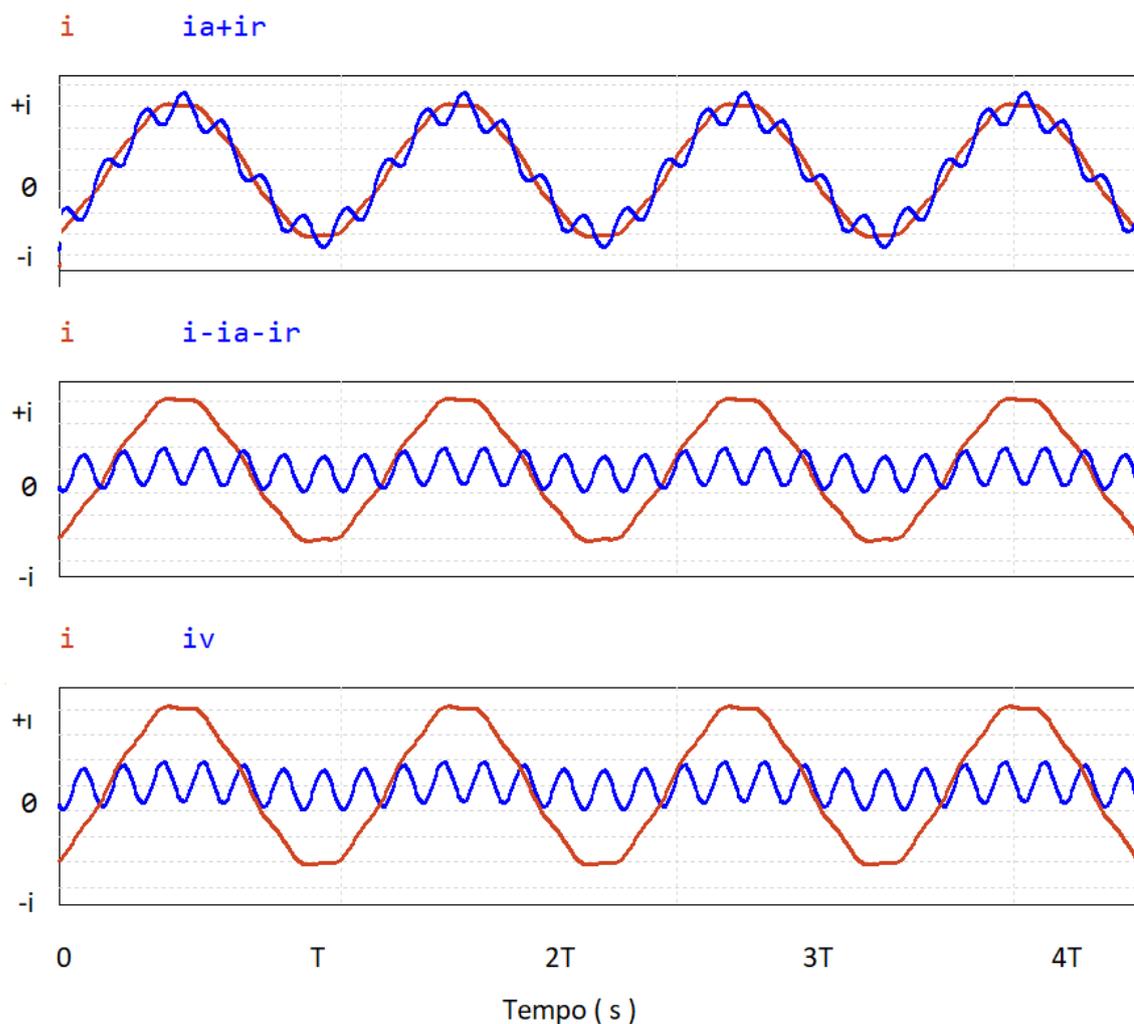
Devido à maneira de estimação da equação (3), o sinal da homotensão $hv(t)$ apresenta o mesmo formato do sinal de tensão $v(t)$, porém com um atraso de fase de 90 graus.

É possível notar que a corrente ativa $i_a(t)$ possui o mesmo formato da tensão $v(t)$, porém com um fator de escala, de acordo com a equação (14).

Análogo ao caso da corrente ativa, a corrente reativa $i_r(t)$ também tem o mesmo formato de onda da homotensão $hv(t)$ porém em escala menor, conforme equação (15).

Com os sinais: corrente $i(t)$, corrente ativa $i_a(t)$ e corrente reativa $i_r(t)$ é possível verificar graficamente o sinal: corrente vazia $i_v(t)$ tal como descrito em (12).

Figura 4 - Corrente Vazia.



Fonte: O Autor.

A Figura 4 - Corrente Vazia, apresenta o significado gráfico do sinal de corrente $i_v(t)$, sendo possível ver que a corrente vazia é o resultado da subtração do sinal de corrente $i(t)$ menos os sinais: corrente ativa $i_a(t)$ e corrente reativa $i_r(t)$.

O sinal $i_v(t)$ é composto de todas as correntes que diferem da corrente ativa e reativa, quando calculadas diretamente pelos sinais de tensão, homotensão e corrente.

3.4 Equações de corrente harmônica k

As correntes harmônicas k, são as representações das correntes ativas e reativas na ordem harmônica k.

Para Busarello et al (2018) [9] as correntes harmônicas podem ser calculadas conforme os equacionamentos abaixo.

A corrente ativa de ordem harmônica k (i_{ak}) é dada por (16):

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

Logo, a equação (16) é a representação da corrente ativa na ordem k, sendo k um número inteiro diferente de 0.

A estimação individual das correntes ativas em cada uma das frequências tem o intuito de obter o valor de todas as correntes ativas presentes, executando uma soma ao final, denominada corrente ativa harmônica $i_{ha}(t)$.

Matematicamente a representação de todas as correntes ativas para todas as ordens k existentes até a kaésima ordem (K) é então, a corrente ativa harmônica $i_{ha}(t)$.

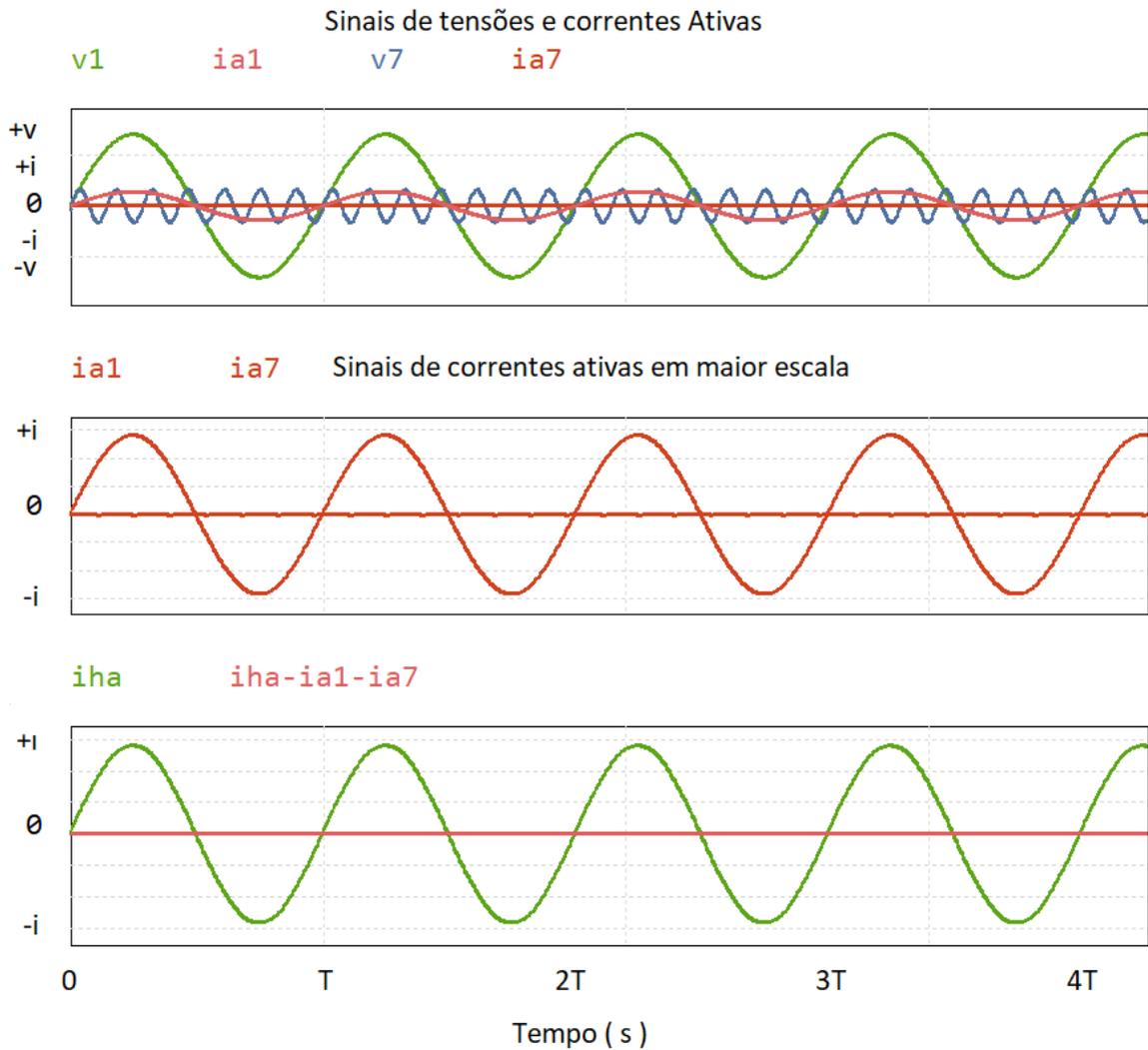
A corrente ativa harmônica $i_{ha}(t)$ é dada por (17):

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

A Figura 5 apresenta graficamente os equacionamentos (16) e (17), considerando uma carga RL alimentada por uma tensão distorcida, composta da soma de uma sinal de tensão na

frequência fundamental e um sinal de tensão na frequência equivalente à sétima harmônica, apenas para exemplificar.

Figura 5 - Correntes ativas de frequências distintas.



Fonte: Próprio Autor.

Os sinais presentes na Figura 5 são:

- “v1” é o sinal de tensão filtrado na frequência fundamental $v_{1(t)}$;
- “ia1” é o sinal de corrente ativa na frequência fundamental $i_{a1}(t)$, correspondente da equação (16), para $k=1$;
- “v7” é o sinal de tensão filtrado na frequência de sétima ordem $v_{7(t)}$;
- “ia7” é o sinal de corrente ativa na frequência de sétima ordem $i_{a7}(t)$, correspondente da equação (16), para $k=7$;

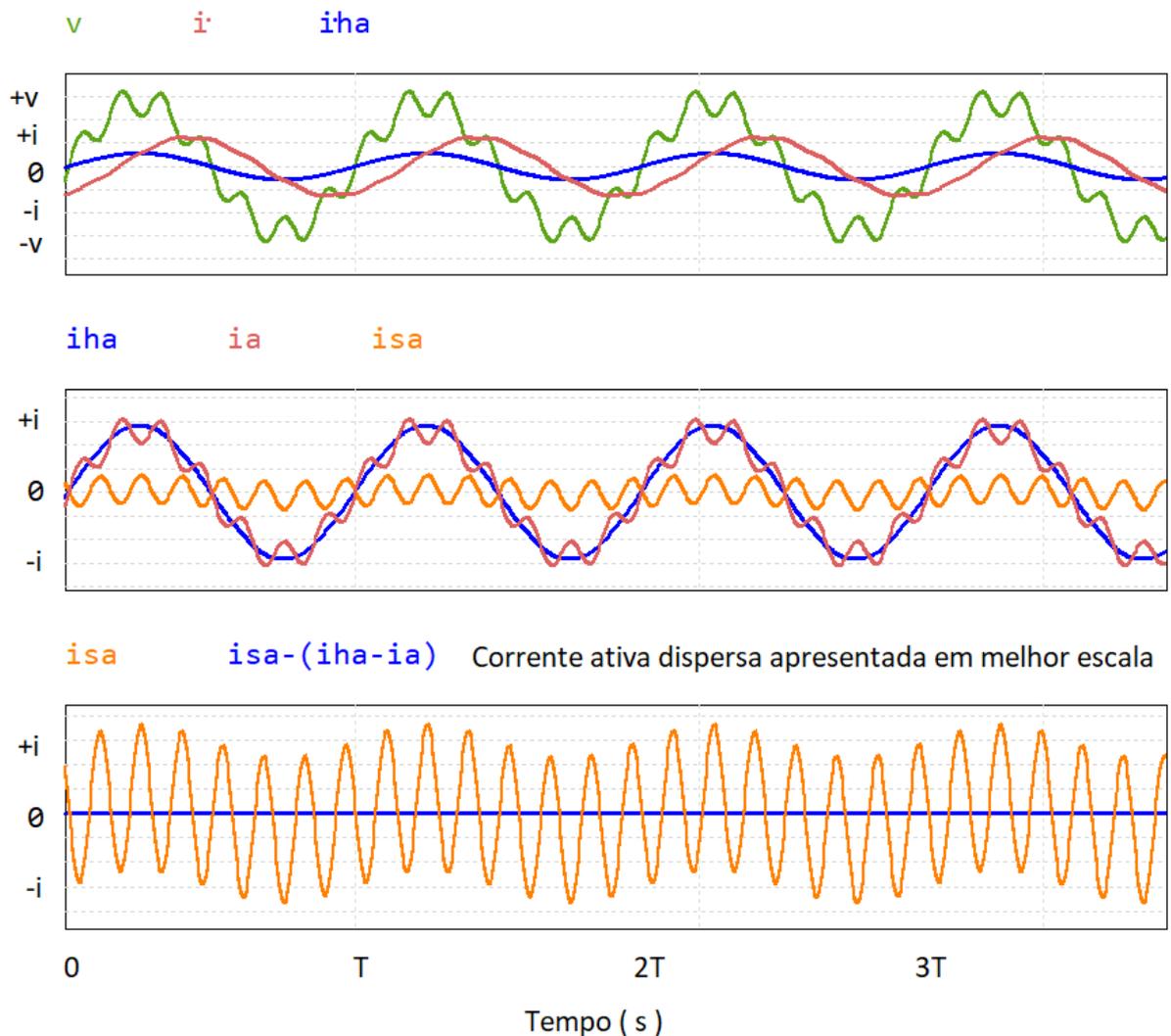
- “iha” é o sinal da corrente ativa harmônica $i_{ha}(t)$; expresso na equação (17), correspondente a soma dos sinais de todas as correntes ativas, estimadas individualmente, através do processo de filtragem da tensão.
- “iha-(ia1+ia7)” demonstra a equivalência de sinais entre i_{ha} e soma $i_{a7} + i_{a7}$.

Na CPT [22], a corrente ativa dispersa (i_{sa}) é a diferença entre a soma de todas as correntes ativas calculadas individualmente $i_{ha}(t)$ e a corrente ativa (i_a) calculada pelos sinais originais em(14).

A corrente ativa dispersa (i_{sa}) é dada por (18).

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

Figura 6 - Corrente ativa harmônica e Corrente ativa dispersa.



Fonte: O Autor.

Nota-se que o cálculo da corrente ativa (i_a) através dos sinais originais é ligeiramente diferente da corrente ativa calculada através das componentes harmônicas calculadas individualmente representadas pelo sinal $i_{ha}(t)$, e essa diferença é a representação física correspondente a (i_{sa}) apresentada em (18).

A Figura 6 - Corrente ativa harmônica e Corrente ativa dispersa, demonstra graficamente os significados físicos das correntes i_{sa} , i_{ha} e i_a .

As correntes reativas possuem as mesmas propriedades comentadas na análise das correntes ativas, com a diferença da homotensão, a tensão defasada em atraso de 90 graus ao sinal original, como dito anteriormente.

A equação a seguir é muito parecida com a equação (15), sendo a representação k, a ordem harmônica que o sinal de tensão foi filtrado.

A corrente reativa harmônica k (i_{rk}) é dada por (19).

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

A corrente reativa para todas as harmônicas $i_{hr}(t)$ é dada por (20):

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

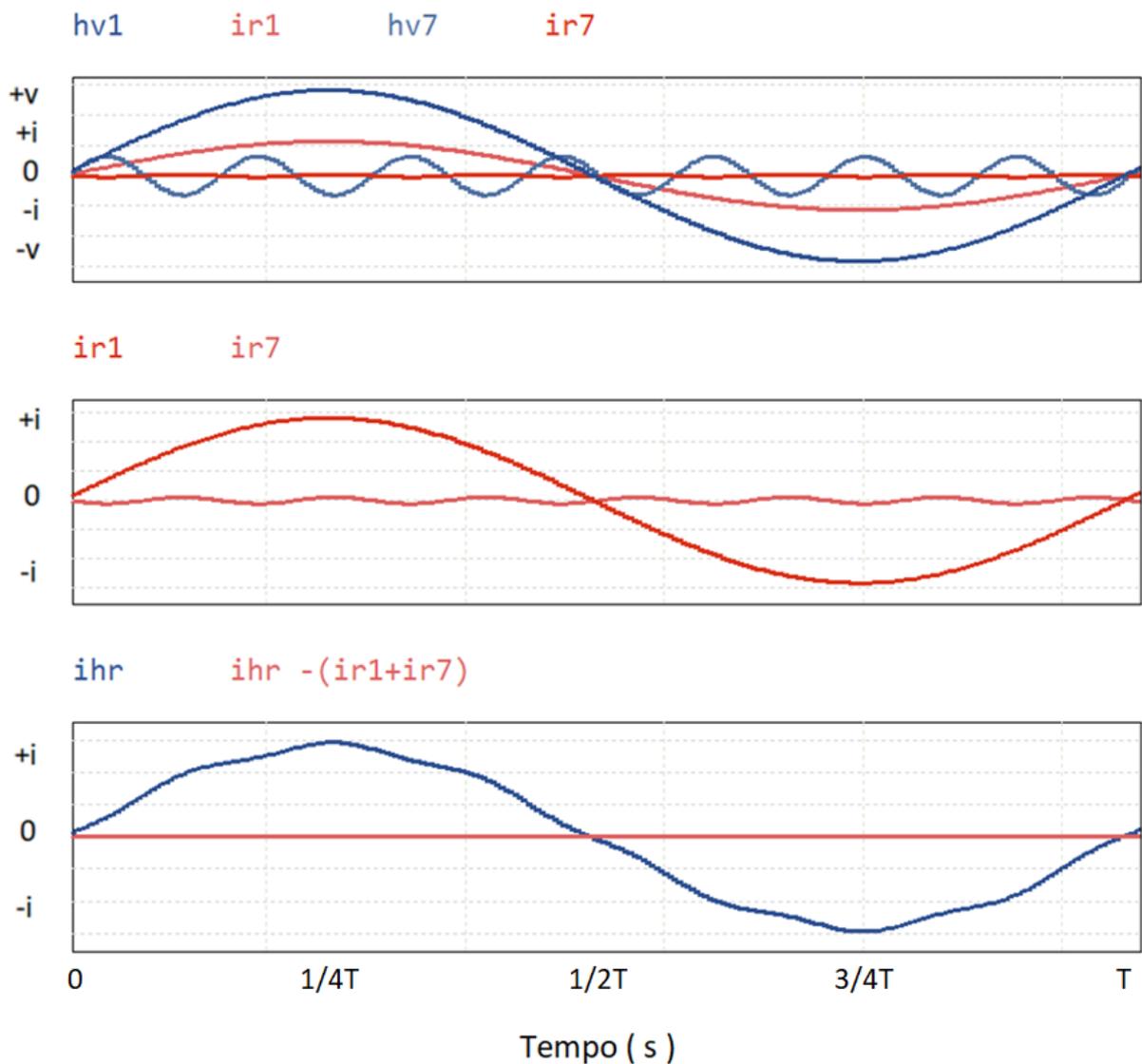
A Figura 7 - Correntes reativas de frequências distintas e Figura 5 - Correntes ativas de frequências distintas, apresenta graficamente os equacionamentos (19) e (20), considerando uma carga RL alimentada por uma tensão distorcida, composta da soma de uma sinal de tensão na frequência fundamental e um sinal de tensão na frequência equivalente à sétima harmônica, apenas para exemplificar.

Os sinais presentes na Figura 7 são:

- “hv1” é o sinal de tensão filtrado na frequência fundamental $hv_1(t)$;
- “ir1” é o sinal de corrente reativa na frequência fundamental $i_{r1}(t)$, correspondente da equação (19), para k=1;
- “hv7” é o sinal de tensão filtrado na frequência de sétima ordem $hv_7(t)$;
- “ir7” é o sinal de corrente reativa na frequência de sétima ordem $i_{r7}(t)$, correspondente da equação (19)(16), para k=7;

- “i_{hr}” é o sinal da corrente reativa harmônica $i_{hr}(t)$; expresso na equação (20), correspondente a soma dos sinais de todas as correntes reativas, estimadas individualmente, através do processo de filtragem da tensão.
- “i_{hr}-(i_{r1}+i_{r7})” demonstra a equivalência de sinais entre i_{hr} e soma $i_{r7} + i_{r1}$, sendo o resultado da subtração da corrente reativa harmônica e as correntes ativas calculadas individualmente na frequência fundamental e na frequência de sétima ordem.

Figura 7 - Correntes reativas de frequências distintas.



Fonte: O Autor.

Vale a pena lembrar que a Figura 7 é apenas um exemplo e que, análogo ao sinal $i_{ha}(t)$, o sinal $i_{hr}(t)$ apresentado em (20) é a soma de todas as correntes reativas calculadas individualmente em cada ordem k , até a K ésima ordem harmônica.

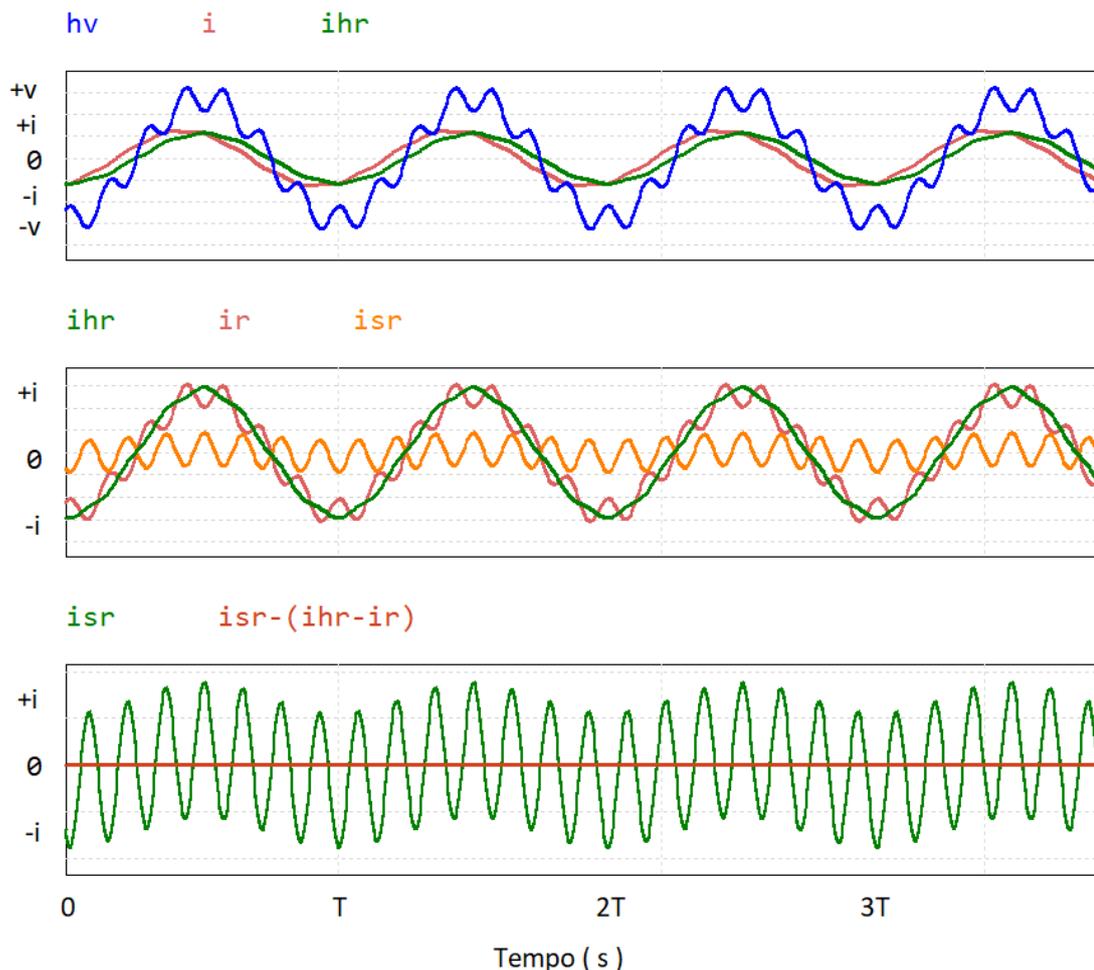
De forma parecida com (i_{sa}) , o sinal de corrente reativa dispersa (i_{sr}) é a diferença entre o cálculo da corrente reativa estimada através da soma das correntes reativas harmônicas e a corrente reativa calculada através dos sinais originais.

A corrente reativa dispersa (i_{sr}) é dada por (21):

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

A corrente harmônica ativa $i_{ha}(t)$ é o cálculo da corrente ativa usando um método de decomposição de sinais. Significa que a corrente ativa é calculada individualmente em cada frequência presente na tensão e somada ao final, equação (17).

Figura 8 - Corrente reativa harmônica e Corrente reativa dispersa.



Fonte: O Autor.

Da mesma forma, a corrente harmônica reativa $i_{hr}(t)$ é o cálculo da corrente reativa usando um método de decomposição de sinais.

Significa que a corrente reativa foi calculada individualmente em cada frequência presente na tensão e somada ao final, equação (20).

A de corrente ativa dispersa $i_{sa}(t)$, obtida pela equação (18), é a diferença das correntes ativas, calculadas por dois métodos distintos, um que considera a decomposição de sinais, e o outro que calcula diretamente com os sinais originais, equações (17) e (14).

De característica análoga à corrente ativa dispersa, a corrente reativa dispersa $i_{sr}(t)$ obtida pela equação (21)(21), é a diferença de correntes reativas, calculadas por dois métodos distintos, um que considera a decomposição de sinais, e o outro que calcula diretamente com os sinais originais, equações (20) e (15).

A última componente de corrente da CPT utilizada neste trabalho é a corrente gerada (i_g), que corresponde à corrente que não possui um par harmônico de tensão.

Seu nome refere-se a corrente de característica puramente não linear, completamente distorcido.

A corrente gerada (i_g) é dada por (22):

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

Com a substituição das equações (18)e (21).em (10) tem-se mais uma forma de calcular a corrente gerada (i_g) que, até então não havia sido evidenciada no rol de equações da CPT.

A corrente gerada (i_g) também pode ser dada por (23):

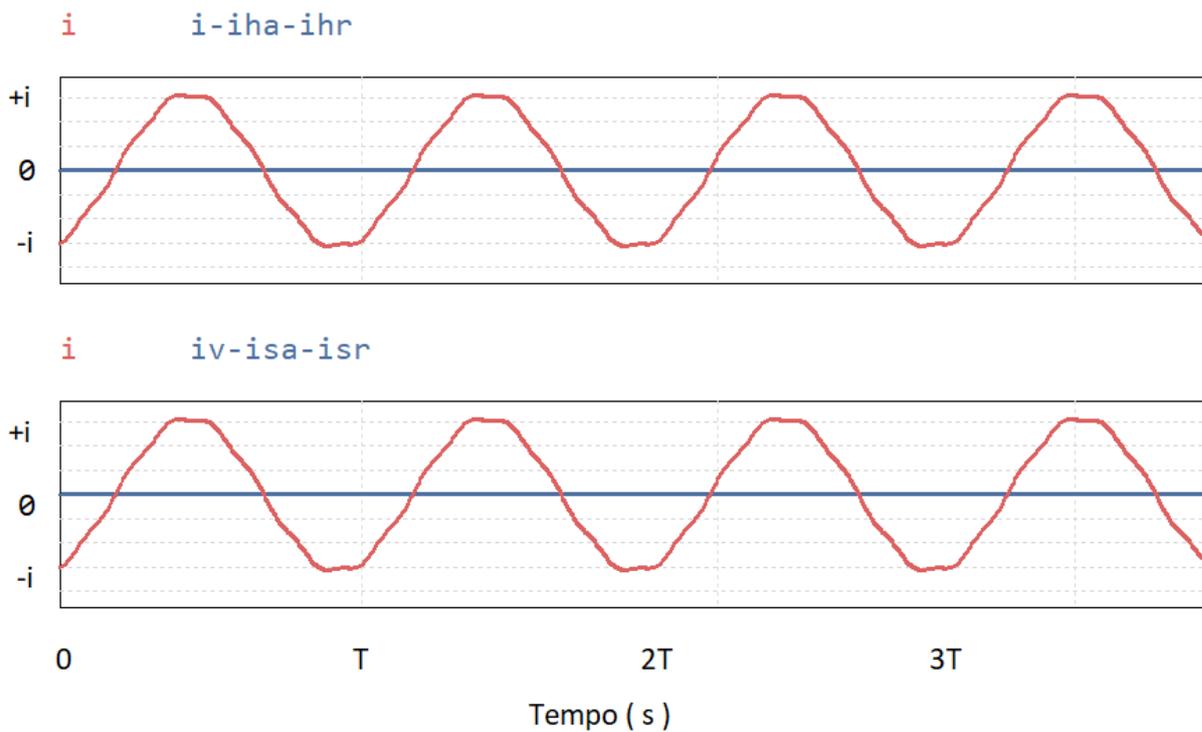
$$i_g(t) = i(t) - i_{ha}(t) - i_{hr}(t) \quad (23)$$

A Figura 9 - Corrente gerada de uma carga linear, equivale aos sinais equacionados em (22) e (23) para uma carga RL alimentada por uma tensão distorcida.

De acordo com a CPT, tanto na equação (22), quanto na equação (23), que estimam o valor da corrente gerada $i_g(t)$ de formas diferentes, os valores resultantes devem ser nulos, visto que a carga linear não gera correntes que estejam em frequências diferentes da tensão.

O que se observa, na Figura 9, são os sinais $i(t)$ como referência e o resultado dos dois métodos de estimação de $i_g(t)$.

Figura 9 - Corrente gerada de uma carga linear.



Fonte: O Autor.

3.5 Conclusões do Capítulo

Diante dos equacionamentos da CPT, notam-se as separações da corrente em suas componentes ortogonais, sendo de interesse especial, a equação (23). Através da corrente gerada e sua relação com as demais correntes previstas, é possível fazer a estimação do percentual de responsabilidade por conteúdo harmônico, sugerido em [7].

A separação dos sinais que representam as correntes ativas, reativas, dispersas e vazia, além dos cálculos, também dependem de filtragem, principalmente para a determinação de correntes ativas e reativas harmônicas, que são o somatório das correntes ativas e reativas calculadas individualmente em cada frequência presente na tensão.

Devido à necessidade de calcular várias componentes de corrente em frequências distintas, e depois, encontrar as diferenças entre os sinais, entende-se que o processo de filtragem escolhido deve ser capaz de estimar com exatidão o sinal filtrado.

O próximo capítulo apresenta o filtro digital Transformada Discreta de Fourier com Janela Deslizante Recursiva (SWR-DFT), capaz de realizar uma filtragem, acurada o suficiente, para a aplicação de CPT.

4 Transformada Discreta de Fourier com Janela Deslizante Recursiva

Este capítulo apresenta a teoria da SWR-DFT, utilizada para a filtragem do sinal de tensão, e conseqüentemente, a estimação dos sinais de corrente, contendo um breve contexto de aplicação, função de transferência, diagrama de implementação original e uma variação de estrutura que apresenta uma nova funcionalidade relacionada à CPT.

4.1 Definição da Transformada Discreta de Fourier com Janela Deslizante Recursiva

As redes elétricas possuem sinais alternados trafegando em seus circuitos [4] e, na maioria das vezes, para as aplicações reais, estes sinais não são perfeitos [3] como nas funções trigonométricas senoidais ou sinais projetados no desenvolvimento de geradores de eletricidade.

A decomposição de sinais periódicos ruidosos em sinais com abordagem matemática mais acessível é de vital importância para a engenharia, sendo a transformada de Fourier, uma ferramenta matemática capaz de calcular os valores das amplitudes e frequências dos sinais.

Os sinais periódicos podem ser representados através da soma de séries de senos e cossenos, de acordo com [1].

A transformada de Fourier no domínio do tempo é dada por (24)

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w)e^{-i\omega t} dw \quad (24)$$

Para $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$

Ao longo da história da eletricidade foram propostas diversas variações e melhorias para os estudos de Fourier. O algoritmo da Transformada discreta de Fourier com janela deslizante recursiva - SWR-DFT [24], proposto por Silveira et al (2009) [25], é uma destas melhorias.

Para [26], a SWR-DFT é uma modificação do algoritmo *Short-Time Fourier Transform STFT*.

A função de transferências do Filtro Harmônico STFT é dado por **Erro! Fonte de referência não encontrada.**:

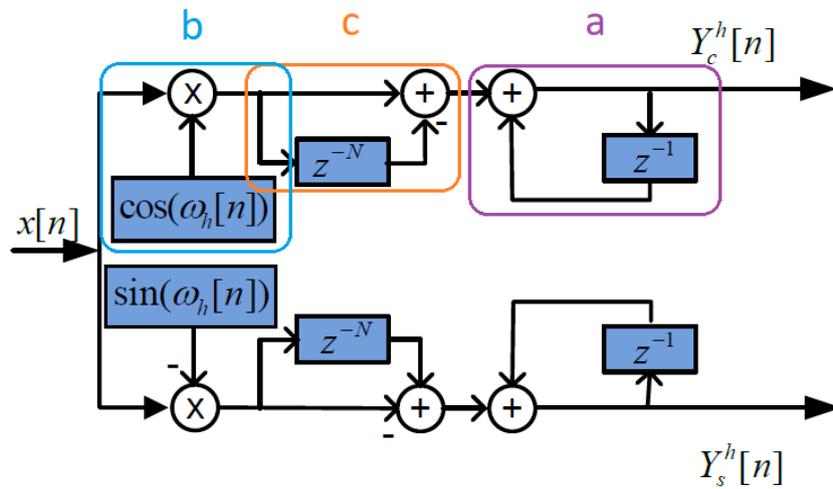
$$H_k(z) = \frac{1 - e^{jk\omega_1}z^{-N}}{1 - e^{jk\omega_1}z^{-1}} \quad (25)$$

Fonte [26].

A equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresenta o a função de transferência para estimação do harmônico no parâmetro k. onde k é inteiro e N é o número de amostras.

A Figura 10 - STFT – Implementação em Blocos e Equações das Diferenças apresenta, tal como [26], um diagrama de blocos que facilita a interpretação das funções, onde foram acrescentados retângulos relacionando a implementação com as equações.

Figura 10 - STFT – Implementação em Blocos e Equações das Diferenças.



$$Y_c^k[n] = Y_c^k[n-1] + \cos(\omega_h n) \times (x[n] - x[n-N])$$

$$Y_s^k[n] = Y_s^k[n-1] - \sin(\omega_h n) \times (x[n] - x[n-N])$$

Fonte [26].

Cada indicador isola uma etapa do cálculo, levando em conta os valores dos cossenos, onde:

- “a” é uma integral discreta, que soma os valores dentro de um ciclo.
- “b” refere-se uma pilha circular de cossenos, que pode ser implementada através de um vetor linha com número de colunas igual aos pontos de discretização do sinal, exemplo: para uma frequência amostral de 14,4 kHz onde deseja-se filtrar um harmônico de 60 Hz, a pilha deve conter 240 colunas, armazenando os valores da função cosseno considerando este intervalo como 2π . Também é possível notar o produto da pilha de senos pelo resultado da subtração entre o sinal de entrada e a média.
- “c” é a subtração do valor de entrada atual e seu respectivo valor no ciclo anterior.
- $Y_c^k[n]$ é uma das saídas do filtro, e contém a amplitude da componente filtrada k, considerada a representação trigonométrica da identidade de Euler, para os cossenos.
- $Y_s^k[n]$ é a outra saída do filtro, e contém a amplitude da componente filtrada k, considerada a representação trigonométrica da identidade de Euler, para os senos.

A análise da equação das diferenças para os senos é exatamente a mesma dos cossenos.

O funcionamento do SWR-DFT é muito próximo do STFT, como é possível ver em sua função de transferência.

A Função de Transferência para SWR-DFT é dada por (26):

$$H_{SWRDFT}(z) = \frac{1 - z^{-L}}{1 - e^{j2k\pi/L}z^{-1}} \quad (26)$$

L – Número de amostras por ciclo

k – Componente harmônica que se deseja filtrar

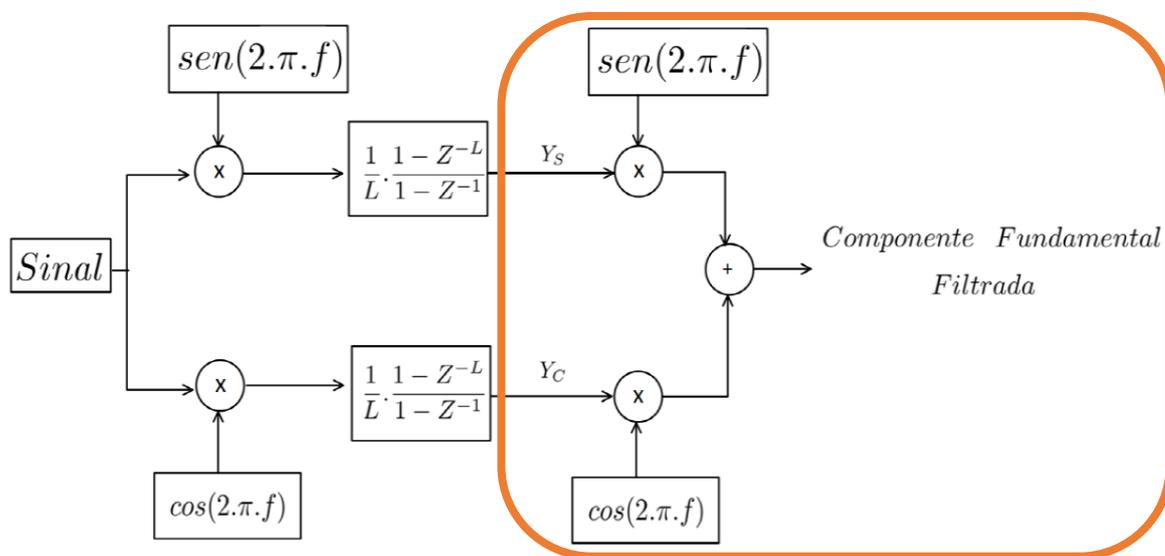
Fonte: Pinto (2015) [27].

Segundo [27] o algoritmo SWR-DFT pode ser implementado conforme a Figura 11 onde é possível notar as similaridades com o algoritmo STTF.

Nota-se a presença de duas médias para os casos de “ Y_s e Y_c ” [27], que são implementados através de média móvel com vetores em pilhas circulares, tal como em [26].

A Figura 11 apresenta a inovação de [24], segundo [27], e sua novidade, área delimitada pelo retângulo, é a multiplicação das amplitudes “ Y_s e Y_c ” novamente por uma pilha de senos e cossenos respectivamente onde, somadas ao final obtêm-se o valor referente à componente filtrada no instante discretizado.

Figura 11 – Estrutura de Filtragem baseada na SWR-DFT.



Fonte: Pinto (2015) [27].

Em outras palavras: um determinado “sinal” trafega por dois barramentos. Cada barramento está destinado a estimar o valor de uma componente trigonométrica da identidade de Euler e, portanto, existem dois barramentos, um de senos e um de cossenos. No barramento de senos, por exemplo, existe uma multiplicação, por uma pilha de senos a cada nova amostra do “sinal”. A pilha de senos é composta dos valores dos senos referentes à ordem k , para um período (mais claro na Figura 10). Após a etapa de multiplicação do seno, é feita uma média, (mais evidente na Figura 11), onde L é o número de amostras. O resultado até este ponto, é uma das saídas do STFT, ou seja, a amplitude da componente filtrada, neste caso para o coeficiente dos senos. Na área delimitada da Figura 11, apresenta-se a segunda multiplicação, tanto no barramento de senos quanto no barramento de cossenos, somando o sinal ao final, sendo esta saída, o sinal, para aquele instante de tempo, recomposto em forma de uma soma dos coeficientes trigonométricos da identidade de Euler, denominada “Componente Fundamental filtrada”. O barramento de cossenos possui dinâmica semelhante ao barramento dos senos.

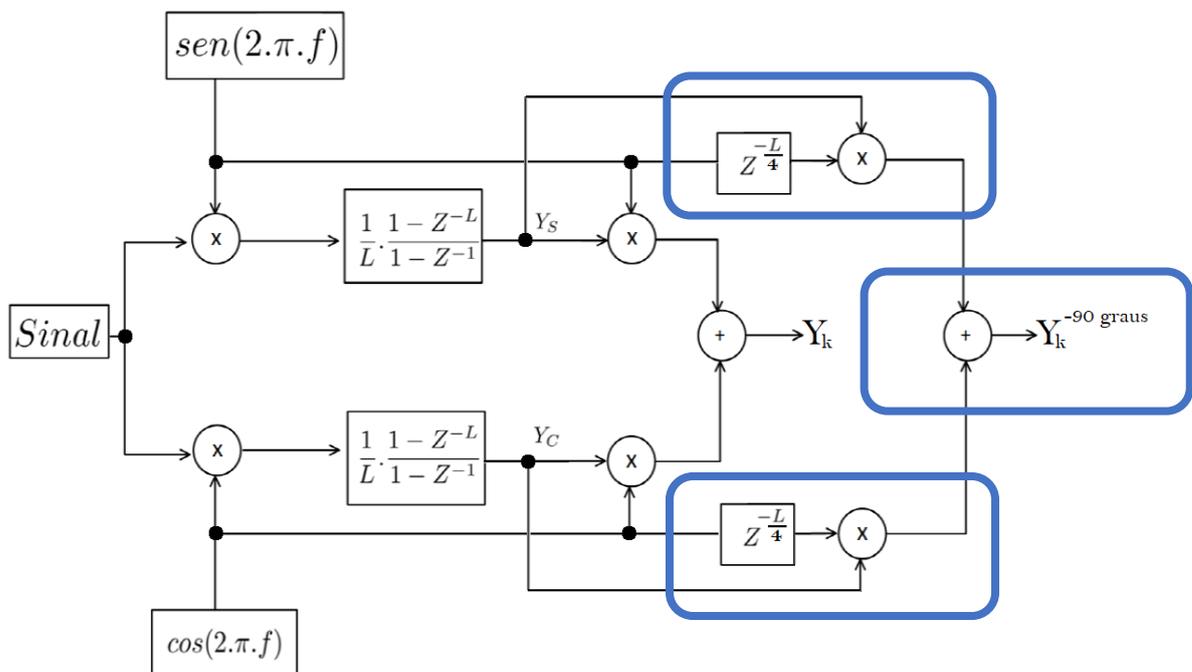
Portanto, o SWR-DFT é um filtro digital sintetizador de sinais, onde escolhe-se um valor de frequência fundamental e, a partir deste, estimam-se os coeficientes da identidade de Euler que, somados ao final, representam o sinal filtrado na frequência desejada

4.2 Algoritmo SWR-DFT Homointegrador

Originalmente, a implementação do filtro digital SWR-DFT se daria como apresentado por [27], porém durante a implementação da SWR-DFT, conforme a Figura 11, em um controlador digital de sinais que, para este trabalho, é o modelo TMS320F28335 da “Texas Instruments”, percebeu-se que o filtro poderia ser adaptado fornecendo nova funcionalidade.

Assim apresenta-se na Figura 12 - Filtro SWR-DFT Homointegrador, contendo a saída original de componente filtrada Y_k e a saída Y_k^{-90} que apresenta a componente filtrada Y_k com um atraso de 90 graus em seu sinal.

Figura 12 - Filtro SWR-DFT Homointegrador.



Fonte: O Autor – adaptado de Pinto (2015) [27].

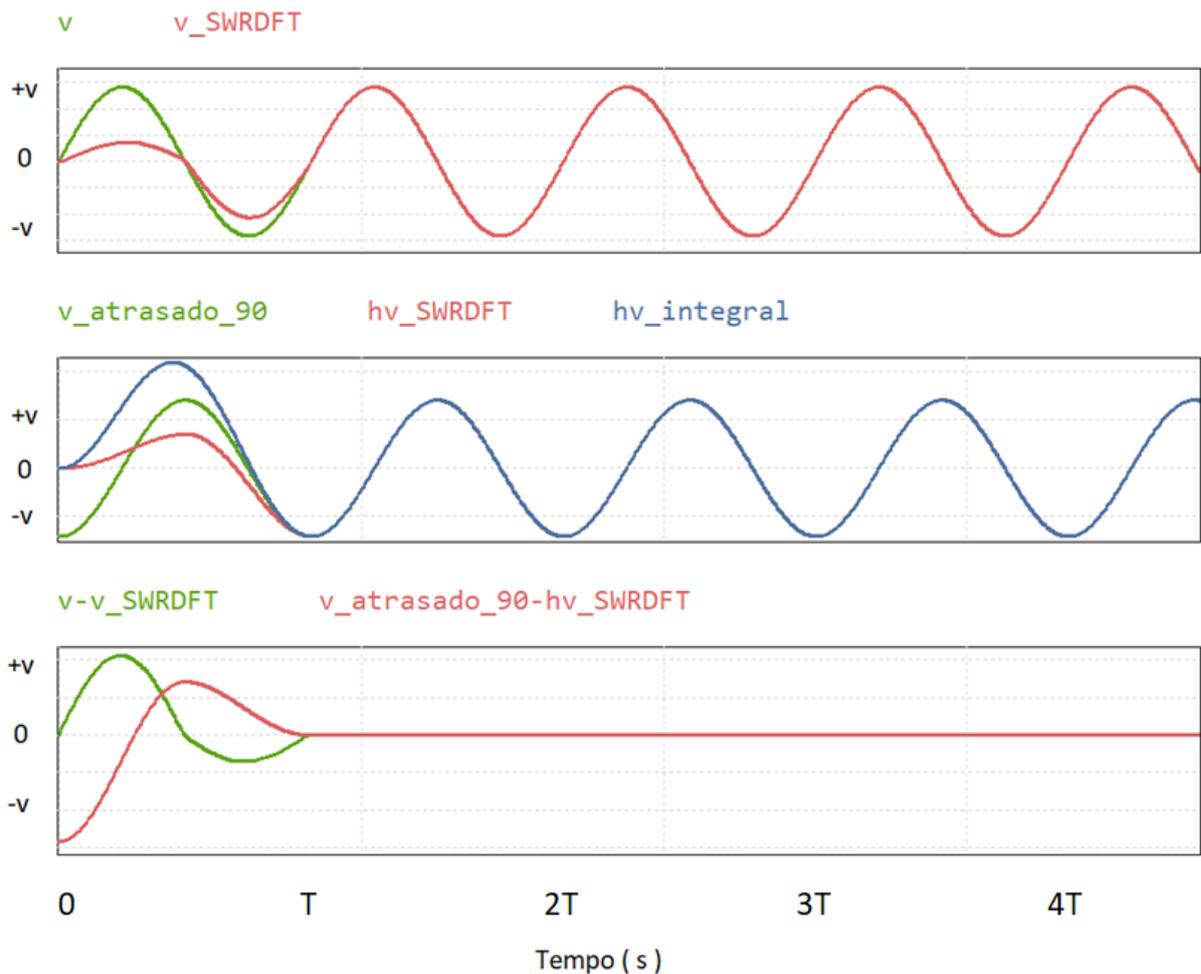
O objetivo da saída Y_k^{-90} é estimar a homotensão de uma componente filtrada, equação (8), através da otimização do uso das médias móveis já existentes na SWR-DFT.

As áreas delimitadas por retângulos, representam as melhorias e adaptações acrescentadas na SWR-DFT, sendo elas, os defasadores das pilhas de senos e cossenos, sua multiplicação pelas médias dos senos e cossenos e a soma ao final para a saída. Y_k^{-90} .

A Figura 13 apresenta os sinais de tensão e homotensão, onde:

- “v” é o sinal de tensão fundamental via simulação;
- “v_SWR-DFT” é a componente fundamental de tensão filtrada de um sinal distorcido de tensão;
- “v_atrasado_90” é o sinal de tensão fundamental via simulação com atraso de 90 graus;
- “hv_SWR-DFT” é a homotensão estimada pelo SWR-DFT Homointegradora;
- “hv_integral” é a homotensão calculada pela equação (8) da CPT.

Figura 13 – Comparativo sinais SWR-DFT Homointegradora.



Fonte: O Autor

Na Figura 13, o primeiro gráfico contém os sinais “v” representando o sinal de tensão $v(t)$ simulado e “v_SWRDFT” representando o sinal de tensão filtrada na harmônica k, $v_k(t)$.

O sinal $v_k(t)$ obtém-se a partir do sinal distorcido de tensão, Figura 3, onde a saída Y_k da SRD-DFT Homointegradora, Figura 12, tem $k=1$, filtrando a frequência fundamental.

Observa-se (19) a equivalência de sinais entre a tensão simulada e a tensão filtrada a partir de um sinal distorcido.

Para o segundo gráfico, comparam-se três sinais, a homotensão simulada $\hat{v}_{k \text{ simulada}}(t)$ (tensão de referência), a homotensão estimada pela SWR-DFT $\hat{v}_{k \text{ SWR-DFT}}(t)$ e a homotensão $\hat{v}_{k \text{ TPC}}(t)$ calculada pelo método da integral imparcial, dada na CPT. Quando ambas estão em regime, nota-se que são graficamente iguais, sem atraso de fase ou atenuações.

A terceira figura, realiza a subtração dos sinais, resultando em uma componente de valor inferior a um milivolt, considerado como zero, demonstrando a acurácia e funcionalidade do filtro. SRD-DFT Homointegrador.

Ainda é possível verificar na Figura 13, os transitórios dos sinais nos instantes iniciais de cada gráfico, evidenciando que as estimações de homotensão da SWR-DFT e da CPT, conforme implementadas neste trabalho, necessitam de um ciclo para entrar em regime, devido a média móvel que estabiliza ao final de um ciclo.

4.3 Conclusões do Capítulo 4

Neste capítulo foram apresentadas as particularidades da SWR-DFT e sua variação, para a estimação da homotensão, o filtro SWR-DFT Homointegrador.

Na CPT, utiliza-se a integral imparcial, também denominada homointegral ou homointeração, para atrasar o sinal de tensão em 90 graus.

Sabe-se que, para sinais senoidais puros, a homointegração funciona adequadamente deslocando o sinal para o ângulo desejado e mantendo a amplitude do sinal original, já para sinais distorcidos acontece o fenômeno de atenuação de sinais.

A atenuação ocorre devido ao cálculo da integral de um sinal requerer a multiplicação por uma constante de escala. Essa constante é a frequência angular do sinal desejado, logo, é necessária a escolha de uma única frequência de integração e, portanto, a atenuação de outras componentes acontece naturalmente, visto a impossibilidade de aplicar mais de uma frequência de integração.

Quando leva-se em consideração a natureza da necessidade da integração, o atraso do sinal de tensão em um quarto de ciclo, com o propósito de estimar as correntes reativas [9] [8]

[6], nota-se que as atenuações são, na realidade, indesejáveis, quando considerado um sinal distorcido.

A correta estimação da homotensão $\hat{v}(t)$, apresentado em (9), é uma alternativa que contorna as atenuações da integral imparcial, exigindo maior custo computacional.

Porém, como são previstas as filtragens pela SRD-DFT, a estimação de $v_k(t)$. através da SRD-DFT Homointegradora resulta em economia de processamento.

Conclui-se a aplicabilidade da SRD-DFT Homointegradora em substituição do método da integral imparcial [6], apresentado em (3), dada a forma de estimação de $\hat{v}(t)$, através da soma das componentes filtradas.

Em [27] a autora apresenta desvantagens da SRD-DFT na presença de sinais que contenham componentes inter-harmônicos e ressalta a possibilidade de propagação de erros.

Considera-se, para este trabalho, a presença de interharmônicos como nula e, sendo assim, qualifica-se a versão SWR-DFT Homointegradora, como apta para comporem o algoritmo de estimação de responsabilidades por conteúdo harmônico, vista a capacidade de replicar o sinal resultante da homointegração de componentes filtradas.

A atribuição de responsabilidades por conteúdo harmônico se dá através da estimação de dois fatores, um de consumo de harmônicos e outro de geração de harmônicos.

A correta separação de correntes que levam ao cálculo acurado destes fatores depende diretamente da acurácia da SWR-DFT Homointegradora, que possibilita a separação da corrente gerada $i_g(t)$. A estimação da corrente gerada e sua relação com a determinação dos percentuais de responsabilidades por conteúdo harmônico, são temas do próximo capítulo.

5 Responsabilidade Por Conteúdo

Harmônico

O presente capítulo tem como objetivo principal contextualizar a abordagem de separação de correntes da CPT e a definição de responsabilidades por conteúdo harmônico em sistemas monofásicos.

Apresentam-se os equacionamentos para determinação das responsabilidades por conteúdo harmônico entre consumidor e concessionária, bem como seu significado físico do modelo matemático.

5.1 Distorções Harmônicas

A rede elétrica é um meio de propagação de sinais provenientes de geradores, transmissores, distribuidores e consumidores de energia elétrica. O compartilhamento da mesma se dá através do tráfego de sinais de tensão e corrente que circulam nas redes e, portanto, em algum momento, a potência elétrica gerada em uma unidade geradora, será novamente convertida em algum processo em um ponto de consumo.

Estes processos de conversão se dão pela característica da carga que, ao ser linear, consome correntes que estão nas mesmas frequências da tensão, já as cargas de característica não linear, que apresentam comportamento diferente do proporcional ao longo de um ciclo, podem consumir correntes adicionais em frequências que diferem das frequências da tensão.

Dentre os critérios de análise de redes elétricas, destacam-se a análise das distorções harmônicas como metodologia de avaliação da qualidade de energia.

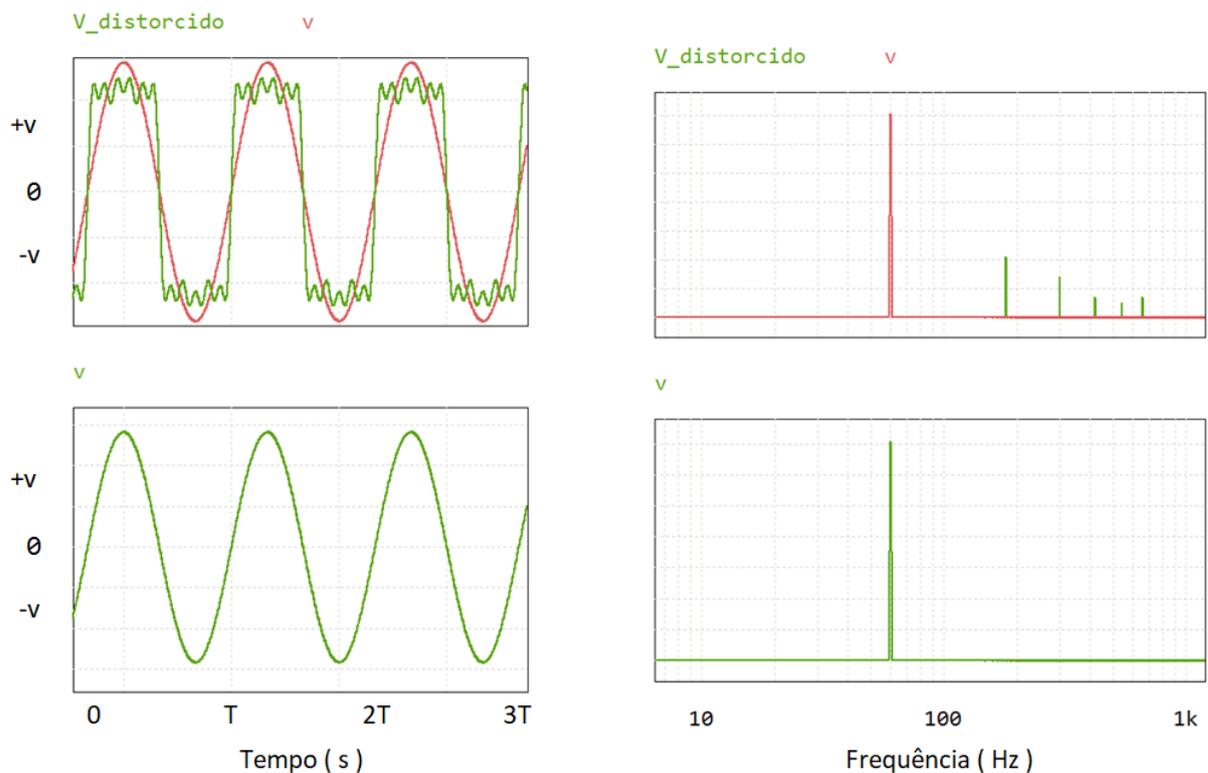
As distorções harmônicas referem-se a variações ou irregularidades na forma de onda de uma corrente elétrica ou de uma tensão em relação a uma onda senoidal pura. Estas irregularidades podem ser descritas como múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema.

A inserção destas componentes pode se dar de várias maneiras, tais como: o desbalanço de fases ocorrido em alguma etapa de geração ou transformação, utilização de cargas não lineares, defeitos em reguladores de tensão dinâmicos (geradores rotativos) e estáticos (transformadores reguladores), variações de sincronismo em geradores, transientes de rejeição

de carga, problemas mecânicos em indutores tais como desalinhamento de enrolamentos provenientes de esforços ou falhas construtivas, flutuações de carga, entre outros.

A Figura 14 apresenta dois sinais de tensão, sendo “v_distorcido” um sinal não senoidal e “v” um sinal senoidal puro, seguido de seus respectivos espectros harmônicos, onde pode-se notar a presença de múltiplas ordens harmônicas em “v_distorcido”.

Figura 14 - Tensão distorcida e Espectro harmônico.



Fonte: O Autor

As distorções harmônicas na geração de eletricidade costumam estar presentes na tensão. As distorções harmônicas no consumo, independente da distorção de tensão, apresentam-se na corrente, tipicamente.

Cargas lineares só possuem correntes harmônicas diferentes da fundamental se a tensão for distorcida, já as cargas não lineares podem apresentar correntes diferentes da frequência fundamental mesmo se a tensão for puramente senoidal.

5.2 Correntes harmônicas

Na CPT, as correntes harmônicas são as correntes que possuem comportamento ativo ou reativo na frequência em que estejam.

Quando as componentes de corrente estão nas mesmas frequências que as componentes de tensão, a corrente ativa harmônica de ordem K , (i_{ak}) e a corrente reativa de harmônica de ordem K , (i_{rk}), podem ser calculadas, equações (16)(17) e (19). A estimação de i_{ak} e i_{rk} é feita de forma individual, para cada ordem k , onde $k=1$ refere-se às correntes na frequência fundamental.

Conforme visto no item 0, a soma de todas as correntes ativas em todas as ordens harmônicas é denominada corrente ativa harmônica i_{ha} e a soma de todas as correntes reativas em todas as ordens harmônicas é denominada corrente reativa harmônica i_{hr} .

A determinação de responsabilidades por conteúdo harmônico depende da separação entre correntes que possuem ou não pares harmônicos na tensão.

5.3 Comparativo de espectro harmônico.

O espectro harmônico refere-se à decomposição de um sinal ou onda em suas componentes fundamentais e harmônicas, visualizando suas amplitudes e faixas de frequência.

Para sinais senoidais puros, o espectro harmônico de uma carga linear deve apresentar somente a amplitude da onda fundamental.

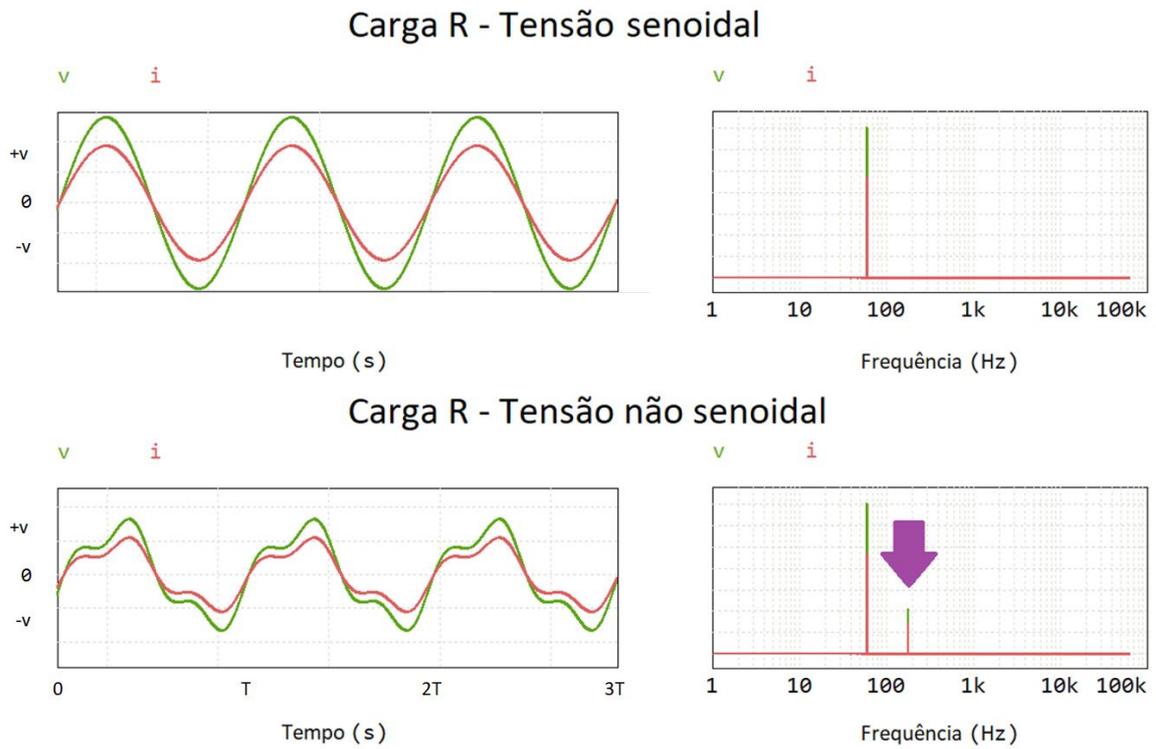
Porém, quando alimentado por uma tensão distorcida, até mesmo uma carga de característica resistiva apresenta sinais harmônicos de corrente.

A Erro! Fonte de referência não encontrada., demonstra os sinais de uma carga resistiva em dois casos específicos, sendo: Tensão Senoidal e Não Senoidal, seguido de um gráfico de espectro harmônico para cada caso.

Nota-se que, embora o resistor apresente comportamento linear, quando alimentado por uma tensão distorcida, o mesmo apresenta sinais de correntes nas mesmas componente de frequência presentes na tensão. Uma seta indicativa inserida no segundo gráfico de espectro harmônico mostra a presença de corrente de terceira ordem harmônica tanto na tensão quanto na corrente.

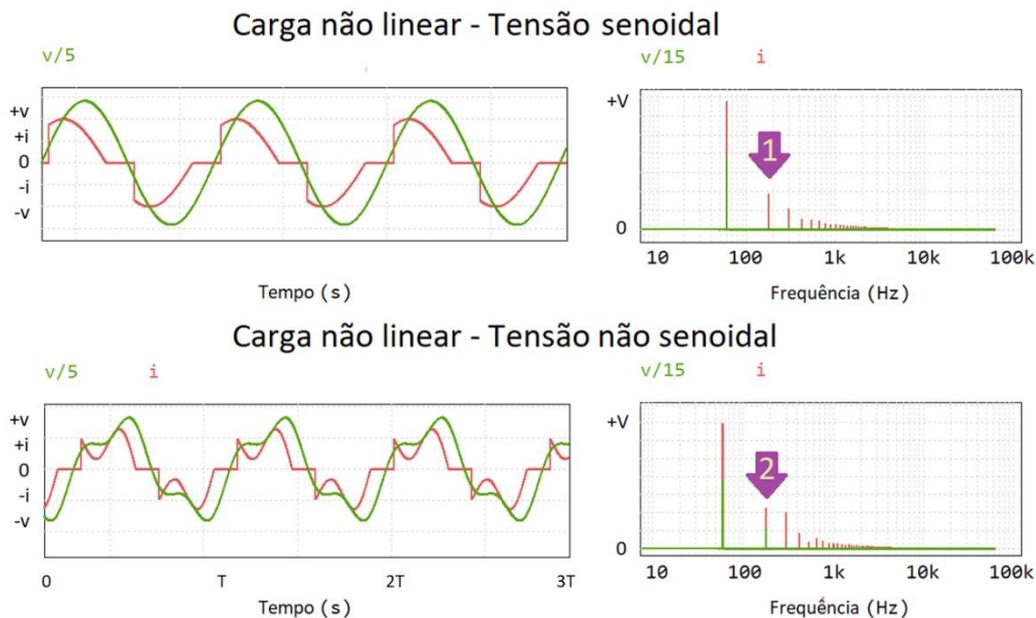
Na Figura 16, de forma análoga a análise anterior, compara os sinais de uma carga não linear em dois casos, sendo: Tensão Senoidal e Não Senoidal, seguido de um gráfico de espectro harmônico para cada caso.

Figura 15 - Comparativo de sinais para uma carga resistiva



Fonte: Próprio Autor

Figura 16- Comparativo de sinais para uma carga não linear.



Fonte: O Autor.

Na seta indicativa 1, na Figura 16, é possível notar a presença de correntes harmônicas em ordens que não estão presentes na tensão, caso de tensão senoidal.

Para o caso de tensão não senoidal, notam-se, na seta indicativa 2, a presença de um componente harmônico de tensão que difere da frequência fundamental e componentes harmônicos de corrente que diferem dos que existem na tensão.

Também é possível notar, para o caso de tensão senoidal, que todas as correntes de frequências diferentes da fundamental foram geradas pela carga.

5.4 Corrente de distorção harmônica

As correntes, num contexto de qualidade de energia, são avaliadas por várias metodologias, entre elas a taxa de distorção harmônica e o fator de distorção harmônica.

A taxa de distorção harmônica de corrente TDHi apresenta uma razão entre a soma quadrática das correntes eficazes que diferem da frequência fundamental e a corrente eficaz de frequência fundamental I_1 .

A Taxa de Distorção Harmônica de Corrente TDHi é dada por (27):

$$TDHi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (27)$$

Já o fator de distorção harmônica de corrente FDHi é a relação entre a corrente eficaz na frequência fundamental I_1 e o valor eficaz da corrente, I , sendo I o valor eficaz da corrente, de um sinal de corrente distorcido.

O fator de distorção harmônica de corrente FDHi é dado por (28):

$$FDHi = \frac{I_1}{I} \quad (28)$$

Ao analisar a equação (27) - TDHi, nota-se que o dividendo é a soma dos valores eficazes de todas as componentes de corrente, com exceção da corrente eficaz fundamental I_1 .

Na CPT existem sinais de corrente que se aproximam deste valor, sendo a representação deste sinal, cujo valor eficaz é o dividendo da razão descrita em (27).

Este sinal, embora seja tão somente o sinal proveniente da equação: $i(t) - i_1(t)$, relaciona-se diretamente com as componentes de corrente ativa harmônica i_{ha} , corrente reativa harmônica i_{hr} e a corrente gerada i_g da CPT, pois tratam-se de correntes estimadas individualmente em cada frequência harmônica, e representa todas as correntes diferentes de i_1 , podendo ser denominado Corrente de Distorção Harmônica i_{dh} .

O sinal de Corrente de Distorção Harmônica i_{dh} é dado por (29):

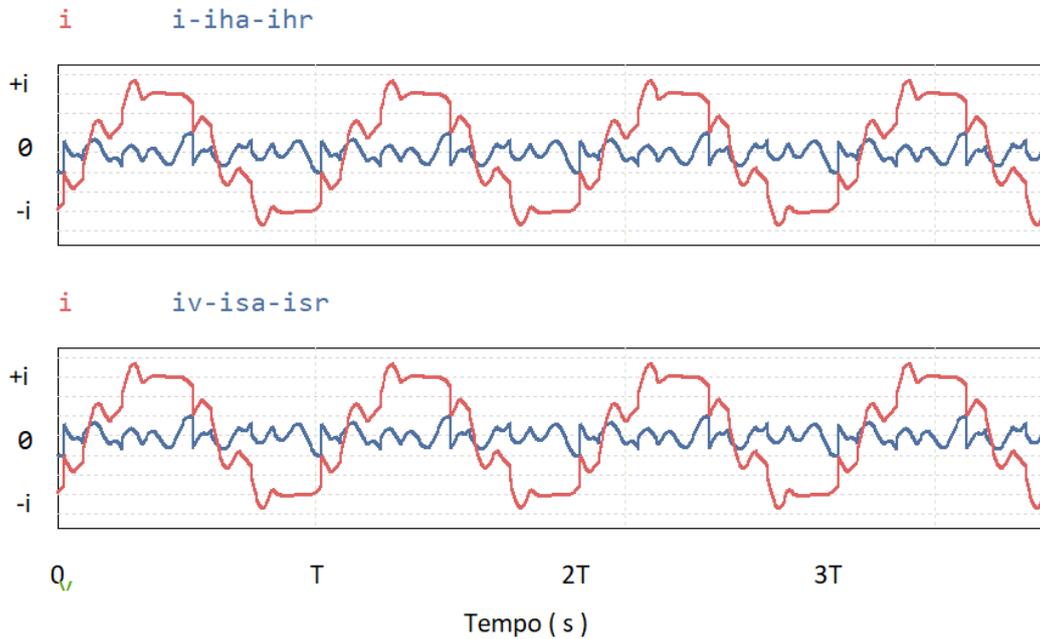
$$i_{dh}(t) = i(t) - i_1(t) \quad (29)$$

Na CPT o sinal de Corrente de Distorção Harmônica i_{dh} pode ser estimado por (30):

$$i_{dh}(t) = i_{ha}(t) + i_{hr}(t) + i_g(t) - i_1(t) \quad (30)$$

A Figura 17 apresenta graficamente o sinal de i_{dh} , estimado pelas equações (29) e (30) respectivamente e “i” é o referencial de corrente $i(t)$.

Figura 17 – Sinal de Corrente de Distorção Harmônica.



Fonte: O Autor.

É possível notar que as duas equações para o sinal Corrente de Distorção Harmônica i_{dh} se equivalem.

Já o FDHi, equação (28), relaciona a corrente eficaz I_1 com a corrente eficaz I .

A Responsabilidade por Conteúdo Harmônico, estimada a partir dos sinais de corrente e tensão presentes no ponto de acoplamento comum – PAC, pode ser separada em parcelas representativas referentes a responsabilidade do consumidor e a responsabilidade da distribuidora de energia elétrica. Estas parcelas de responsabilidade são apresentadas em forma de fatores, respectivamente:

- Fator de Geração de Harmônicos F_{GH} ;
- Fator de Consumo de Harmônicos F_{CH} .

5.5 Fatores de Geração e de Consumo de Harmônicos

Como verifica-se nos itens anteriores deste capítulo, algumas correntes distorcidas são capazes de produzir trabalho, pois possuem tensões em suas respectivas frequências, já outras correntes não produzem trabalho, referindo-se às correntes geradas.

A relação entre os valores eficazes das correntes geradas, i_g e as correntes de distorção harmônica i_{dh} . é denominada de Fator de Geração de Harmônicos F_{GH} .

O Fator de Geração de Harmônicos F_{GH} é dado por (31):

$$F_{GH} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_g^2(t)}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{dh}^2(t)}} = \frac{I_G}{I_{DH}} \quad (31)$$

Onde I_G é o valor eficaz do sinal $i_g(t)$.

Onde I_{DH} é o valor eficaz do sinal $i_{dh}(t)$.

Fonte: O Autor.

Devido a sua natureza, o cálculo de componentes harmônicos, o F_{GH} só deve ser utilizado quando do conhecimento da existência de sinal distorcido tensão ou de corrente, caso contrário, a equação converge para o infinito positivo.

O valor estimado de F_{GH} (31) é proporcional ao percentual de responsabilidade de conteúdo harmônico do cliente, para qualquer conteúdo harmônico medido no Acoplamento comum PAC, do cliente.

Ainda sob a perspectiva do cliente, é apresentado o Fator de Consumo de Harmônicos F_{CH} que se refere ao conteúdo harmônico presente na rede, que fará com que correntes de frequências harmônicas trafeguem, mesmo que o cliente só possua cargas lineares conectadas a seu PAC.

Para este caso, o conteúdo harmônico de tensão provocará o surgimento de conteúdo harmônico de corrente.

O Fator de Consumo de Harmônicos F_{CH} é dado por (32):

$$F_{CH} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (i_{dh}(t) - i_g(t))^2}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_{dh}^2(t)}} = \frac{\sqrt{I_{DH}^2 - I_G^2}}{I_{DH}} \quad (32)$$

Fonte: O Autor.

A parcela de responsabilidade da distribuidora com relação a presença de conteúdo na corrente é proporcional ao Fator de Consumo de Harmônicos F_{CH} .

Análogo ao F_{GH} , o F_{CH} também converge para o infinito positivo, quando a soma das correntes de conteúdo harmônico diferentes da fundamental for nula.

Devido à sua metodologia de estimação, os fatores são complementares, ou seja, quando somados, seu resultado deve ser igual a 1, a este comportamento, denomina-se equivalência unitária da soma de fatores harmônicos.

A equivalência unitária da soma de fatores harmônicos é dada pela equação (33):

$$F_{GH} + F_{CH} = 1 \quad (33)$$

Fonte: O Autor.

Os dois fatores têm sua aplicação possível se, e somente se, houver sinais distorcidos, sejam de tensão, sejam de corrente.

5.6 Conclusões do capítulo

O capítulo 5 apresenta as equações para a estimação de valores de responsabilidade por conteúdo harmônico.

A nomenclatura adotada, Fator de Geração de Harmônicos F_{GH} e o Fator de Consumo de Harmônicos F_{CH} , possui seu referencial no PAC do cliente, por isso os termos “gerado” e “consumo” que procuram descrever o fenômeno sob a perspectiva do consumidor, visto que o método de estimação só usa um ponto de medição, porém, cada fator apresenta ao final, um valor escalar que representa a responsabilidade por conteúdo harmônico, do cliente e da distribuidora, respectivamente.

Atribui-se, bem sucedida a aplicabilidade teórica da CPT para a estimação das responsabilidades por conteúdo harmônico em redes de distribuição, devido ao rol de soluções

desenvolvidas, equacionamentos e algoritmos, bem como às apresentações gráficas das componentes de corrente nas figuras ao longo de todo o capítulo,

A implementação experimental da estimação de responsabilidades por conteúdo harmônico é o tema do próximo capítulo.

6 Resultados Experimentais

Neste capítulo apresentam-se os principais resultados experimentais da estimação de responsabilidade por conteúdo harmônico.

6.1 Dificuldades encontradas e Soluções

A seguir, seguem subscritos as principais dificuldades encontradas e suas respectivas soluções e curiosidades da implementação do estimador de responsabilidades:

Divisões por zero - Durante implementação das equações (14)(16)(15)(19), correntes ativa, ativa de harmônica k , reativa e reativa de harmônica k , nota-se que, em determinadas vezes, os valores referentes ao divisor dessas equações, dado como o quadrado da norma euclidiana do sinal de tensão, resulta em um valor muito próximo de zero, fazendo o número escalar calculado convergir para infinito positivo.

Uma investigação mais detalhada sugere que o referido divisor não deve ser menor que 1. Quando esses divisores possuem o valor menor que 1, a técnica de estimação da corrente pelo sinal de tensão fica comprometida, visto que valores inferiores a unidade, funcionam como um segundo fator de proporção.

Por outro lado, limitar os valores a serem maior ou iguais a 1 para todos os casos, sugere uma propagação de erro. Logo, surge a necessidade de verificar qual seria a propagação inicial do erro.

Para este trabalho, a amplitude pico a pico do sinal de tensão é de aproximadamente 360 volts e, portanto, quando calculada a relação $1/360$, o erro percentual inicial, é de $\sim 0,00278\%$, sendo assim foi fixado o valor mínimo como 1, através de um bloco de divisão condicional.

Ao ser substituída a etapa de divisão convencional, por uma divisão condicional, a estabilidade do código melhora consideravelmente.

Memória do Processador e Tempo de Processamento – Durante a implementação, por diversas vezes, é necessário a otimização do código, com o intuito de melhorar seu desempenho, e evitar erros, causados por estouro de memória e tempo para o processamento. Isto se dá pela magnitude computacional do código. Embora sejam somente uma sequência de médias,

multiplicações, entre outros, o número de médias móveis atual, já exige esforço computacional, comprometendo a potência de processamento disponível.

O código atual trabalha com as ordens $K=1, 3, 5, 7$ e 9 , sendo que a inserção de mais uma ordem, faz com que haja um estouro da interrupção. Significa que o código está extenso demais para ser executado em um ciclo da frequência amostral.

Portanto, embora a apresentação das ordens k pares seja enriquecedora para a pesquisa, as mesmas foram suprimidas em prol do processamento em tempo real.

Código compacto - Na busca pela otimização, para aumentar as ordens harmônicas, foram utilizadas várias estratégias, entre elas: diminuição da frequência amostral, originalmente 56 KHz, redução das ordens harmônicas e escolha só das ímpares, compactação do código, substituição de funções trigonométricas por listas circulares, aproveitamento das listas circulares para mais de uma função trigonométrica (o vetor seno, também é o vetor cosseno, com o ponto de entrada atrasado em 90 graus) e por último, mas não menos importante, o aproveitamento da SWR-DFT para a sintetização do sinal de homotensão de ordem k $\hat{v}_k(t)$ e seu somatório para a recomposição da homotensão do sinal original de tensão $\hat{v}(t)$.

Otimização matemática - Ao ser revisitado inúmeras vezes, o código e os equacionamentos, surgiram desdobramentos das equações de [6], entre eles a equação (23), que estima a corrente gerada (i_g) de uma forma, relativamente mais simples, do ponto de vista do entendimento da CPT. Reiterado, a corrente gerada (i_g) é obtida da subtração entre o sinal de corrente $i(t)$ e a soma das correntes ativas e reativas harmônicas, (i_{ha}) e (i_{hr}), respectivamente.

Um Ponto de coleta - A determinação de responsabilidades por conteúdo harmônico vista em outros trabalhos, [8] por exemplo, utiliza dois pontos de coleta de sinais, sendo um deles no ponto de entrega do cliente e outro antes do PAC - Figura 1, por exemplo, para estimar as responsabilidades.

A abordagem pela componente a corrente gerada (i_g) possibilita a utilização de um único ponto de coleta.

Método não invasivo - A abordagem presente neste trabalho é do tipo não invasiva, isto é, a coleta de sinais e processos de estimação ocorrem sem a necessidade de inserção de cargas ou circuitos de filtros sintonizados, tais como os dos resultados apresentados em [8].

6.2 Dados experimentais

As cargas utilizadas para a coleta de dados encontram-se descritas na Tabela 5 - Cargas experimentais.

Tabela 5 - Cargas experimentais

Tabela de Cargas		
Número	Carga	Descrição
1	R	Lâmpada incandescente
2	RL	Motor de indução monofásico
3	RL_2	Motor de indução monofásico com rotor bobinado
4	Não_linear	Ponte retificadora de onda completa - Carga RC Paralelo

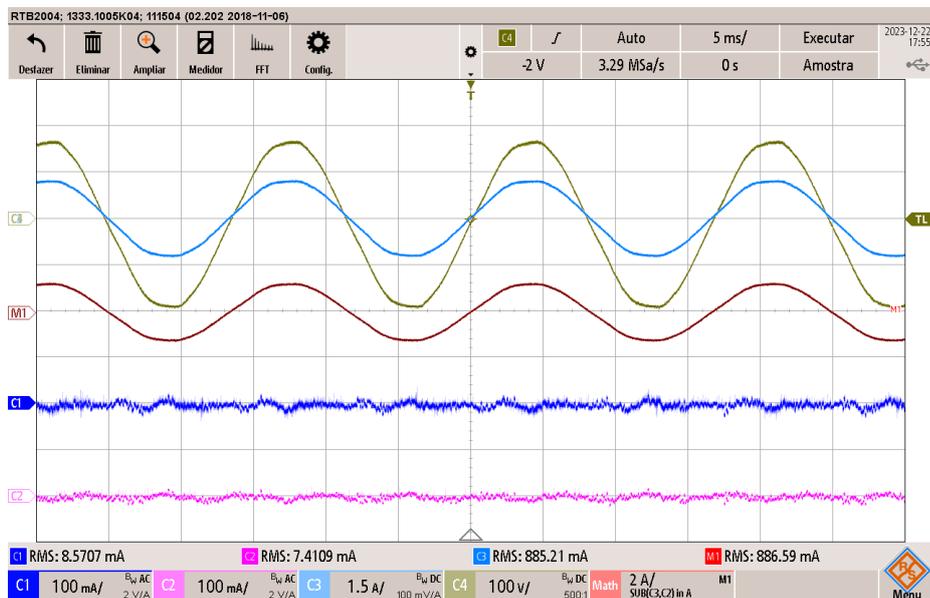
Pode-se observar os sinais das cargas da Tabela 5 nas figuras a seguir sendo os canais:

- “CH1”, o sinal amostrado da corrente de distorção harmônica $i_{ah}(t)$;
- “CH2”, o sinal amostrado da corrente gerada $i_g(t)$;
- “CH3”, o sinal da corrente $i(t)$;
- “CH4”, o sinal da tensão $v(t)$;
- “M1”, a subtração dos canais CH3 e CH2, portanto, $i_{ha}(t) + i_{hr}(t)$, correntes de comportamento harmônico.

Fonte: O Autor.

A Figura 18 é a apresentação dos sinais estimados pela CPT para uma carga resistiva onde nota-se que, embora o valor teórico da corrente gerada (i_g) seja nulo, o valor eficaz da corrente gerada I_G em “C2 RMS” é igual a 7,4109mA. Atribui-se este fato ao ruído de medição das ponteiros de corrente, bem como sua resolução. Já o valor eficaz da corrente de distorção harmônica I_{GH} é ligeiramente superior, “C1 RMS” é igual a 8,5707mA e sugere distorção harmônica de tensão.

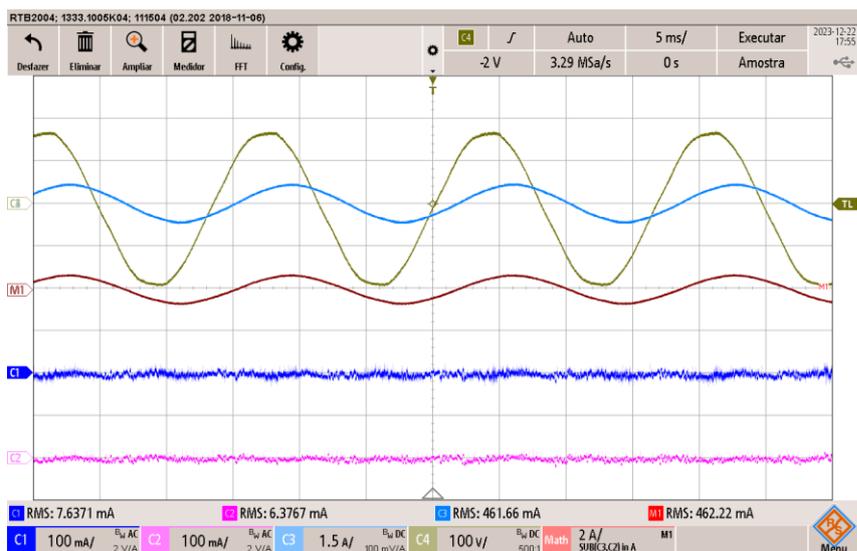
Figura 18 – Carga R – Lâmpada Incandescente.



Fonte: O Autor.

A Figura 19 é a apresentação dos sinais estimados pela CPT para uma carga indutiva. Novamente os valores eficazes dos canais 1 e dois confirmam a referência da carga resistiva e devem ser considerados nulos.

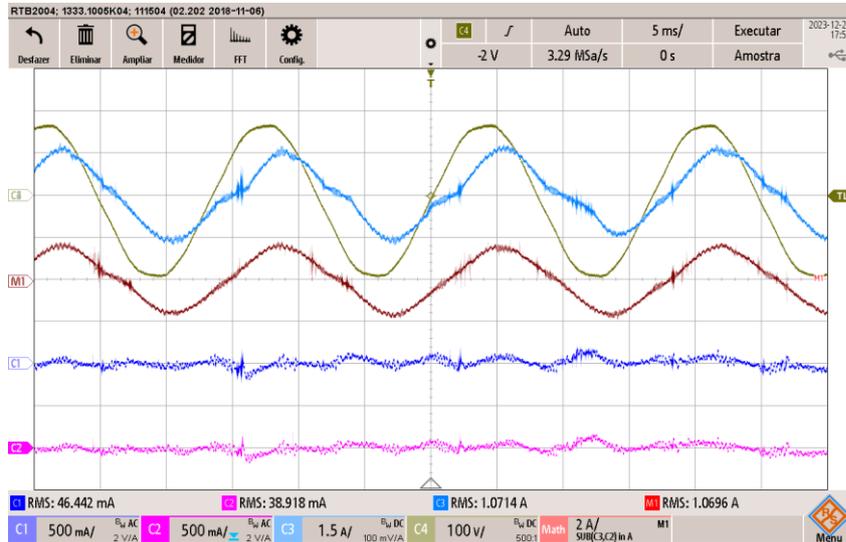
Figura 19 – Carga RL – Motor de Indução Monofásico.



Fonte: O Autor.

A Figura 20 apresenta uma carga linear com ruído provocado pelo comutador de escovas, nota-se um valor I_G mantém-se em proporção.

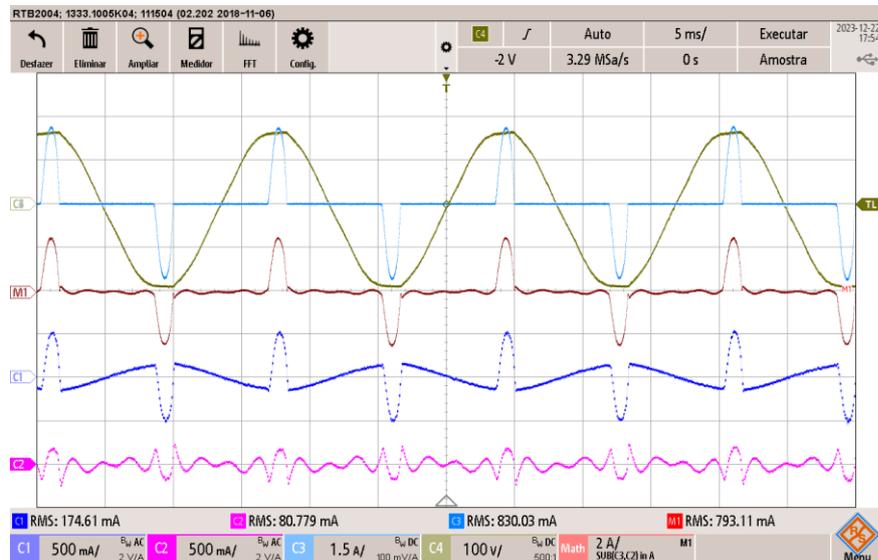
Figura 20 - Carga RL2 – Motor de indução com rotor bobinado.



Fonte: O Autor.

Figura 21 apresenta os sinais de uma carga não linear, composta de um retificador de onda completa e uma carga RC, onde fica mais evidência as correntes de comportamento harmônico no canal “M1”.

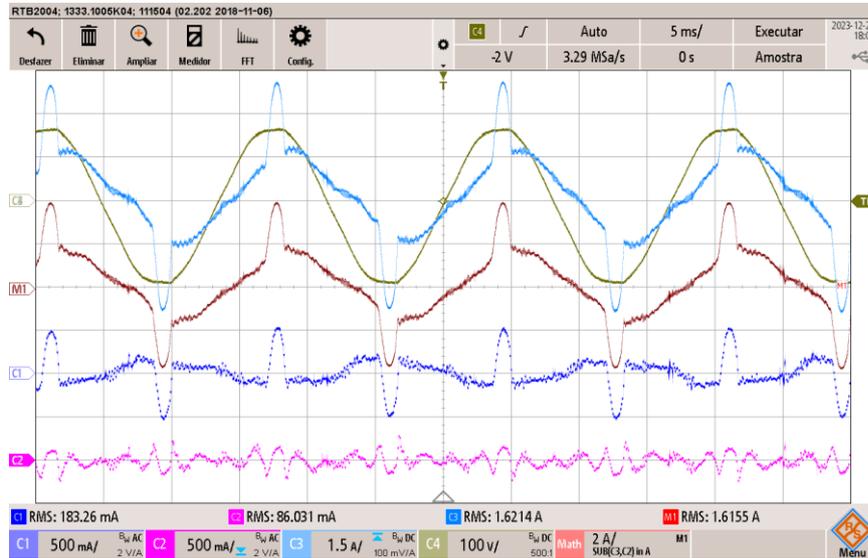
Figura 21- Carga Não_Linear – Ponte retificador de onda completa



Fonte: O Autor.

A Figura 22 apresenta um sinal de maior amplitude composto pela associação de algumas das cargas em paralelo (cargas 2, 3 e 4).

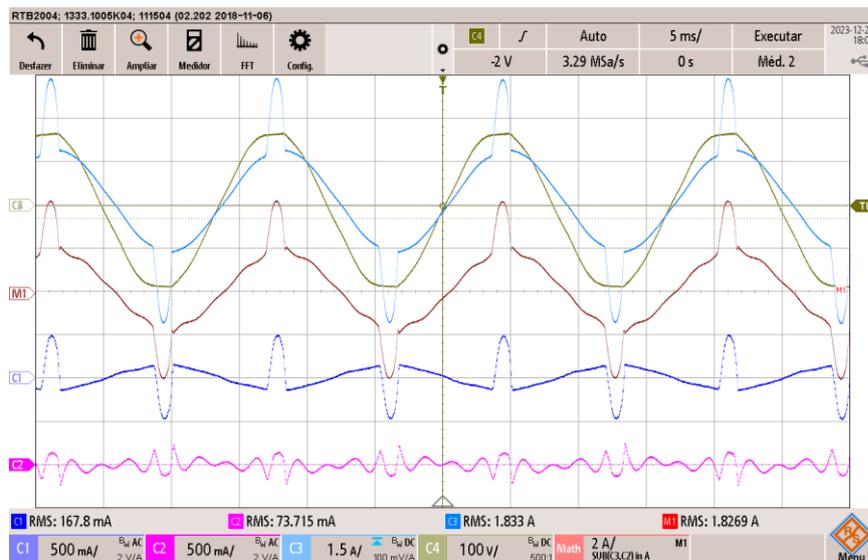
Figura 22 – Cargas em Paralelo.



Fonte: O Autor.

A Figura 23 apresenta um sinal composto de todas as cargas associadas em paralelo.

Figura 23 - Cargas em Paralelo 2



Fonte: O Autor.

De forma a melhorar a visibilidade da Figura 23, foi selecionada exibição por média, neste caso, média de 2 ciclos, de forma a atenuar os ruídos da imagem. Os valores eficazes não mudam devido à exibição da média de 2 ciclos.

A Tabela 6 apresenta os resultados das estimações de corrente, obtidas através de um dispositivo contendo pontas de prova de corrente, tensão, cargas variadas e um controlador digital de sinais.

Tabela 6 – Dados Experimentais

Dados Experimentais - Correntes [mA]				
	I_DH	I_G	I	I_H
Carga R	8,5707	7,4109	885,21	886,59
Carga RL	7,6371	6,3767	461,66	462,22
Carga RL_2	46,442	38,918	1071,4	1069,6
Carga Não_Linear	174,61	80,779	830,03	793,11
Cargas em Paralelo	183,26	86,031	1621,4	1615,5
Cargas em Paralaelo 2	167,8	73,715	1833	1826,9

I_DH - Corrente de distorção Harmônica Eficaz
I_G - Corrente gerada Eficaz
I - Corrente Eficaz
I_H - Correntes Harmônicas Eficaz ($\sqrt{I_H^2 + I_G^2}$)

Fonte: O Autor.

6.3 Responsabilidades

Com base nas equações (31), (32) e (33), Fator de Geração de Harmônicos F_{GH} , Fator de Consumo de Harmônicos F_{GH} e a equivalência unitária da soma de fatores, pode-se atribuir responsabilidade por conteúdo harmônico.

A Figura 7, apresenta os fatores de atribuição de responsabilidades, estimados através dos dados experimentais.

Tabela 7 - Fatores de Responsabilidade por conteúdo harmônico.

Fatores de Responsabilidade por conteúdo harmônico		
	F_GH	F_CH
Carga R	0,864678498	0,135321502
Carga RL	0,834963533	0,165036467
Carga RL_2	0,837991473	0,162008527
Carga Não_Linear	0,462625279	0,537374721
Cargas em Paralelo	0,469447779	0,530552221
Cargas em Paralelo 2	0,439302741	0,560697259
<hr/>		
F_GH - Fator de Geração de Harmônicos		
<hr/>		
F_CH - Fator de Consumo de Harmônicos		

Fonte: O Autor.

Os fatores representam as responsabilidades em notação *pu* (por unidade) e, portanto, para obter-se a responsabilidade em percentuais, basta multiplicar pela base 100.

O valor de F_{CH} a Tabela 7 pode ser estimado através de (32) ou (33) e o mesmo equivale para F_{GH} .

As responsabilidades, apresentadas em percentuais, podem ser estimadas conforme as equações a seguir:

A responsabilidade por conteúdo harmônico do consumidor $R_{CH\ consumidor}$ é dada por (34):

$$R_{CH\ Consumidor} = F_{GH} \times 100 \quad (34)$$

A responsabilidade por conteúdo harmônico da distribuidora $R_{CH\ distribuidora}$ é dada por (35):

$$R_{CH\ distribuidora} = F_{CH} \times 100 \quad (35)$$

A Tabela 8 apresenta as responsabilidades atribuídas para cada carga, estimadas através de (34) e (35).

Tabela 8 –Responsabilidade por consumo harmônico

Responsabilidade por conteúdo harmônico [%]			
Linhas	Cargas	R_CH_cons	R_CH_dist
1	Carga R	86,47	13,53
2	Carga RL	83,5	16,5
3	Carga RL_2	83,8	16,2
4	Carga Não_Linear	46,26	53,74
5	Cargas em Paralelo	46,94	53,06
6	Cargas em Paralelo 2	43,93	56,07

R_CH_cons - Responsabilidade do consumidor por conteúdo harmônico
R_CH_dist - Responsabilidade da distribuidora por conteúdo harmônico

Fonte: Próprio Autor

A estimação de responsabilidades apresentada, se dá para quaisquer que sejam os valores de correntes que forem submetidos aos estimadores, contudo, devido à tensão ter apresentado baixa distorção, e também a característica linear das cargas R, RL e RL2, o estimador apresenta um valor que aparenta ser diferente do esperado teoricamente.

Porém ressalta-se o fato de que o valor teorizado de $I_G = 0$, se dá quando consideradas todas as harmônicas k, para k sendo um número natural tendendo ao infinito.

Durante a implementação foram consideradas ordens harmônicas ímpares de 1 até 9, por serem mais abundantes em sinais distorcidos provenientes de cargas não lineares.

Com isso, salienta-se que o estimador não possui ordens harmônicas pares, bem como seu número de ordens k é limitado. Dadas estas considerações é justificável que apareça um valor de I_G proveniente de distorções em ordens que não foram contempladas. Portanto, a aquisição de um sinal de amplitude de 8 miliampères aproximadamente, presente em ambas correntes I_G e I_{DH} , conforme a Tabela 1, nada mais é do que as correntes de distorção harmônica que, por falta de memória e velocidade de processamento, foram deixadas de lado, em prol de correntes mais expressivas.

Quaisquer que sejam as correntes que estejam em ordens harmônicas que não foram contempladas, será considerado como I_G e I_{DH} , sendo atribuída ao cliente. Dito isto o presente resultado, sugere a utilização de um estimador com maior número de ordens k. Também fica clara a possibilidade de implementar um atribuidor de responsabilidades que possua aquisição, seguida de pós processamento, quer dizer, coleta-se os dados, e os processa passo a passo, sem a necessidade de realizar todos os cálculos dentro de uma única interrupção.

Quando adicionada uma carga não linear, surge a presença da corrente gerada, cargas das linhas “4, 5 e 6” - (Tabela 8), “Não_Linear, Cargas em Paralelo e Cargas em Paralelo 2”, respectivamente. Notam-se, de forma mais evidente, as correntes de distorção harmônica e sua relação com as correntes geradas, visto que para os três casos a carga de característica “não linear” está presente e sua influência não muda nos três sinais medidos.

Mais uma vez, por conta do número limitado de harmônicas implementado, surgem sinais que, novamente serão estimados como corrente gerada, mas que fazem parte das correntes de distorção harmônica ou até mesmo da corrente gerada de ordem k que não está presente no atribuidor de responsabilidades.

6.4 Conclusões do capítulo 6

Conclui-se para este capítulo que, conforme previsto, o aumento das cargas de característica linear, em um ambiente com distorção harmônica de tensão, provoca o aumento proporcional da distorção harmônica e portanto, diminui a responsabilidade do cliente (consumidor) onde, é possível visualizar na Tabela 8, nas linhas 4, 5 e 6, o aumento crescente de carga linear faz com que $R_{CH\ consumidor}$ diminua, em conformidade com o esperado teoricamente. Tal comportamento assemelha-se ao que acontece com o fator de potência que, ao pretender aumentar o fator, não se corrige o reativo e sim, aumentam-se as cargas ativas.

Também nota-se que correntes de ordens k que não foram contempladas no estimador são computadas como correntes geradas.

Uma possível solução é a implementação de um estimador de responsabilidades que contenha maior número de ordens harmônicas.

Uma das sugestões para este feito é a construção de um estimador que faça a análise do sinal em bateladas, quer dizer, faz-se primeiro a aquisição do sinal, e depois o processamento, de forma que sejam acrescidas o maior número de ordens possível., repetindo continuamente.

Dadas as apresentações do presente capítulo, consideram-se bem sucedidas as coletas experimentais e sua conformidade com os sinais previstos nas simulações.

A seguir, o capítulo 7 apresenta as conclusões finais e considerações sobre o tema.

7 Conclusões

Neste capítulo apresentam-se as considerações gerais sobre o processo de atribuição de responsabilidades por conteúdo harmônico, as contribuições e as sugestões para trabalhos futuros.

7.1 Conclusões Finais

Através do processamento e coleta dos dados experimentais, comparando-os com os resultados de simulação, nota-se que processo de atribuição de responsabilidades por conteúdo harmônico é aplicável no contexto de qualidade de energia e eletrônica de potência.

O Estimador de Responsabilidades por Conteúdo Harmônico com Aplicação da Teoria de Potências Conservativas e Transformada Discreta de Fourier com Janela Deslizante Recursiva, através das metodologias desenvolvidas e aplicadas neste trabalho, incluindo as condições e delimitações listadas anteriormente, é capaz de realizar a atribuição de responsabilidades, conforme a proposta teorizada.

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.

E, por sua vez, toda corrente que, no seu espectro harmônico, possua frequência igual as 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 Homointegrador. Somente com filtragem de altíssima acurácia e exata decomposição dos sinais é possível calcular os valores eficazes necessários para a atribuição de responsabilidade por conteúdo harmônico. Sendo assim, os algoritmos utilizados para implementação em um controlador digital de sinais devem ser bem elaborados.

7.2 Contribuições

Consideram-se contribuições relevantes para o tema:

- O método de estimação da homotensão do sinal original denominada homotensão $\hat{v}(t)$, equação (9).
- A estimação do sinal de homotensão de ordem k , denominado SWR-DFT Homointegrador, Figura 12 - Filtro SWR-DFT Homointegrador.
- Os fatores:
 - Fator de geração de harmônicos F_{GH} , equação (31);
 - Fator de consumo de harmônicos F_{CH} , equação (32);
 - e a Equivalência unitária da soma de fatores harmônicos, equação (33).
- As equações de responsabilidades por conteúdo harmônico:
 - Responsabilidade por conteúdo harmônico do consumidor $R_{CH\ consumidor}$, equação (34);
 - Responsabilidade por conteúdo harmônico da distribuidora $R_{CH\ distribuidora}$, equação (35).
- O artigo aceito e futuramente publicado em: 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON) – “*Real-time estimator of resistance and reactance values for linear and nonlinear loads in single-phase electric grids with low harmonic distortion voltages*”.

7.3 Sugestões de Trabalhos Futuros

Consideram-se sugestões de trabalhos futuros:

- A implementação em um dispositivo com maior capacidade de memória e processamento, sendo assim capaz de considerar mais ordens harmônicas e obter resultado ainda mais acurados da atribuição de responsabilidade.
- Uma variação do experimento contendo uma fonte de tensão capaz de gerar sinais distorcidos, sendo esta fonte, contribuinte para a retirada de resultados experimentais mais direcionados a cada ordem harmônica.
- Um estimador de responsabilidade, com pós processamento, onde os desafios da velocidade dos processadores possam ser ignorados, ao menos um pouco, focando

na obtenção de um atribuidor de responsabilidades com o maior número de ordens possível.

- Um estudo que compare as diferenças entre um estimador em tempo real, tema deste trabalho, e um estimador com etapa de pós processamento, discutindo a relevância da estimação em tempo real e da pós processada.

8 Referências

- [1] . J.-B. J. Fourier, “Analytical Theory of Heat”.
- [2] N. L. Kusters e W. J. M. Moore, “On the definition of reactive power under non-sinusoidal conditions*,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 5, p. 99, 1980.
- [3] “IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems,” *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, pp. pp.1-29, 2014.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), “Procedimentos de Dist. de Energia Elétrica no Sistema Elétrico nacional (PRODIST): Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica. Brasil,” 2022.
- [5] 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, 2003.
- [6] 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. 885-8993, 2011.
- [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, 2011.
- [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 Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2022.
- [9] 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*, 2018.

- [10] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), “Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico: Sumódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à rede básica. Brasil,” 2020.
- [11] 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.
- [12] ONS - Operador Nacional do Sistema, “Procedimentos de Rede - Módulo 2 – Critérios e Requisitos,” *Procedimentos de Rede*, 2022.
- [13] M. Simões, F. Harirchi e M. Babakmehr, “Survey On Time-domain Power Theories and Their Applications For Renewable Energy Integration In Smart-grids,” *IET Smart Grid*, vol. 2, n° 4, pp. 491-503, 2019.
- [14] 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, 1927.
- [15] S. Fryze, “Moc, Rzeczywista, Urojona i Pozorna w Obwodach Elektrycznych o Przebiegach Odkształconych Prądu i Napięcia,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. vol. XIII, n° 7 e 8, pp. 193-203 i 225-234, 1931.
- [16] F. Buchholz, Das Begriffssystem Rechteistung, Wirkleistung, totale Blindleistung, Selbstverlag Munchen, 1950.
- [17] M. Depenbrock, “The FBD-Method, a generally applicable tool for analyzing power relations,” *IEEE Trans. Power Syst*, vol. vol. 8, p. pp. 381–387, 1993.
- [18] H. Akagi, Y. Kanazawa e A. Nabae, “Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits,” em *IPEC – International Power Electronics Conference pp. 1375-1386*, Tokyo, 1983.
- [19] E. Clarke, “Determination of voltages and currents during unbalanced faults,” *General Electric Review*, vol. Vol. 40, pp. p. 511-513, 1937.
- [20] R. Park, “Two-Reaction Theory of Synchronous Machines – Generalized Method of Analysis Part I,” *AIEE Trans*, vol. Vol. 48, pp. p. 716-727, 1929.
- [21] L. S. Czarnecki, “Currents’ Physical Components (CPC) concept: A fundamental of power theory,” *Int. Sch. Nonsinusoidal Curr. Compens.*, p. pp. 1–11, 2008.

- [22] P. Tenti, H. Paredes, F. Marafão e P. Matavelli, “Accountability in Smart Microgrids Based on Conservative Power Theory. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 60, nº 1, pp. 3058-3069, 2011.
- [23] I. N. Alves, “Atribuição de responsabilidade devido à distorção harmônica em rede elétrica com geração distribuída usando a Teoria da Potência Conservativa,” 2021.
- [24] 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.
- [25] D. F. Fabri, “Uma Proposta de Implementação de um Analisador de Harmônicos Variantes no Tempo,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2011.
- [26] C. H. N. Martins, “Estudo e Implementação de um analisador de harmônicos variantes no tempo,” Tese de Doutorado - Programa de Pós Graduação em Eng. Elétrica, Sistemas Eletrônicos - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, 2015.
- [27] M. F. Pinto, “Sistema inteligente para monitoração, gerenciamento e controle de iluminação pública e análise de parâmetros da rede elétrica,” Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2015.
- [28] L. Czarnecki, “What is wrong with the conservative power theory (CPT),” em *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, Craiova Romênia, 2016.
- [29] L. Cividino, “Power factor, harmonic distortion; causes, effects and considerations,” em *Fourteenth International Telecommunications Energy Conference - INTELEC '92*, Washington, D.C., U.S.A, 1992.
- [30] T. Busarello, A. Mortezaei, A. Péres e M. Simoes, “Application of the Conservative Power Theory Current Decomposition in a Load Power-Sharing Strategy Among Distributed Energy Resources,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, pp. 3771-3781, 2018.

- [31] R. J. Furquim, N. R. Ferreira e F. A. Moreira, “Álgebra de Clifford Aplicada à análise da potência elétrica em circuitos monofásicos em regime não senoidal,” em *V CONAPESC - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Ciências* - www.conapesc.com.br, 2020.
- [32] M. G. Simões, F. Harirchi e M. Babakmehr, “Survey on time-domain power theories their applications for renewable energy integration in smart-grids,” *IET - The Institution of Engineering and Technology - Smart Grid*, vol. Vol. 2, pp. 491-503, 2018.
- [33] V. A. A. Prado, “Medições de potência segundo a Teoria das Potências Conservativas (TPC) E IEEE 1459-2010 Implementadas com reduzida taxa de amostragem.,” UFMS - Universidade Federal do Mato Grosso, Campo Grande, 2021.
- [34] G. A. Pessôa, “Modelagem em espaço de estados aplicado à Fonte Delta de Impedância,” Universidade Estadual de Londrina - Dissertação de Mestrado, Londrina, 2022.