

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA

MATHEUS BRANCO ARCADEPANI

ANÁLISE DO IMPACTO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO NAS
COMPONENTES DE CORRENTE DEFINIDAS PELA CPT E CPC

BAURU - SP

2021

MATHEUS BRANCO ARCADEPANI

**ANÁLISE DO IMPACTO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO NAS
COMPONENTES DE CORRENTE DEFINIDAS PELA CPT E CPC**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas de Energia

Orientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Candido Moreira

BAURU - SP

2021

Arcadepani, Matheus Branco.

Análise do impacto das distorções harmônicas de tensão nas componentes de corrente definidas pela CPT e CPC / Matheus Branco Arcadepani, 2021
148 p.

Orientador: Helmo Kelis Morales Paredes
Coorientador: Alexandre Candido Moreira

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021.

1. Cargas não lineares. 2. Distorções Harmônicas. 3. Domínio da frequência. 4. Teorias de Potência. 5. Distorção Harmônica Total I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de Matheus Branco Arcadepani, discente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia - Câmpus de Bauru.

Aos 09 dias do mês de junho do ano de 2021, às 09:30 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE Mestrado de Matheus Branco Arcadepani, intitulada **ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO E SEU IMPACTO NAS COMPONENTES DE CORRENTE DEFINIDAS PELA CPT E CPC**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba, Prof. Dr. WESLEY ANGELINO DE SOUZA (Participação Virtual) do(a) Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE) / Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR / Campus de Cornélio Procópio, Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFAO (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Instituto de Ciência e Tecnologia - UNESP - Câmpus de Sorocaba. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: Aprovado Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO: **MATHEUS BRANCO ARCADEPANI**

DE: "ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO E SEU IMPACTO NAS COMPONENTES DE CORRENTE DEFINIDAS PELA CPT E CPC"

PARA:

"ANÁLISE DO IMPACTO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO NAS COMPONENTES DE CORRENTE DEFINIDAS PELA CPT E CPC"

Bauru, 09 de junho de 2021.



Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família pelo apoio durante o mestrado. Gostaria de deixar minha gratidão;

Agradeço a Deus por me ajudar a concluir mais uma etapa, com muita força e fé;

Por fim, agradeço também aos meus professores, em especial ao meu orientador Professor Helmo Kelis Morales Paredes e ao meu coorientador Professor Alexandre Candido Moreira, por compartilhar conhecimentos e experiências que me proporcionaram aprendizado para me tornar mestre em Engenharia Elétrica;

RESUMO

Este trabalho propõe analisar e discutir a influência das distorções harmônicas de tensão em cargas monofásicas lineares e não lineares. Através das correntes/potências decompostas das Teorias de Potência conhecidas como CPT do inglês *Conservative Power Theory* e CPC do inglês *Current's Physical Components*, serão analisados e discutidos os efeitos das harmônicas de tensão e seu impacto no valor eficaz total da corrente e nas parcelas decompostas. Além disso, por meio da Distorção Harmônica Total (DHT), verificar a necessidade do uso do domínio da frequência, demonstrando que para um certo valor de DHT não é necessário o uso do domínio da frequência em aplicações práticas. Com auxílio de cálculos teóricos e simulações computacionais serão analisadas e comparadas as diferentes componentes de corrente/potência definidas pela CPC e CPT. Através do software MATLAB/SIMULINK® foram implementados os algoritmos da CPT e CPC para obter as formas de onda e correntes/potências decompostas para análise.

Palavras-chave: Cargas não lineares; Distorções harmônicas; Domínio da Frequência; Teorias de Potência; Distorção Harmônica Total.

ABSTRACT

This work proposes to analyze and discuss the effect of harmonic voltage distortions on linear and nonlinear single-phase loads. Through the decomposed currents/powers of Power Theories known as Conservative Power Theory (CPT) and Current's Physical Components (CPC), the effects of voltage harmonics and their impact on the total rms value of the current and on the decomposed currents will be analyzed and discussed. In addition, with the Total Harmonic Distortion (THD), verify the need to use the frequency domain, demonstrating that for a certain value of THD it is not necessary to use the frequency domain in practical applications. With the theoretical calculations and computer simulations, the different current/power components defined by CPC and CPT will be analyzed and compared. Through the MATLAB/SIMULINK software, the CPT and CPC algorithms were implemented to obtain the decomposed waveforms and currents/powers for analysis.

Index Terms: Nonlinear loads; Harmonic distortions; Frequency domain; Power Theories; Total Harmonic Distortion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de uma carga linear invariante no tempo.....	32
Figura 2 - Modelo de uma carga não linear.....	34
Figura 3 - Circuito simulado da carga RL: a) Caso Senoidal e b) Caso não senoidal.....	43
Figura 4 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPT para carga RL.	56
Figura 5 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPC para carga RL.	57
Figura 6 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHTv para a Carga RL.....	58
Figura 7 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHTv para a Carga RL.....	58
Figura 8 - Circuito simulado da carga RL//C _{1,0} : a) Caso senoidal e b) Caso não senoidal.	60
Figura 9 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPT para carga RL//C _{1,0}	74
Figura 10 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPC para carga RL//C _{1,0}	75
Figura 11 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHTv para a carga RL//C _{1,0}	76
Figura 12 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHTv para a carga RL//C _{1,0}	77
Figura 13 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHTv para a carga RL//C _{0,95}	89
Figura 14 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHTv para a carga RL//C _{0,95}	90
Figura 15 - Circuito simulado da carga FCH: a) Caso senoidal e b) Caso não senoidal.....	92
Figura 16 - Espectro Harmônico da Tensão para a carga FCH (Condição Senoidal).	92
Figura 17 - Espectro Harmônico da Corrente para a carga FCH (Condição Senoidal).....	93
Figura 18 - Espectro Harmônico da Tensão para carga FCH (Condição 1).....	97
Figura 19 - Espectro Harmônico da Corrente para carga FCH (Condição 1).	97
Figura 20 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPT para carga FCH.	109
Figura 21 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPC para carga FCH.	110

Figura 22 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHTv [%] da carga FCH.	111
Figura 23 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHTv [%] da carga FCH.	112
Figura 24 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função de até DHTv = 5% da carga FCH.	112
Figura 25 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função de até DHTv = 5% da carga FCH.	113
Figura 26 - Circuito simulado da carga FTH: a) Caso senoidal e b) Caso não senoidal.	114
Figura 27 - Espectro Harmônico da Tensão para carga FTH (Condição Senoidal).	115
Figura 28 - Espectro Harmônico da Corrente para carga FTH (Condição Senoidal).	116
Figura 29 - Espectro Harmônico da Tensão para carga FTH (Condição 1).	120
Figura 30 - Espectro Harmônico da Corrente para carga FTH (Condição 1).	120
Figura 31 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPT para carga FTH.	132
Figura 32 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPC para carga FTH.	133
Figura 33 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHTv da carga FTH.	134
Figura 34 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHTv da carga FTH.	135
Figura 35 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHTv = 5% da carga FTH.	135
Figura 36 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHTv = 5% da carga FTH.	136
Figura 37 - Corrente total e sinal reconstruído com transitórios para a CPC.	148
Figura 38 - Corrente total e sinal reconstruído sem transitórios para a CPC.	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites das distorções totais de tensão [57].	24
Tabela 2 - Limites das distorções de tensão totais e individuais [17].	25
Tabela 3 - Parâmetros das cargas.	42
Tabela 4 - Dados da carga RL para a condição 0.	45
Tabela 5 - Parâmetros calculados para a carga RL para a condição 1.	46
Tabela 6 - Dados da carga RL para a condição 1.	49
Tabela 7 - Dados da carga RL para a condição 2.	50
Tabela 8 - Dados da carga RL para a condição 3.	51
Tabela 9 - Dados da carga RL para a condição 4.	52
Tabela 10 - Dados da carga RL para a condição 5.	53
Tabela 11 - Dados da carga RL para a condição 6.	54
Tabela 12 - Dados da carga RL para a condição 7.	55
Tabela 13 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPT para a Carga RL.	59
Tabela 14 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPC para a Carga RL.	59
Tabela 15 - Análise comparativa entre as teorias para a carga RL.	60
Tabela 16 - Dados da carga RL//C _{1,0} para o caso senoidal.	63
Tabela 17 - Parâmetros calculados para a carga RL//C _{1,0} para a condição 1.	64
Tabela 18 - Dados da carga RL//C _{1,0} para a condição 1.	67
Tabela 19 - Dados da carga RL//C _{1,0} para a condição 2.	68
Tabela 20 - Dados da carga RL//C _{1,0} para a condição 3.	69
Tabela 21 - Dados da carga RL//C _{1,0} para a condição 4.	70
Tabela 22 - Dados da carga RL//C _{1,0} para a condição 5.	71
Tabela 23 - Dados da carga RL//C _{1,0} para a condição 6.	72
Tabela 24 - Dados da carga RL//C _{1,0} para a condição 7.	73
Tabela 25 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPT para a carga RL//C _{1,0} .	77
Tabela 26 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPC para a carga RL//C _{1,0} .	77
Tabela 27 - Análise comparativa entre as teorias para a carga RL//C _{1,0} .	78
Tabela 28 - Dados da carga RL//C _{0,95} para o caso senoidal.	81
Tabela 29 - Parâmetros calculados da carga RL//C _{0,95} para a condição 1.	81
Tabela 30 - Dados da carga RL//C _{0,95} para a condição 1.	85
Tabela 31 - Dados da carga RL//C _{0,95} para a condição 2.	86
Tabela 32 - Dados da carga RL//C _{0,95} para a condição 3.	86

Tabela 33 - Dados da carga RL//C _{0,95} para a condição 4.....	87
Tabela 34 - Dados da carga RL//C _{0,95} para a condição 5.....	87
Tabela 35 - Dados da carga RL//C _{0,95} para a condição 6.....	88
Tabela 36 - Dados da carga RL//C _{0,95} para a condição 7.....	88
Tabela 37 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT para a carga RL//C _{0,95}	90
Tabela 38 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC para a carga RL//C _{0,95}	90
Tabela 39 - Análise comparativa entre as teorias para a carga RL//C _{0,95}	91
Tabela 40 - Dados da carga FCH para o caso senoidal.	96
Tabela 41 - Dados da carga FCH para a condição 1.	102
Tabela 42 - Dados da carga FCH para a condição 2.	103
Tabela 43 - Dados da carga FCH para a condição 3.	104
Tabela 44 - Dados da carga FCH para a condição 4.	105
Tabela 45 - Dados da carga FCH para a condição 5.	106
Tabela 46 - Dados da carga FCH para a condição 6.	107
Tabela 47 - Dados da carga FCH para a condição 7.	108
Tabela 48 - Variações Percentuais das correntes da CPT para a carga FCH.	113
Tabela 49 - Variações Percentuais das correntes da CPC para a carga FCH.	113
Tabela 50 - Análise Comparativa entre as teorias da carga FCH.....	114
Tabela 51 - Dados da carga FTH para o caso senoidal.	119
Tabela 52 - Dados da carga FTH para a condição 1.....	125
Tabela 53 - Dados da carga FTH para a condição 2.....	126
Tabela 54 - Dados da carga FTH para a condição 3.....	127
Tabela 55 - Dados da carga FTH para a condição 4.....	128
Tabela 56 - Dados da carga FTH para a condição 5.....	129
Tabela 57 - Dados da carga FTH para a condição 6.....	130
Tabela 58 - Dados da carga FTH para a condição 7.....	131
Tabela 59 - Variações Percentuais das correntes da CPT para a carga FTH.....	136
Tabela 60 - Variações Percentuais das correntes da CPC para a carga FTH.	136
Tabela 61 - Análise comparativa entre as teorias para a carga FTH.	137
Tabela 62 – Comparação dos dados da Carga FTH para o caso senoidal.	147

LISTA DE ABREVIATURAS

EPE - Empresa de Pesquisa Energética
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
GD - Geração Distribuída
QEE - Qualidade de Energia Elétrica
CA - Corrente alternada
CC - Corrente contínua
IEEE - Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
FBD - *Fryze, Buchholz e Depenbrock*
CPT – *Conservative Power Theory*
CPC – *Current's Physical Components*
PAC - Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST - Procedimentos de Distribuição
IEC – *International Electrotechnical Commission*
FFT – *Fast Fourier Transform*

LISTA DE SÍMBOLOS

B_e - Reatividade equivalente

B_h - Susceptância de cada ordem harmônica

D - Potência residual

D_a - Potência ativa dispersa

D_r - Potência reativa dispersa

D_g - Potência harmônica gerada pela carga

G_e - Condutância equivalente

G_h - Condutância de cada ordem harmônica

$i_a(t)$ - Corrente ativa

$i_c(t)$ - Corrente do consumidor

$i_d(t)$ - Corrente do distribuidor

$i_r(t)$ - Corrente reativa

$i_s(t)$ - Corrente dispersa

i_v - Corrente residual

i_{ak} - Corrente ativa harmônica de ordem k

i_k - Corrente harmônica de ordem k

i_{rk} - Corrente reativa harmônica de ordem k

i_{ah} - Corrente ativa harmônica

i_{rh} - Corrente reativa harmônica

i_g - Corrente harmônica gerada pela carga

i_{as} - Corrente ativa dispersa

i_{rs} - Corrente reativa dispersa

I_a - Valor RMS da corrente ativa

I_r - Valor RMS da corrente reativa

I_s - Valor RMS da corrente dispersa da CPC

I_{as} - Valor RMS da corrente ativa dispersa

I_{rs} - Valor RMS da corrente reativa dispersa

I_g - Valor RMS da corrente harmônica gerada pela carga

$v_a(t)$ - Tensão de distribuição

$v_c(t)$ - Tensão do consumidor

x_f - Integral no tempo de uma grandeza x

\bar{x} - Valor médio de uma grandeza x

$\hat{x}(t)$ - Integral Imparcial de uma grandeza x

$\|x\|$ - Norma Euclidiana de uma grandeza x

Y_h - Admitância de cada ordem harmônica

λ - Fator de potência

λ_D - Fator de não linearidade

λ_Q - Fator de reatividade

λ_C - Fator de não linearidade do consumidor

φ_h - Diferença angular de cada ordem harmônica

SUMÁRIO

Capítulo 1 - Introdução	17
1.1 Contextualização do Tema.....	17
1.2 Objetivos.....	19
1.3 Estrutura da Dissertação.....	20
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica	21
2.1 Componentes harmônicas e caracterização de carga.....	21
2.2 Normas Regulatórias sobre a distorção de tensão.....	23
2.3 Teorias de Potência.....	27
Capítulo 3 - Fundamentação Teórica: CPC e CPT	31
3.1 Definição das expressões matemáticas.....	31
3.2 Teoria das Componentes Físicas de Correntes (CPC).....	31
3.3 Teoria da Potência Conservativa (CPT).....	36
Capítulo 4 – Resultados das Simulações	41
4.1 Parâmetros das simulações.....	41
4.2 Resultados e discussões.....	42
Capítulo 5 - Conclusões Finais	138
5.1 Continuidade do Trabalho.....	139
5.2 Publicações realizadas pelo autor.....	140
Referências Bibliográficas	141
Apêndice A	147

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Contextualização do Tema

O conceito de eficiência energética, segundo discutido pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [1] significa que “um mesmo serviço poderia ser obtido com menor gasto de energia e, conseqüentemente com menores impactos econômicos, ambientais, sociais e culturais”. Devido a esta definição, a inserção de fontes renováveis e/ou alternativas de energia na matriz energética dos países aumentou, evoluindo para outro termo comumente chamado de “Geração Distribuída (GD)” e mais recentemente para “Microrredes” [2], [3].

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [4]: *“a GD é caracterizada pela instalação de geradores de pequeno porte, normalmente a partir de fontes renováveis ou mesmo utilizando combustíveis fósseis, localizados próximos aos centros de consumo de energia elétrica”*. Em 2012, com a resolução normativa nº 482/2012 [5], a ANEEL criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, neste momento o consumidor começou a gerar sua própria energia e fornecer o excedente para a rede de distribuição [6], permitindo assim a geração distribuída local. Em 2015, a norma nº 482/2012 é atualizada para simplificar o processo de conexão da micro ou minigeração distribuída na rede de distribuição e incentivar ainda mais a utilização da energia solar fotovoltaica no sistema elétrico, logo, as novas regras foram estabelecidas pela resolução normativa nº 687/2015 [7].

A integração de geradores distribuídos ao sistema elétrico impõe desafios normativos não somente na conversão de energia elétrica, mas também no controle e gerenciamento da energia gerada, na proteção dos sistemas elétricos e dos usuários, e na monitoração e controle da qualidade da energia elétrica (QEE). Em termos da QEE, tem impulsionado o desenvolvimento de topologias de conversores e técnicas de controle que visem compensar os distúrbios existentes na rede, mediante os denominados serviços auxiliares ou multifuncionalidade dos conversores [8]-[12].

Por outro lado, as cargas não lineares (amplamente difundidas no mercado industrial e doméstico) que distorcem as formas de onda da tensão e corrente, sempre estiveram presentes no sistema elétrico em maior ou menor escala. Com a introdução dos dispositivos chaveados eletronicamente, no entanto, o grau de distorção produzido aumenta significativamente, gerando a necessidade de constantes verificações dos níveis harmônicos presentes no sistema.

Na atualidade, os sistemas de conversão CA/CC constituem ainda a principal fonte de contaminação harmônica da rede elétrica. Os retificadores são caracterizados pela conexão direta a um filtro capacitivo. Esta solução, embora de custo reduzido, produz uma forma de onda de corrente tipo impulsiva, e conseqüentemente uma elevada distorção harmônica. Dada a grande quantidade deste tipo de carga (fonte harmônica) espalhada por toda a rede (aparelhos eletrodomésticos, computadores pessoais, celulares, tablets, reatores eletrônicos para lâmpadas, dentre outros), o efeito combinado pode ser significativo [13]-[18], podendo criar uma série de perturbações (ressonâncias, sobreaquecimentos, erros de medição, vibrações em máquinas, dentre outros) para os autoprodutores (usuários que consomem e geram sua própria energia) e para as concessionárias [13], [17], [18]. Assim, na situação atual, o efeito das cargas que produzem distorções tem um maior impacto nas redes de baixa tensão e de média tensão.

Como conseqüência da integração das cargas lineares e não lineares, e a inserção de sistemas de geração conectados à rede elétrica, podem surgir novos desafios e impactos na QEE, em que os códigos de distribuição que determinam penalidades mediante os indicadores de QEE tradicionais, como, fator de potência, distorção harmônica total e fator de desequilíbrio precisam ser reanalisados e revistos. Portanto, é necessário estabelecer uma nova regulamentação que seja válida para todos os agentes do setor elétrico, redefinindo limites para a injeção de harmônicas e/ou desequilíbrios de tensão e corrente nos sistemas elétricos [19], [20]. Desta forma, o aprimoramento da pesquisa relacionada à identificação e propagação de harmônicos em sistemas elétricos, assim como o monitoramento e análise da QEE é uma temática atual e relevante para a implantação das denominadas redes inteligentes (*Smart Grids*), que vem se destacando no Brasil e no Mundo [21].

A análise da QEE e a definição do que deve ser atribuído para o usuário e a concessionária depende da correta identificação das componentes das tensões e correntes que contribuem para a degradação da QEE, neste contexto, entre muitas ferramentas para este fim, surgiram diversos estudos às denominadas teorias de potência [22]-[48], com o intuito de apresentar definições e decomposições de corrente e potências em condição senoidal e não senoidal, entretanto, cada teoria possui uma particularidade e foram definidas para aplicações específicas como: tarifação, compensação e entre outros. Teve-se início em 1865 com *Maxwell* apresentando o conceito de defasagem, ou seja, deslocamento de fase [27]. Em 1888, *Shallenberger* demonstrou os fenômenos de oscilação de potência [28] e em 1894, *Houston* e *Kenenlly* começaram a produzir trabalhos científicos utilizando o termo de “fenômeno de distorção” para as harmônicas [29]. Em 1897, *Steinmetz* propôs as definições das potências aparente, ativa e reativa e do fator de potência [30]. Desde então, com o passar dos anos,

diversas teorias de potências foram propostas e importantes contribuições na área de circuitos elétricos sob condição não senoidal foram relatadas [22], [23]. Algumas das mais importantes teorias, no domínio do tempo e no domínio da frequência foram apresentadas por: *Budeanu, Fryze, Depenbrock, Akagi, Czarnecki, Tenti e IEEE 1459*.

Através de uma pesquisa nos diferentes veículos de divulgação científica (periódicos e conferências) pode ser verificada uma série de estudos comparativos entre tais teorias. Recomenda-se as referências [41], [42] para as teorias FBD, pq e CPT e as referências [49], [50] para as teorias FBD, pq, CPT e *IEEE Std 1459*. Todas estas propostas têm contribuído para a compreensão sobre a modelagem e análise dos circuitos elétricos lineares e não lineares sob condição não senoidal. No entanto, estes estudos ainda não estão em uma forma de satisfazer a análise focada no impacto da distorção harmônica da tensão nas componentes de corrente/potência decomposta, principalmente das teorias CPC e CPT. Além do mais, ainda não há estudos sobre análises comparativas entre as teorias CPC e CPT, logo, o intuito de utilizá-las neste trabalho é verificar a separação que ambas as teorias fazem entre a fonte (distribuidor) e a carga (consumidor) através das correntes/potências decompostas. Assim, esta dissertação também traz um estudo preliminar sobre questões de atribuição de responsabilidades devido às distorções harmônicas, ou seja, necessidade de compreender a origem das distorções harmônicas e avaliar o impacto nas componentes de corrente/potência. Destaca-se que, neste trabalho não serão considerados casos de estudo com GD, ou seja, cargas (usuários) que geram sua própria energia.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é, através das teorias CPC e CPT analisar e verificar como as distorções harmônicas de tensão influenciam na operação de circuitos monofásicos contendo cargas lineares e não lineares, de modo a evitar interpretações equivocadas dos fenômenos de potência e sua respectiva interpretação física. Assim, através das componentes de corrente/potência decomposta pela CPT e CPC e principalmente pelas componentes dispersas definidas nas duas teorias, é possível observar o efeito da distorção harmônica de tensão e seu impacto no valor eficaz total da corrente e nas outras parcelas de corrente/potência decompostas. Além disso, por meio dos limites da distorção harmônica total (DHT), estabelecidos pelas normas nacionais e internacionais, verificar a necessidade do uso do domínio da frequência para decompor a corrente residual da CPT. Para tanto, além dos cálculos teóricos, implementou-se através do software MATLAB/SIMULINK® os algoritmos da CPT e CPC para obter as correntes/potências decompostas e as formas de onda da tensão e corrente.

1.3 Estrutura da Dissertação

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica. Nesse capítulo serão apresentadas algumas pesquisas como artigos, dissertações e tese nas áreas de teorias de potência, atribuição de responsabilidade e caracterização de cargas lineares e não lineares. O objetivo deste capítulo é mostrar e discutir as referências utilizadas neste trabalho.

O Capítulo 3 mostra os equacionamentos e os conceitos utilizados pelas teorias de potência CPT e CPC para avaliar como as distorções harmônicas de tensão podem afetar as correntes decompostas pela CPT e CPC.

O Capítulo 4 apresenta os casos e os diferentes circuitos elétricos simulados com o intuito de analisar, compreender e verificar o comportamento das distorções harmônicas de tensão e seu impacto no valor das parcelas decompostas pela CPT e CPC, apresentando os resultados obtidos através de tabelas e formas de onda para cada carga simulada.

O Capítulo 5 mostra as conclusões dos estudos de casos apresentados e os trabalhos futuros que podem complementar este trabalho.

Neste sentido, no capítulo a seguir, serão apresentadas as revisões bibliográficas (artigos, pesquisas e normas) que auxiliaram na realização deste trabalho, proporcionando embasamento teórico no tema proposto.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

No contexto discutido anteriormente, este capítulo tem o objetivo de apresentar alguns artigos e pesquisas relacionados ao tema da dissertação, como por exemplo, estudos nas áreas de distorções harmônicas, metodologias de atribuição de responsabilidades, caracterização de cargas lineares e não lineares, as normas referentes às distorções harmônicas e as teorias de potência.

2.1 Componentes harmônicas e caracterização de carga

Em Deckmann e Pomilio [51], mostra-se a definição, causas e consequências das distorções harmônicas no sistema elétrico. Tal efeito é definido como uma deformação na forma de onda da corrente ou tensão provocado por uma carga não linear (equipamentos eletrônicos) ou por uma carga que possui uma relação não linear entre tensão e corrente (transformadores e motores). Esta deformação ocorre de forma semelhante em cada ciclo da frequência fundamental. Suas consequências no sistema elétrico são sobreaquecimento de capacitores, vibrações e ruídos em máquinas rotativas, erros de medições, diminuição da vida útil do equipamento e dentre outros.

Em Paredes et al (2007) [52], utilizando circuitos monofásicos lineares e não lineares, foi discutido e mostrado como as distorções harmônicas pode influenciar na tarifação de energia elétrica. Para cargas lineares, a potência ativa fundamental (P_1) resulta menor que a potência ativa total ($P > P_1$), logo a potência harmônica é positiva ($P_H = \sum_{h=2}^{\infty} P_h$). Já para cargas não lineares, a potência ativa fundamental resulta maior que a potência ativa total ($P < P_1$), tornando a potência harmônica negativa ($P_H = P - P_1 < 0$). Com isso, foi demonstrado que, do ponto de vista de tarifação seria mais justo tarifar a componente fundamental da potência ativa (P_1) e não a potência ativa total (P). Destaca-se que, a potência ativa harmônica ($P_H = \sum_{h=2}^{\infty} V_h I_h \cos \phi_h$) só existirá se no PAC houver componentes harmônicas de ordens comuns entre a tensão e a corrente. Portanto, quando a tensão no PAC é senoidal P_H resulta nulo. Daí a necessidade de avaliar e discutir como as harmônicas de tensão no PAC influenciam nas demais grandezas envolvidas na análise dos circuitos elétricos.

Outro aspecto discutido é à interação harmônica entre as cargas lineares e não lineares. Considerando uma carga linear e não linear ligados no mesmo PAC, assim sendo, a carga linear estará sujeita as distorções harmônicas impostas pela tensão e, dessa maneira, absorve potência harmônica (P_H). Agora, no caso de duas cargas não lineares ligadas no mesmo PAC pode

originar um cancelamento mútuo entre determinadas ordens harmônicas ou até mesmo uma amplificação das harmônicas. Portanto, o estudo em Marafão, Paredes e Silva [42] traz um questionamento sobre como atribuir responsabilidades na geração de harmônica de tensão de forma mais justa, pois surge o dilema: se o consumidor (carga linear) é tarifado pela potência ativa total (P), pagará por uma parcela de potência indesejada adicional (P_H). No entanto, se for taxada pela potência ativa fundamental (P_1), a concessionária terá que arcar com P_H que é devido às distorções de tensão que está sendo imposta pela carga não linear.

Em Tenti et al (2011) [53], através de simulações computacionais e teste experimental contendo cargas lineares e não lineares alimentadas com tensões senoidais e não senoidais, é abordado uma metodologia para discriminar as contribuições harmônicas entre o supridor (fonte) e o usuário (carga) através das parcelas de potência da CPT. Neste estudo, desconsiderando o efeito da impedância de linha, foi proposta uma abordagem para modelar a carga de uma forma que permite separar a responsabilidade no fornecimento de potência ativa, reativa, desbalanço e residual (distorção). Já em Tenti et al (2014) [54], o mesmo problema é abordado, porém é incluído o efeito da impedância de linha. Para fazer isto, foi proposta uma estratégia para estimar os parâmetros da impedância de linha. Mostrou-se que a estimativa das parcelas de potência associadas a carga nunca é pior do que as medidas no PAC, evitando assim a sobre penalização das cargas. No entanto, nos trabalhos precedentes não foi verificado a influência da distorção harmônica de tensão nas parcelas de corrente/potência frente aos limites estabelecidos pelas normas. Assim, a seguinte seção traz, de forma resumida, as principais normas nacionais e internacionais que limitam as distorções de tensão.

Em relação à caracterização de carga, trabalhos como Paredes, Reis e Deckmann [20] e Reis [55], propõem metodologias para identificar os parâmetros de cargas lineares e não lineares, os quais podem ser representados por circuitos série ou paralelo contendo resistência-capacitor e uma fonte de tensão harmônica ou condutância-susceptância e uma fonte de corrente harmônica. Neste caso, a caracterização da carga, tipo fonte de tensão harmônica ou tipo fonte de corrente harmônica é realizada pelo sinal da energia reativa. Além disso, também foi verificado que a energia/potência reativa está associada à defasagem da corrente em relação à tensão independentemente de quem o provoca, seja por elementos que armazenam energia (indutores e capacitores) ou cargas não lineares controladas por chaves eletrônicas, resistores controlados a Triac e controle de ângulo em retificadores são alguns exemplos. Por outro lado, em Paredes et al (2007) [52], também foi demonstrado que as cargas não lineares influenciam na operação de cargas vizinhas, podendo alterar o funcionamento e comportamento de cargas lineares.

Em relação a atribuição de responsabilidades, em Rodrigues et al [56] é realizada uma análise comparativa entre duas metodologias, Método do Capacitor Chaveado¹ e a CPT, para atribuir responsabilidades na geração de harmônicas de tensão no PAC. O sistema elétrico simulado foi considerando a rede (supridor) e um conjunto de três indústrias (carga). Através dos resultados, pode-se atribuir as contribuições de responsabilidade em porcentagem de cada indústria na geração de distorção harmônica de tensão no PAC. No entanto, apesar dos resultados para ambos os métodos serem similares, diferente da CPT que requer apenas a medição de tensão e corrente nos pontos de interesse, o método do capacitor chaveado, trata-se de um método invasivo que além da necessidade da instalação de um elemento físico (capacitor) no sistema elétrico que pode causar efeitos prejudiciais, há necessidade de definir os protocolos de medição e a manobra muito cuidadosos do chaveamento do capacitor. Portanto, além do custo do capacitor este método pode resultar em modificações nos modelos dos circuitos, na frequência fundamental e principalmente no fluxo de potência reativa do sistema elétrico.

Conforme discutido e apresentado anteriormente, observa-se que as distorções de tensão possuem um fator importante para a área da QEE, com isso, deve-se estabelecer limites para a injeção de harmônicas na tensão. Logo, a seguir serão apresentadas as normas no âmbito nacional e internacional que regulamentam as distorções harmônicas na tensão.

2.2 Normas Regulatórias sobre a distorção de tensão

Os níveis de distorção harmônica podem ser caracterizados mediante o espectro harmônico contendo as amplitudes e ângulos de fase para cada ordem harmônica individual. Além disso, é muito comum usar valores de referência (percentual) do valor da Distorção Harmônica Total (DHT) como uma medida do nível de distorção num PAC por exemplo. Para limitar os níveis de distorção harmônica de tensão nas instalações são utilizados os valores definidos pelas normas e padrões. Neste sentido, nas correntes/potências decompostas, o DHT é um índice que pode auxiliar, por exemplo, para verificar até qual porcentagem de DHT de tensão podem ser realizados os cálculos apenas no domínio do tempo, e a partir de qual porcentagem haveria necessidade do uso do domínio da frequência. A seguir serão apresentadas normas nacional e internacional, com o intuito de comparar os valores de referências utilizados e auxiliar na criação dos casos de simulações computacionais, apresentados no capítulo 4.

¹ Método baseado no chaveamento do capacitor, em que realiza a medição da tensão e corrente antes e depois da inserção do capacitor no circuito. Através desta técnica, é possível atribuir responsabilidade sem a necessidade do conhecimento das impedâncias harmônicas da rede.

2.2.1 PRODIST

No Brasil, a ANEEL mediante o Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [57], determina os valores limites para a distorção harmônica total. Tais valores são utilizados como referência e, por enquanto, não são aplicadas penalidades para os valores além do permitido. Os indicadores mostram a distorção total de tensão que estão relacionadas aos 5% das piores leituras de um conjunto de 1008 leituras válidas, utiliza-se do percentil² 95 para realizar estes cálculos. A Tabela 1 apresenta os limites estabelecidos para as distorções harmônicas. O PRODIST substitui o termo DHT por Distorção Total de Tensão (DTT).

Tabela 1 - Limites das distorções totais de tensão [57].

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _p 95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _i 95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT ₃ 95%	6,5%	5,0%	3,0%

onde:

- $DTT_{95\%}$ é a distorção total de tensão que foi ultrapassado em apenas 5% das 1008 leituras válidas;
- $DTT_p 95\%$ é a distorção total de tensão para as harmônicas pares não múltiplas de 3 que foram ultrapassadas em apenas 5% das 1008 leituras válidas;
- $DTT_i 95\%$ é a distorção total de tensão para as harmônicas ímpares não múltiplas de 3 que foram ultrapassadas em apenas 5% das 1008 leituras válidas;
- $DTT_3 95\%$ é a distorção total de tensão para as harmônicas múltiplas de 3 que foram ultrapassadas em apenas 5% das 1008 leituras válidas.

O cálculo dos índices de DTTs é descrito abaixo:

$$DTT_{95\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{m\acute{a}x} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (1)$$

² Percentil é uma medida que divide o conjunto de dados em 100 partes iguais.

$$DTT_p 95\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

$$DTT_i 95\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (3)$$

$$DTT_3 95\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (4)$$

tal que, V_1 é a tensão fundamental, V_h é a tensão harmônica de ordem h , h_p é todas as ordens harmônicas pares não múltiplas de 3 ($h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, \dots$), h_i é todas as ordens harmônicas ímpares não múltiplas de 3 ($h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, \dots$), h_3 é todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ($h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, \dots$).

2.2.2 Norma IEEE 519-2014

No âmbito internacional temos a Norma IEEE 519-2014 [17], que define os limites para as distorções harmônicas de tensão, os quais se referem aos valores medidos no PAC. Esta norma, em conjunto com a concessionária e o consumidor, estabelece limites de harmônicas na tensão no ponto de entrega de energia (PAC), diminuindo o impacto causado pela inserção das cargas não lineares. Tais valores variam de acordo com o nível de tensão PAC [18]. A Tabela 2 mostra os limites estabelecidos pela norma.

Tabela 2 - Limites das distorções de tensão totais e individuais [17].

Tensão de barramento no PAC	Harmônica Individual (%)	DHT (%)
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8,0
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5,0
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5 ^a

^aOs sistemas de alta tensão podem ter até 2 % de DHT, onde a causa é um sistema HVDC.

A concessionária de energia deve entregar a tensão especificada em contrato, desde que as correntes harmônicas dos consumidores sejam restritas. Assim sendo, o DHT da tensão no PAC é calculado conforme (5):

$$DHT(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^h V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (5)$$

tal que V_1 é a componente fundamental da tensão e V_h são as ordens harmônicas da tensão.

2.2.3 Norma IEEE 1547-2018

Outra norma a nível internacional que limita as distorções harmônicas é a IEEE 1547-2018 [58], no entanto esta norma é direcionada para especificar limites de distorção harmônica para a interconexão e a interoperabilidade entre os sistemas elétricos de potência e os recursos energéticos distribuídos (DER). Embora a norma não defina limites específicos para a distorção de tensão, limita a distorção de corrente que pode ser provocada pela distorção de tensão existente antes da conexão do DER na rede elétrica. Dentro deste contexto, a norma prevê um índice denominado de TRD do inglês *Total Rated Current Distortion* devido à distorção de tensão existente. Portanto, o TRD máximo de corrente que a norma indica é de 5%, e pode ser calculado conforme:

$$TRD(\%) = \frac{\sqrt{I_{RMS}^2 - I_1^2}}{I_{nominal}} \times 100 \quad (6)$$

onde, I_{RMS} é a corrente eficaz (RMS) do DER, I_1 é a corrente fundamental e $I_{nominal}$ é a corrente nominal do DER, respectivamente.

Neste trabalho, a tensão é menor que 1 kV, logo, pelas Tabelas 1 e 2, nota-se que a norma IEEE 519-2014 possui um rigor maior para limitar a distorção de tensão total que o PRODIST, a norma IEEE 519 limita em 8% o DHT_v , já o PRODIST limita em 10%. Para as harmônicas individuais, o IEEE limita em 5%, diferentemente do PRODIST que não limita as harmônicas individualmente. Outra diferença entre as normas é que o IEEE também estabelece limites para distorções harmônicas de corrente e o PRODIST apenas limita a distorção de tensão. Por outro lado, devido à inserção massiva dos DER nos sistemas elétricos, a norma IEEE 1547 mostra claramente a preocupação com as distorções harmônicas de corrente provocadas pelas distorções harmônicas impostas pela tensão no PAC. Portanto, há necessidade de estudos visando levantar discussões sobre como as distorções harmônicas de tensão influenciam nas correntes medidas nos diferentes pontos do sistema de potência.

No entanto, diferente das normas anteriores que olham para o sistema de potência, outras normas internacionais, como a IEC 61000-3-2 [59] abordam o assunto das distorções harmônicas na origem, ou seja, limita a distorção harmônica de corrente diretamente no dispositivo que o origina.

A correta identificação das harmônicas geradas das partes envolvidas (supridor ou consumidor) permite a execução dos procedimentos de mitigação de harmônicas de forma justa,

logo, para esta correta identificação e interpretação das tensões e correntes harmônicas, há necessidade de entender e interpretar as denominadas teorias de potências.

2.3 Teorias de Potência

Ao longo do tempo, diferentes autores estudaram e desenvolveram definições de corrente e potência, com o objetivo de estabelecer uma teoria que se aplique em condições não senoidais e assimétricas [22]-[48]. Com isso, as teorias foram desenvolvidas no domínio da frequência, baseada nas tensões e correntes de cada ordem harmônica, aplicadas principalmente em sistemas de medição e tarifação, e no domínio do tempo, baseada em correntes instantâneas, aplicada principalmente em compensação de distúrbios [23]. A seguir serão brevemente discutidas as principais teorias de potência.

➤ Domínio da frequência:

- *Budeanu* (1927) [31]: apresentou uma nova potência, chamada de potência de distorção, realizando a decomposição da potência aparente em ativa (P), reativa (Q_B) e distorção (D_B) para circuitos monofásicos sob condição não senoidais. Com base em circuitos elétricos particulares *Czarnecki* [32] demonstrou algumas limitações na teoria como: a compensação de reativos não pode ser feita através de Q_B e a definição de D_B não tem relação com as distorções harmônicas de corrente e tensão.

Essas limitações podem ser explicadas devido as potências P , Q_B e D_B , não atendem a propriedade de ortogonalidade³. Portanto, podem existir várias parcelas de corrente no domínio da frequência que levam ao mesmo valor de Q_B ou D_B , comprometendo assim a interpretação e o significado físico de Q_B e D_B . Uma solução para resolver as limitações da teoria de *Budeanu* seria, com base nas definições de P , Q_B e D_B , definir parcelas de corrente que sejam ortogonais entre si, assim seria garantido que há apenas uma parcela de corrente associada a cada termo de potência.

- *Czarnecki* (1988) [24]: proposta para circuitos monofásicos e trifásicos sob condição não senoidal, que evoluiu para a chamada teoria CPC do inglês *Current's Physical Components* [25]. Nas definições da teoria, o autor associa

³ As grandezas x e y são ditas ortogonais entre si, quando o produto interno entre elas é igual a zero:

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t)dt = 0$$

os termos de potência ao comportamento do circuito elétrico, ou seja, as correntes decompostas são ortogonais entre si e estão associadas aos fenômenos físicos como: reativos, harmônicos, desbalanço de carga (circuitos trifásicos) e potência ativa. Para cargas lineares, a corrente é decomposta em ativa, reativa e dispersa, onde a corrente dispersa está relacionada aos harmônicos da tensão. Para cargas não lineares, incrementa-se a corrente gerada pelo consumidor, relacionada aos harmônicos da corrente. Além disso, tal teoria pode ser utilizada para monitoração/tarifação de energia e compensação de distúrbios [26]. No entanto, por se tratar de uma teoria no domínio da frequência, a análise limita-se as harmônicas (múltiplas inteiras da fundamental). Eventuais inter-harmônicas (múltiplos não inteiros da fundamental) são desconsiderados na análise, assim como possíveis variações da frequência de linha.

- *IEEE STD 1459* (2000/2010) [33]-[36]: as discussões começaram em 1995 [33], [34] e, após uma série de discussões e contribuições de diversos pesquisadores, no ano 2000 foi publicada a primeira versão da norma, chamada de *IEEE STD 1459-2000* [35], abordando os cálculos de termos de potências em circuitos monofásicos e trifásicos (três e quatro condutores) sob condição não senoidais e desequilibrados. Em 2010, teve-se uma revisão e foi republicado como *IEEE STD 1459-2010* [36]. Na norma para sistemas trifásicos sem e com condutor de neutro é apresentando o conceito de potência aparente efetiva (S_e) e fator de potência ($FP = P/S_e$). Similarmente a teoria de *Budeanu*, os termos de potência são decompostos com base nas componentes fundamentais e harmônicas da tensão e corrente para o caso monofásico e no caso trifásico acrescentasse a decomposição da sequência positiva. Assim, S_e é decomposto em: potência ativa (P) e potência não ativa (N). Além disso, S_e apresenta componentes: fundamental (S_{e1}), fundamental de sequência positiva (S_1^+), fundamental de desbalanço (S_{U1}) e não fundamentais (S_{eN} e S_{eH}). A potência ativa P é decomposta em: fundamental de sequência positiva (P_1^+) e harmônica (P_H). Já as componentes associadas a potência N são: reativa fundamental de sequência positiva (Q_1^+) e componentes não fundamentais (D_{eI} , D_{eV} e D_{eH}). No caso de circuitos monofásicos só há componentes fundamentais (S_1 , P_1 e Q_1) e não fundamentais (S_N , S_H , P_H , D_I , D_V e D_H). Portanto, a norma limita-se sua aplicação para medição de grandezas de potência sob condição senoidal equilibrada e não

senoidal desequilibradas [36]. Além disso, não foram definidos termos de correntes ortogonais entre si que possam ser associados aos diferentes termos de potência definidos pela norma.

➤ Domínio do tempo:

- *Fryze* (1931/1932) [37]: utilizando a propriedade de ortogonalidade introduziu a primeira decomposição da corrente instantaneamente em: corrente ativa (i_a) e corrente não ativa (i_{na}). Tal teoria foi desenvolvida para circuitos monofásicos tal que, i_{na} aglomera todas as correntes indesejadas do circuito (reativos e harmônicas), logo não é possível distinguir o que é reativo e harmônico. Por outro lado, por serem ortogonais as componentes i_a e i_{na} , a teoria permite o emprego de filtros ativos de potência para compensar i_{na} e melhorar instantaneamente o fator de potência (minimiza a circulação de reativos e o conteúdo harmônico de corrente).
- *Depenbrock* (1962/1993) [39], [40]: embora o equacionamento original da teoria tenha sido apresentado em alemão no ano de 1962, esta teoria só passou a ser conhecida e referenciada após sua publicação no IEEE em 1993 [39]. Esta teoria é conhecida como *Teoria FBD* por que reúne as contribuições de *Fryze* [37], *Buchholz* [38] e do próprio *Depenbrock* [40]. A teoria FBD estabeleceu a base para a decomposição ortogonal da corrente instantânea em circuitos polifásicos (m condutores). Além disso, indica que o neutro deve ser tratado como um condutor de fase e não apenas como a referência das tensões de fase, como normalmente é realizado. Assim, utilizando o conceito de valores coletivos introduzido por *Buchholz* [38] que inclui a corrente do neutro e a tensão do neutro (medida em relação a um ponto externo do circuito), a teoria FBD propõe a decomposição da corrente em: corrente ativa (i_{am}), corrente não ativa (i_{nam}), correntes de potência (i_{pm}), correntes de potência zero (i_{zm}) e correntes de variação (i_{vm}). Do ponto de vista de compensação as componentes i_{vm} e i_{zm} podem ser muito úteis para melhorar a QEE. No entanto, a interpretação de fenômenos físicos é comprometida, visto que, i_{vm} e i_{zm} combinam os efeitos dos reativos, desequilíbrio e harmônicas [41], [42].
- *Akagi et al.* (1983) [43]-[46]: conhecida como *Teoria pq* foi desenvolvido para sistemas trifásicos a três e quatro condutores [44]. Semelhante à *Teoria FBD*, tem sua origem na área de compensação de distúrbios, porém a *Teoria pq* utiliza

a transformação de Clarke para decompor a corrente em: corrente instantânea ativa média ($i_{\bar{p}m}$), corrente instantânea ativa oscilatória ($i_{\tilde{p}m}$), corrente instantânea reativa (i_{qm}) e corrente instantânea de sequência zero (i_{0m}). As componentes $i_{\tilde{p}m}$ e i_{qm} , do ponto de vista de compensação podem ser aplicadas de forma semelhante às componentes i_{vm} e i_{zm} da *Teoria FBD*. Além disso, sob condições de tensões senoidais e equilibradas as componentes i_{vm} e i_{zm} da *Teoria FBD* e as componentes $i_{\tilde{p}m}$ e i_{qm} da *Teoria pq* são equivalentes, ou seja, $i_{vm} = i_{\tilde{p}m}$ e $i_{zm} = i_{qm}$. Já para tensões não senoidais e/ou desequilibrada perde-se as equivalências [41]. Portanto, como não é possível associar os fenômenos físicos com as correntes decompostas, tais teorias não permite separar e identificar a origem da deterioração da QEE quando vários distúrbios estão presentes simultaneamente.

- *Tenti, et al.* (2003/2010) [47], [48]: conhecida como CPT do inglês *Conservative Power Theory*, inicialmente foi desenvolvido para circuitos monofásicos [47] e posteriormente expandido para circuitos polifásicos. Com base nas leis de tensões e corrente de Kirchhoff assim como no teorema de Tellegen, a CPT decompõe a corrente instantânea em: corrente ativa balanceada (i_{am}^b), corrente reativa balanceada (i_{rm}^b), corrente de desbalanço (i_m^u) e corrente residual (i_{vm}), tal que, cada componente é associado a um fenômeno físico, ou seja, transferência de potência entre a fonte e carga, reativos, desbalanço de carga e não linearidade entre as tensões e correntes (harmônicas). Além disso, a componente i_{vm} ainda pode ser decomposta em três parcelas, correntes ativa e reativa dispersa (i_{sam} e i_{srm}) e corrente harmônica gerada (i_{gm}) pela carga [22]. Na última década, a CPT tem sido empregada para diversas aplicações como: tarifação e caracterização de cargas [20], estratégias de compensação em redes convencionais e microrredes [10]-[12] e atribuição de responsabilidades [53].

Além da análise que foi apresentada anteriormente, conforme discutido na seção introdutório deste trabalho, ainda não há estudos sobre análises comparativas entre os métodos denominados CPT e CPC. Assim, no próximo capítulo serão apresentados os equacionamentos das teorias CPT e CPC e sua associação/interpretação de cada corrente decomposta com um fenômeno físico distinto (reativos e harmônicas), principalmente a corrente dispersa que está relacionada a distorção de tensão.

Capítulo 3 - Fundamentação Teórica: CPC e CPT

Neste capítulo serão apresentadas as expressões matemáticas utilizadas nas teorias CPC e CPT e suas metodologias de cálculos de correntes e potências, relacionando cada parcela de corrente a um fenômeno físico distinto, principalmente, as distorções harmônicas de tensão.

3.1 Definição das expressões matemáticas

As expressões matemáticas para auxiliar nos cálculos são:

- Integral no Tempo: é o limite do somatório de cada valores que a grandeza x atribui no tempo.

$$x_f = \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (7)$$

- Valor médio: é a integral no período T de $x(t)$.

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (8)$$

- Integral imparcial: é a integral no tempo sem o seu valor médio.

$$\hat{x}(t) = x_f(t) - \bar{x}(t) \quad (9)$$

- Produto interno: é a integral do produto entre duas grandezas x e y no período T .

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t) dt \quad (10)$$

- Norma Euclidiana: é a raiz quadrada do produto interno de x . Neste caso a norma resulta equivalente ao valor eficaz da x .

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = X \quad (11)$$

3.2 Teoria das Componentes Físicas de Correntes (CPC)

Essa teoria é proposta por *Czarnecki* e modelada no domínio da frequência para sistemas monofásicos e trifásicos. O autor utiliza valores médios e instantâneos para definir componentes de corrente e potência [24], [25], [60].

Primeiramente, considerando uma carga linear invariante no tempo, alimentado por uma fonte de tensão conforme mostrado na Figura 1, à tensão e sua respectiva corrente são dados por:

$$v(t) = V_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \left(\sum_{h \in H} V_h e^{jh\omega_1 t} \right) \quad (12)$$

$$i(t) = Y_0 V_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \left(\sum_{h \in H} Y_h V_h e^{jh\omega_1 t} \right) \quad (13)$$

onde V_0 e I_0 são os valores CC das grandezas $v(t)$ e $i(t)$, h é a ordem harmônica, H contabiliza o conjunto de harmônicos presentes no circuito, V_h é a tensão de cada ordem harmônica, Y é a admitância da carga, j é a unidade imaginária e ω_1 é a frequência angular da fundamental.

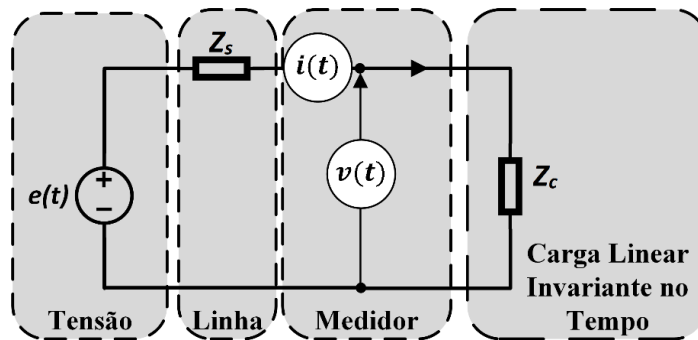


Figura 1 - Modelo de uma carga linear invariante no tempo.

Para realizar a análise da carga no domínio da frequência, a admitância (Y_h) é representada em função da condutância, G_h (parte real de Y_h) e a susceptância, B_h (parte imaginária de Y_h) e calculadas para cada ordem harmônica.

$$Y_h = G_h + jB_h \quad (14)$$

Utilizando (13) e (14), a corrente total é decomposta em três parcelas de correntes: ativa, reativa e dispersa.

A corrente ativa $i_a(t)$ é definida igual a definição estabelecida por Fryze [37], em que G_e é a condutância equivalente ($G_e = \frac{P}{V^2}$).

$$i_a(t) = G_e v(t) = G_e V_0 + \sqrt{2} \operatorname{Re} \sum_{h \in H} G_e V_h e^{jh\omega_1 t} \quad (15)$$

Para encontrar as parcelas reativa e dispersa, basta subtrair a corrente ativa (15) da corrente total (13):

$$i(t) - i_a(t) = (Y_0 - G_e)V_0 + \sqrt{2}Re \sum_{h \in H} (G_h + jB_h - G_e)V_h e^{jh\omega_1 t} \quad (16)$$

Nota-se que, em (16) a corrente reativa, $i_r(t)$ está relacionada à susceptância da carga e representa o defasamento angular entre a tensão e corrente. Portanto, a corrente reativa é definida como:

$$i_r(t) = \sqrt{2}Re \sum_{h \in H} jB_h V_h e^{jh\omega_1 t} \quad (17)$$

Já a corrente de dispersa, $i_s(t)$ é obtida pela diferença da somatória das condutâncias em cada frequência harmônica e a condutância equivalente. Observa-se que por se tratar de uma carga linear invariante no tempo, esta componente representa a distorção harmônica de corrente vinda pela fonte.

$$i_s(t) = (G_0 - G_e)V_0 + \sqrt{2}Re \sum_{h \in H} (G_h - G_e)V_h e^{jh\omega_1 t} \quad (18)$$

Os valores eficazes de cada parcela de corrente descrita anteriormente resultam:

$$I_a = \|i_a\| = G_e \|v\| = \frac{P}{\|v\|} \quad (19)$$

$$I_r = \|i_r\| = \sqrt{\sum_{h \in H} B_h^2 \cdot V_h^2} = \sqrt{\sum_{h \in H} \left(\frac{Q_h}{V_h}\right)^2} \quad (20)$$

$$I_s = \|i_s\| = \sqrt{\sum_{h \in H_0} (G_h - G_e)^2 \cdot V_h^2} \quad (21)$$

Sendo Q_h a potência reativa para cada ordem harmônica. Portanto, a corrente total é representada por (22).

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_s(t) \quad (22)$$

Todo o equacionamento anterior foi desenvolvido considerando uma carga linear. No entanto, para as cargas não lineares, aparece uma nova parcela de corrente, conhecida como corrente do consumidor ou corrente gerada pela carga, a qual deve ser incluída na equação (22). Para fazer isto, é utilizada a Figura 2 que representa o modelo de uma carga não linear.

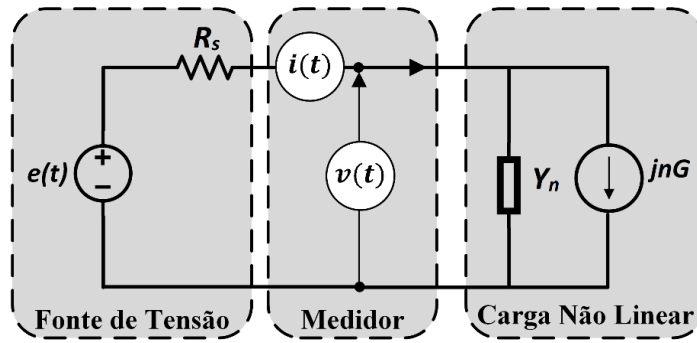


Figura 2 - Modelo de uma carga não linear.

Em seus trabalhos [25], [60], *Czarnercki* considera que a corrente do consumidor (corrente gerada pela carga) flui da carga para a fonte, e não contribui nem para a parte ativa e nem para a parte reativa. Tal componente representaria, portanto, o quanto de correntes harmônicas está sendo inserido no circuito pela carga, ou seja, transferência de energia da carga para a fonte. Portanto, há necessidade de identificar o fluxo da corrente harmônica.

Para identificar o sentido da corrente harmônica no circuito, deve-se observar a diferença angular entre a tensão e a corrente ($\varphi_h = \varphi_{vh} - \varphi_{ih}$) para cada ordem harmônica, logo:

$$P_h = V_h I_h \cos(\varphi_h) \quad (23)$$

Assim:

- Se $|\varphi_h| < \frac{\pi}{2}$, a potência ativa será positiva e fluxo da corrente será da fonte para carga, ou seja, a distorção está vindo da fonte.
- Se $|\varphi_h| > \frac{\pi}{2}$, a potência ativa será negativa e o fluxo da corrente será da carga para a fonte, ou seja, a distorção está vindo da carga.

Desta forma, adicionando a corrente do consumidor (i_c), (22) pode ser reescrita como:

$$i(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_s(t) + i_c(t) \quad (24)$$

Portanto, através da diferença angular (φ_h) explicada anteriormente, pode-se separar (24) em apenas duas parcelas de correntes, uma corrente associada ao distribuidor (supridor) para $|\varphi_h| < \frac{\pi}{2}$ e outra corrente associada ao consumidor (carga) para $|\varphi_h| > \frac{\pi}{2}$.

$$i_d(t) = i_a(t) + i_r(t) + i_s(t) \quad (25)$$

$$i(t) = i_d(t) + i_c(t) \quad (26)$$

sendo i_d a corrente harmônica que o supridor produz no circuito e i_c a corrente harmônica que a carga produz no circuito.

Analogamente, com a identificação do fluxo harmônico (ângulo φ_h), a tensão pode ser decomposta em duas sub parcelas conforme (27). Portanto, a potência ativa P também pode ser decomposta conforme (28).

$$\|v\|^2 = \|v_d\|^2 + \|v_c\|^2 \quad (27)$$

$$P = P_d - P_c \quad (28)$$

sendo v_d a tensão do distribuidor, v_c a tensão do consumidor, P_d a potência ativa pertencente ao distribuidor, P_c a potência ativa referente ao consumidor.

Com a presença das cargas não lineares, segundo *Czarnecki* [25], [60] a corrente ativa não é mais estabelecida pela definição de *Fryze*, logo a corrente ativa associada ao “distribuidor”, resultaria:

$$i_{ad} = \frac{P_d}{\|v_d\|^2} v_d = G_{ed} v_d \quad (29)$$

Observe-que, para $v_c \neq 0$, (29) resulta diferente de (15). Por outro lado, se tensão harmônica produzida pela carga é nulo ($v_c = 0$), (29) e (15) resultam idêntica uma vez que a tensão do PAC resulta idêntica a tensão do distribuidor ($v = v_d$). Como o autor da CPC não deixa claro qual componente de corrente (15) ou (29) deve ser utilizada para a definição do fator de potência λ , neste trabalho será utilizada a corrente ativa de *Fryze*, ou seja, aquela definida conforme (15).

Como, todas as parcelas decompostas são ortogonais entre si, a corrente eficaz total pode ser decomposta conforme (30).

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_s^2 + I_c^2 \quad (30)$$

Multiplicando (30) pelo valor eficaz da tensão ao quadrado é possível encontrar as parcelas de potências relacionadas a cada corrente.

$$\begin{aligned} V^2 I^2 &= V^2 I_a^2 + V^2 I_r^2 + V^2 I_s^2 + V^2 I_c^2 \\ A^2 &= P^2 + Q^2 + D_s^2 + D_c^2 \end{aligned} \quad (31)$$

onde A é a potência aparente [VA], P é a potência ativa [W], Q é a potência reativa [var], D_s é a potência de dispersão [VA] e D_c é a potência do consumidor [VA] ou potência harmônica gerada.

De (30) e (31), observa-se que, a corrente total eficaz e a potência aparente consideram a corrente ativa definida em (19), ou seja, corresponde a toda a corrente ativa eficaz no circuito. Assim, o fator de potência é calculado através de (32), ou seja, pela razão dos valores eficazes das correntes ativa e total ou pela razão das potências ativa e aparente.

$$\lambda = \frac{I_a}{I} = \frac{P}{A} \quad (32)$$

3.2.1 Discussões

Devido a análise no domínio da frequência ser muito complexo, dificulta a utilização da CPC para aplicações como tarifação, medição e compensação de distúrbios de QEE. Por exemplo, sob determinadas condições (baixos valores de DHT_v , menores a 5%) a separação das contribuições do distribuidor e consumidor na corrente total (i_d e i_c), quando analisados próximo aos limites de decisão (ângulo de $\pm 90^\circ$), a exatidão do sistema de amostragem e algoritmos de cálculo do ângulo podem levar a inconsistências na separação de i_d e i_c devido aos erros no diagnóstico de harmônicas específicas. Além disso, se as magnitudes das correntes harmônicas associadas a i_d são pequenas quando comparadas com as harmônicas de corrente associadas a i_c podem acarretar imprecisões nas medidas das grandezas envolvidas e levar a erros de interpretação. Porém, a CPC possui algumas particularidades interessantes, como por exemplo, associação de cada parcela de corrente a um fenômeno físico do circuito elétrico, facilitando o entendimento do fenômeno de potência e sua associação com os distúrbios, assim como sua possível estratégia de compensação [26], [61], [62]. Nota-se que alguns pontos ainda não foram abordados como: circuitos com tensões assimétricas (ângulo entre as tensões diferente de 120°), compensação de distúrbios da tensão e possíveis inter-harmônicas presentes nos sinais de tensão e corrente. Em 2019, *Czarnecki* [60] apresentou uma revisão da teoria, em que as nomenclaturas dos termos da CPC foram atualizadas, onde a corrente do distribuidor começou a ser chamada de corrente consumida pela carga e a corrente do consumidor chamada de corrente gerada pela carga, porém os conceitos utilizados foram os mesmos já apresentados neste trabalho. Portanto, além das limitações indicadas anteriormente e a complexidade no desenvolvimento da CPC, o principal problema com a teoria é montar o quebra-cabeça sobre os mais de 100 artigos publicados pelo autor nos últimos 40 anos e entender qual deveria ser a teoria geral que o autor da CPC tanto clama.

3.3 Teoria da Potência Conservativa (CPT)

Em 2003 [47], *Tenti* e *Mattavelli* apresentam sua primeira versão para circuitos monofásicos. Desde então vem sendo aprimorada e expandida para circuitos polifásicos e em 2010, *Tenti*, *Mattavelli* e *Paredes* [48] publicaram sua versão mais completa denominada de CPT, a qual contempla circuitos lineares e não lineares sob tensões senoidais e não senoidais,

além disso, foi incluída o efeito de variação da frequência nas análises, expandindo assim os conceitos da CPT para aplicações das chamadas microrredes e redes inteligentes.

Considerando as expressões matemáticas definidas anteriormente na seção 3.1, e considerando circuitos monofásicos os autores de CPT definem a potência e energia em valores médios e instantâneos conforme (33), (34), (35) e (36).

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (33)$$

$$P = \bar{p} = \langle v, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (34)$$

$$w_r(t) = \hat{v}(t)i(t) \quad (35)$$

$$W_r = \overline{w_r} = \langle \hat{v}, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}(t)i(t)dt \quad (36)$$

Com as definições de potência ativa e energia reativa apresentadas anteriormente, a corrente total é decomposta em corrente ativa, reativa e residual.

A corrente ativa $i_a(t)$ é definida como sendo a corrente mínima para transportar potência ativa (P), e é apresentada em (37).

$$i_a = \frac{\langle v, i \rangle}{\|v\|^2} v = \frac{P}{V^2} v = G_e v \quad (37)$$

onde G_e é a condutância equivalente [Ω^{-1}] e V é o valor eficaz da tensão.

Similarmente, a corrente reativa é definida como sendo a mínima corrente para transportar energia reativa (W_r).

$$i_r = \frac{\langle \hat{v}, i \rangle}{\|\hat{v}\|^2} \hat{v} = \frac{W_r}{\hat{V}^2} \hat{v} = \mathcal{B}_e \hat{v} \quad (38)$$

tal que, \hat{v} é a integral da tensão sem valor seu valor médio (9) $\left[V \cdot s / rad \right]$, \mathcal{B}_e a reatividade equivalente [H^{-1}] e \hat{V} é o valor eficaz de \hat{v} . Por outro lado, a característica indutiva ou capacitiva da carga pode ser verificada mediante o signo da energia reativa:

- Se W_r é positivo, a energia é devido a elementos indutivos.
- Se W_r é negativo, a energia é devido a elementos capacitivos.

Finalmente, a corrente residual pode ser obtida por (39).

$$i_v = i - i_a - i_r \quad (39)$$

⁴ Observa-se que a reatividade \mathcal{B} é o inverso da indutância [H^{-1}] e é diferente da susceptância (parte imaginária da admitância).

Observe que, até aqui todas as componentes de corrente da CPT foram obtidas no domínio do tempo. No entanto, conforme discutido em *Paredes* [22], para analisar o significado físico da corrente residual é necessária fazer o uso do domínio da frequência. Assim, as correntes ativas e reativas podem ser definidas individualmente para cada ordem harmônica conforme (40) e (41).

$$i_{ak} = \frac{\langle v, i_k \rangle}{\|v_k\|^2} v_k = \frac{P_k}{V_k^2} v_k = G_k v_k \quad (40)$$

$$i_{rk} = \frac{\langle \hat{v}_k, i_k \rangle}{\|\hat{v}_k\|^2} \hat{v}_k = \frac{\omega^2 k^2 W_{rk}}{V_k^2} \hat{v}_k = \mathcal{B}_k \hat{v}_k \quad (41)$$

tal que, k representa o conjunto de harmônicas comuns entre as tensões e correntes.

Portanto, a corrente total do circuito é reescrita contendo o somatório das correntes harmônicas ativas (i_{ah}), reativas (i_{rh}) e as harmônicas que só existem no espectro da corrente (i_g).

$$i = \sum_k (i_{ak} + i_{rk}) + \sum_{i \neq k} i_g = i_{ah} + i_{rh} + i_g \quad (42)$$

Observe que, $i_{ah} + i_{rh}$ inclui todas as componentes harmônicas coexistentes entre a tensão e corrente, enquanto i_g são as componentes harmônicas que só existem na corrente, ou seja, as harmônicas geradas pela carga. Conforme demonstrado em *Paredes* [22], para tensão senoidal, as componentes i_{ah} e i_{rh} resultam iguais às componentes i_a e i_r respectivamente, ou seja, $i_{ah} = i_a$, $i_{rh} = i_r$ e $i_g = i_v$. No entanto, quando a tensão apresenta conteúdo harmônico estes termos deixam de ser iguais, portanto, é necessário incluir essas diferenças, chamadas de componentes dispersas (associadas à parte ativa e reativa) na corrente residual.

A corrente residual, portanto, é decomposta em corrente ativa dispersa (i_{as}), corrente reativa dispersa (i_{rs}) e corrente harmônica gerada pela carga (i_g).

$$i_v = i_{as} + i_{rs} + i_g \quad (43)$$

Tal que, as componentes dispersas são definidas como:

$$i_{as} = i_{ah} - i_a = \sum_{k \in K} (G_k - G_e) v_k \quad (44)$$

$$i_{rs} = i_{rh} - i_r = \sum_{k \in K} (\mathcal{B}_k - \mathcal{B}_e) \hat{v}_k \quad (45)$$

e a corrente gerada pela carga pode ser obtida de (46):

$$i_g = i_v - i_{as} - i_{rs} \quad (46)$$

Ao realizar a soma das componentes i_{as} e i_{rs} , temos a corrente dispersa (i_s) total, que representa as correntes harmônicas geradas pelas componentes harmônicas da tensão.

$$i_s = i_{as} + i_{rs} \quad (47)$$

Logo, a corrente total do circuito é descrita conforme (48).

$$i = i_a + i_r + i_v = i_a + i_r + i_{as} + i_{rs} + i_g \quad (48)$$

Como todas as componentes de corrente decompostas são ortogonais entre si, pode-se realizar a soma dos valores eficazes ao quadrado:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2 \quad (49)$$

Ao multiplicar a equação (49) pelo valor eficaz da tensão ao quadrado, temos as correspondentes potências:

$$A^2 = P^2 + Q^2 + D_{as}^2 + D_{rs}^2 + D_g^2 \quad (50)$$

onde P é a potência ativa [W], Q é a potência reativa [var], D_{as} é a potência ativa dispersa [VA], D_{rs} é a potência reativa dispersa [var], D_g é a potência harmônica gerada pela carga [VA] e A é a potência aparente [VA]. Finalmente, define-se o fator de potência como:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D_{as}^2 + D_{rs}^2 + D_g^2}} \quad (51)$$

3.3.1 Discussões

Diferente da CPC (mais de 100 artigos publicados no domínio da frequência), a teoria CPT [47], [48], foi desenvolvida no domínio do tempo e como discutido na introdução, tem sido empregada nas mais diversas aplicações tais como: tarifação e caracterização de cargas, estratégias de compensação em redes convencionais e microrredes e atribuição de responsabilidades [10]-[12], [20], [22], [53], [54], [55], [56]. A CPT também apresenta atributos para o entendimento do fenômeno de potência e sua associação com cada parcela de corrente decomposta nos circuitos elétricos. Para fazer isto, é utilizado o domínio da frequência, principalmente para interpretar e compreender o significado físico da corrente residual (i_v) [22]. Portanto, há necessidade de se verificar a influência das distorções harmônicas de tensão na componente i_v e suas sub parcelas dispersas ativa e reativa (i_{as} e i_{rs}) assim como na corrente gerada pela carga (i_g). Além de verificar sua relação com as componentes reativa (i_r), dispersa (i_s) e do consumidor (i_c) da CPC. Entretanto, autores como *Czarnecki*, (autor da CPC) argumenta que a CPT apresenta algumas limitações, pois não interpreta adequadamente os fenômenos físicos [63], [64], [65].

Assim, a seguir serão apresentadas simulações computacionais para as cargas lineares e não lineares, ou seja, aplicar os conceitos e equações estabelecidos pelos métodos da CPC e

CPT, e verificar/interpretar as influências das distorções harmônicas de tensão nas correntes decompostas, demonstrando os resultados obtidos através de tabelas e formas de ondas.

Capítulo 4 – Resultados das Simulações

A metodologia utilizada neste trabalho baseia-se na simulação computacional e análise de diferentes circuitos elétricos monofásicos. Neste capítulo serão apresentados os resultados para circuitos elétricos com diferentes níveis de distorção harmônica da tensão fornecida, DHT_v , e cargas com diferentes características de operação. As diferentes condições de tensão e carga objetivam a comparação dos efeitos ocorridos sob o cálculo das parcelas de corrente e potências decompostas, segundo as teorias de potência CPT e CPC.

4.1 Parâmetros das simulações

As simulações foram realizadas no software MATLAB/SIMULINK®, com uma tensão eficaz de 127 V e frequência de 60 Hz. Para a análise na frequência foi utilizado a *Fast Fourier Transform* (FFT) para calcular as amplitudes e fases das harmônicas, levando em conta uma frequência de amostragem de 122880 Hz ($2^{11} \cdot 60 \text{ Hz}$). Assim tal frequência, facilita os ajustes de implementação da FFT (múltiplos inteiros de 2) e utiliza-se de uma alta frequência de amostragem, para os valores computacionais estarem o mais próximo dos valores teóricos. Visando criar condições representativas de operação, foram considerados, além da tensão senoidal (Condição 0), sete condições para tensão não senoidal, que incluem 3°, 5° e 7° ordens harmônicas, na qual tais harmônicas são as mais representativas nas redes elétricas de distribuição. As condições de operação não senoidal são baseadas nas normas observadas no capítulo 2, ou seja, através dos limites de distorção de tensão estabelecidos pelas normas IEEE ($DHT_v = 8\%$ e harmônica individual = 5%) e PRODIST ($DHT_v = 10\%$).

- *Condição 1:* 5 % de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas resultando uma $DHT_v = 8,66\%$;
- *Condição 2:* 5 % de 3ª harmônica, 7 % de 5ª harmônica e 5 % de 7ª harmônica resultando uma $DHT_v = 9,95\%$;
- *Condição 3:* 6,5 % de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas resultando numa $DHT_v = 11,26\%$;
- *Condição 4:* 7,5 % de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas resultando numa $DHT_v = 12,99\%$;
- *Condição 5:* 8 % de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas resultando uma $DHT_v = 13,86\%$;
- *Condição 6:* 11 % de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas resultando uma $DHT_v = 19,05\%$;
- *Condição 7:* 15 % de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas resultando numa $DHT_v = 25,98\%$;

Para as condições apresentadas, serão realizadas simulações para cinco cargas distintas, sendo três cargas lineares e duas cargas não lineares. A primeira carga é uma carga Resistiva-Indutiva (RL) com fator de potência igual a 0,80. A segunda e a terceira são cargas RL (igual à

primeira), porém considerando a compensação do fator de potência na fundamental mediante a conexão de um capacitor em paralelo para corrigir o fator de potência para 1,0 e 0,95, respectivamente. A quarta carga é uma carga não linear do tipo fonte de tensão harmônica (FTH), composto por um filtro indutivo de entrada, retificador de onda completa e um resistor em paralelo com o capacitor no lado CC. Por último, a quinta carga é uma carga do tipo fonte de corrente harmônica (FCH), composto por um retificador de onda completa e um resistor em série com o indutor no lado CC. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de cada carga.

Tabela 3 - Parâmetros das cargas.

Cargas	Impedância linha (Ω)	Resistor (Ω)	Indutor (mH)	Capacitor (μF)
RL	-	1,0323	2,0537	-
RL//C_{1,0}	-	1,0323	2,0537	1233,50
RL//C_{0,95}	-	1,0323	2,0537	692,90
FTH	-	23,600	0,5000	2350,00
FCH	-	17,920	41,082	-

As cargas foram avaliadas separadamente, com os objetivos de verificar os valores das correntes e potências para cada teoria de potência e analisar o comportamento das componentes de corrente para ambas as teorias em cada condição, ou seja, variando a distorção harmônica de tensão. Através das simulações computacionais realizadas para as discussões/resultados, foi possível observar a importância da escolha do janelamento da FFT. A presença dos indutores e capacitores nos circuitos elétricos ocasionam transitórios na corrente e tal fenômeno pode influenciar nos cálculos das correntes/potências decompostas no domínio da frequência. Portanto, a janela escolhida para a FFT não deve incluir esses transitórios. No Apêndice A, demonstra-se os erros ocasionados pelos transitórios nos cálculos e nas formas de onda para a carga FTH (carga mais crítica).

Além disso, visando validar a implementação da metodologia proposta para ambas às teorias no MATLAB/SIMULINK®, também foram calculados os valores teóricos para cada condição e carga, utilizando as equações demonstradas no capítulo anterior. Nos cálculos teóricos, foram utilizadas todas as casas decimais, entretanto, a fim de comparação, os resultados das correntes/potências serão apresentados com as mesmas casas decimais que os valores computacionais.

4.2 Resultados e discussões

A seguir serão analisados e apresentados os resultados obtidos pelas simulações e cálculos teóricos para as diferentes cargas e condições considerados neste estudo.

4.2.1 Carga RL

As Figuras 3.a e 3.b apresentam o modelo da carga RL para o caso senoidal e para o caso não senoidal, respectivamente.

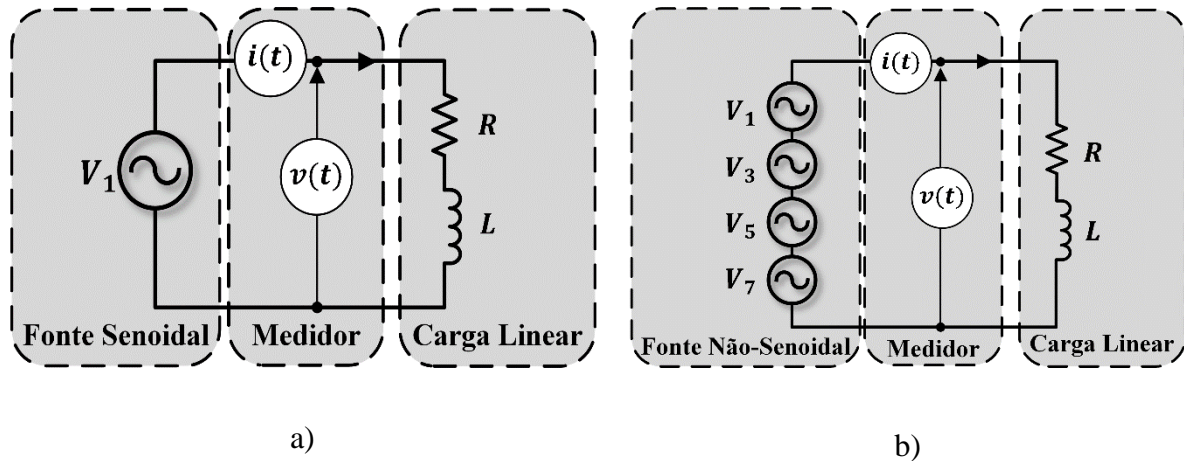


Figura 3 - Circuito simulado da carga RL: a) Caso Senoidal e b) Caso não senoidal.

4.2.1.1 Condição 0 - tensão senoidal

- *Cálculo dos valores teóricos da CPT:*

Considerando uma tensão eficaz de 127 V , uma frequência de 60 Hz e $\omega = 2\pi 60 = 376,9911\text{ rad/s}$, da Tabela 3, a impedância equivalente da carga RL resulta:

$$Z_e = R + j\omega L = 1,0323 + j(2\pi 60 \cdot 2,0537e^{-3}) = 1,0323 + j0,7742\ \Omega$$

logo, calcula-se a corrente I , o ângulo ϕ e a admitância equivalente Y_e :

$$I = \frac{V}{Z_e} = \frac{127}{1,0323 + j0,7742} = 98,42\text{ A} \quad (52)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{X}{R} = \tan^{-1} \frac{0,7742}{1,0323} = 36,87^\circ \quad (53)$$

$$Y_e = \frac{1}{Z_e} = \frac{1}{1,0323 + j0,7742} = G_e + jB_e = 0,62 - j0,465\text{ S} \quad (54)$$

Assim, a potência ativa P e o valor eficaz da integral imparcial da tensão, \hat{V} e a energia reativa W_r resultam:

$$P = G_e \cdot V^2 = 0,62 \cdot 127^2 = 9999,98 \approx 10000\text{ W} \quad (55)$$

$$\hat{V} = \frac{V}{\omega} = \frac{127}{377} = 0,3369\text{ V} \cdot \text{s/rad} \quad (56)$$

$$W_r = B_e \hat{V}^2 = \omega \cdot B_e \cdot \hat{V}^2 = 376,9911 \cdot (0,465) \cdot 0,3369^2 = 19,8933\text{ J} \quad (57)$$

Agora, calculando as correntes da CPT:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,62 \cdot 127 = 78,74\text{ A} \quad (58)$$

$$I_r = B_e \hat{V} = \omega \cdot B_e \cdot \hat{V} = 376,9911 \cdot 0,465 \cdot 0,3369 = 59,05 \text{ A} \quad (59)$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{98,42^2 - 78,74^2 - 59,05^2} = 0 \text{ A} \quad (60)$$

Como a tensão é senoidal e a carga é linear, as componentes dispersas e corrente gerada pela carga resultam nulo:

$$I_{as} = \sqrt{(G_1 - G_e)^2 \cdot V_k^2} = \sqrt{(0,62 - 0,62)^2 \cdot 127^2} = 0 \text{ A} \quad (61)$$

$$I_{rs} = \sqrt{(B_1 - B_e)^2 \cdot \hat{V}_k^2} = \sqrt{(0,465 - 0,465)^2 \cdot 0,3369^2} = 0 \text{ A} \quad (62)$$

$$I_g = \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{0^2 - 0^2 - 0^2} = 0 \text{ A} \quad (63)$$

Portanto, as potências da CPT resultam:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 98,42 = 12499,9 \approx 12500 \text{ VA} \quad (64)$$

$$Q = V \cdot I_r = \omega \cdot W_r = 376,9911 \cdot 19,8933 = 7500 \text{ var} \quad (65)$$

$$D = V \cdot I_v = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA} \quad (66)$$

$$D_{as} = V \cdot I_{as} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA} \quad (67)$$

$$D_{rs} = V \cdot I_{rs} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ var} \quad (68)$$

$$D_g = V \cdot I_g = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA} \quad (69)$$

Finalmente, o fator de potência da CPT é:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{10000}{\sqrt{10000^2 + 7500^2 + 0^2}} = 0,80 \quad (70)$$

- *Cálculo dos valores teóricos da CPC*

Anteriormente, foram calculados os valores de: I , ϕ , Y_e , P e I_a através das equações (52)-(55) e (58), logo:

$$I = 98,42 \text{ A}; \phi = 36,87^\circ; Y_e = 0,62 + j0,465 \text{ S}; P = 10000 \text{ W}; I_a = 78,74 \text{ A};$$

Assim, a corrente reativa da CPC resulta:

$$I_r = \sqrt{B_e^2 \cdot V^2} = \sqrt{0,465^2 \cdot 127^2} = 59,05 \text{ A} \quad (71)$$

Similarmente que a CPT, como a tensão é senoidal e a carga é linear, as correntes dispersa e do consumidor resultam nulos, ou seja:

$$I_s = \sqrt{((G_1 - G_e) \cdot V_h)^2} = \sqrt{((0,62 - 0,62) \cdot 127)^2} = 0 \text{ A} \quad (72)$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{98,42^2 - 78,74^2 - 59,05^2 - 0^2} = 0 \text{ A} \quad (73)$$

Portanto, as potências da CPC resultam:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 98,42 = 12499 \text{ VA} \approx 12500 \text{ VA} \quad (74)$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 59,05 = 7499,70 \text{ var} \approx 7500 \text{ var} \quad (75)$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA} \quad (76)$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA} \quad (77)$$

Finalmente o fator de potência, resulta:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{10000}{12500} = 0,80 \quad (78)$$

Todos os valores teóricos obtidos anteriormente e os resultados da simulação são resumidos na Tabela 4. Analisando os dados, percebe-se que os valores da decomposição das correntes e das potências foram praticamente iguais para ambas às teorias. Por ser uma carga linear, para a CPC, a potência do consumidor é nula ($P_{c_CPC} = 0$), a potência ativa é a potência do distribuidor e é a potência ativa da CPT ($P_{d_CPC} = P_{CPT}$), logo o fator de potência é igual em ambas as teorias ($\lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$).

Tabela 4 - Dados da carga RL para a condição 0.
Senoidal com $DHT_v = 0,00\%$ e $DHT_I = 0,00\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12500,00	12500,00	A (VA)	12500,00	12500,00
P (W)	10000,00	10000,00	P_a (W)	10000,00	10000,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	7500,00	7500,00	Q (var)	7500,00	7500,00
D_{as} (VA)	0,00	0,00	D_s (VA)	0,00	0,00
D_{rs} (var)	0,00	0,00			
D_g (VA)	0,04	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	98,42	98,42	I (A)	98,42	98,42
I_a (A)	78,74	78,74	I_a (A)	78,74	78,74
I_r (A)	59,05	59,05	I_r (A)	59,05	59,05
I_{as} (A)	0,00	0,00	I_s (A)	0,00	0,00
I_{rs} (A)	0,00	0,00			
I_g (A)	0,00	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,800	0,800	λ	0,800	0,800

4.2.1.2 Condição 1 (5% de 3ª, 5% de 5ª e 5% de 7ª harmônicas)

- Cálculo dos valores teóricos para a CPT:

Para esta condição, além da tensão eficaz na fundamental, $V_1 = 127 V$, temos 5 % de 3°, 5°, e 7° harmônicas, resultando em valores eficazes de $V_3 = V_5 = V_7 = 6,35 V$. Portanto, a tensão eficaz total resulta:

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2} = \sqrt{127^2 + 6,35^2 + 6,35^2 + 6,35^2} = 127,48 V \quad (79)$$

Os cálculos das correntes, os ângulos e as admitâncias, assim como o valor eficaz da integral imparcial da tensão, para cada ordem harmônica são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros calculados para a carga RL para a condição 1.

$Z_h = R + jh\omega L$	$I_h = \frac{V_h}{Z_h}$	$Y_h = \frac{1}{Z_h} = G_h + jB_h$	$\hat{V}_h = \frac{V_h}{h\omega}$
$Z_1 = 1,0323 + j0,7742\Omega$	$I_1 = 98,42A$	$Y_1 = 0,62 - j0,465 S$	$\hat{V}_1 = 0,3369 V$
$Z_3 = 1,0323 + j2,3226\Omega$	$I_3 = 2,50A$	$Y_3 = 0,1598 - j0,3595 S$	$\hat{V}_3 = 0,0056 V$
$Z_5 = 1,0323 + j3,8711\Omega$	$I_5 = 1,59 A$	$Y_5 = 0,0643 - j0,2412 S$	$\hat{V}_5 = 0,0034 V$
$Z_7 = 1,0323 + j5,4194\Omega$	$I_7 = 1,15A$	$Y_7 = 0,0339 - j0,1781 S$	$\hat{V}_7 = 0,0024 V$

Da Tabela 5, os valores eficazes da corrente total e da integral imparcial da tensão resultam em:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{98,42^2 + 2,50^2 + 1,59^2 + 1,15^2} = 98,47 A \quad (80)$$

$$\hat{V} = \sqrt{\hat{V}_1^2 + \hat{V}_3^2 + \hat{V}_5^2 + \hat{V}_7^2} = \sqrt{0,3369^2 + 0,0056^2 + 0,0034^2 + 0,0024^2} \quad (81)$$

$$= 0,3370 V \cdot s/\text{rad}$$

Logo, a potência ativa P , e a energia reativa W são:

$$P = \sum G_h \cdot V_h^2 = 0,62 \cdot 127^2 + 0,1598 \cdot 6,35^2 + 0,0643 \cdot 6,35^2 + 0,0339 \cdot 6,35^2 \quad (82)$$

$$= 10010 W$$

$$W_r = \sum \frac{B_h \cdot V_h^2}{\omega^2 h^2} = \sum \frac{B_h \cdot V_h^2}{\omega h} = \quad (83)$$

$$= \frac{0,465 \cdot 127^2}{376,9911 \cdot 1} + \frac{0,3595 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 3} + \frac{0,2412 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 5} + \frac{0,1781 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 7} = 19,9140 J$$

Portanto, a condutância e reatidade equivalente são:

$$G_e = \frac{P}{V^2} = \frac{10000}{127,48^2} = 0,616 S \quad (84)$$

$$B_e = \frac{W_r}{\hat{V}^2} = \frac{19,9140}{0,3370^2} = 175,399 H^{-1} \quad (85)$$

Utilizando, (79), (80), (84) e (85), calculam-se as correntes da CPT:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,616 \cdot 127,48 = 78,53 A$$

$$I_r = B_e \cdot \hat{V} = 175,399 \cdot 0,3370 = 59,10 A$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{98,47^2 - 78,53^2 - 59,10^2} = 6,14 \text{ A}$$

$$I_{as} = \sqrt{\sum (G_k - G_e)^2 \cdot V_k^2} =$$

$$= \sqrt{(0,62 - 0,616)^2 \cdot 127^2 + (0,1598 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0643 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0339 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2}$$

$$I_{as} = 5,88 \text{ A}$$

$$I_{rs} = \sqrt{\sum (\mathcal{B}_k - \mathcal{B}_e)^2 \cdot \hat{V}_k^2} =$$

$$= \sqrt{(-175,292 + 175,399)^2 \cdot 127^2 + (-406,618 + 175,399)^2 \cdot 6,35^2 + (-454,613 + 175,399)^2 \cdot 6,35^2 + (-469,893 + 175,399)^2 \cdot 6,35^2}$$

$$I_{rs} = 1,75 \text{ A}$$

$$I_g = \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{6,14^2 - 5,88^2 - 1,75^2} = 0 \text{ A}$$

Assim, as potências da CPT são obtidas através de:

$$A = V \cdot I = 127,48 \cdot 98,47 \approx 12550 \text{ VA}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127,48 \cdot 59,10 \approx 7534 \text{ var}$$

$$D = V \cdot I_v = 127,48 \cdot 6,14 = 782,3 \text{ VA}$$

$$D_{as} = V \cdot I_{as} = 127,48 \cdot 5,88 = 749,6 \text{ VA}$$

$$D_{rs} = V \cdot I_{rs} = 127,48 \cdot 1,75 = 223,5 \text{ var}$$

$$D_g = V \cdot I_g = 127,48 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

Finalmente, o fator de potência resulta:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{10010}{\sqrt{10010^2 + 7534^2 + 782,3^2}} = 0,797$$

- *Cálculos dos valores teóricos para a CPC:*

Anteriormente, foram calculados os parâmetros Z_h , I_h e Y_h (vide Tabela 5), assim como a corrente ativa:

$$I_a = 78,53 \text{ A}$$

$$I_r = \sqrt{\sum B_h^2 \cdot V_h^2}$$

$$= \sqrt{0,465^2 \cdot 127^2 + 0,3595^2 \cdot 6,35^2 + 0,2412^2 \cdot 6,35^2 + 0,1781^2 \cdot 6,35^2}$$

$$I_r = 59,13 \text{ A}$$

$$I_s = \sqrt{\sum ((G_h - G_e) \cdot V_h)^2} =$$

$$= \sqrt{(0,62 - 0,616)^2 \cdot 127^2 + (0,1598 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0643 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0339 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2}$$

$$I_s = 5,88 \text{ A}$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{98,47^2 - 78,53^2 - 59,13^2 - 5,88^2} = 0 \text{ A}$$

E as potências da CPC resultam:

$$A = V \cdot I = 127,48 \cdot 98,47 \approx 12550 \text{ VA}$$

$$P = V \cdot I_a = 127,48 \cdot 78,53 \approx 10010 \text{ W}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127,48 \cdot 59,13 \approx 7537 \text{ var}$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127,48 \cdot 5,88 \approx 749,60 \text{ VA}$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127,48 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

Logo, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{10010}{12550} = 0,797$$

Os cálculos e resultados obtidos para a condição 1 são apresentados na Tabela 6. Percebe-se que, em função das harmônicas impostas pela fonte de tensão, todos os valores das grandezas (correntes e potências) resultaram diferentes quando comparado daqueles valores no caso senoidal (vide Tabelas 5 e 6). Além disso, como esperado as componentes dispersas (I_{s_CPC} , I_{as_CPT} e I_{rs_CPT}) resultaram diferentes de zero. Além disso, devido a característica linear da carga, a potência do distribuidor da CPC resulta igual a potência ativa da CPT ($P_{c_CPC} = P_{CPT}$), logo o fator de potência é igual em ambas as teorias ($\lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$). A potência do consumidor da CPC resulta nulo ($P_{c_CPC} = 0$) e as componentes I_{c_CPC} e I_{g_CPT} também são nulos. Uma vez que, neste caso, as equações (17) e (42) são equivalentes, as componentes dispersa da CPC e ativa dispersa da CPT são iguais ($I_{s_CPC} = I_{as_CPT}$). No entanto, a CPT além de I_{as_CPT} , apresenta um valor para a componente I_{rs_CPT} , devido aos diferentes valores de reatividade em diferentes frequências (provocada pela distorção de tensão). Por outro lado, pode ser verificado que,

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = \sqrt{59,10^2 + 1,75^2} = 59,13 = I_{r_CPC}.$$

Tabela 6 - Dados da carga RL para a condição 1.
Condição 1 (5%) com $DHT_v = 8,66\%$ e $DHT_I = 3,23\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12550,00	12550,00	A (VA)	12550,00	12550,00
P (W)	10010,00	10010,00	P _a (W)	10010,00	10010,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	7534,00	7534,00	Q (var)	7537,00	7537,00
D _{as} (VA)	749,60	749,60	D _s (VA)	749,60	749,60
D _{rs} (var)	223,50	223,50			
D _g (VA)	6,53	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	98,47	98,47	I (A)	98,47	98,47
I _a (A)	78,52	78,53	I _a (A)	78,52	78,53
I _r (A)	59,10	59,10	I _r (A)	59,13	59,13
I _{as} (A)	5,88	5,88	I _s (A)	5,88	5,88
I _{rs} (A)	1,75	1,75			
I _g (A)	0,05	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,797	0,797	λ	0,797	0,797

4.2.1.3 Condição 2 (5% de 3ª harmônica, 7% de 5ª harmônica e 5% de 7ª harmônica)

Como, para a condição 2, apenas foi incrementado o nível de distorção da tensão, o procedimento das contas teóricas é realizado igual a condição 1, portanto os valores teóricos serão diretamente apresentados conjuntamente com os valores simulados na Tabela 7. Similarmente, que na condição 1, as componentes, I_{s_CPC} , I_{as_CPT} e I_{rs_CPT} resultam diferente de zero, a potência do distribuidor é igual a potência ativa da CPT ($P_{d_CPC} = P_{CPT}$), logo o fator de potência são iguais ($\lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$). A potência do consumidor da CPC resulta nulo ($P_{c_CPC} = 0$), as componentes I_{g_CPT} e I_{c_CPC} também são nulas. A componente ativa dispersa da CPT e a componente dispersa da CPC resultaram iguais ($I_{s_CPC} = I_{as_CPT}$). Além disso, a equivalência

dos reativos entre a CPC e CPT também pode ser verificada por: $\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = \sqrt{59,11^2 + 1,98^2} = 59,15 = I_{r_CPC}$.

Tabela 7 - Dados da carga RL para a condição 2.
Condição 2 com $DHT_V = 9,95\%$ e $DHT_I = 3,59\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12570,00	12570,00	A (VA)	12570,00	12570,00
P (W)	10010,00	10010,00	P_d (W)	10010,00	10010,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	7544,00	7544,00	Q (var)	7549,00	7549,00
D_{as} (VA)	868,70	868,80	D_s (VA)	868,80	868,80
D_{rs} (var)	252,80	252,80			
D_g (VA)	7,39	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	98,48	98,49	I (A)	98,48	98,49
I_a (A)	78,45	78,45	I_a (A)	78,45	78,45
I_r (A)	59,11	59,11	I_r (A)	59,15	59,15
I_{as} (A)	6,81	6,81	I_s (A)	6,81	6,81
I_{rs} (A)	1,98	1,98			
I_g (A)	0,06	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,797	0,797	λ	0,797	0,797

Como a ideia é testar a influência do DHT_V nas componentes de corrente da CPT e CPC, para as seguintes condições de operação 3, 4, 5, 6 e 7. Apenas serão apresentadas as tabelas contendo os dados calculados e simulados. Além disso, espera-se que as equivalências entre ambas as teorias sejam mantidas.

4.2.1.4 Condição 3 (6,5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

A Tabela 8 apresenta os valores obtidos para as grandezas da CPT e CPC. Conforme esperado, observa-se que as equivalências entre as componentes discutidas na condição 2 são mantidas.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$$

$$P_{c_CPC} = 0$$

$$P_{d_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 8 - Dados da carga RL para a condição 3.
Condição 3 (6,5%) com $DHT_v = 11,26\%$ e $DHT_i = 4,19\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12590,00	12590,00	A (VA)	12590,00	12590,00
P (W)	10020,00	10020,00	P_a (W)	10020,00	10020,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	7558,00	7558,00	Q (var)	7563,00	7563,00
D_{as} (VA)	974,50	974,60	D_s (VA)	974,50	974,60
D_{rs} (var)	291,20	291,20			
D_g (VA)	8,47	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	98,51	98,51	I (A)	98,51	98,51
I_a (A)	78,38	78,38	I_a (A)	78,38	78,38
I_r (A)	59,13	59,13	I_r (A)	59,18	59,18
I_{as} (A)	7,63	7,63	I_s (A)	7,63	7,63
I_{rs} (A)	2,28	2,28			
I_g (A)	0,07	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,796	0,796	λ	0,796	0,796

4.2.1.5 Condição 4 (7,5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Similarmente, a Tabela 9 apresentam os valores das grandezas para as teorias CPT e CPC. Similarmente as condições anteriores (1, 2 e 3) as equivalências entre as teorias são mantidas.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$$

$$P_{c_CPC} = 0$$

$$P_{d_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 9 - Dados da carga RL para a condição 4.
Condição 4 (7,5%) com $DHT_V = 12,99\%$ e $DHT_I = 4,84\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12620,00	12620,00	A (VA)	12620,00	12620,00
P (W)	10020,00	10020,00	P_a (W)	10020,00	10020,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	7577,00	7577,00	Q (var)	7584,00	7584,00
D_{as} (VA)	1124,00	1125,00	D_s (VA)	1124,00	1125,00
D_{rs} (var)	336,70	336,70			
D_g (VA)	9,76	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	98,54	98,54	I (A)	98,54	98,54
I_a (A)	78,26	78,27	I_a (A)	78,26	78,27
I_r (A)	59,16	59,16	I_r (A)	59,22	59,22
I_{as} (A)	8,78	8,78	I_s (A)	8,78	8,78
I_{rs} (A)	2,63	2,63			
I_g (A)	0,08	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,794	0,794	λ	0,794	0,794

4.2.1.6 Condição 5 (8% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Os valores obtidos das grandezas para as teorias CPT e CPC são apresentadas na Tabela 10. Nota-se que, mesmo com o incremento do DHT_V , as equivalências entre as teorias são mantidas.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$$

$$P_{c_CPC} = 0$$

$$P_{a_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 10 - Dados da carga RL para a condição 5.
Condição 5 (8%) com $DHT_V = 13,86\%$ e $DHT_I = 5,16\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12640,00	12640,00	A (VA)	12640,00	12640,00
P (W)	10030,00	10030,00	P _a (W)	10030,00	10030,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	7587,00	7587,00	Q (var)	7596,00	7596,00
D _{as} (VA)	1199,00	1200,00	D _s (VA)	1199,00	1200,00
D _{rs} (var)	359,50	359,50			
D _g (VA)	10,40	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	98,55	98,55	I (A)	98,55	98,55
I _a (A)	78,20	78,20	I _a (A)	78,20	78,20
I _r (A)	59,18	59,18	I _r (A)	59,24	59,24
I _{as} (A)	9,36	9,36	I _s (A)	9,36	9,36
I _{rs} (A)	2,80	2,80			
I _g (A)	0,08	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,794	0,793	λ	0,794	0,793

4.2.1.7 Condição 6 (11% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Similarmente as condições anteriores, pela Tabela 11 podem ser verificadas as equivalências entre as grandezas das teorias. No entanto, para $THD_V = 19,05\%$ as componentes reativas resultam diferentes.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$$

$$P_{c_CPC} = 0$$

$$P_{d_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Por outro lado, a equivalência para os reativos pode ser alcançada por:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = \sqrt{59,29^2 + 3,85^2} = 59,41 = I_{r_CPC}$$

Tabela 11 - Dados da carga RL para a condição 6.
Condição 6 (11%) com $DHT_V = 19,05\%$ e $DHT_I = 7,10\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12760,00	12760,00	A (VA)	12760,00	12760,00
P (W)	10050,00	10050,00	P_a (W)	10050,00	10050,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	7665,00	7665,00	Q (var)	7681,00	7681,00
D_{as} (VA)	1649,00	1649,00	D_s (VA)	1649,00	1649,00
D_{rs} (var)	498,20	498,20			
D_g (VA)	14,21	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	98,67	98,67	I (A)	98,67	98,67
I_a (A)	77,73	77,74	I_a (A)	77,74	77,74
I_r (A)	59,29	59,29	I_r (A)	59,41	59,41
I_{as} (A)	12,76	12,76	I_s (A)	12,76	12,76
I_{rs} (A)	3,85	3,85			
I_g (A)	0,11	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,788	0,788	λ	0,788	0,788

4.2.1.8 Condição 7 (15% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Finalmente, a Tabela 12 resume os valores teóricos e simulados para ambas as teorias considerando um DHT_V de 26 %, resultando uma DHT de corrente de aproximadamente 10%. Similarmente que a condição 6, podemos concluir que:

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$$

$$P_{c_CPC} = 0$$

$$P_{d_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

E a equivalência para os reativos pode ser alcançada mediante:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = \sqrt{59,49^2 + 5,25^2} = 59,72 = I_{r_CPC}$$

Tabela 12 - Dados da carga RL para a condição 7.
Condição 7 (15%) com $DHT_v = 25,98\%$ e $DHT_i = 9,68\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12970,00	12970,00	A (VA)	12970,00	12970,00
P (W)	10090,00	10090,00	P_a (W)	10090,00	10090,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	7806,00	7806,00	Q (var)	7836,00	7836,00
D_{as} (VA)	2250,00	2250,00	D_s (VA)	2250,00	2250,00
D_{rs} (var)	688,90	689,00			
D_g (VA)	19,17	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	98,88	98,88	I (A)	98,88	98,88
I_a (A)	76,92	76,92	I_a (A)	76,92	76,92
I_r (A)	59,49	59,49	I_r (A)	59,72	59,72
I_v (A)	17,93	17,93	-	-	-
I_{as} (A)	17,14	17,14	I_s (A)	17,14	17,14
I_{rs} (A)	5,25	5,25			
I_g (A)	0,15	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,778	0,778	λ	0,778	0,778

As Figuras 4 e 5 apresentam as formas de onda da corrente total e a reconstrução do sinal obtidos pela CPT e CPC, respectivamente, percebe-se que tais formas de onda são sobrepostas, ou seja, idênticas. Conforme o DHT_v aumenta, nota-se uma maior distorção nas formas de onda da corrente.

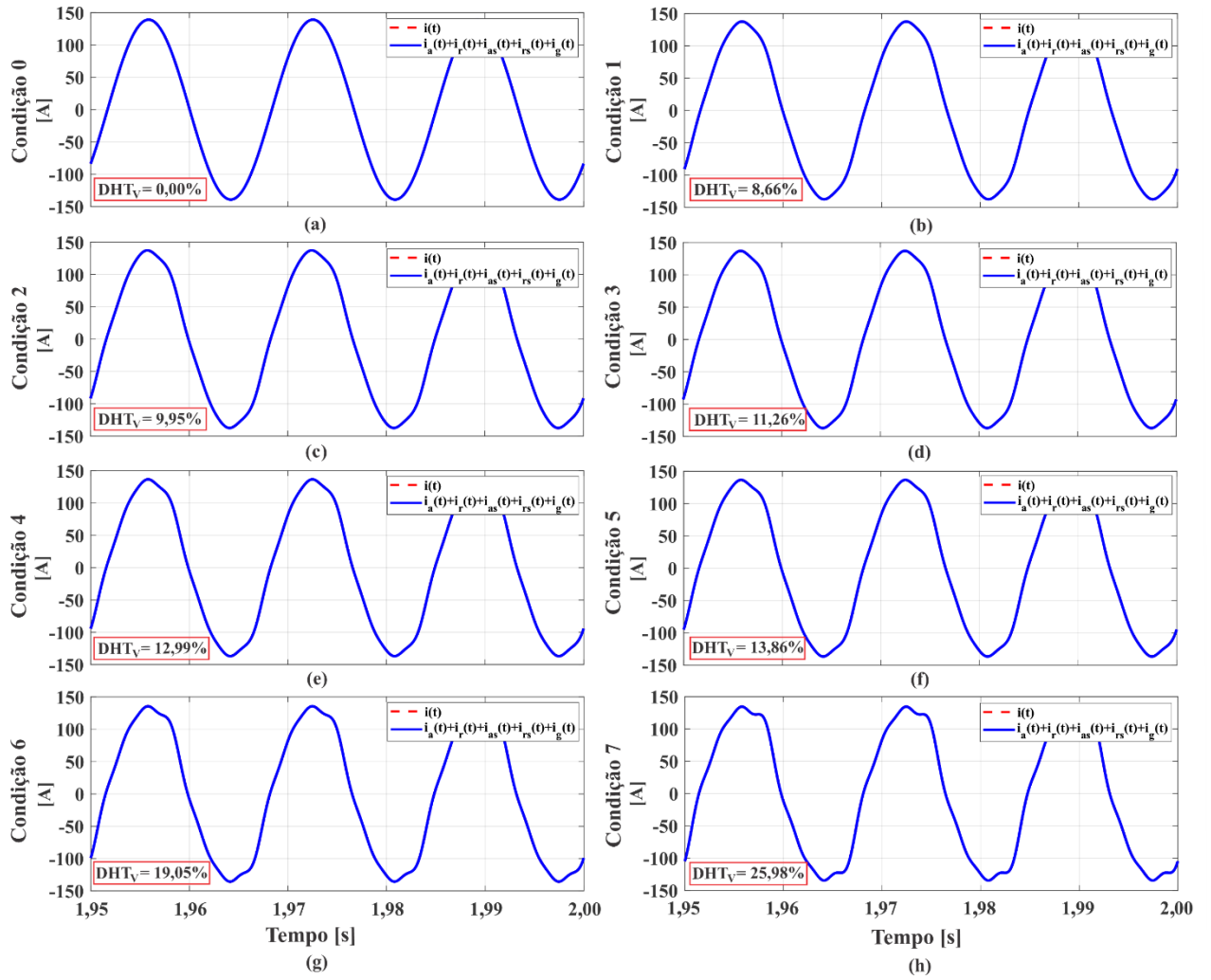


Figura 4 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPT para carga RL.

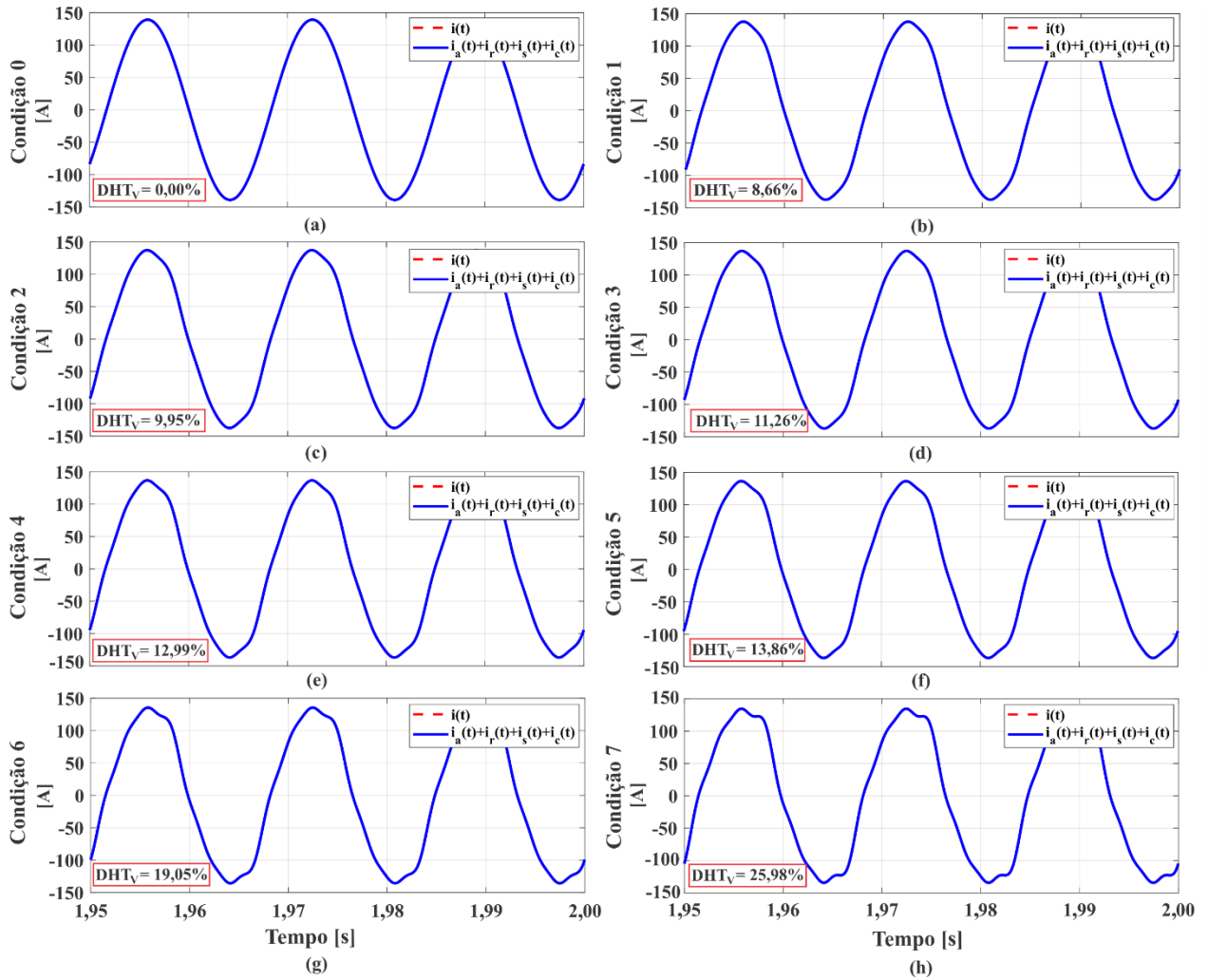


Figura 5 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPC para carga RL.

4.2.1.9 Discussões sobre a operação da carga RL

As Figuras 6 e 7 e as Tabelas 13 e 14 mostram os dados com as variações percentuais das correntes decompostas em função do DHT_V , tais figuras foram geradas através do MATLAB/SIMULINK para 90 amostras, onde de forma automatizada calcula-se as correntes decompostas de ambas as teorias para cada DHT_V (o máximo DHT_V foi de 30%) e esboça a sua evolução. Verifica-se que, para a carga RL, conforme a distorção harmônica de tensão aumenta, as correntes ativas (I_{a_CPT} e I_{a_CPC}) e reativas (I_{r_CPT} e I_{r_CPC}) independentemente do nível de distorção de tensão (considerado neste estudo) diminuem e aumentam ligeiramente, respectivamente. No entanto, as componentes dispersas, I_{as_CPT} e I_{s_CPC} , tiveram um acréscimo de aproximadamente 20% para uma DHT_V de 30%, já a componente I_{rs_CPT} teve um incremento de aproximadamente de 6% para os mesmos 30% de DHT_V . Como esperado, devido ao comportamento linear da carga, os valores das correntes geradas pela carga, I_{g_CPT} e I_{c_CPC} resultaram praticamente iguais à zero, pois a carga RL não gera correntes harmônicas.

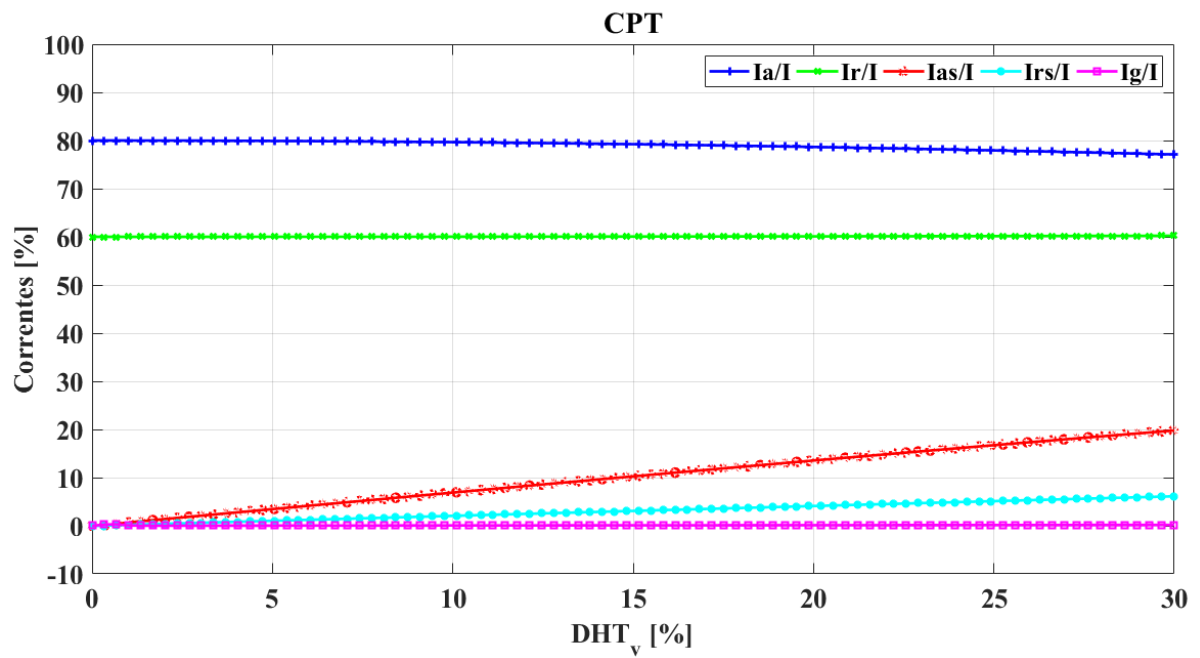


Figura 6 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHT_v para a Carga RL.

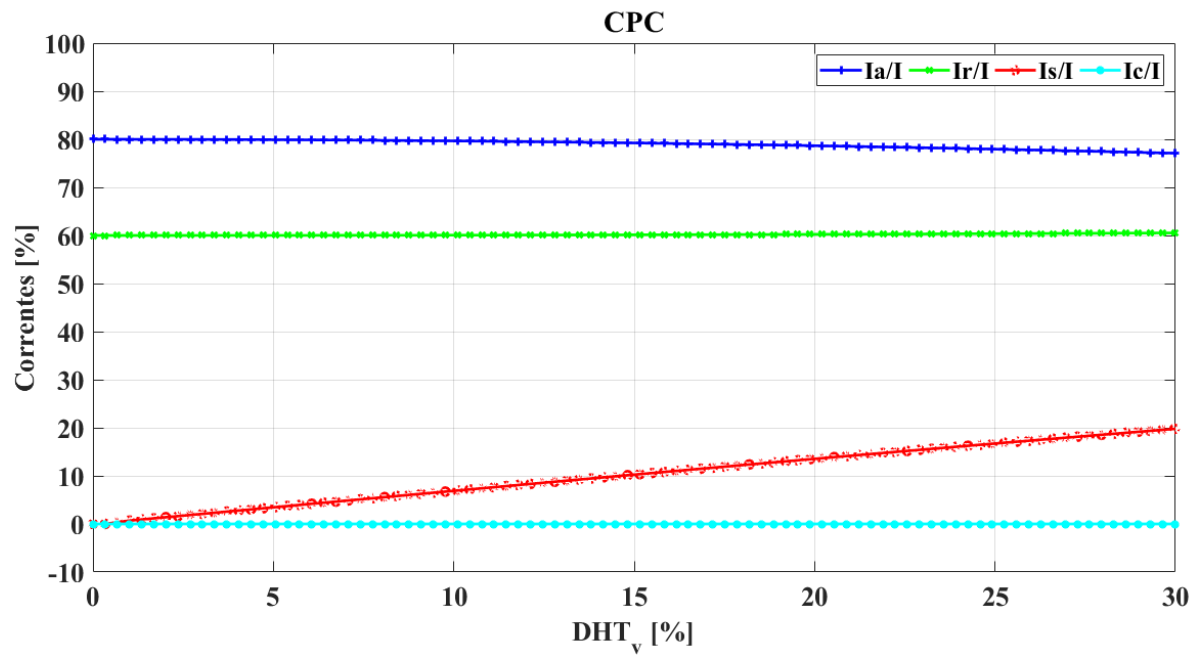


Figura 7 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHT_v para a Carga RL.

Tabela 13 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPT para a Carga RL.

DHT_v [%]	I [A]	I_a/I [%]	I_r/I [%]	I_{as}/I [%]	I_{rs}/I [%]	I_g/I [%]
0,00	98,42	80,00	60,00	0,00	0,00	0,00
5,00	98,44	79,91	60,01	3,49	1,04	0,03
8,00	98,47	79,77	60,01	5,58	1,67	0,05
10,00	98,49	79,65	60,03	6,96	2,08	0,06
15,00	98,58	79,23	60,05	10,36	3,11	0,09
20,00	98,70	78,63	60,10	13,68	4,14	0,12
25,00	98,84	77,96	60,16	16,68	5,10	0,14
30,00	99,03	77,11	60,22	19,77	6,11	0,17

Tabela 14 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPC para a Carga RL

DHT_v [%]	I [A]	I_a/I [%]	I_r/I [%]	I_s/I [%]	I_c/I [%]
0,00	98,42	80,00	60,00	0,00	0,00
5,00	98,44	79,91	60,02	3,49	0,00
8,00	98,47	79,77	60,04	5,58	0,00
10,00	98,49	79,65	60,06	6,96	0,00
15,00	98,58	79,23	60,13	10,36	0,00
20,00	98,70	78,63	60,24	13,68	0,00
25,00	98,84	77,96	60,37	16,68	0,00
30,00	99,03	77,11	60,53	19,77	0,00

Com os valores obtidos das Tabelas 13 e 14 e relacionando com as normas de distorção de tensão, IEEE ($DHT_v = 8\%$) e PRODIST ($DHT_v = 10\%$), observa-se um incremento máximo de 7% das correntes dispersas I_{as} e I_s e de 2% para a componente I_{rs} . Logo, os resultados mostram que para fins de aplicação prática, em que o DHT de tensão são limitadas (8% ou 10%) as componentes dispersas da CPT e CPC são irrelevantes. Além disso, no caso da CPT, não seria necessário implementar a FFT (uso do domínio da frequência), pois tal valor pode ser obtido diretamente no domínio do tempo, mediante a componente residual.

Finalmente, a Tabela 15, resume a análise comparativa entre ambas às teorias. Observa-se que, as correntes ativas resultaram iguais para todas as condições de análise ($I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$), o mesmo acontece para as componentes dispersa e dispersa ativa ($I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$). No caso das correntes reativas, apenas para a condição de tensão senoidal resultam iguais ($I_{r_CPT} = I_{r_CPC}$). Para a condição não senoidal, $0 > THD_v < 15\%$ as correntes reativas resultam aproximadamente iguais ($I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$) e para $THD_v > 15\%$ a equivalência pode ser obtida mediante a combinação da componente reativa com a componente dispersa reativa

($\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$). Além disso, como as correntes ativas de ambas as teorias foram

iguais, o fator de potência também foi igual ($\lambda_{CPT} = \lambda_{CPC}$) e houve uma diminuição conforme o aumento do DHT_V .

Tabela 15 - Análise comparativa entre as teorias para a carga RL.

Senoidal	Não senoidal
$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$	$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$
$I_{r_CPT} = I_{r_CPC} \neq 0$	$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC} \neq 0$
$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} = 0$	$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} \neq 0$
$I_{rs_CPT} = 0$	$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$
$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$	$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$

4.2.2 Carga RL//C_{1,0}

As configurações para a carga RL com o capacitor (C) conectado em paralelo para corrigir o fator de potência na fundamental (0,80 para 1,0) considerando as condições de tensão senoidal e não senoidal são apresentados nas Figuras 8.a e 8.b.

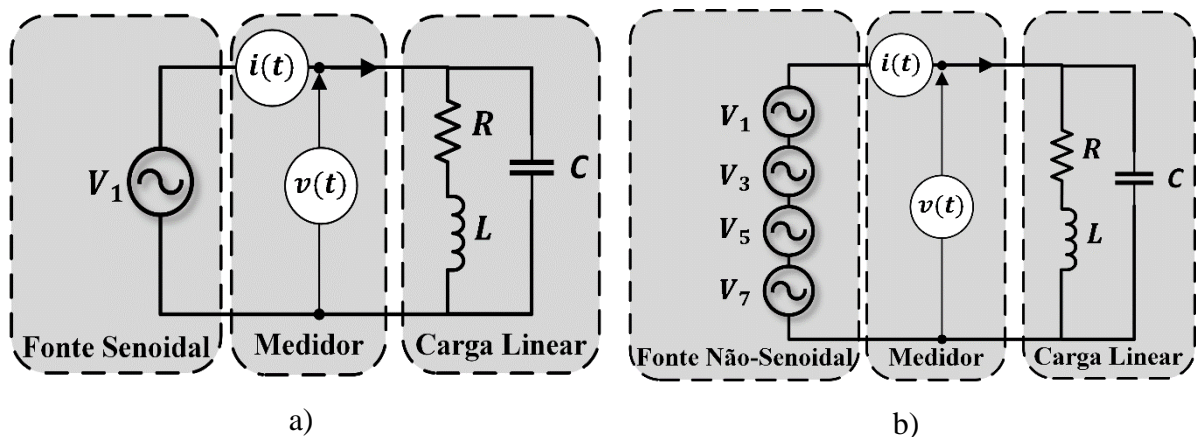


Figura 8 - Circuito simulado da carga RL//C_{1,0}: a) Caso senoidal e b) Caso não senoidal.

4.2.2.1 Condição 0 - tensão senoidal

- Cálculo dos valores teóricos para a CPT:

Considerando 127 V de tensão eficaz, 60 Hz e $\omega = 2\pi 60 = 376,9911 \text{ rad/s}$, a impedância equivalente da carga RL em paralelo com o capacitor resulta:

$$Z_e = (R + j\omega L) // \frac{1}{j\omega C} = (1,0323 + j0,7742) // \left(\frac{1}{j0,465}\right) = 1,6129 - j0,0001 \Omega$$

A corrente, o ângulo ϕ e a admitância equivalente são:

$$I = \frac{V}{Z_e} = \frac{127}{1,6129 - j0,0001} = 78,74 \text{ A}$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{X}{R} = \tan^{-1} \frac{1,6129}{0,0001} = 0^\circ$$

$$Y_e = \frac{1}{Z_e} = \frac{1}{1,6129 - j0,0001} = 0,62 + j0,00004 \text{ S} \equiv G_e$$

Logo, a potência ativa, o valor eficaz da integral imparcial da tensão e a energia reativa resultam:

$$P = G_e \cdot V^2 = 0,62 \cdot 127^2 = 9999,98 \approx 10000 \text{ W}$$

$$\hat{V} = \frac{V}{\omega} = \frac{127}{377} = 0,3369 \text{ Vs/rad}$$

$$W_r = \mathcal{B}_e \hat{V}^2 = \omega \cdot B_e \cdot \hat{V}^2 = 376,9911 \cdot 0,00004 \cdot 0,3369^2 \equiv 0,00 \text{ J}$$

Assim, as correntes da CPT são:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,62 \cdot 127 = 78,74 \text{ A}$$

$$I_r = \mathcal{B}_e \cdot \hat{V} = \omega \cdot B_e \cdot \hat{V} = 376,9911 \cdot 0,00004 \cdot 0,3369 = 0,005 \text{ A} \equiv 0,00 \text{ A}$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{78,74^2 - 78,74^2 - 0^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_{as} = \sqrt{(G_1 - G_e)^2 \cdot V^2} = \sqrt{(0,62 - 0,62)^2 \cdot 127^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_{rs} = \sqrt{(\mathcal{B}_1 - \mathcal{B}_e)^2 \cdot \hat{V}^2} = \sqrt{(0 - 0)^2 \cdot 0,3369^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_g = \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{0^2 - 0^2 - 0^2} = 0 \text{ A}$$

As potências da CPT, portanto são:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 78,74 = 9999,98 \approx 10000 \text{ VA}$$

$$P = V \cdot I_a = 127 \cdot 78,74 = 9999,98 \approx 10000 \text{ W}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 0,005 = 0,67 \text{ var}$$

$$D = V \cdot I_v = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

$$D_{as} = V \cdot I_{as} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

$$D_{rs} = V \cdot I_{rs} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ var}$$

$$D_g = V \cdot I_g = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

Finalmente, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{10000}{\sqrt{10000^2 + 0,67^2 + 0^2}} \equiv 1,00$$

- *Cálculo dos valores teóricos da CPC*

Anteriormente foram calculados os parâmetros: I , ϕ , Y_e , P e I_a , logo:

$$I = 78,74 \text{ A} ; \phi = 0^\circ ; Y_e = 0,62 + j0,00004;$$

$$P = 9999,98 \text{ W};$$

$$I_a = 78,74 \text{ A}$$

Com isso, calculam-se as correntes da CPC:

$$I_r = \sqrt{B_e^2 \cdot V^2} = \sqrt{0,00004^2 \cdot 127^2} = 0,005 \equiv 0 \text{ A}$$

$$I_s = \sqrt{((G_1 - G_e) \cdot V)^2} = \sqrt{((0,62 - 0,62) \cdot 127)^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{78,74^2 - 78,74^2 - 0^2 - 0^2} = 0 \text{ A}$$

As potências da CPC, portanto resultam:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 78,74 = 9999,98 \text{ VA} \approx 10000 \text{ VA}$$

$$P = V \cdot I_a = 127 \cdot 78,74 = 9999,98 \approx 10000 \text{ W}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 0,005 = 0,67 \equiv 0 \text{ var}$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

Finalmente, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{10000}{10000} = 1,00$$

A Tabela 16 apresenta os valores teóricos e simulados da CPT e CPC para o caso senoidal. Como esperado, analisando os valores da corrente total e corrente ativa resultam iguais, em consequência a potência aparente é igual à potência ativa. O valor da potência/corrente reativa é nulo uma vez que o fator de potência foi compensado resultando unitário ($\lambda = 1$). Por ser uma carga linear, a potência do consumidor da CPT resulta nulo ($P_c = 0$) e a potência do distribuidor da CPC é igual a potência ativa da CPT ($P_{a_CPC} = P_{CPT}$), logo o fator de potência de ambas as teorias é igual.

Tabela 16 - Dados da carga RL//C_{1,0} para o caso senoidal.
Senoidal com DHT_v = 0,00% e DHT_i = 0,00%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10000,00	10000,00	A (VA)	10000,00	10000,00
P (W)	10000,00	10000,00	P _a (W)	10000,00	10000,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	0,60	0,67	Q (var)	0,60	0,67
D _{as} (VA)	0,00	0,00	D _s (VA)	0,00	0,00
D _{rs} (var)	0,00	0,00			
D _g (VA)	0,00	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	78,74	78,74	I (A)	78,74	78,74
I _a (A)	78,74	78,74	I _a (A)	78,74	78,74
I _r (A)	0,00	0,00	I _r (A)	0,00	0,00
I _{as} (A)	0,00	0,00	I _s (A)	0,00	0,00
I _{rs} (A)	0,00	0,00			
I _g (A)	0,00	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	1,000	1,000	λ	1,000	1,000

4.2.2.2 Condição 1 (5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

- *Cálculo dos valores teóricos da CPT:*

Considerando os valores eficazes da tensão: $V_1 = 127 V$, $V_3 = V_5 = V_7 = 6,35 V$ e a frequência fundamental de 60 Hz. Assim, o valor da tensão eficaz resulta:

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2} = \sqrt{127^2 + 6,35^2 + 6,35^2 + 6,35^2} = 127,48 V$$

Pelo circuito da Figura 8.b, obtém-se o paralelo da impedância equivalente da carga RL com o capacitor C, e calcula-se as correntes, os ângulos, as admitância e o valor eficaz de \hat{v} para cada ordem harmônica conforme é apresentado na Tabelas 17.

Tabela 17 - Parâmetros calculados para a carga RL//C_{1,0} para a condição 1.

$Z_h = R + jh\omega L // \frac{1}{j\omega C}$	$I_h = \frac{V_h}{Z_h}$	$Y_h = \frac{1}{Z_h} = G_h + jB_h$	$\hat{V}_h = \frac{V_h}{h\omega}$
$Z_1 = 1,6129 - j0,0001\Omega$	$I_1 = 78,74 A$	$Y_1 = 0,62 + j0$	$\hat{V}_1 = 0,3369 V$
$Z_3 = 0,1456 - j0,9432\Omega$	$I_3 = 6,65 A$	$Y_3 = 0,1598 + j1,0355$	$\hat{V}_3 = 0,0056 V$
$Z_5 = 0,0148 - j0,4794\Omega$	$I_5 = 13,24 A$	$Y_5 = 0,0643 + j0,0839$	$\hat{V}_5 = 0,0034 V$
$Z_7 = 0,0036 + j0,3249\Omega$	$I_7 = 19,54 A$	$Y_7 = 0,0339 + j3,0771$	$\hat{V}_7 = 0,0024 V$

Assim, os valores eficazes da corrente e da tensão imparcial resultam:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{78,74^2 + 6,65^2 + 13,24^2 + 19,54^2} = 82,47 A$$

$$\hat{V} = \sqrt{\hat{V}_1^2 + \hat{V}_3^2 + \hat{V}_5^2 + \hat{V}_7^2} = \sqrt{0,3369^2 + 0,0056^2 + 0,0034^2 + 0,0024^2} = 0,3370 \text{ Vs/rad}$$

A reatividade de cada ordem harmônica é calculada da seguinte forma:

$$B_h = \frac{\omega h I_h \sin \theta_h}{V_h} \quad (86)$$

$$B_1 = 0,0157 H^{-1}; B_3 = 1171,15 H^{-1}; B_5 = 3928,08 H^{-1}; B_7 = 8120,19 H^{-1}$$

Logo, calcula-se a potência ativa e a energia reativa:

$$P = \sum G_h \cdot V_h^2 = 0,62 \cdot 127^2 + 0,1598 \cdot 6,35^2 + 0,0643 \cdot 6,35^2 + 0,0339 \cdot 6,35^2 = 10010 W$$

$$\begin{aligned} W_r &= \sum \frac{B_h \cdot V_k^2}{\omega^2 h^2} = \sum \frac{B_h \cdot V_h^2}{\omega h} = \\ &= \frac{0 \cdot 127^2}{376,9911 \cdot 1} + \frac{1,0355 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 3} + \frac{2,0839 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 5} + \frac{3,0771 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 7} = 0,1303 J \end{aligned}$$

Portanto, a condutância e reatidade equivalente são:

$$G_e = \frac{P}{V^2} = \frac{10010}{127,48^2} = 0,616 S$$

$$B_e = \frac{W_r}{\hat{V}^2} = \frac{0,1303}{0,3370^2} = 1,148 H^{-1}$$

Seguidamente, calculam-se as correntes da CPT:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,616 \cdot 127,48 = 78,53 A$$

$$I_r = B_e \cdot \hat{V} = 1,148 \cdot 0,3370 = 0,39 A$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{82,47^2 - 78,53^2 - 0,39^2} = 25,19 A$$

$$I_{as} = \sqrt{\sum (G_k - G_e) \cdot V_k^2}$$

$$= \sqrt{(0,62 - 0,616)^2 \cdot 127^2 + (0,1598 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0643 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0339 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2}$$

$$I_{as} = 5,88 A$$

$$I_{rs} = \sqrt{\sum (B_k - B_e) \cdot \hat{V}^2}$$

$$= \sqrt{(0,0157 - 1,148)^2 \cdot 127^2 + (1171,15 - 1,148)^2 \cdot 6,35^2 + (3928,08 - 1,148)^2 \cdot 6,35^2 + (8120,19 - 1,148)^2 \cdot 6,35^2}$$

$$I_{rs} = 24,49 A$$

$$I_g = \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{25,19^2 - 5,88^2 - 24,49^2} = 0 A$$

Logo, as potências da CPT são obtidas:

$$A = V \cdot I = 127,48 \cdot 82,47 \approx 10510 VA$$

$$P = V \cdot I_a = 127,48 \cdot 78,53 \approx 10010 W$$

$$Q = V \cdot I_r = 127,48 \cdot 0,39 \approx 49,29 var$$

$$D = V \cdot I_v = 127,48 \cdot 25,19 \approx 3211,00 VA$$

$$D_{as} = V \cdot I_{as} = 127,48 \cdot 5,88 \approx 749,60 VA$$

$$D_{rs} = V \cdot I_{rs} = 127,48 \cdot 24,49 \approx 3122,00 var$$

$$D_g = V \cdot I_g = 127,48 \cdot 0 = 0 VA$$

Finalmente, obtém-se o fator de potência:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{10010}{\sqrt{10010^2 + 49,29^2 + 3211^2}} = 0,952$$

- *Cálculos dos valores teóricos da CPC:*

Anteriormente, foram calculados os parâmetros Z_h , I_h e Y_h (vide Tabela 17), assim como a corrente ativa:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,616 \cdot 127,48 = 78,53 A$$

Logo, calculam-se as correntes da CPC:

$$\begin{aligned} I_r &= \sqrt{\sum B_h^2 \cdot V_h^2} \\ &= \sqrt{0^2 \cdot 127^2 + 1,0355^2 \cdot 6,35^2 + 2,0839^2 \cdot 6,35^2 + 3,0771^2 \cdot 6,35^2} \\ &= 24,50 A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_s &= \sqrt{\sum ((G_h - G_e) \cdot V_h)^2} \\
&= \sqrt{(0,62 - 0,616)^2 \cdot 127^2 + (0,1598 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + \dots} \\
&\quad \sqrt{\dots + (0,0643 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0339 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2} \\
&= 5,88 \text{ A}
\end{aligned}$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{82,47^2 - 78,53^2 - 24,50^2 - 5,88^2} = 0 \text{ A}$$

No caso da CPC, o valor da susceptância B_h é o valor imaginário da admitância Y_h .

Assim, as potências da CPC são:

$$A = V \cdot I = 127,48 \cdot 82,47 \approx 10510 \text{ VA}$$

$$P = V \cdot I_a = 127,48 \cdot 78,53 \approx 10010 \text{ W}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127,48 \cdot 24,50 \approx 3123,00 \text{ var}$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127,48 \cdot 5,88 \approx 749,60 \text{ VA}$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127,48 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

Logo, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{10010}{10510} = 0,952$$

Todos os valores teóricos calculados anteriormente e os valores simulados são disponibilizados na Tabela 18. Pode-se notar que, para a condição de tensão distorcida, além de ser diferente de zero há uma diferença nos valores da corrente/potência reativa da CPT e CPC. Além disso, o valor dos reativos não resulta nulo devido a capacitor ser projetado na fundamental. No caso da CPT, mesmo que a potência reativa leve em conta as harmônicas (comuns entre a tensão imparcial \hat{v} e a corrente), Q_{CPT} não inclui os efeitos dos diferentes valores das reatividades provocadas pelas diferentes ordens harmônicas de tensão. Este efeito na CPT se manifesta na potência reativa dispersa (D_{rs_CPT}). Já a potência reativa da CPC não diferencia a susceptância devido às harmônicas comuns da tensão e corrente, e os valores diferentes das susceptância para cada ordem harmônica, ou seja, a Q_{CPC} inclui estes dois efeitos na susceptância. Portanto, esta diferença entre os reativos está pelo fato dessas grandezas serem calculados de forma diferente, no entanto a sua equivalência pode ser dada mediante:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = \sqrt{0,39^2 + 24,49^2} = 24,50 \text{ A} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{Q_{CPT}^2 + D_{rs_CPT}^2} = Q_{CPC}$$

Além disso, observa-se que:

$$I_{rs_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \ll I_{r_CPC}$$

Por outro lado, como a carga RL//C é linear, não há potência do consumidor da CPC ($P_{c_CPC} = 0$), assim como não há corrente gerada pela carga ($I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$) e a equivalência entre as demais grandezas é mantida:

$$P_{d_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \text{ e } I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

Além disso, devido à interação do capacitor com as harmônicas de tensão, observa-se um substancial elevação do DHT de corrente que atinge 31,15 %.

Tabela 18 - Dados da carga RL//C_{1,0} para a condição 1.
Condição 1 (5%) com DHT_V = 8,66% e DHT_I = 31,15%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10510,00	10510,00	A (VA)	10510,00	10510,00
P (W)	10010,00	10010,00	P_d (W)	10010,00	10010,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	49,18	49,29	Q (var)	3123,00	3123,00
D_{as} (VA)	749,50	749,60	D_s (VA)	749,50	749,60
D_{rs} (var)	3122,00	3122,00			
D_g (VA)	30,61	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	82,47	82,47	I (A)	82,47	82,47
I_a (A)	78,53	78,53	I_a (A)	78,53	78,53
I_r (A)	0,39	0,39	I_r (A)	24,50	24,50
I_{as} (A)	5,88	5,88	I_s (A)	5,88	5,88
I_{rs} (A)	24,49	24,49			
I_g (A)	0,24	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,952	0,952	λ	0,952	0,952

4.2.2.3 Condição 2 (5% de 3ª harmônica, 7% de 5ª harmônica e 5% de 7ª harmônica)

Similarmente a metodologia empregada para a condição 1, os dados teóricos foram obtidos e resumidos conjuntamente com os valores simulados na Tabela 19. Nota-se que, novamente os valores das correntes reativas são diferentes entre as teorias, os valores de I_{as} e I_s são iguais e I_g e I_c são praticamente nulos (a carga RL//C não gera correntes harmônicas). Similarmente a condição 1, a equivalência para os reativos pode ser obtida mediante:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = \sqrt{0,51^2 + 27,71^2} = 27,72 \text{ A} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{Q_{CPT}^2 + D_{rs_CPT}^2} = Q_{CPC}$$

$$I_{rs_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \ll I_{r_CPC}$$

Tabela 19 - Dados da carga RL//C_{1,0} para a condição 2.**Condição 2 com DHT_v = 9,95% e DHT₁ = 35,23%**

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10650,00	10650,00	A (VA)	10650,00	10650,00
P (W)	10010,00	10010,00	P_d (W)	10010,00	10010,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	65,44	65,56	Q (var)	3537,00	3537,00
D_{as} (VA)	868,70	868,80	D_s (VA)	868,70	868,80
D_{rs} (var)	3537,00	3537,00			
D_g (VA)	33,33	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	83,48	83,48	I (A)	83,48	83,48
I_a (A)	78,45	78,45	I_a (A)	78,45	78,45
I_r (A)	0,51	0,51	I_r (A)	27,72	27,72
I_{as} (A)	6,81	6,81	I_s (A)	6,81	6,81
I_{rs} (A)	27,71	27,71			
I_g (A)	0,26	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,940	0,940	λ	0,940	0,940

4.2.2.4 Condição 3 (6,5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Para a condição 3, a Tabela 20 apresenta os valores calculados e simulados para as teorias CPT e CPC. Verifica-se o mesmo comportamento que as condições 1 e 2 quanto as equivalências das grandezas entre as teorias:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{Q_{CPT}^2 + D_{rs_CPT}^2} = Q_{CPC}$$

$$I_{rs_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \ll I_{r_CPC}$$

$$P_{c_CPC} = 0 \text{ e } P_{d_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

e como a carga RL//C é linear não há corrente gerada pela carga:

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$$

Tabela 20 - Dados da carga RL//C_{1.0} para a condição 3.
Condição 3 (6,5%) com DHT_v = 11,26% e DHT₁ = 40,49%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10860,00	10860,00	A (VA)	10860,00	10860,00
P (W)	10020,00	10020,00	P _d (W)	10020,00	10020,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	82,91	83,04	Q (var)	4070,00	4070,00
D _{as} (VA)	974,40	974,60	D _s (VA)	974,40	974,60
D _{rs} (var)	4069,00	4069,00			
D _g (VA)	39,88	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	84,95	84,95	I (A)	84,95	84,95
I _a (A)	78,38	78,38	I _a (A)	78,38	78,38
I _r (A)	0,65	0,65	I _r (A)	31,85	31,85
I _{as} (A)	7,62	7,63	I _s (A)	7,62	7,63
I _{rs} (A)	31,84	31,84			
I _g (A)	0,31	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,923	0,923	λ	0,923	0,923

4.2.2.5 Condição 4 (7,5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Similarmente aos casos anteriores, a Tabela 21 mostra os valores teóricos e simulados. Nota-se um incremento da distorção de corrente de 40,49 % (condição 3) para 46,72 %, no entanto, similarmente que as condições anteriores 1, 2 e 3, verifica-se as equivalências das grandezas entre as teorias:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{Q_{CPT}^2 + D_{rs_CPT}^2} = Q_{CPC}$$

$$I_{rs_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \ll I_{r_CPC}$$

$$P_{c_CPC} = 0 \text{ e } P_{d_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

e como a carga RL//C é linear não há corrente gerada pela carga:

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$$

Tabela 21 - Dados da carga RL//C_{1,0} para a condição 4.
Condição 4 (7,5%) com DHT_v = 12,99% e DHT_i = 46,72%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	11130,00	11130,00	A (VA)	11130,00	11130,00
P (W)	10020,00	10020,00	P_a (W)	10020,00	10020,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	110,40	110,60	Q (var)	4706,00	4706,00
D_{as} (VA)	1124,00	1125,00	D_s (VA)	1124,00	1125,00
D_{rs} (var)	4705,00	4705,00			
D_g (VA)	46,10	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	86,91	86,91	I (A)	86,91	86,91
I_a (A)	78,26	78,27	I_a (A)	78,26	78,27
I_r (A)	0,86	0,86	I_r (A)	36,75	36,75
I_{as} (A)	8,78	8,78	I_s (A)	8,78	8,78
I_{rs} (A)	36,74	36,74			
I_g (A)	0,36	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,901	0,901	λ	0,901	0,901

4.2.2.6 Condição 5 (8% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Similarmente, para os valores mostrados na Tabela 22, verifica-se a correspondência entre as teorias:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{Q_{CPT}^2 + D_{rs_CPT}^2} = Q_{CPC}$$

$$I_{rs_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \ll I_{r_CPC}$$

$$P_{c_CPC} = 0 \text{ e } P_{a_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

e como a carga RL//C é linear não há corrente gerada pela carga:

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$$

Tabela 22 - Dados da carga RL//C_{1,0} para a condição 5.
Condição 5 (8%) com DHT_v = 13,86% e DHT_i = 49,83%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	11280,00	11280,00	A (VA)	11280,00	11280,00
P (W)	10030,00	10030,00	P _d (W)	10030,00	10030,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	125,70	125,80	Q (var)	5025,00	5025,00
D _{as} (VA)	1199,00	1200,00	D _s (VA)	1199,00	1200,00
D _{rs} (var)	5024,00	5024,00			
D _g (VA)	49,22	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	87,97	87,97	I (A)	87,97	87,97
I _a (A)	78,20	78,20	I _a (A)	78,20	78,20
I _r (A)	0,98	0,98	I _r (A)	39,20	39,20
I _{as} (A)	9,35	9,36	I _s (A)	9,35	9,36
I _{rs} (A)	39,18	39,18			
I _g (A)	0,38	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,889	0,889	λ	0,889	0,889

4.2.2.7 Condição 6 (11% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Para a condição 6, a Tabela 23 mostra os valores das grandezas de análise para ambas as teorias. Pelos valores, verificam-se as seguintes equivalências:

$$I_{rs_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \ll I_{r_CPC}$$

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{Q_{CPT}^2 + D_{rs_CPT}^2} = Q_{CPC}$$

$$P_{c_CPC} = 0 \text{ e } P_{d_CPC} = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \Rightarrow P_{CPT} = P_{CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} \Rightarrow D_{as_CPT} = D_{s_CPC}$$

e como a carga RL//C é linear não há corrente gerada pela carga:

$$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0 \Rightarrow D_{g_CPT} = D_{c_CPC}$$

Tabela 23 - Dados da carga RL//C_{1,0} para a condição 6.
Condição 6 (11%) com DHT_v = 19,05% e DHT_I = 68,52%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	12340,00	12340,00	A (VA)	12340,00	12340,00
P (W)	10050,00	10050,00	P _d (W)	10050,00	10050,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	239,00	239,10	Q (var)	6968,00	6968,00
D _{as} (VA)	1649,00	1649,00	D _s (VA)	1649,00	1649,00
D _{rs} (var)	6964,00	6964,00			
D _g (VA)	68,17	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	95,45	95,45	I (A)	95,45	95,45
I _a (A)	77,74	77,74	I _a (A)	77,74	77,74
I _r (A)	1,85	1,85	I _r (A)	53,89	53,89
I _v (A)	55,35	55,35	-	-	-
I _{as} (A)	12,76	12,76	I _s (A)	12,76	12,76
I _{rs} (A)	53,86	53,86			
I _g (A)	0,53	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,814	0,814	λ	0,814	0,814

4.2.2.8 Condição 7 (15% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Finalmente, para uma condição em que a fonte impõe um DHT de tensão de 25,98 %, os valores teóricos e simulados das grandezas das teorias CPT e CPC, apresentadas na Tabela 24, mostra que é mantida a equivalência apresentada para as condições anteriores (1, 2, 3, 4, 5 e 6). Há uma análise comparativa, mostrando que o incremento do DHT de tensão não altera a correspondência entre as teorias.

Tabela 24 - Dados da carga RL//C_{1,0} para a condição 7.
Condição 7 (15%) com DHT_v = 25,98% e DHT_I = 93,44%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	14140,00	14140,00	A (VA)	14140,00	14140,00
P (W)	10090,00	10090,00	P_a (W)	10090,00	10090,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	450,10	450,30	Q (var)	9643,00	9643,00
D_{as} (VA)	2249,00	2250,00	D_s (VA)	2249,00	2250,00
D_{rs} (var)	9633,00	9633,00			
D_g (VA)	94,19	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	107,80	107,76	I (A)	107,80	107,76
I_a (A)	76,92	76,92	I_a (A)	76,92	76,92
I_r (A)	3,43	3,43	I_r (A)	73,49	73,49
I_{as} (A)	17,14	17,14	I_s (A)	17,14	17,14
I_{rs} (A)	73,41	73,41			
I_g (A)	0,72	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,714	0,714	λ	0,714	0,714

As Figuras 9 e 10 apresentam as formas de onda da corrente total e sua reconstrução do sinal para a CPT e CPC, observa-se que as formas de onda estão sobrepostas, ou seja, a corrente total é igual sua reconstrução do sinal. Nota-se que com a inserção do capacitor em paralelo, amplificou-se a distorção de corrente (DHT_I) se comparado com a carga RL.

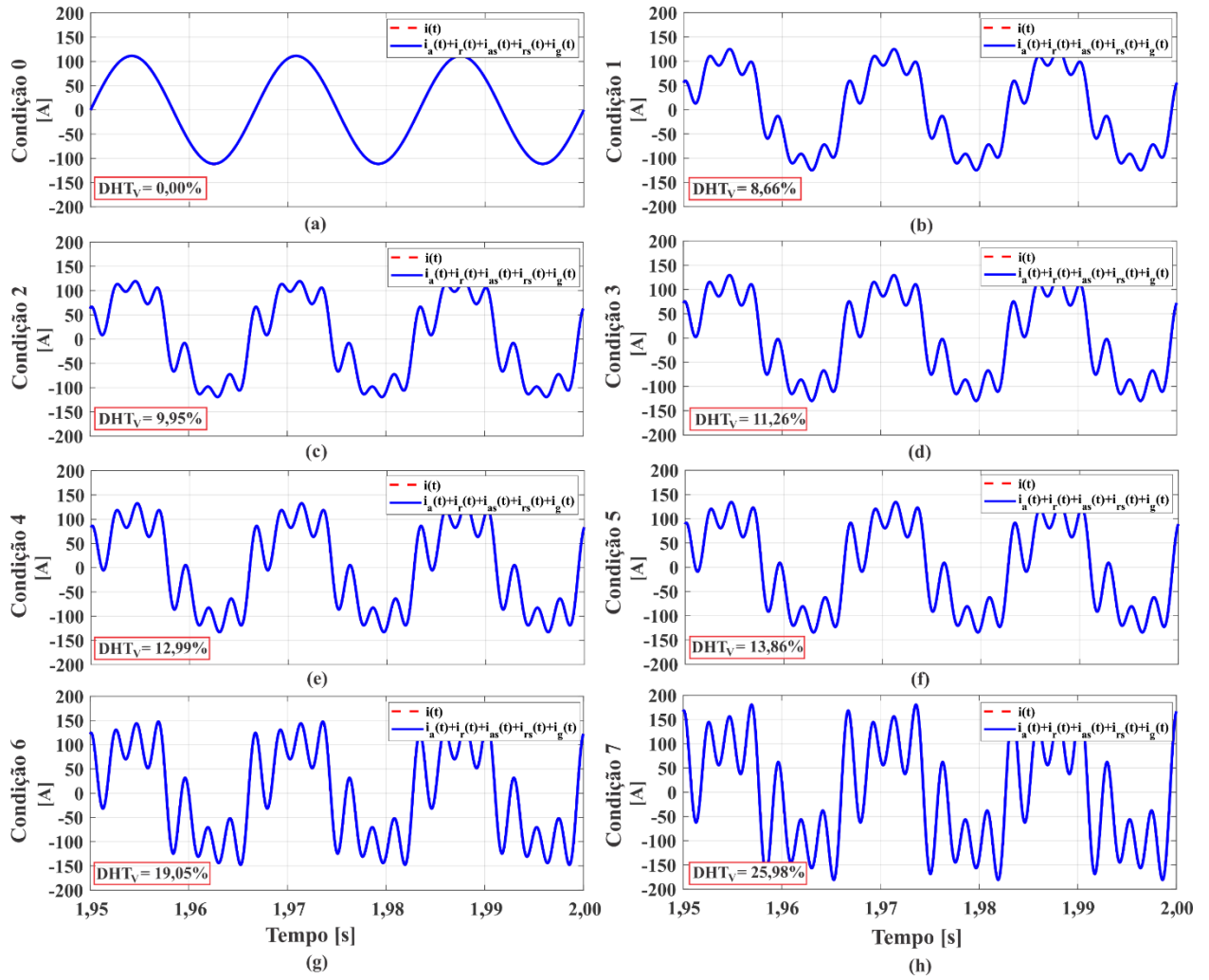


Figura 9 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPT para carga $RL//C_{1,0}$.

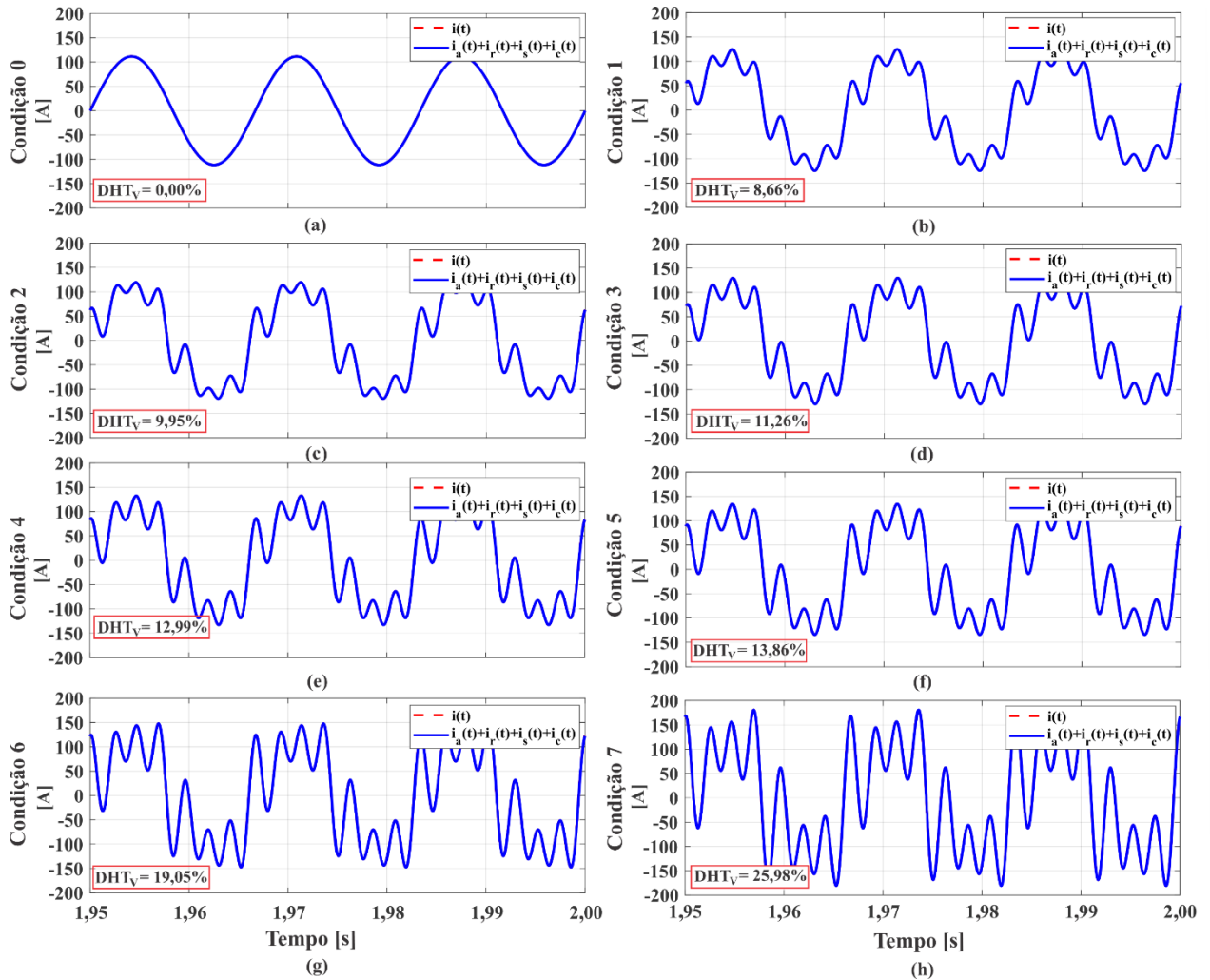


Figura 10 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPC para carga $RL//C_{1,0}$.

4.2.2.9 Discussões sobre a operação da carga $RL//C_{1,0}$

Como verificado pelas condições analisadas anteriormente, o incremento da distorção de tensão não altera a equivalência entre as grandezas analisadas da CPT e CPC. Similarmente que para a carga RL, através do MATLAB/SIMUINK, de forma automatizada utilizando 90 amostras, foram geradas as Figuras 11 e 12 e as Tabelas 25 e 26, no qual mostram os dados com as variações percentuais das correntes decompostas em função do DHT_v . Para a carga RL em paralelo com um capacitor ($C_{1,0}$) para corrigir o fator de potência (unitário) na fundamental, foi possível observar que conforme o DHT_v aumenta, as correntes ativas (I_{a_CPT} e I_{a_CPC}) diminuem em torno de 34% para um DHT_v de 30%, já as componentes dispersas, I_{as_CPT} e I_{s_CPC} , tiveram um acréscimo de aproximadamente 17% para os mesmos 30% de DHT_v . Além disso, nota-se um incremento considerável na corrente dispersa reativa (I_{rs_CPT}) da CPT e a corrente reativa (I_{r_CPC}) e da CPC atingindo 73% de acréscimo para uma distorção de 30% de DHT_v . Este comportamento é devido a corrente do capacitor (cálculo é baseada uma função

derivativa), que quando alimentado por uma tensão harmônica, sofre uma amplificação harmônica e em consequência há um incremento no valor eficaz de I_{rs_CPT} e I_{r_CPC} . Contrariamente à corrente reativa (I_{r_CPT}) da CPT que apresenta um incremento de aproximadamente 4% para os mesmos 30% de DHT_v . Este ligeiro incremento é devido ao cálculo da corrente reativa ser baseada em uma função integral. Consequentemente, se comparado com a tensão ou corrente total, apresenta uma atenuação no conteúdo harmônico. Finalmente, como esperado, devido ao comportamento linear da carga, os valores das correntes geradas pela carga, I_{g_CPT} e I_{c_CPC} resultaram praticamente iguais à zero, pois o equivalente da carga RL e o capacitor em paralelo ($C_{1,0}$) não gera correntes harmônicas.

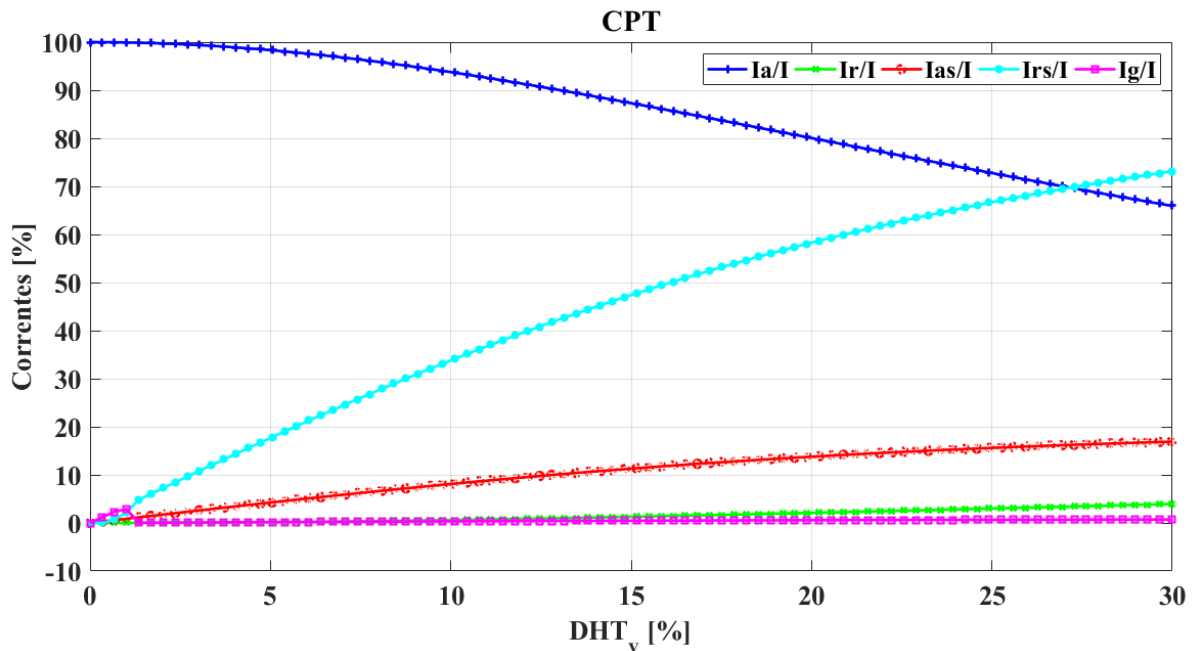


Figura 11 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHT_v para a carga RL//C_{1,0}.

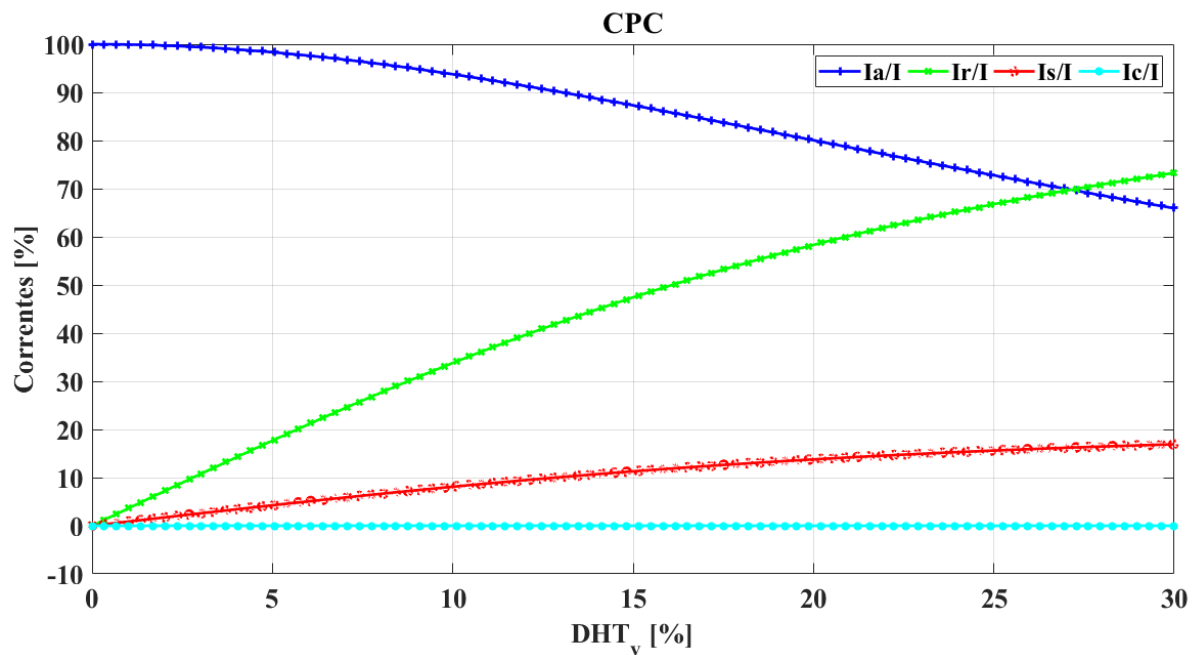


Figura 12 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHT_v para a carga $RL//C_{1,0}$.

Tabela 25 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPT para a carga $RL//C_{1,0}$.

DHT_v [%]	I [A]	I_a/I [%]	I_r/I [%]	I_{as}/I [%]	I_{rs}/I [%]	I_g/I [%]
0,00	78,74	100,00	0,01	0,00	0,00	0,00
5,00	80,03	98,30	0,17	4,30	17,86	0,18
8,00	82,00	95,80	0,41	6,70	27,88	0,27
10,00	83,77	93,64	0,62	8,18	34,11	0,33
15,00	89,67	87,09	1,31	11,39	47,79	0,47
20,00	96,77	80,24	2,08	13,73	58,04	0,57
25,00	105,74	72,88	2,99	15,59	66,61	0,65
30,00	115,77	65,96	3,94	16,91	73,13	0,71

Tabela 26 - Variações percentuais das correntes decompostas da CPC para a carga $RL//C_{1,0}$.

DHT_v [%]	I [A]	I_a/I [%]	I_r/I [%]	I_s/I [%]	I_c/I [%]
0,00	78,74	100,00	0,01	0,00	0,00
5,00	80,03	98,30	17,86	4,30	0,00
8,00	82,00	95,80	27,88	6,70	0,00
10,00	83,77	93,64	34,12	8,18	0,00
15,00	89,67	87,09	47,81	11,39	0,00
20,00	96,77	80,24	58,08	13,73	0,00
25,00	105,73	72,88	66,67	15,59	0,00
30,00	115,77	65,96	73,24	16,91	0,00

Relacionando os dados obtidos nas Tabelas 25 e 26 com as normas, IEEE ($DHT_v = 8\%$) e PRODIST ($DHT_v = 10\%$), observa-se um aumento máximo de 8 % para as componentes dispersa I_{as} e I_s , assim similarmente que para a carga RL, essas componentes podem ser consideradas irrelevantes. Não entanto, no caso da corrente reativa dispersa da CPT resultou em um acréscimo de 34% para os 10 % de DHT de tensão. Este resultado mostra que esse incremento elevado é devido exclusivamente ao efeito provocado pelas correntes harmônicas que foram amplificadas devido a combinação do capacitor e as tensões harmônicas impostas pela fonte de tensão. Portanto, neste caso torna-se interessante a implementação da FFT (uso do domínio da frequência), porque pode auxiliar na identificação de eventuais ressonâncias entre os bancos capacitivos e as tensões harmônicas presentes nos circuitos elétricos.

A Tabela 27 resume a análise comparativa entre ambas às teorias. Observa-se que, as correntes ativas resultaram iguais para todas as condições de análise ($I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$), o mesmo acontece para as componentes dispersa e dispersa ativa ($I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$). No caso das correntes reativas, apenas para a condição de tensão senoidal resultam iguais. Para a condição não senoidal a equivalência pode ser obtida mediante a combinação da componente dispersa reativa a reativa. Além disso, observa-se que como a corrente ativa de ambas as teorias foram iguais, o fator de potência também foi igual ($\lambda_{CPT} = \lambda_{CPC}$) e houve uma diminuição conforme o aumento do DHT_v .

Tabela 27 - Análise comparativa entre as teorias para a carga RL//C_{1,0}.

Senoidal	Não senoidal
$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$	$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$
$I_{r_CPT} = I_{r_CPC} = 0$	$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC} \neq 0$
$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} = 0$	$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} \neq 0$
$I_{rs_CPT} = 0$	$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$
$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$	$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$

4.2.3 Carga RL//C_{0,95}

Esta configuração da carga RL e capacitor é uma variante da carga anterior (RL//C_{1,0}), neste caso a instalação do capacitor foi para corrigir o fator de potência na fundamental de 0,80 para 0,95. Assim, os circuitos são os mesmos das Figuras 8.a e 8.b, o que altera é o valor do capacitor utilizado.

4.2.3.1 Condição 0 - tensão senoidal

- *Cálculos dos valores teóricos para CPT:*

Considerando 127 V de tensão eficaz, 60 Hz e $\omega = 2\pi 60 = 376,9911 \text{ rad/s}$, a impedância equivalente da carga RL em paralelo com o capacitor resulta:

$$Z_e = (R + j\omega L) // \frac{1}{j\omega C} = (1,0323 + j0,7742) // \left(\frac{1}{j0,261}\right) = 1,4557 + j0,4784 \Omega$$

A corrente e a admitância equivalente são:

$$I = \frac{V}{Z_e} = \frac{127}{1,4557 + j0,4784} = 82,88 \text{ A}$$

$$Y_e = \frac{1}{Z_e} = \frac{1}{1,4557 + j0,4784} = 0,62 - j0,2038 \text{ S} \equiv G_e$$

Logo, a potência ativa, o valor eficaz da integral imparcial da tensão e a energia reativa resultam:

$$P = G_e \cdot V^2 = 0,62 \cdot 127^2 = 9999,98 \text{ W} \approx 10000 \text{ W}$$

$$\hat{V} = \frac{V}{\omega} = \frac{127}{377} = 0,3369 \text{ Vs/rad}$$

$$W_r = B_e \hat{V}^2 = \omega \cdot B_e \cdot \hat{V}^2 = 376,9911 \cdot (-0,2038) \cdot 0,3369^2 = 8,718 \text{ J}$$

Assim, as correntes da CPT são:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,62 \cdot 127 = 78,74 \text{ A}$$

$$I_r = B_e \cdot \hat{V} = \omega \cdot B_e \cdot \hat{V} = 376,9911 \cdot 0,2038 \cdot 0,3369 = 25,88 \text{ A}$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{82,88^2 - 78,74^2 - 25,88^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_{as} = \sqrt{(G_1 - G_e)^2 \cdot V^2} = \sqrt{(0,62 - 0,62)^2 \cdot 127^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_{rs} = \sqrt{(B_1 - B_e)^2 \cdot \hat{V}^2} = \sqrt{(-76,816 + 76,816)^2 \cdot 0,3369^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_g = \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{0^2 - 0^2 - 0^2} = 0 \text{ A}$$

As potências da CPT, portanto são:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 82,88 \approx 10530 \text{ VA}$$

$$P = V \cdot I_a = 127 \cdot 78,74 \approx 1000 \text{ W}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 25,88 \approx 3286 \text{ var}$$

$$D = V \cdot I_v = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

$$D_{as} = V \cdot I_{as} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

$$D_{rs} = V \cdot I_{rs} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ var}$$

$$D_g = V \cdot I_g = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

Finalmente, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{10000}{\sqrt{10000^2 + 3286^2 + 0^2}} \equiv 0,95$$

- *Cálculo dos valores teóricos para CPC*

Anteriormente foram calculados os parâmetros: I , Y_e , P e I_a , logo:

$$I = 82,88 \text{ A}; Y_e = 0,62 - j0,2038 \text{ S}$$

$$P = 10000 \text{ W}$$

$$I_a = 78,74 \text{ A}$$

Com isso, calculam-se as correntes da CPC:

$$I_r = \sqrt{B_e^2 \cdot V^2} = \sqrt{0,2038^2 \cdot 127^2} = 25,88 \text{ A}$$

$$I_s = \sqrt{((G_1 - G_e) \cdot V)^2} = \sqrt{((0,62 - 0,62) \cdot 127)^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{82,88^2 - 78,74^2 - 0^2 - 0^2} = 0 \text{ A}$$

As potências da CPC, portanto resultam:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 82,88 \approx 10530 \text{ VA}$$

$$P = V \cdot I_a = 127 \cdot 78,74 \approx 1000 \text{ W}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 25,88 \approx 3286 \text{ var}$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

Finalmente, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{10000}{10530} \equiv 0,95$$

Para o caso senoidal, a Tabela 28 resume os valores teóricos e simulados. É possível observar que no caso senoidal para esta carga, os valores das correntes são iguais em ambas às teorias. Além disso, agora a corrente reativa é diferente de zero uma vez que não foram compensados todos os reativos. Similar a carga RL//C_{1,0}, a potência do consumidor da CPC resulta nulo ($P_{c_CPC} = 0$) e a potência do distribuidor é igual a potência ativa da CPT ($P_{d_CPC} = P_{CPT}$), conseqüentemente, o fator de potência é idêntico.

Tabela 28 - Dados da carga RL//C_{0,95} para o caso senoidal.
Senoidal com DHT_v = 0,00% e DHT_i = 0,00%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10530,00	10530,00	A (VA)	10530,00	10530,00
P (W)	10000,00	10000,00	P _a (W)	10000,00	10000,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	3286,00	3286,00	Q (var)	3287,00	3286,00
D _{as} (VA)	0,00	0,00	D _s (VA)	0,00	0,00
D _{rs} (var)	0,00	0,00			
D _g (VA)	0,02	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	82,88	82,88	I (A)	82,88	82,88
I _a (A)	78,74	78,74	I _a (A)	78,74	78,74
I _r (A)	25,88	25,88	I _r (A)	25,88	25,88
I _{as} (A)	0,00	0,00	I _s (A)	0,00	0,00
I _{rs} (A)	0,00	0,00			
I _g (A)	0,00	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,950	0,950	λ	0,950	0,950

4.2.3.2 Condição 1 (5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

- *Cálculo dos valores teóricos da CPT:*

Considerando os valores eficazes da tensão: $V_1 = 127 V$, $V_3 = V_5 = V_7 = 6,35 V$ e a frequência fundamental de 60 Hz. Assim o valor da tensão eficaz resulta:

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2} = \sqrt{127^2 + 6,35^2 + 6,35^2 + 6,35^2} = 127,48 V$$

Pelo circuito da Figura 8.b, obtém-se o paralelo da impedância equivalente da carga RL com o capacitor C, e calcula-se as correntes, os ângulos, as admitâncias e o valor eficaz de \hat{v} para cada ordem harmônica conforme é apresentado na Tabela 29.

Tabela 29 - Parâmetros calculados da carga RL//C_{0,95} para a condição 1.

$Z_h = R + jh\omega L // \frac{1}{jh\omega C}$	$I_h = \frac{V_h}{Z_h}$	$Y_h = \frac{1}{Z_h} = G_h + jB_h$	$\hat{V}_h = \frac{V_h}{h\omega}$
$Z_1 = 1,4557 + j0,4784\Omega$	$I_1 = 82,88 A$	$Y_1 = 0,62 - j0,2038$	$\hat{V}_1 = 0,3369 V$
$Z_3 = 0,7779 - j2,0647\Omega$	$I_3 = 2,88 A$	$Y_3 = 0,1598 + j0,4241$	$\hat{V}_3 = 0,0056 V$
$Z_5 = 0,0565 - j0,9356\Omega$	$I_5 = 6,77 A$	$Y_5 = 0,0643 + j1,0649$	$\hat{V}_5 = 0,0034 V$
$Z_7 = 0,0124 - j0,6056\Omega$	$I_7 = 10,48 A$	$Y_7 = 0,0339 + j1,6505$	$\hat{V}_7 = 0,0024 V$

Assim, os valores eficazes da corrente e da tensão imparcial resultam:

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + I_7^2} = \sqrt{82,88^2 + 2,88^2 + 6,77^2 + 10,48^2} = 83,87 \text{ A}$$

$$\hat{V} = \sqrt{\hat{V}_1^2 + \hat{V}_3^2 + \hat{V}_5^2 + \hat{V}_7^2} = \sqrt{0,3369^2 + 0,0056^2 + 0,0034^2 + 0,0024^2} \\ = 0,3370 \text{ Vs/rad}$$

A reatidade de cada ordem harmônica é calculada da seguinte forma:

$$B_h = \frac{\omega h I_h \sin \theta_h}{V_h}$$

$$B_1 = -76,82 \text{ H}^{-1}; B_3 = 479,67 \text{ H}^{-1}; B_5 = 2007,30 \text{ H}^{-1}; B_7 = 4355,46 \text{ H}^{-1}$$

Logo, calcula-se a potência ativa e a energia reativa:

$$P = \sum G_h \cdot V_h^2 = 0,62 \cdot 127^2 + 0,1598 \cdot 6,35^2 + 0,0643 \cdot 6,35^2 + 0,0339 \cdot 6,35^2 \\ = 10010 \text{ W}$$

$$W_r = \sum \frac{B_h \cdot V_k^2}{\omega^2 \cdot h^2} = \sum \frac{B_h \cdot V_h^2}{\omega \cdot h} = \\ = \frac{0,2038 \cdot 127^2}{376,9911 \cdot 1} + \frac{0,4241 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 3} + \frac{1,0649 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 5} + \frac{1,6505 \cdot 6,35^2}{376,9911 \cdot 7} \\ = -8,6544 \text{ J}$$

Portanto, condutância e reatidade equivalente são:

$$G_e = \frac{P}{V^2} = \frac{10010}{127,48^2} = 0,616 \text{ S}$$

$$B_e = \frac{W_r}{\hat{V}^2} = \frac{-8,6544}{0,3370^2} = -76,227 \text{ H}^{-1}$$

Calculam-se as correntes da CPT:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,616 \cdot 127,48 = 78,53 \text{ A}$$

$$I_r = B_e \cdot \hat{V} = 76,227 \cdot 0,3370 = 25,68 \text{ A}$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{82,88^2 - 78,53^2 - 25,68^2} = 14,40 \text{ A}$$

$$I_{as} = \sqrt{\sum (G_k - G_e) \cdot V_k^2} \\ = \sqrt{(0,62 - 0,616)^2 \cdot 127^2 + (0,1598 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + \dots} \\ \sqrt{\dots + (0,0643 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0339 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2} \\ = 5,88 \text{ A}$$

$$\begin{aligned}
I_{rs} &= \sqrt{\sum (B_k - B_e) \cdot \hat{V}^2} \\
&= \sqrt{(-76,82 + 76,227)^2 \cdot 127^2 + (479,67 + 76,227)^2 \cdot 6,35^2 + \dots} \\
&\quad \sqrt{\dots + (2007,30 + 76,227)^2 \cdot 6,35^2 + (4355,46 + 76,227)^2 \cdot 6,35^2} \\
&= 13,14 \text{ A} \\
I_g &= \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{14,40^2 - 5,88^2 - 13,14^2} = 0 \text{ A}
\end{aligned}$$

Logo, as potências da CPT são obtidas:

$$\begin{aligned}
A &= V \cdot I = 127,48 \cdot 83,87 \approx 10690,00 \text{ VA} \\
P &= V \cdot I_a = 127,48 \cdot 78,53 \approx 10010 \text{ var} \\
Q &= V \cdot I_r = 127,48 \cdot 25,68 \approx 3274,00 \text{ var} \\
D &= V \cdot I_v = 127,48 \cdot 14,40 \approx 1836,00 \text{ VA} \\
D_{as} &= V \cdot I_{as} = 127,48 \cdot 5,88 \approx 749,60 \text{ VA} \\
D_{rs} &= V \cdot I_{rs} = 127,48 \cdot 13,14 \approx 1676,00 \text{ var} \\
D_g &= V \cdot I_g = 127,48 \cdot 0 = 0 \text{ VA}
\end{aligned}$$

Finalmente, obtém-se o fator de potência:

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{10010}{\sqrt{10010^2 + 3274^2 + 1836^2}} = 0,936$$

- *Cálculo dos valores teóricos da CPC:*

Anteriormente, foram calculados os parâmetros Z_h , I_h e Y_h (vide Tabela 29), logo, calculam-se as correntes da CPC:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,616 \cdot 127,48 = 78,53 \text{ A}$$

$$I_r = \sqrt{\sum B_h^2 \cdot V_h^2}$$

$$I_r = \sqrt{0,2038^2 \cdot 127^2 + 0,4241^2 \cdot 6,35^2 + 1,0649^2 \cdot 6,35^2 + 1,6505^2 \cdot 6,35^2}$$

$$I_r = 28,85 \text{ A}$$

$$I_s = \sqrt{\sum ((G_h - G_e) \cdot V_h)^2}$$

$$I_s = \sqrt{(0,62 - 0,616)^2 \cdot 127^2 + (0,1598 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + \dots}$$

$$\sqrt{\dots + (0,0643 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2 + (0,0339 - 0,616)^2 \cdot 6,35^2}$$

$$I_s = 5,88 \text{ A}$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{83,87^2 - 78,53^2 - 28,85^2 - 5,88^2} = 0 \text{ A}$$

No caso da CPC, o valor da susceptância B_h é o valor imaginário da admitância Y_h . Assim, as potências da CPC são:

$$A = V \cdot I = 127,48 \cdot 83,87 \approx 10690 \text{ VA}$$

$$P = V \cdot I_a = 127,48 \cdot 78,53 \approx 10010 \text{ var}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127,48 \cdot 28,85 \approx 3678,00 \text{ var}$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127,48 \cdot 5,88 \approx 749,60 \text{ VA}$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127,48 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

Logo, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{10010}{10690} = 0,936$$

A Tabela 30 apresentam os valores calculados e simulados mediante as teorias CPT e CPC. Além de preservar as equivalências analisadas entre as teorias, para a carga anterior (RL//C_{1,0}), observa-se que, no caso da CPT, em função da compensação não ser total, agora a corrente reativa (I_{r_CPT}) é maior que a corrente reativa dispersa (I_{rs_CPT}). Novamente por ser uma carga linear, a potência ativa da CPT é igual a potência da CPC e similar a potência do distribuidor, logo, o fator de potência é igual.

Uma vez que foi alterado apenas o valor do capacitor, a seguir serão resumidos os valores teóricos e simulados para todas as condições restantes.

Tabela 30 - Dados da carga RL//C_{0,95} para a condição 1.
Condição 1 (5%) com DHT_v = 8,66% e DHT_I = 15,45%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10690,00	10690,00	A (VA)	10690,00	10690,00
P (W)	10010,00	10010,00	P_d (W)	10010,00	10010,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	3274,00	3274,00	Q (var)	3678,00	3678,00
D_{as} (VA)	749,60	749,60	D_s (VA)	749,60	749,60
D_{rs} (var)	1676,00	1676,00			
D_g (VA)	17,42	0,00	D_c (VA)	0,00	0,00
I (A)	83,86	83,87	I (A)	83,86	83,87
I_a (A)	78,52	78,53	I_a (A)	78,52	78,53
I_r (A)	25,69	25,68	I_r (A)	28,85	28,85
I_{as} (A)	5,88	5,88	I_s (A)	5,88	5,88
I_{rs} (A)	13,14	13,14			
I_g (A)	0,14	0,00	I_c (A)	0,00	0,00
λ	0,936	0,936	λ	0,936	0,936

4.2.3.3 Condição 2, 3, 4, 5, 6 e 7

As Tabelas 31 – 36 apresentam os valores para as condições 2-7 e as seguintes análises são válidas:

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 31 - Dados da carga RL//C_{0,95} para a condição 2.
Condição 2 com DHT_v = 9,95% e DHT_I = 17,41%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10740,00	10740,00	A (VA)	10740,00	10740,00
P (W)	10010,00	10010,00	P _a (W)	10010,00	10010,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	3270,00	3270,00	Q (var)	3778,00	3778,00
D _{as} (VA)	868,70	868,80	D _s (VA)	868,70	868,80
D _{rs} (var)	1893,00	1893,00			
D _g (VA)	18,98	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	84,13	84,13	I (A)	84,13	84,13
I _a (A)	78,45	78,45	I _a (A)	78,45	78,45
I _r (A)	25,62	25,62	I _r (A)	29,60	29,60
I _{as} (A)	6,81	6,81	I _s (A)	6,81	6,81
I _{rs} (A)	14,83	14,83			
I _g (A)	0,15	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,933	0,933	λ	0,933	0,933

Tabela 32 - Dados da carga RL//C_{0,95} para a condição 3.
Condição 3 (6,5%) com DHT_v = 11,26% e DHT_I = 20,09%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10800,00	10800,00	A (VA)	10800,00	10800,00
P (W)	10020,00	10020,00	P _a (W)	10020,00	10020,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	3266,00	3266,00	Q (var)	3928,00	3928,00
D _{as} (VA)	974,50	974,60	D _s (VA)	974,50	974,60
D _{rs} (var)	2184,00	2184,00			
D _g (VA)	22,69	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	84,54	84,54	I (A)	84,54	84,54
I _a (A)	78,38	78,38	I _a (A)	78,38	78,38
I _r (A)	25,55	25,55	I _r (A)	30,74	30,74
I _{as} (A)	7,63	7,63	I _s (A)	7,63	7,63
I _{rs} (A)	17,09	17,09			
I _g (A)	0,18	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,927	0,927	λ	0,927	0,927

Tabela 33 - Dados da carga RL//C_{0,95} para a condição 4.
Condição 4 (7,5%) com DHT_v = 12,99% e DHT_I = 23,18%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10900,00	10900,00	A (VA)	10900,00	10900,00
P (W)	10020,00	10020,00	P _a (W)	10020,00	10020,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	3259,00	3258,00	Q (var)	4122,00	4122,00
D _{as} (VA)	1124,00	1125,00	D _s (VA)	1124,00	1125,00
D _{rs} (var)	2525,00	2525,00			
D _g (VA)	26,21	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	85,08	85,08	I (A)	85,08	85,08
I _a (A)	78,26	78,27	I _a (A)	78,26	78,27
I _r (A)	25,44	25,44	I _r (A)	32,19	32,19
I _{as} (A)	8,78	8,78	I _s (A)	8,78	8,78
I _{rs} (A)	19,71	19,71			
I _g (A)	0,20	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,920	0,920	λ	0,920	0,920

Tabela 34 - Dados da carga RL//C_{0,95} para a condição 5.
Condição 5 (8%) com DHT_v = 13,86% e DHT_I = 24,73%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	10950,00	10950,00	A (VA)	10950,00	10950,00
P (W)	10030,00	10030,00	P _a (W)	10030,00	10030,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	3255,00	3255,00	Q (var)	4226,00	4226,00
D _{as} (VA)	1199,00	1200,00	D _s (VA)	1199,00	1200,00
D _{rs} (var)	2696,00	2696,00			
D _g (VA)	27,98	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	85,38	85,38	I (A)	85,38	85,38
I _a (A)	78,20	78,20	I _a (A)	78,20	78,20
I _r (A)	25,38	25,38	I _r (A)	32,96	32,96
I _{as} (A)	9,36	9,36	I _s (A)	9,36	9,36
I _{rs} (A)	21,03	21,03			
I _g (A)	0,22	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,916	0,916	λ	0,916	0,916

Tabela 35 - Dados da carga RL//C_{0,95} para a condição 6.
Condição 6 (11%) com DHT_v = 19,05% e DHT_I = 34,00%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	11320,00	11320,00	A (VA)	11320,00	11320,00
P (W)	10050,00	10050,00	P _a (W)	10050,00	10050,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	3225,00	3225,00	Q (var)	4936,00	4936,00
D _{as} (VA)	1649,00	1649,00	D _s (VA)	1649,00	1649,00
D _{rs} (var)	3737,00	3737,00			
D _g (VA)	38,71	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	87,54	87,54	I (A)	87,54	87,54
I _a (A)	77,74	77,74	I _a (A)	77,74	77,74
I _r (A)	24,95	24,94	I _r (A)	38,18	38,18
I _{as} (A)	12,76	12,76	I _s (A)	12,76	12,76
I _{rs} (A)	28,90	28,90			
I _g (A)	0,30	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,888	0,888	λ	0,888	0,888

Tabela 36 - Dados da carga RL//C_{0,95} para a condição 7.
Condição 7 (15%) com DHT_v = 25,98% e DHT_I = 46,36%

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	11990,00	11990,00	A (VA)	11990,00	11990,00
P (W)	10090,00	10090,00	P _a (W)	10090,00	10090,00
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	3168,00	3168,00	Q (var)	6063,00	6063,00
D _{as} (VA)	2249,00	2250,00	D _s (VA)	2249,00	2250,00
D _{rs} (var)	5169,00	5169,00			
D _g (VA)	53,36	0,00	D _c (VA)	0,00	0,00
I (A)	91,35	91,36	I (A)	91,35	91,36
I _a (A)	76,92	76,92	I _a (A)	76,92	76,92
I _r (A)	24,15	24,14	I _r (A)	46,21	46,21
I _{as} (A)	17,14	17,14	I _s (A)	17,14	17,14
I _{rs} (A)	39,40	39,40			
I _g (A)	0,41	0,00	I _c (A)	0,00	0,00
λ	0,842	0,842	λ	0,842	0,842

4.2.3.4 Discussões sobre a operação da Carga RL//C_{0,95}

As Figura 13 e 14 e as Tabelas 37 e 38 mostram os dados com as variações percentuais das correntes decompostas em função do DHT_v. Tais dados foram obtidos através do MATLAB/SIMULINK utilizando 90 amostras e de forma automática calcula-se as correntes decompostas para cada DHT_v e esboçam-se a sua evolução. Observe que, mesmo mantendo-se as equivalências entre as grandezas da CPT e CPC, diferente da carga (RL//C_{1,0}) para a carga RL//C_{0,95} é possível observar que o aumento da distorção harmônica de tensão, provoca uma diminuição de aproximadamente 6% na corrente reativa (I_{r_CPT}) da CPT e um aumento de 23% na corrente reativa (I_{r_CPC}) da CPC. Já a componente reativa dispersa (I_{rs_CPT}) da CPT teve um incremento (aproximadamente de 48 % para 30 % de DHT_v). Por outro lado, enquanto as correntes ativas da CPT e CPC (I_{a_CPT} e I_{a_CPC}) diminuem com o incremento do DHT_v (aproximadamente de 14 % para 30 % de DHT_v), as componentes dispersas, I_{as_CPT} e I_{s_CPC} , apresentaram um acréscimo (aproximadamente de 21 % para 30 % de DHT_v). Como esperado, devido ao comportamento linear da carga, os valores das correntes geradas pela carga, I_{g_CPT} e I_{c_CPC} resultaram praticamente iguais à zero, pois a carga RL//C_{0,95} não gera correntes harmônicas. Nota-se que as potências ativas são iguais, logo, o fator de potência também resulta igual e diminui conforme o aumento do DHT_v.

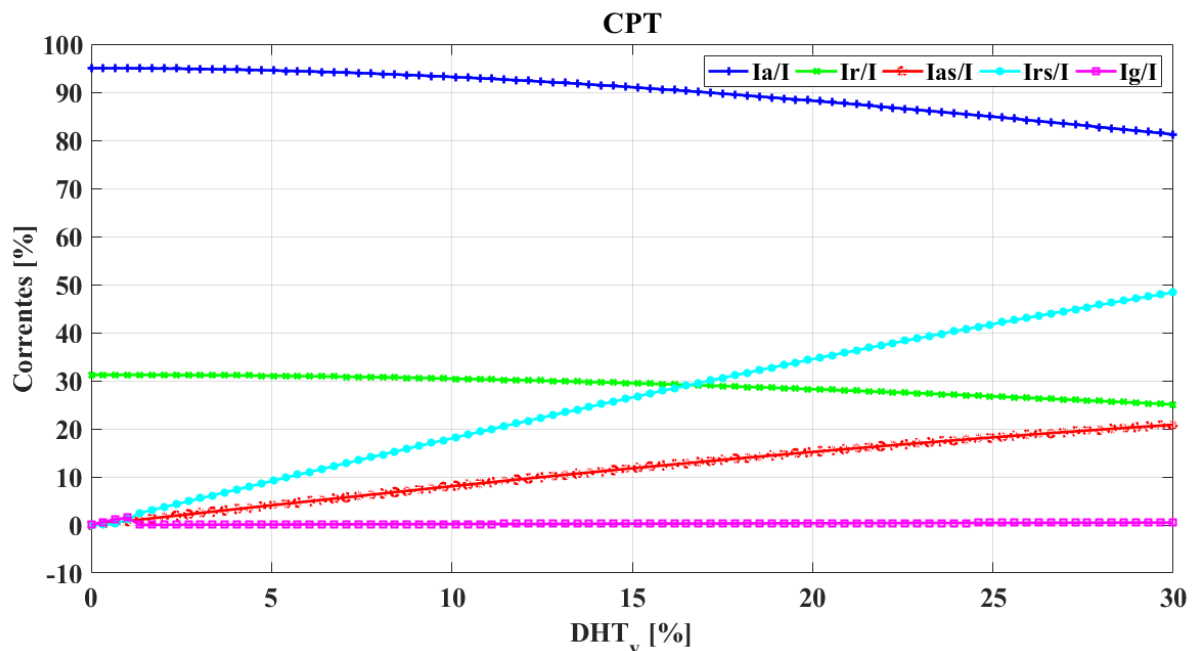


Figura 13 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHT_v para a carga RL//C_{0,95}.

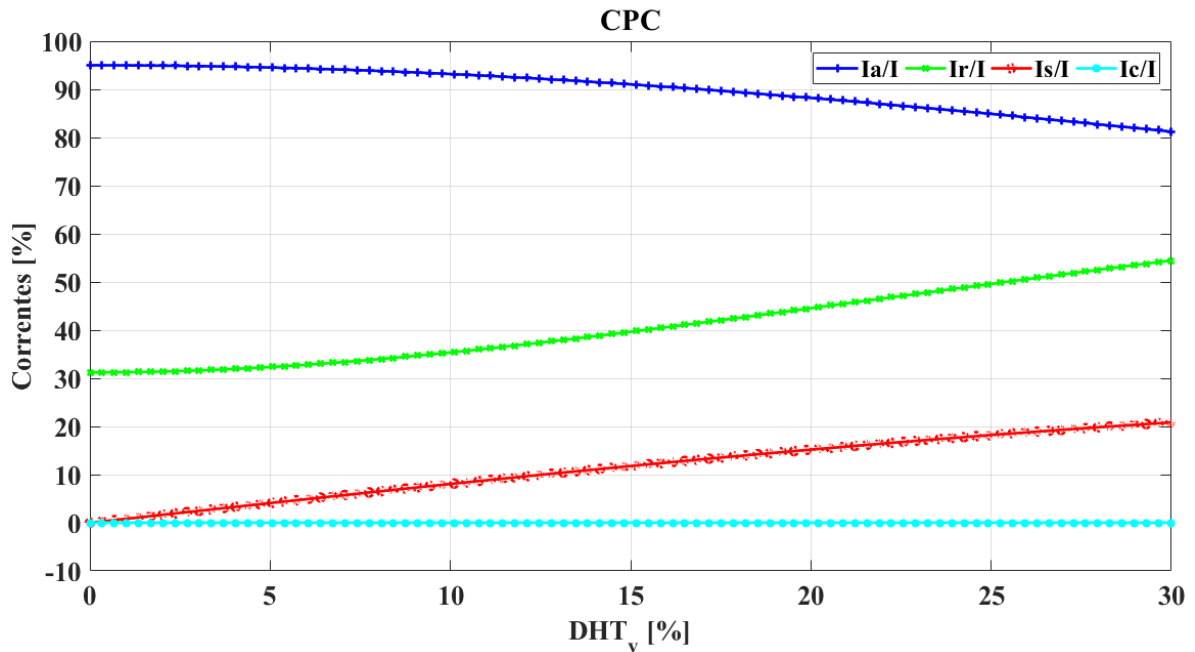


Figura 14 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHT_v para a carga RL//C_{0,95}.

Tabela 37 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT para a carga RL//C_{0,95}.

DHT _v [%]	I[A]	I _a /I[%]	I _r /I[%]	I _{as} /I[%]	I _{rs} /I[%]	I _g /I[%]
0,00	82,88	95,00	31,22	0,00	0,00	0,00
5,00	83,22	94,53	31,02	4,13	9,21	0,10
8,00	83,74	93,81	30,70	6,56	14,65	0,15
10,00	84,22	93,15	30,42	8,14	18,21	0,19
15,00	85,86	90,96	29,45	11,90	26,78	0,28
20,00	87,94	88,30	28,27	15,11	34,28	0,35
25,00	90,71	84,95	26,77	18,17	41,67	0,43
30,00	93,99	81,24	25,08	20,83	48,34	0,50

Tabela 38 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC para a carga RL//C_{0,95}.

DHT _v [%]	I[A]	I _a /I[%]	I _r /I[%]	I _s /I[%]	I _c /I[%]
0,00	82,88	95,00	31,22	0,00	0,00
5,00	83,22	94,53	32,36	4,13	0,00
8,00	83,74	93,81	34,02	6,56	0,00
10,00	84,22	93,15	35,45	8,14	0,00
15,00	85,86	90,96	39,81	11,90	0,00
20,00	87,94	88,30	44,43	15,11	0,00
25,00	90,71	84,95	49,52	18,17	0,00
30,00	93,99	81,24	54,46	20,83	0,00

Similarmente à carga anterior (RL//C_{1,0}), observando os dados obtidos nas Tabelas 37 e 38 e contrastando com os limites das normas, IEEE ($DHT_v = 8\%$) e PRODIST ($DHT_v = 10\%$), como esperado as componentes dispersas I_{as} e I_s mantiveram os 8% de acréscimo em função do incremento do DHT de tensão. Este resultado é condizente uma vez que na carga apenas o valor do capacitor foi alterado em função da compensação do fator de potência ($C_{1,0} \neq C_{0,95}$). Por outro lado, em função do valor do capacitor, a corrente reativa dispersa da CPT apresenta uma diminuição dos 34% (RL//C_{1,0}) para 18% (RL//C_{0,95}) para os mesmos 10 % de DHT de tensão. Assim, o incremento da corrente dispersa reativa da CPT é devido e exclusivamente ao efeito das correntes harmônicas amplificadas em função do valor do capacitor e as tensões harmônicas impostas pela fonte de tensão. Portanto, a implementação da FFT (uso do domínio da frequência) para circuitos lineares envolvendo capacitores alimentados com tensões distorcidas torna-se interessante para a identificação de eventuais ressonâncias entre os bancos capacitivos e as tensões harmônicas.

A Tabela 39 resume a análise comparativa entre ambas às teorias. Observa-se que, as correntes ativas resultaram iguais para todas as condições de análise ($I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$), o mesmo acontece para as componentes dispersa ativa e dispersa ($I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$). No caso das correntes reativas, apenas para a condição de tensão senoidal resultam iguais. Para a condição não senoidal a equivalência pode ser obtida mediante a combinação da componente dispersa reativa com a componente reativa.

Tabela 39 - Análise comparativa entre as teorias para a carga RL//C_{0,95}.

Senoidal	Não senoidal
$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$	$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$
$I_{r_CPT} = I_{r_CPC} \neq 0$	$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC} \neq 0$
$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} = 0$	$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} \neq 0$
$I_{rs_CPT} = 0$	$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$
$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$	$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} = 0$

4.2.4 Carga FCH

Os circuitos simulados da carga do tipo fonte de corrente (FCH) são demonstrados nas Figuras 15.a e 15.b.

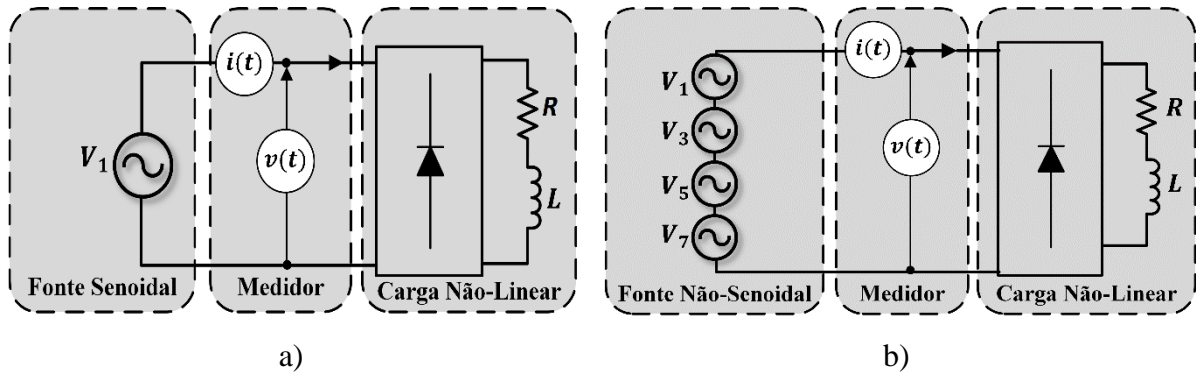


Figura 15 - Circuito simulado da carga FCH: a) Caso senoidal e b) Caso não senoidal

4.2.4.1 Condição 0 - tensão senoidal

- *Cálculo dos valores teóricos para a CPT:*

Considerando 127 V de tensão eficaz, 60 Hz e $\omega = 2\pi 60 = 376,9911 \text{ rad/s}$, com o auxílio do software MATLAB/SIMULINK®, obtém a tensão e corrente de cada ordem harmônica, neste caso, foram obtidos até a 43ª ordem harmônica, resultando em um $DHT_I = 34,45\%$, lembrando que o valor real é $DHT_I = 35,39\%$. As Figuras 16 e 17 mostram o espectro harmônico da tensão e corrente, respectivamente. Calculou-se também o valor eficaz da corrente.

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{43} I_h^2} = 6,54 \text{ A}$$

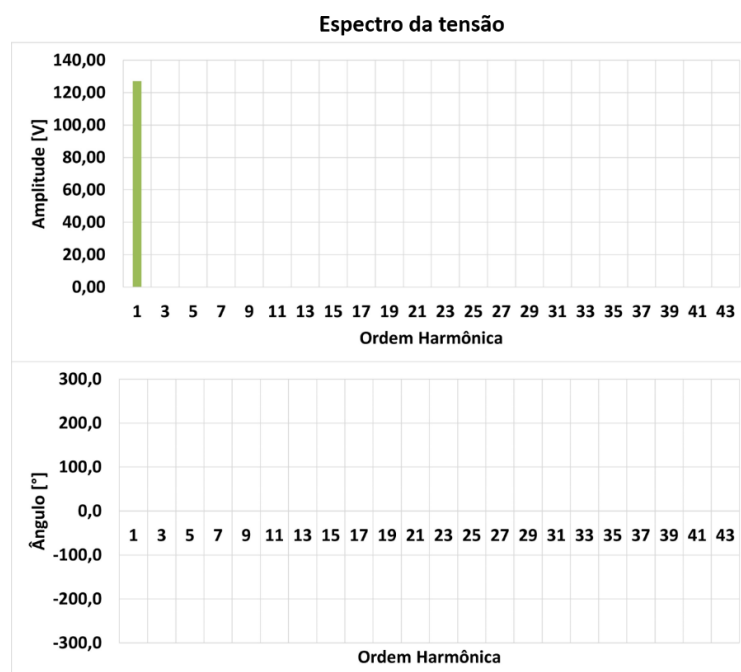


Figura 16 - Espectro Harmônico da Tensão para a carga FCH (Condição Senoidal).

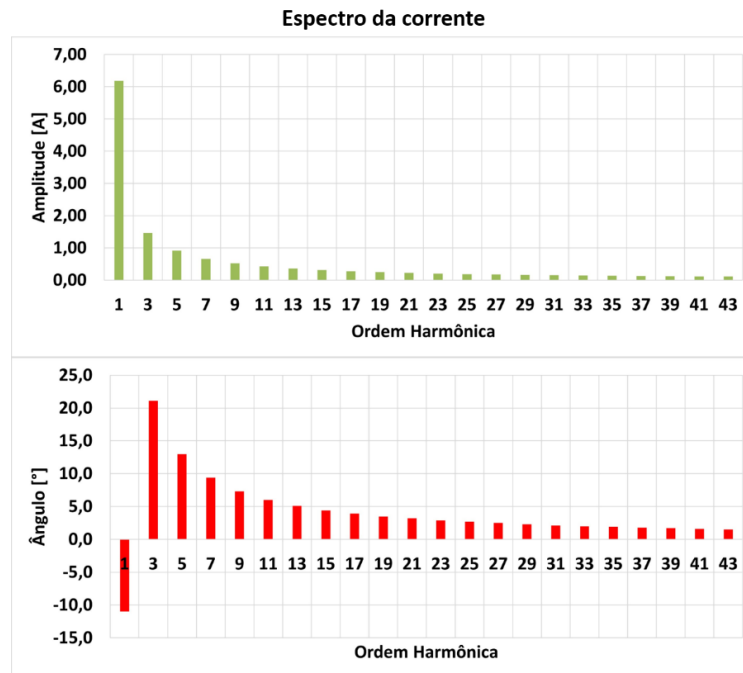


Figura 17 - Espectro Harmônico da Corrente para a carga FCH (Condição Senoidal).

Logo, através das correntes I_h e dos ângulos θ_h calcula-se as potências P_h e Q_h para cada ordem harmônica:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 = 127 \cdot 6,18 \cdot \cos(11^\circ) = 770,94 \text{ W}$$

$$P_3 = V_3 I_3 \cos \theta_3 = 0 \cdot 1,46 \cdot \cos(-21,1^\circ) = 0 \text{ W}$$

$$P_5 = V_5 I_5 \cos \theta_5 = 0 \cdot 0,92 \cdot \cos(-13^\circ) = 0 \text{ W}$$

$$P_7 = P_9 = P_{11} = \dots = P_{43} = 0 \text{ W}$$

$$P = \sum_{h=1}^{43} P_h = P_1 + P_3 + \dots + P_{43} = 770,94 \text{ W}$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 = 127 \cdot 6,18 \cdot \sin(11^\circ) = 149,86 \text{ var}$$

$$Q_3 = V_3 I_3 \sin \theta_3 = 0 \cdot 1,46 \cdot \sin(-21,1^\circ) = 0 \text{ var}$$

$$Q_5 = V_5 I_5 \sin \theta_5 = 0 \cdot 0,92 \cdot \sin(-13^\circ) = 0 \text{ var}$$

$$Q_7 = Q_9 = Q_{11} = \dots = Q_{43} = 0 \text{ var}$$

$$Q = \sum_{h=1}^{43} Q_h = Q_1 + Q_3 + \dots + Q_{43} \approx 149,90 \text{ var}$$

Através da potência ativa e da corrente, calcula-se a condutância equivalente e a reatidade equivalente:

$$G_e = G_1 = \frac{P}{V^2} = \frac{770,94}{127^2} = 0,048 \text{ S}$$

$$\mathcal{B}_e = \mathcal{B}_1 = \omega \frac{Q}{V^2} = 376,9911 \cdot \frac{149,90}{127^2} = 3,503 \text{ H}^{-1}$$

Calcula-se a integral imparcial da tensão e a energia reativa:

$$\hat{V} = \frac{V}{\omega} = \frac{127}{376,9911} = 0,3369 \text{ Vs/rad}$$

$$W_r = \mathcal{B}_e \cdot \hat{V}^2 = 3,503 \cdot 0,3369^2 = 0,3975 \text{ J}$$

Portanto, obtém-se as correntes da CPT:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,048 \cdot 127 = 6,07 \text{ A}$$

$$I_r = \mathcal{B}_e \cdot \hat{V} = 3,503 \cdot 0,3369 = 1,18 \text{ A}$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{6,54^2 - 6,07^2 - 1,18^2} = 2,13 \text{ A}$$

$$I_{as} = \sqrt{(G_1 - G_e)^2 \cdot V_k^2} = \sqrt{(0,048 - 0,048)^2 \cdot 127^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_{rs} = \sqrt{(\mathcal{B}_1 - \mathcal{B}_e)^2 \cdot \hat{V}_k^2} = \sqrt{(3,503 - 3,503)^2 \cdot 0,3369^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_g = \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{2,13^2 - 0^2 - 0^2} = 2,13 \text{ A}$$

As potências da CPT, portanto são:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 6,54 \approx 830,70 \text{ VA}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 1,18 \approx 149,90 \text{ var}$$

$$D = V \cdot I_v = 127 \cdot 2,13 \approx 270,70 \text{ VA}$$

$$D_{as} = V \cdot I_{as} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

$$D_{rs} = V \cdot I_{rs} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ var}$$

$$D_g = V \cdot I_g = 127 \cdot 2,13 \approx 270,70 \text{ VA}$$

Finalmente,

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{770,90}{\sqrt{770,90^2 + 149,90^2 + 270,70^2}} \equiv 0,928$$

- *Cálculo dos valores teóricos para a CPC:*

Anteriormente, foram calculados a corrente eficaz e a corrente de cada ordem harmônica (vide Figura 17), e as potências P e Q e a corrente ativa I_a . Na CPC, utiliza-se da susceptância da carga, logo:

$$B_e = \frac{Q}{V^2} = \frac{149,90}{127^2} = 0,0093 \text{ S}$$

Por ser uma carga não linear, precisa-se analisar o fluxo harmônico, porém a tensão é senoidal e sem impedância de linha, logo, $V = V_d = 127 V$ e $V_c = 0 V$. Analogamente, $P = P_d = 770,90 W$ e $P_c = 0 W$.

Portanto, calcula-se as correntes da CPC:

$$I_r = \sqrt{B_e^2 \cdot V^2} = \sqrt{0,0093^2 \cdot 127^2} = 1,18 A$$

$$I_s = \sqrt{((G_1 - G_e) \cdot V)^2} = \sqrt{((0,048 - 0,048) \cdot 127)^2} = 0 A$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{6,54^2 - 6,07^2 - 1,18^2 - 0^2} = 2,13 A$$

As potências da CPC, portanto resultam:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 6,54 \approx 830,70 VA$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 1,18 \approx 149,90 var$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127 \cdot 0 = 0 VA$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127 \cdot 2,13 \approx 270,69 VA$$

Finalmente, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{770,90}{830,70} \equiv 0,928$$

Para a condição senoidal, a Tabela 40 apresenta os valores calculados e simulados pelas teorias CPT e CPC. Observa-se que, os valores das correntes ativas e reativas são iguais entre as teorias e os valores da corrente harmônica gerada pela carga e a corrente do consumidor resultaram próximos. Em função de a tensão ser senoidal, as correntes dispersas para ambas as teorias resultaram nulo e a corrente residual é igual a corrente harmônica gerada pela carga. As potências ativa são iguais entre as teorias, portanto, o fator de potência também é igual e a potência ativa da CPC é igual a potência do distribuidor devido a separação angular analisada.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} = I_{r_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$I_{v_CPT} = \sqrt{I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2} = \sqrt{0^2 + 0^2 + I_g^2} = I_{g_CPT} = 2,18 A$$

$$P_{CPC} = P_d \approx P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 40 - Dados da carga FCH para o caso senoidal.
Senoidal com $DHT_V = 0,00\%$ e $DHT_I = 35,31\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	832,90	830,70	A (VA)	832,90	830,70
P (W)	771,00	770,90	P _a (W)	771,00	770,90
			P _c (W)	0,00	0,00
Q (var)	149,60	149,90	Q (var)	149,60	149,90
D _{as} (VA)	0,00	0,00	D _s (VA)	0,00	0,00
D _{rs} (var)	0,00	0,00			
D _g (VA)	277,20	270,70	D _c (VA)	269,80	270,69
I (A)	6,56	6,54	I (A)	6,56	6,54
I _a (A)	6,07	6,07	I _a (A)	6,07	6,07
I _r (A)	1,18	1,18	I _r (A)	1,18	1,18
I _{as} (A)	0,00	0,00	I _s (A)	0,00	0,00
I _{rs} (A)	0,00	0,00			
I _g (A)	2,18	2,13	I _c (A)	2,12	2,13
λ	0,926	0,928	λ	0,926	0,928

4.2.4.2 Condição 1 (5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

- *Cálculo dos valores teóricos para a CPT:*

Considerando os valores eficazes da tensão: $V_1 = 127 V$, $V_3 = V_5 = V_7 = 6,35 V$, frequência de $60 Hz$ e $\omega = 2\pi 60 = 376,9911 rad/s$, com o auxílio do software MATLAB/SIMULINK®, obtém a tensão e corrente de cada ordem harmônica, neste caso, foram obtidos até a 43^a ordem harmônica, resultando em um $DHT_I = 36,36\%$, lembrando que o valor teórico é $DHT_I = 37,35\%$. As Figura 18 e 19 mostram os espectros harmônicos da tensão e corrente, respectivamente. Calculou-se também os valores eficazes da tensão e corrente.

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2} = \sqrt{127^2 + 6,35^2 + 6,35^2 + 6,35^2} = 127,48 V$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{43} I_h^2} = 6,54 A$$

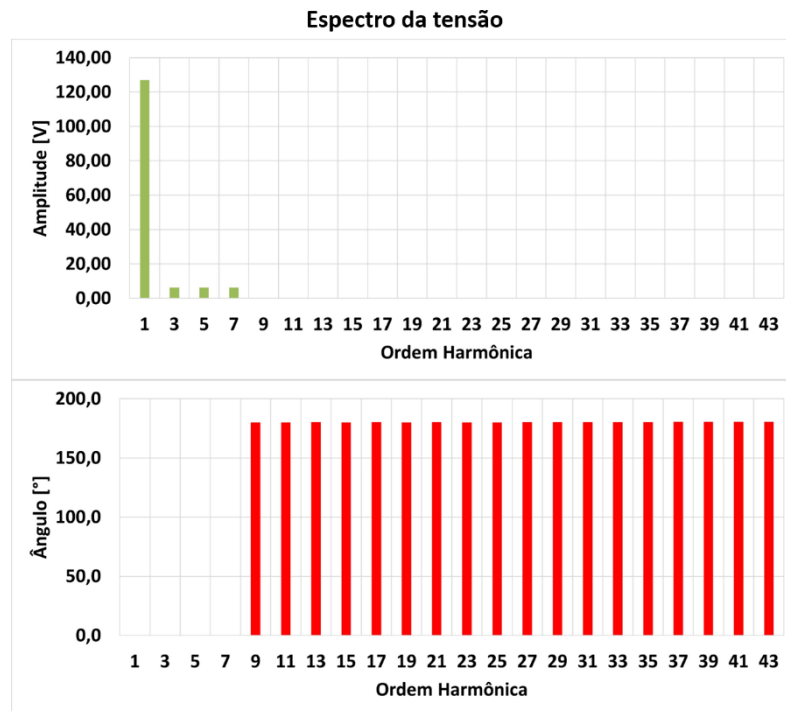


Figura 18 - Espectro Harmônico da Tensão para carga FCH (Condição 1).

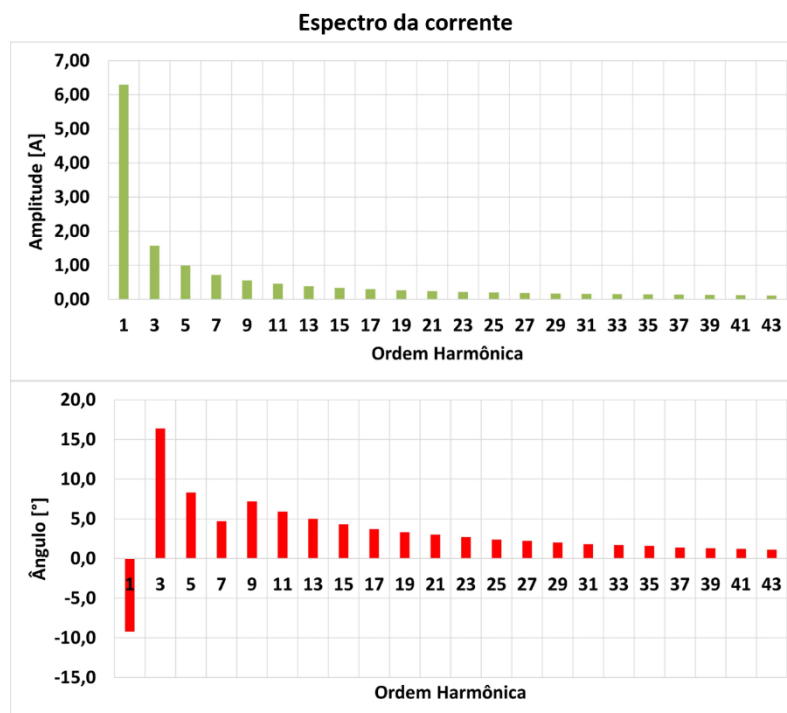


Figura 19 - Espectro Harmônico da Corrente para carga FCH (Condição 1).

Logo, através das tensões V_h , correntes I_h e dos ângulos θ_h calcula-se as potências P_h e Q_h para cada ordem harmônica:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 = 127 \cdot 6,30 \cdot \cos(9,2^\circ) = 789,56 \text{ W}$$

$$P_3 = V_3 I_3 \cos \theta_3 = 6,35 \cdot 1,58 \cdot \cos(-16,4^\circ) = 9,59 \text{ W}$$

$$P_5 = V_5 I_5 \cos \theta_5 = 6,35 \cdot 0,99 \cdot \cos(-8,3^\circ) = 6,20 \text{ W}$$

$$P_7 = V_7 I_7 \cos \theta_7 = 6,35 \cdot 0,71 \cdot \cos(-4,7^\circ) = 4,52 \text{ W}$$

$$P_9 = P_{11} = \dots = P_{43} = 0 \text{ W}$$

$$P = \sum_{h=1}^{43} P_h = P_1 + P_3 + P_5 + P_7 + \dots + P_{43} \approx 809,90 \text{ W}$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 = 127 \cdot 6,30 \cdot \sin(9,2^\circ) = 127,88 \text{ var}$$

$$Q_3 = V_3 I_3 \sin \theta_3 = 6,35 \cdot 1,58 \cdot \sin(-16,4^\circ) = -2,82 \text{ var}$$

$$Q_5 = V_5 I_5 \sin \theta_5 = 6,35 \cdot 0,99 \cdot \sin(-8,4^\circ) = -0,90 \text{ var}$$

$$Q_7 = V_7 I_7 \sin \theta_7 = 6,35 \cdot 0,71 \cdot \sin(-4,7^\circ) = -0,37 \text{ var}$$

$$Q_9 = Q_{11} = \dots = Q_{43} = 0 \text{ var}$$

$$Q = \sum_{h=1}^{43} Q_h = Q_1 + Q_3 + Q_5 + Q_7 + \dots + Q_{43} = 123,77 \text{ var}$$

Através da potência ativa e das tensões V_h , calcula-se a condutância equivalente e as condutâncias G_h :

$$G_e = \frac{P}{V^2} = \frac{809,90}{127,48^2} = 0,0498 \text{ S}$$

$$G_1 = \frac{P_1}{V_1^2} = \frac{789,56}{127^2} = 0,0490 \text{ S}$$

$$G_3 = \frac{P_3}{V_3^2} = \frac{9,59}{6,35^2} = 0,2379 \text{ S}$$

$$G_5 = \frac{P_5}{V_5^2} = \frac{6,19}{6,35^2} = 0,1536 \text{ S}$$

$$G_7 = \frac{P_7}{V_7^2} = \frac{4,52}{6,35^2} = 0,1121 \text{ S}$$

Através da potência reativa e das correntes I_h , tem-se as reatâncias B_h :

$$B_1 = \frac{h\omega I_1 \sin(\theta_1)}{V_1} = \frac{1 \cdot 376,9911 \cdot 6,30 \cdot \sin(9,2^\circ)}{127} = 2,989 \text{ H}^{-1}$$

$$B_3 = \frac{h\omega I_3 \sin(\theta_3)}{V_3} = \frac{3 \cdot 376,9911 \cdot 1,58 \cdot \sin(-16,4^\circ)}{6,35} = -79,202 \text{ H}^{-1}$$

$$B_5 = \frac{h\omega I_5 \sin(\theta_5)}{V_5} = \frac{5 \cdot 376,9911 \cdot 0,99 \cdot \sin(-8,3^\circ)}{6,35} = -42,251 \text{ H}^{-1}$$

$$B_7 = \frac{h\omega I_7 \sin(\theta_7)}{V_7} = \frac{7 \cdot 376,9911 \cdot 0,71 \cdot \sin(-4,7^\circ)}{6,35} = -24,313 \text{ H}^{-1}$$

Calcula-se a integral imparcial da tensão para cada ordem harmônica e seu valor eficaz:

$$\hat{V}_1 = \frac{V_1}{h\omega} = \frac{127}{376,9911} = 0,3369 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

$$\hat{V}_3 = \frac{V_3}{h\omega} = \frac{6,35}{3 \cdot 376,9911} = 0,0056 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

$$\hat{V}_5 = \frac{V_5}{h\omega} = \frac{6,35}{5 \cdot 376,9911} = 0,0034 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

$$\hat{V}_7 = \frac{V_7}{h\omega} = \frac{6,35}{7 \cdot 376,9911} = 0,0024 \text{ V} \cdot \text{s/rad}$$

$$\hat{V} = \sqrt{\hat{V}_1^2 + \hat{V}_3^2 + \hat{V}_5^2 + \hat{V}_7^2}$$

$$\hat{V} = \sqrt{0,3369^2 + 0,0056^2 + 0,0034^2 + 0,0024^2} = 0,3370 \text{ Vs/rad}$$

Logo, obtém-se a energia reativa para cada ordem harmônica e a reatidade equivalente:

$$W_{r1} = \mathcal{B}_1 \cdot \hat{V}_1^2 = 2,989 \cdot 0,3369^2 = 0,3392 \text{ J}$$

$$W_{r3} = \mathcal{B}_3 \cdot \hat{V}_3^2 = -79,202 \cdot 0,0056^2 = -0,0025 \text{ J}$$

$$W_{r5} = \mathcal{B}_5 \cdot \hat{V}_5^2 = -42,251 \cdot 0,0034^2 = -0,00048 \text{ J}$$

$$W_{r7} = \mathcal{B}_7 \cdot \hat{V}_7^2 = -24,313 \cdot 0,0024^2 = -0,00014 \text{ J}$$

$$W_r = \sum_{h=1}^{43} W_{rh} = 0,3392 - 0,0025 - 0,00048 - 0,00014 = 0,3361 \text{ J}$$

$$\mathcal{B}_e = \frac{W_r}{\hat{V}^2} = \frac{0,3361}{0,3370^2} = 2,9603 \text{ H}^{-1}$$

Portanto, obtém-se as correntes da CPT:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,0498 \cdot 127,48 = 6,35 \text{ A}$$

$$I_r = \mathcal{B}_e \cdot \hat{V} = 2,9603 \cdot 0,3370 = 1,00 \text{ A}$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{6,70^2 - 6,35^2 - 1,00^2} = 1,88 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} I_{as} &= \sqrt{\sum_1^h (G_h - G_e)^2 \cdot V_k^2} \\ &= \sqrt{(0,0490 - 0,0498)^2 \cdot 127^2 + (0,2379 - 0,0498)^2 \cdot 6,35^2 + \dots} \\ &\quad \sqrt{\dots + (0,1536 - 0,0498)^2 \cdot 6,35^2 + (0,1121 - 0,0498)^2 \cdot 6,35^2} \\ &= 1,42 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{rs} &= \sqrt{\sum_1^h (\mathcal{B}_h - \mathcal{B}_e)^2 \cdot \hat{V}_k^2} \\
&= \sqrt{(2,989 - 2,9603)^2 \cdot 0,3369^2 + (-79,202 - 2,9603)^2 \cdot 0,0056^2 + \dots} \\
&\quad \sqrt{\dots + (-42,251 - 2,9603)^2 \cdot 0,0034^2 + (-24,313 - 2,9603)^2 \cdot 0,0024^2} \\
I_{rs} &= 0,49 \text{ A} \\
I_g &= \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{1,88^2 - 1,42^2 - 0,49^2} = 1,13 \text{ A}
\end{aligned}$$

As potências da CPT, portanto são:

$$A = V \cdot I = 127,48 \cdot 6,70 \approx 854,20 \text{ VA}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127,48 \cdot 1,00 \approx 127,48 \text{ var}$$

$$D = V \cdot I_v = 127,48 \cdot 1,88 \approx 240,10 \text{ VA}$$

$$D_{as} = V \cdot I_{as} = 127,48 \cdot 1,42 \approx 181,63 \text{ VA}$$

$$D_{rs} = V \cdot I_{rs} = 127,48 \cdot 0,49 \approx 62,50 \text{ var}$$

$$D_g = V \cdot I_g = 127,48 \cdot 1,13 \approx 144,00 \text{ VA}$$

Finalmente,

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{809,90}{\sqrt{809,90^2 + 127,48^2 + 240,10^2}} \equiv 0,948$$

- *Cálculo dos valores teóricos para a CPC:*

Anteriormente, foram calculados a corrente e tensão eficaz e a corrente e tensão de cada ordem harmônica (vide Figura 18 e 19), e as potências P e Q e a corrente ativa I_a . Na CPC, utiliza-se da susceptância da carga, logo:

$$B_1 = \frac{I_1 \sin(\theta_1)}{V_1} = \frac{6,30 \cdot \sin(9,2^\circ)}{127} = 0,0079 \text{ S}$$

$$B_3 = \frac{I_3 \sin(\theta_3)}{V_3} = \frac{1,58 \cdot \sin(-16,4^\circ)}{6,35} = -0,07 \text{ S}$$

$$B_5 = \frac{I_5 \sin(\theta_5)}{V_5} = \frac{0,99 \cdot \sin(-8,4^\circ)}{6,35} = -0,022 \text{ S}$$

$$B_7 = \frac{I_7 \sin(\theta_7)}{V_7} = \frac{0,71 \cdot \sin(-4,7^\circ)}{6,35} = -0,009 \text{ S}$$

Por ser uma carga não linear, analisa-se o fluxo harmônico, porém a diferença angular de cada harmônica é menor que 90° logo, $V = V_d = 127,48 \text{ V}$ e $V_c = 0 \text{ V}$. Analogamente, $P = P_d = 809,90 \text{ W}$ e $P_c = 0 \text{ W}$. Além disso, $G_e = G_{ed}$.

Portanto, calcula-se as correntes da CPC:

$$\begin{aligned}
 I_r &= \sqrt{\sum_1^h B_h^2 \cdot V_h^2} \\
 &= \sqrt{0,0079^2 \cdot 127^2 + 0,07^2 \cdot 6,35^2 + 0,022^2 \cdot 6,35^2 + 0,09^2 \cdot 6,35^2} \\
 &= 1,11 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 I_s &= \sqrt{\sum_1^h ((G_h - G_{ed}) \cdot V_h)^2} \\
 &= \sqrt{((0,0490 - 0,0498) \cdot 127)^2 + ((0,2379 - 0,0498) \cdot 6,35)^2 + \dots} \\
 &\quad \sqrt{\dots + ((0,1536 - 0,0498) \cdot 6,35)^2 + ((0,1121 - 0,0498) \cdot 6,35)^2} \\
 &= 1,42 \text{ A}
 \end{aligned}$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{6,70^2 - 6,35^2 - 1,11^2 - 1,42^2} = 1,13 \text{ A}$$

As potências da CPC, portanto resultam:

$$A = V \cdot I = 127,48 \cdot 6,70 \approx 854,20 \text{ VA}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127,48 \cdot 1,11 \approx 141,70 \text{ var}$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127,48 \cdot 1,42 \approx 181,63 \text{ VA}$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127,48 \cdot 1,13 \approx 144,00 \text{ VA}$$

Finalmente, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{809,90}{854,20} \equiv 0,948$$

Os dados calculados e simulados pela CPT e CPC para a condição 1 são apresentados na Tabela 41. Observa-se que, os valores das correntes ativas são iguais entre as teorias, já as correntes reativas são proximamente iguais. Além disso, em função da distorção de tensão, as componentes dispersas são diferentes de zero. Para esta, condição, a corrente ativa dispersa da CPT é igual a corrente dispersa da CPC e os valores da corrente harmônica gerada pela carga e a corrente do consumidor são próximos. Mesmo para tensão não senoidal, as potências ativas e o fator de potência são iguais entre as teorias e a potência ativa da CPC é igual a potência do distribuidor devido ao fluxo harmônico analisado.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$I_{v_CPT} = \sqrt{I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2} = \sqrt{1,42^2 + 0,49^2 + 1,24^2} \neq I_{g_CPT}$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Por outro lado, verifica-se a equivalência entre as componentes associadas aos reativos:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{1,00^2 + 0,49^2} = 1,11$$

Tabela 41 - Dados da carga FCH para a condição 1.
Condição 1 (5%) com $DHT_v = 8,66\%$ e $DHT_1 = 37,27\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	856,70	854,20	A (VA)	856,70	854,20
P (W)	809,80	809,90	Pa (W)	809,80	809,90
			Pc (W)	0,00	0,00
Q (var)	127,50	127,48	Q (var)	142,00	141,70
D_{as} (VA)	181,50	181,63	D_s (VA)	181,50	181,63
D_{rs} (var)	62,70	62,50			
D_g (VA)	158,30	144,00	D_c (VA)	142,70	144,00
I (A)	6,72	6,70	I (A)	6,72	6,70
I_a (A)	6,35	6,35	I_a (A)	6,35	6,35
I_r (A)	1,00	1,00	I_r (A)	1,11	1,11
I_{as} (A)	1,42	1,42	I_s (A)	1,42	1,42
I_{rs} (A)	0,49	0,49			
I_g (A)	1,24	1,13	I_c (A)	1,12	1,13
λ	0,945	0,948	λ	0,945	0,948

4.2.4.3 Condição 2 (5% de 3ª harmônica, 7% de 5ª harmônica e 5% de 7ª harmônica)

Para a condição 2, os valores das correntes e potências calculadas e simuladas pelas CPT e CPC são apresentados na Tabela 42. Verifica-se, que os valores das correntes reativas são aproximadamente iguais, no entanto as correntes ativas são iguais, as correntes dispersa ativa da CPT e dispersa da CPC são iguais e os valores das correntes gerada da CPT e consumidor da CPC, também resultaram próximos. As potências ativas e o fator de potência resultam iguais entre as teorias.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \text{ e } I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$I_{v_CPT} = \sqrt{I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2} = \sqrt{1,39^2 + 0,49^2 + 1,25^2} \neq I_{g_CPT}$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Além disso, também é verificada que:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{0,98^2 + 0,49^2} \approx 1,09 \text{ A}$$

Tabela 42 - Dados da carga FCH para a condição 2.

Condição 2 com $DHT_v = 9,95\%$ e $DHT_I = 37,51\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	860,40	857,91	A (VA)	860,40	857,91
P (W)	814,80	814,79	P_d (W)	814,80	814,79
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	124,90	124,77	Q (var)	139,60	139,50
D_{as} (VA)	177,00	176,97	D_s (VA)	177,00	176,97
D_{rs} (var)	62,37	62,34			
D_g (VA)	159,80	146,13	D_c (VA)	144,10	146,13
I (A)	6,74	6,72	I (A)	6,74	6,72
I_a (A)	6,38	6,38	I_a (A)	6,38	6,38
I_r (A)	0,98	0,98	I_r (A)	1,09	1,09
I_{as} (A)	1,39	1,39	I_s (A)	1,39	1,39
I_{rs} (A)	0,49	0,49			
I_g (A)	1,25	1,14	I_c (A)	1,13	1,14
λ	0,947	0,950	λ	0,947	0,950

4.2.4.4 Condição 3 (6,5% de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas)

Para a condição 3, a Tabela 43 apresenta os dados calculados e simulados pelas teorias CPT e CPC. Similarmente a condição anterior, os valores das correntes ativas são iguais, as correntes ativa dispersa e dispersa são iguais, correntes reativas aproximadamente iguais e os valores da corrente harmônica gerada pela carga e a corrente do consumidor são próximos. Novamente, as potências ativas e o fator de potência são iguais entre as teorias.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$I_{v_CPT} \neq I_{g_CPT}$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Além disso, também é verificado que:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{0,95^2 + 0,47^2} = 1,06 \text{ A}$$

Tabela 43 - Dados da carga FCH para a condição 3.

Condição 3 (6,5%) com $DHT_V = 11,26\%$ e $DHT_I = 37,87\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	865,40	862,92	A (VA)	865,40	862,92
P (W)	822,20	822,14	Pa (W)	822,20	822,14
			Pc (W)	0,00	0,00
Q (var)	121,10	121,00	Q (var)	134,90	134,85
D_{as} (VA)	169,20	169,27	D_s (VA)	169,20	169,27
D_{rs} (var)	59,55	59,61			
D_g (VA)	161,90	147,92	D_c (VA)	146,00	147,92
I (A)	6,77	6,75	I (A)	6,77	6,75
I_a (A)	6,43	6,43	I_a (A)	6,43	6,43
I_r (A)	0,95	0,95	I_r (A)	1,06	1,06
I_{as} (A)	1,32	1,32	I_s (A)	1,32	1,32
I_{rs} (A)	0,47	0,47			
I_g (A)	1,27	1,16	I_c (A)	1,14	1,16
λ	0,950	0,953	λ	0,950	0,953

4.2.4.5 Condição 4 (7,5% de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas)

A Tabela 44 apresenta os resultados obtidos para a condição 4 com os valores calculados e simulados através da CPT e CPC. Similarmente as condições anteriores, os valores das correntes ativa são iguais, a corrente reativa de ambas teorias são aproximadamente iguais, a corrente ativa dispersa da CPT é igual a corrente dispersa da CPC e os valores da corrente harmônica gerada pela carga da CPT e da corrente do consumidor da CPC são próximos.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$I_{v_CPT} \neq I_{g_CPT}$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Além disso, também é verificado que:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{0,91^2 + 0,45^2} \approx 1,02 \text{ A}$$

Tabela 44 - Dados da carga FCH para a condição 4.

Condição 4 (7,5%) com $DHT_V = 12,99\%$ e $DHT_I = 38,27\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	871,70	869,06	A (VA)	871,70	869,06
P (W)	830,60	830,50	Pa (W)	830,60	830,50
			Pc (W)	0,00	0,00
Q (var)	116,90	117,32	Q (var)	130,20	130,54
D_{as} (VA)	161,10	161,22	D_s (VA)	161,10	161,22
D_{rs} (var)	57,45	57,25			
D_g (VA)	164,40	150,05	D_c (VA)	148,20	150,05
I (A)	6,81	6,79	I (A)	6,81	6,79
I_a (A)	6,49	6,48	I_a (A)	6,49	6,48
I_r (A)	0,91	0,92	I_r (A)	1,02	1,02
I_{as} (A)	1,26	1,26	I_s (A)	1,26	1,26
I_{rs} (A)	0,45	0,45			
I_g (A)	1,28	1,17	I_c (A)	1,16	1,17
λ	0,953	0,956	λ	0,953	0,956

4.2.4.6 Condição 5 (8% de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas)

Para a condição 5, construiu-se a Tabela 45 com os valores calculados e simulados pelas CPT e CPC. Verifica-se novamente que: os valores das correntes ativas são iguais, as correntes reativas são aproximadamente iguais, a corrente ativa dispersa da CPT é igual a corrente dispersa da CPC e os valores da corrente harmônica gerada pela carga da CPT e da corrente do consumidor da CPC são próximos.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$I_{v_CPT} \neq I_{g_CPT}$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Além disso, também é verificado que:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{0,90^2 + 0,44^2} = 1,00 \text{ A}$$

Tabela 45 - Dados da carga FCH para a condição 5.

Condição 5 (8%) com $DHT_v = 13,86\%$ e $DHT_I = 38,47\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	874,90	872,24	A (VA)	874,90	872,24
P (W)	834,80	834,82	Pa (W)	834,80	834,82
			Pc (W)	0,00	0,00
Q (var)	114,80	114,80	Q (var)	127,90	127,80
D_{as} (VA)	157,10	157,23	D_s (VA)	157,20	157,23
D_{rs} (var)	56,41	56,17			
D_g (VA)	165,70	151,04	D_c (VA)	149,40	151,04
I (A)	6,82	6,80	I (A)	6,82	6,80
I_a (A)	6,51	6,51	I_a (A)	6,51	6,51
I_r (A)	0,90	0,90	I_r (A)	1,00	1,00
I_{as} (A)	1,23	1,23	I_s (A)	1,23	1,23
I_{rs} (A)	0,44	0,44			
I_g (A)	1,29	1,18	I_c (A)	1,17	1,18
λ	0,954	0,957	λ	0,954	0,957

4.2.4.7 Condição 6 (11% de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas)

A Tabela 46 apresenta os valores calculados e simulados das correntes e potências pela CPT e CPC. Similarmente as condições anteriores (1, 2, 3, 4 e 5), os valores das correntes ativas são iguais, as correntes reativas são aproximadamente iguais, a corrente ativa dispersa da CPT é igual a corrente dispersa da CPC e os valores da corrente harmônica gerada pela carga da CPT e da corrente do consumidor da CPC são próximos. As potências ativa e o fator de potência são equivalentes entre as teorias.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \text{ e } I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$I_{v_CPT} \neq I_{g_CPT}$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Novamente, também é verificado que:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{0,79^2 + 0,39^2} = 0,88 \text{ A}$$

Tabela 46 - Dados da carga FCH para a condição 6.
Condição 6 (11%) com $DHT_v = 19,05\%$ e $DHT_I = 39,68\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	896,00	893,10	A (VA)	896,00	893,10
P (W)	861,10	861,11	Pa (W)	861,10	861,11
			Pc (W)	0,00	0,00
Q (var)	102,40	102,44	Q (var)	114,00	114,03
D_{as} (VA)	134,50	134,47	D_s (VA)	134,50	134,47
D_{rs} (var)	50,14	50,11			
D_g (VA)	173,60	158,19	D_c (VA)	156,50	158,19
I (A)	6,93	6,91	I (A)	6,93	6,91
I_a (A)	6,66	6,66	I_a (A)	6,66	6,66
I_r (A)	0,79	0,79	I_r (A)	0,88	0,88
I_{as} (A)	1,04	1,04	I_s (A)	1,04	1,04
I_{rs} (A)	0,39	0,39			
I_g (A)	1,34	1,22	I_c (A)	1,21	1,22
λ	0,961	0,964	λ	0,961	0,964

4.2.4.8 Condição 7 (15% de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas)

A Tabela 47 mostra os dados calculados e simulados pelas teorias CPT e CPC para a condição 7. Verificam-se as constatações das condições anteriores, ou seja, as correntes ativas são iguais, as correntes reativas são aproximadamente iguais, a corrente ativa dispersa da CPT é igual a corrente dispersa da CPC e os valores da corrente harmônica gerada pela carga da CPT e da corrente do consumidor da CPC são próximos. Como as potências ativa são iguais entre as teorias, o fator de potência também resulta igual.

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \approx I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \approx I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Verifica-se que:

$$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC} \Rightarrow \sqrt{0,66^2 + 0,32^2} = 0,73 \text{ A}$$

Tabela 47 - Dados da carga FCH para a condição 7.
Condição 7 (15%) com $DHT_v = 25,98\%$ e $DHT_I = 41,30\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	928,70	925,73	A (VA)	928,70	925,73
P (W)	898,20	898,32	P_d (W)	898,30	898,32
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	86,23	86,28	Q (var)	95,94	95,87
D_{as} (VA)	110,90	110,89	D_s (VA)	110,90	110,89
D_{rs} (var)	42,06	41,78			
D_g (VA)	185,00	168,86	D_c (VA)	166,70	168,86
I (A)	7,08	7,06	I (A)	7,08	7,06
I_a (A)	6,85	6,85	I_a (A)	6,84	6,85
I_r (A)	0,66	0,66	I_r (A)	0,73	0,73
I_{as} (A)	0,84	0,85	I_s (A)	0,84	0,85
I_{rs} (A)	0,32	0,32			
I_g (A)	1,41	1,29	I_c (A)	1,27	1,29
λ	0,967	0,970	λ	0,967	0,970

As Figuras 20 e 21 apresentam as formas de onda da corrente total e as correntes decompostas da CPT e CPC para todas as condições simuladas. Nota-se que as formas de onda estão sobrepostas para ambas as teorias

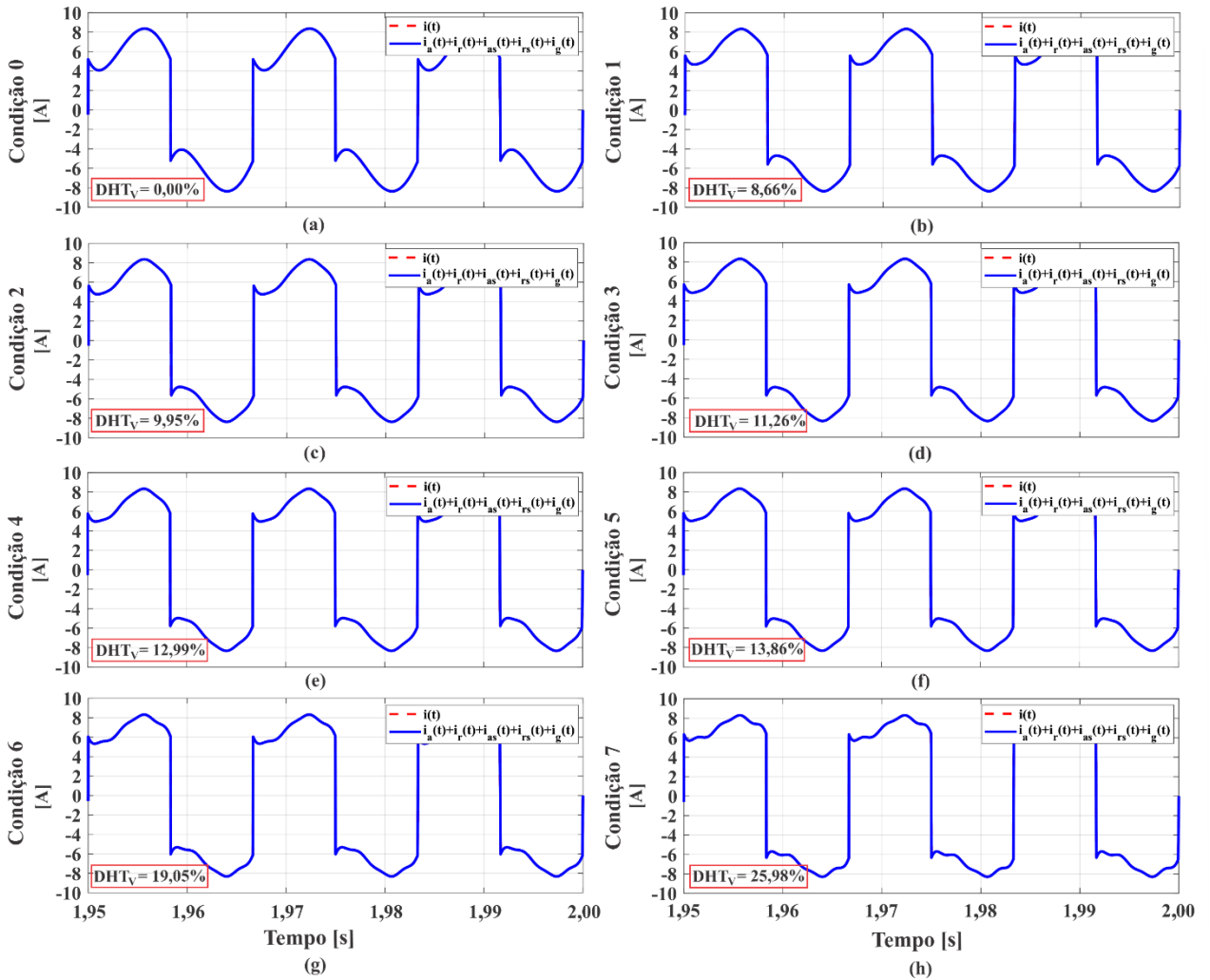


Figura 20 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPT para carga FCH.

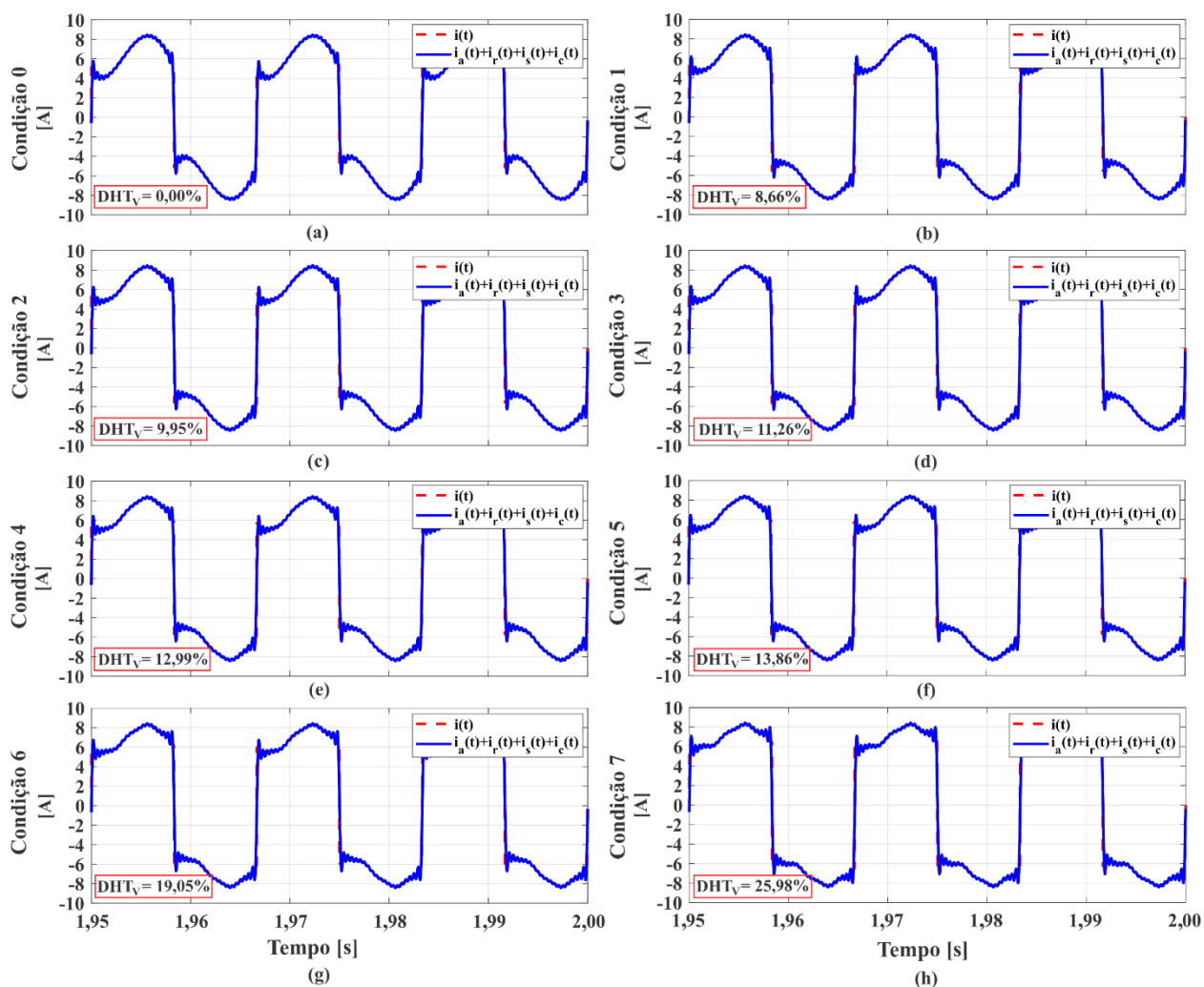


Figura 21 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPC para carga FCH.

4.2.4.9 Discussões sobre a operação da Carga FCH

Para as condições simuladas anteriormente (senoidal e não senoidal), nota-se uma pequena diferença entre os valores teóricos e os valores obtidos computacionalmente das correntes/potências, principalmente na CPC, tal diferença é devido aos valores teóricos não estarem utilizando de todo o espectro harmônico (todas as ordens harmônicas) presentes na corrente.

Através do MATLAB/SIMULINK para 90 amostras, obtém de forma automatizada as Figura 22 e 23 e as Tabelas 48 e 49, onde mostram os dados com as variações percentuais das correntes decompostas em função do DHT de tensão. Verifica-se que, para a carga FCH foi possível confirmar que conforme a distorção harmônica de tensão aumenta, as correntes ativas (I_{a_CPT} e I_{a_CPC}) tendem a aumentar. Já as correntes reativas (I_{r_CPT} e I_{r_CPC}) apresentam uma diminuição em 10 % para a CPT e 9 % para a CPC para um DHT_V de 30 %. No entanto, as componentes dispersas, I_{as_CPT} e I_{s_CPC} , tiveram um incremento atingindo o valor máximo

próximo de um DHT_V de 0,20 % e para maiores níveis de distorção de tensão ($DHT_V > 0,20\%$), observa-se uma diminuição de aproximadamente 13% para DHT_V de 30%. Similarmente, a componente I_{rs_CPT} teve um incremento, atingindo o seu valor máximo para 0,50 % de DHT_V e para maiores níveis de distorção de tensão apresenta uma diminuição. Este fenômeno também pode ser devido às mudanças de fase provocadas pelo comportamento não linear da carga e o incremento da taxa de distorção harmônica da tensão. A inicialização das correntes I_{as_CPT} , I_{rs_CPT} e I_{s_CPC} na Figura 22, é devido a aproximação dos valores calculados (divisão por zero, no valor eficaz das tensões nas diferentes ordens harmônicas, conforme equação (40), (41) e (21) para não tender ao infinito. Finalmente, os valores diferentes de zero para as correntes geradas pela carga, I_{g_CPT} e I_{c_CPC} são em função da característica não linear da carga, que apresentam uma diminuição e depois com o aumento do DHT_V tendem a aumentar ligeiramente. Observa-se que as potências ativa são iguais entre as teorias ($P_{CPT} = P_{CPC}$), portanto, o fator de potência também é equivalente ($\lambda_{CPT} = \lambda_{CPC}$) e houve um incremento com o aumento da distorção de tensão.

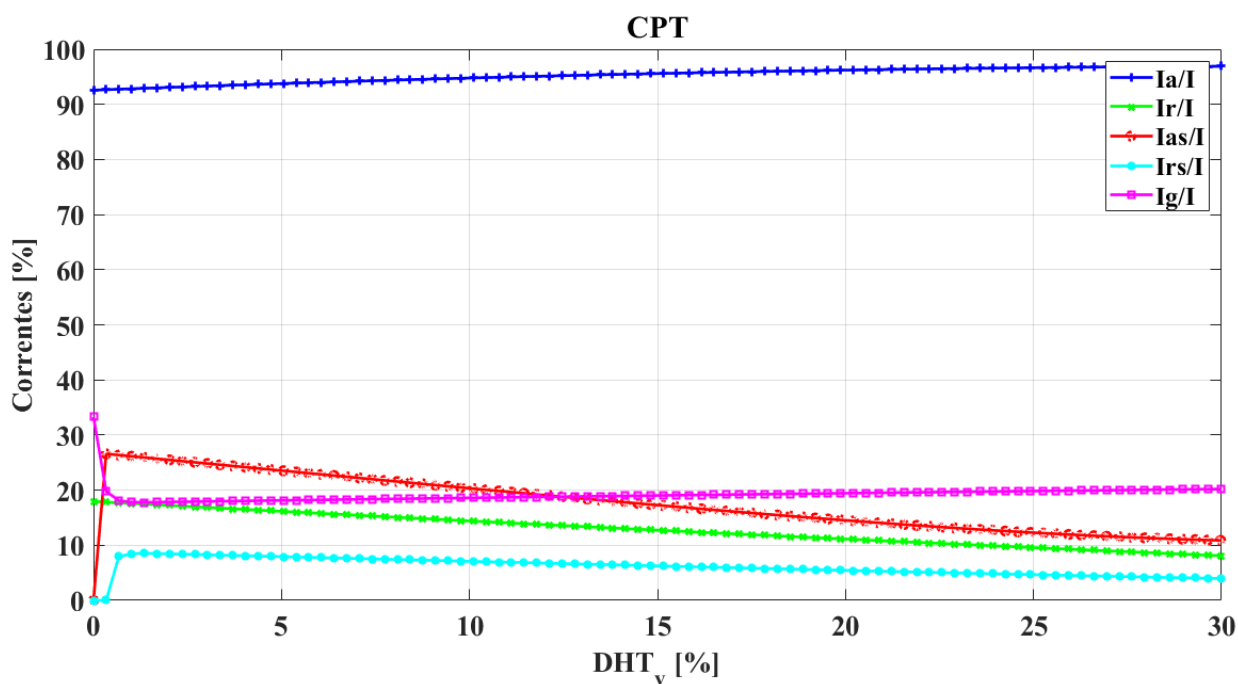


Figura 22 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHT_V [%] da carga FCH.

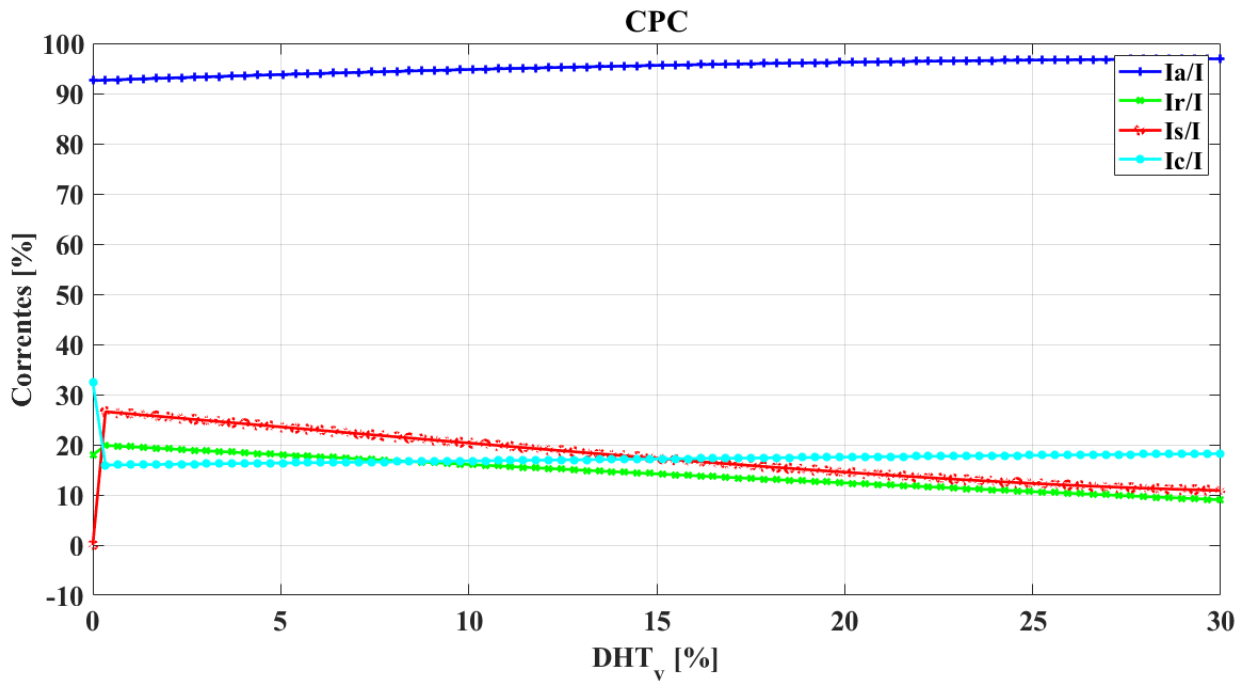


Figura 23 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHT_v [%] da carga FCH.

Para obter uma melhor visualização das Figuras 22 e 23, ou seja, entender melhor a influência das harmônicas na faixa de 0 a 5% de DHT_v , novas formas de onda são obtidas que podem ser observadas nas Figuras 24 e 25. Nota-se que esse aumento em escada da corrente I_{rs_CPT} é devido a integral utilizada no cálculo e como no cálculo da corrente I_{g_CPT} subtrai desta corrente I_{rs_CPT} , então tem-se um decaimento da corrente da mesma forma.

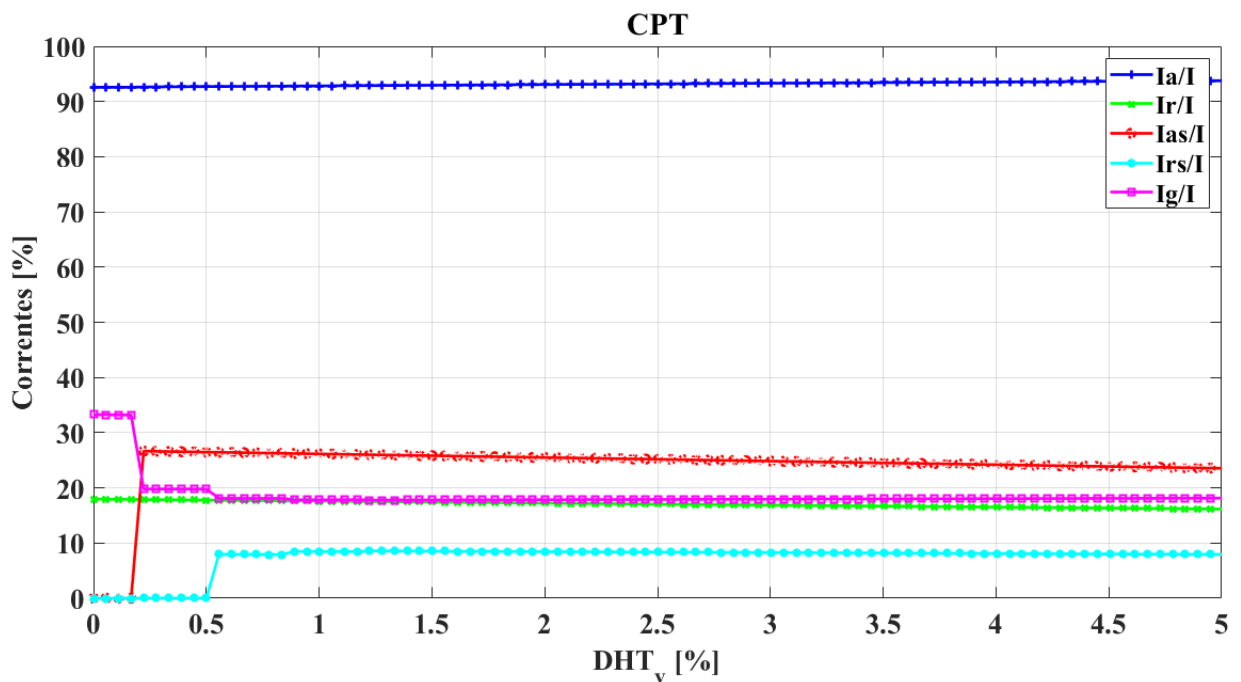


Figura 24 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função de até DHT_v = 5% da carga FCH.

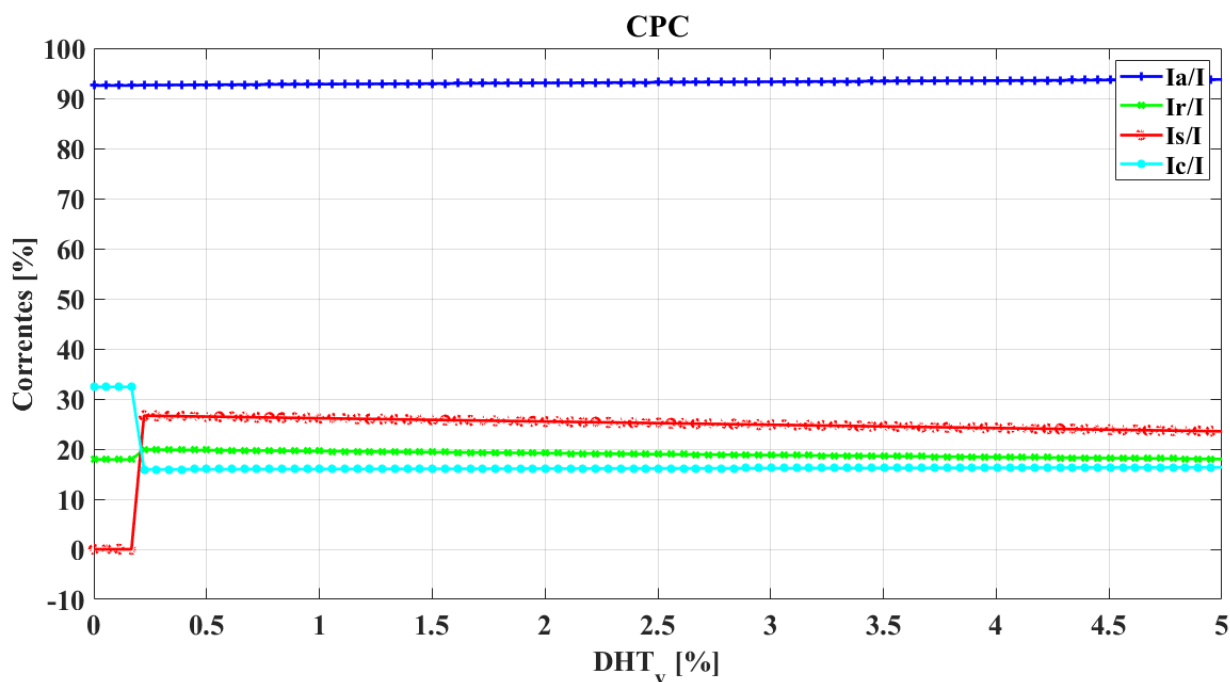


Figura 25 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função de até $DHT_v = 5\%$ da carga FCH.

Tabela 48 - Variações Percentuais das correntes da CPT para a carga FCH.

DHT_v [%]	I [A]	I_a/I [%]	I_r/I [%]	I_{as}/I [%]	I_{rs}/I [%]	I_g/I [%]
0,00	6,56	92,57	17,96	0,00	0,00	33,28
5,00	6,65	93,78	16,14	23,51	7,93	18,15
8,00	6,71	94,41	15,08	21,56	7,42	18,43
10,00	6,75	94,79	14,38	20,28	7,07	18,61
15,00	6,85	95,61	12,69	17,19	6,23	19,05
20,00	6,95	96,20	11,17	14,59	5,47	19,44
25,00	7,06	96,65	9,60	12,32	4,68	19,83
30,00	7,17	96,91	8,11	10,89	3,97	20,21

Tabela 49 - Variações Percentuais das correntes da CPC para a carga FCH.

DHT_v [%]	I [A]	I_a/I [%]	I_r/I [%]	I_s/I [%]	I_c/I [%]
0,00	6,56	92,57	17,96	0,00	32,39
5,00	6,65	93,78	17,98	23,51	16,36
8,00	6,71	94,41	16,80	21,56	16,61
10,00	6,75	94,79	16,03	20,28	16,77
15,00	6,85	95,61	14,14	17,19	17,17
20,00	6,95	96,20	12,43	14,59	17,52
25,00	7,06	96,65	10,69	12,32	17,88
30,00	7,17	96,91	9,03	10,89	18,22

Observando os dados obtidos nas Tabelas 48 e 49 e relacionando com os valores limites de distorção de tensão das normas, IEEE ($DHT_v = 8\%$) e PRODIST ($DHT_v = 10\%$), percebe-se que houve um incremento de 20% das correntes dispersas I_{as} e I_s , nas componentes geradas pela cargas (I_g e I_c) de aproximadamente 19% (CPT) e 17% (CPC) e na corrente dispersa reativa da CPT apenas um incremento de 7%. Portanto, neste caso as correntes geradas são aproximadamente equivalentes e a FFT na CPT torna-se necessário para analisar a influência das tensões harmônicas no funcionamento da carga não-linear tipo FCH.

A Tabela 50 resume a análise comparativa entre ambas às teorias. Observa-se que, as correntes ativas resultaram iguais para todas as condições de análise ($I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$), o mesmo acontece para as componentes dispersa e dispersa ativa ($I_{as_CPT} = I_{s_CPC}$). No caso das correntes reativas, apenas para a condição de tensão senoidal resultam iguais. Para a condição não senoidal, a equivalência pode ser obtida mediante a combinação da componente dispersa reativa e a componente reativa.

Tabela 50 - Análise Comparativa entre as teorias da carga FCH.

Senoidal	Não senoidal
$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$	$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$
$I_{r_CPT} = I_{r_CPC} \neq 0$	$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC} \neq 0$
$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} = 0$	$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} \neq 0$
$I_{rs_CPT} = 0$	$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} = I_{r_CPC}$
$I_g_CPT \approx I_c_CPC \neq 0$	$I_g_CPT \approx I_c_CPC \neq 0$

4.2.5 Carga FTH

Os circuitos da carga não linear do tipo fonte de tensão (FTH) para o caso senoidal e não senoidal são apresentados nas Figuras 26.a e 26.b.

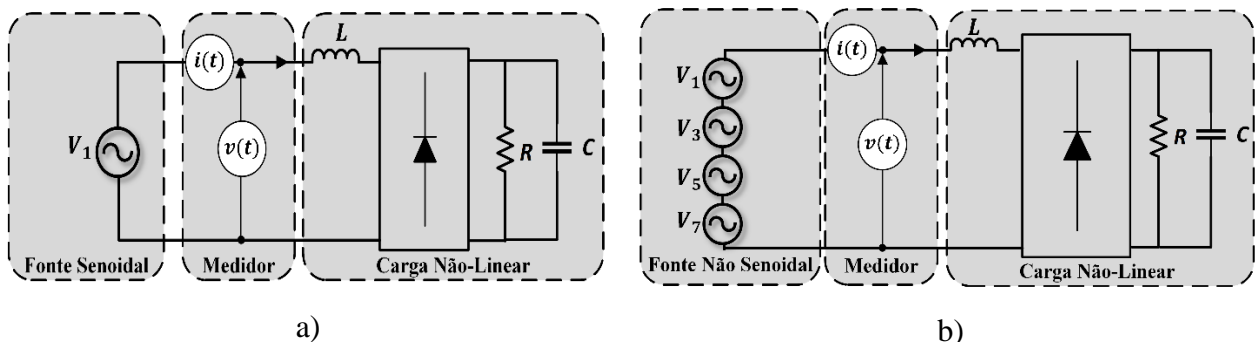


Figura 26 - Circuito simulado da carga FTH: a) Caso senoidal e b) Caso não senoidal.

4.2.5.1 Condição 0 - tensão senoidal

- *Cálculo dos valores teóricos para a CPT:*

Considerando 127 V de tensão eficaz, 60 Hz e $\omega = 2\pi 60 = 376,9911 \text{ rad/s}$, com o auxílio do software MATLAB/SIMULINK®, obtém a tensão e corrente de cada ordem harmônica, neste caso, foram obtidos até a 23ª ordem harmônica, resultando em um $DHT_I = 104,30\%$, lembrando que o valor real é $DHT_I = 104,35\%$. As Figuras 27 e 28 mostram os espectros harmônicos da tensão e corrente. Calculou-se também o valor eficaz da corrente.

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{43} I_h^2} = 14,49 \text{ A}$$

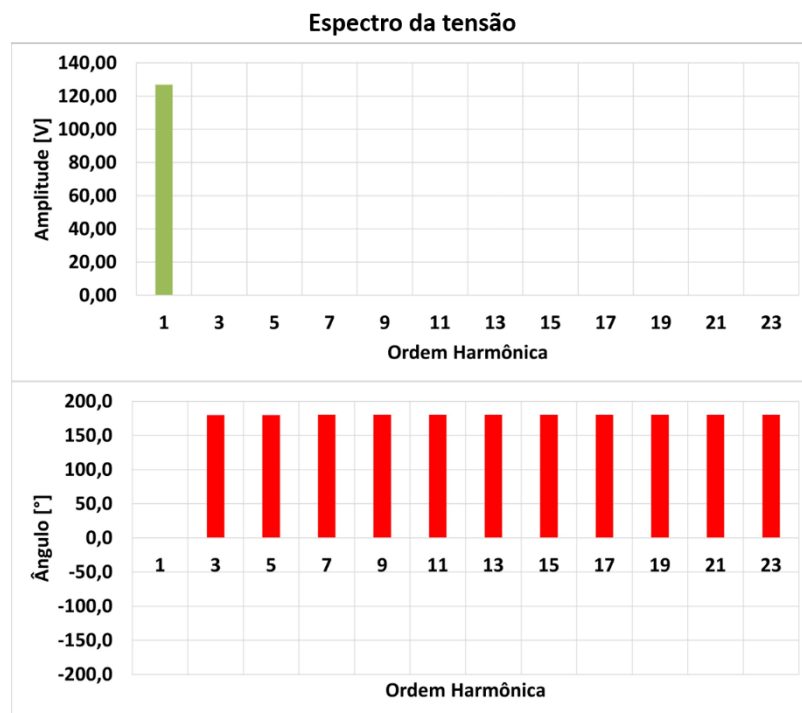


Figura 27 - Espectro Harmônico da Tensão para carga FTH (Condição Senoidal).

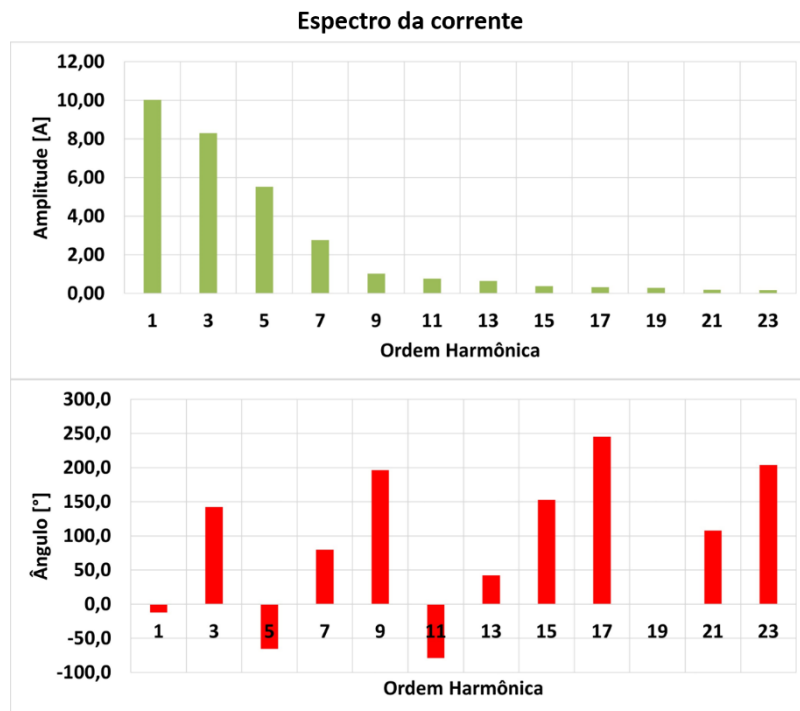


Figura 28 - Espectro Harmônico da Corrente para carga FTH (Condição Senoidal).

Logo, através das correntes I_h e dos ângulos θ_h calcula-se as potências P_h e Q_h para cada ordem harmônica:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 = 127 \cdot 10,03 \cdot \cos(12,3^\circ) = 1244,57 \text{ W}$$

$$P_3 = V_3 I_3 \cos \theta_3 = 0 \cdot 8,30 \cdot \cos(37,6^\circ) = 0 \text{ W}$$

$$P_5 = V_5 I_5 \cos \theta_5 = 0 \cdot 5,53 \cdot \cos(245,2^\circ) = 0 \text{ W}$$

$$P_7 = P_9 = P_{11} = \dots = P_{43} = 0 \text{ W}$$

$$P = \sum_{h=1}^{43} P_h = P_1 + P_3 + \dots + P_{43} = 1244,57 \text{ W}$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 = 127 \cdot 10,03 \cdot \sin(12,3^\circ) = 271,36 \text{ var}$$

$$Q_3 = V_3 I_3 \sin \theta_3 = 0 \cdot 8,30 \cdot \sin(37,6^\circ) = 0 \text{ var}$$

$$Q_5 = V_5 I_5 \sin \theta_5 = 0 \cdot 5,53 \cdot \sin(245,2^\circ) = 0 \text{ var}$$

$$Q_7 = Q_9 = Q_{11} = \dots = Q_{43} = 0 \text{ var}$$

$$Q = \sum_{h=1}^{43} Q_h = Q_1 + Q_3 + \dots + Q_{43} = 271,36 \text{ var}$$

Através da potência ativa e da corrente, calcula-se a condutância equivalente e a reatância equivalente:

$$G_e = G_1 = \frac{P}{V^2} = \frac{1244,57}{127^2} = 0,077 \text{ S}$$

$$\mathcal{B}_e = \mathcal{B}_1 = \omega \frac{Q}{V^2} = 376,9911 \cdot \frac{271,36}{127^2} = 6,343 \text{ H}^{-1}$$

Calcula-se a integral imparcial da tensão e a energia reativa:

$$\hat{V} = \frac{V}{\omega} = \frac{127}{376,9911} = 0,3369 \text{ Vs/rad}$$

$$W_r = \mathcal{B}_e \cdot \hat{V}^2 = 6,343 \cdot 0,3369^2 = 0,7198 \text{ J}$$

Portanto, obtém-se as correntes da CPT:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,077 \cdot 127 = 9,80 \text{ A}$$

$$I_r = \mathcal{B}_e \cdot \hat{V} = 6,343 \cdot 0,3369 = 2,14 \text{ A}$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{14,49^2 - 9,80^2 - 2,14^2} = 10,46 \text{ A}$$

$$I_{as} = \sqrt{(G_1 - G_e)^2 \cdot V_k^2} = \sqrt{(0,077 - 0,077)^2 \cdot 127^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_{rs} = \sqrt{(\mathcal{B}_1 - \mathcal{B}_e)^2 \cdot \hat{V}_k^2} = \sqrt{(6,343 - 6,343)^2 \cdot 0,3369^2} = 0 \text{ A}$$

$$I_g = \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{10,46^2 - 0^2 - 0^2} = 10,46 \text{ A}$$

As potências da CPT, portanto são:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 14,49 \approx 1841,00 \text{ VA}$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 2,14 \approx 271,40 \text{ var}$$

$$D = V \cdot I_v = 127 \cdot 10,46 \approx 1329,00 \text{ VA}$$

$$D_{as} = V \cdot I_{as} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ VA}$$

$$D_{rs} = V \cdot I_{rs} = 127 \cdot 0 = 0 \text{ var}$$

$$D_g = V \cdot I_g = 127 \cdot 10,46 \approx 1329,00 \text{ VA}$$

Finalmente,

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{1245}{\sqrt{1245^2 + 271,40^2 + 1329^2}} \equiv 0,676$$

- *Cálculo dos valores teóricos para a CPC:*

Anteriormente, foram calculados a corrente eficaz e a corrente de cada ordem harmônica (vide Figura 28) e as potências P e Q e a corrente ativa I_a . Na CPC, utiliza-se da susceptância da carga, logo:

$$B_1 = \frac{Q}{V^2} = \frac{271,36}{127^2} = 0,0017 \text{ S}$$

Por se tratar de uma carga não linear, precisa-se analisar o fluxo harmônico, porém a tensão é senoidal e sem impedância de linha, logo, $V = V_d = 127 V$ e $V_c = 0 V$. Analogamente, $P = P_d = 1245 W$ e $P_c = 0 W$.

Portanto, calcula-se as correntes da CPC:

$$I_r = \sqrt{B_1^2 \cdot V^2} = \sqrt{0,0017^2 \cdot 127^2} = 2,14 A$$

$$I_s = \sqrt{((G_1 - G_e) \cdot V)^2} = \sqrt{((0,077 - 0,077) \cdot 127)^2} = 0 A$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{14,49^2 - 9,80^2 - 2,14^2 - 0^2} = 10,46 A$$

As potências da CPC, portanto resultam:

$$A = V \cdot I = 127 \cdot 14,49 \approx 1841,00 VA$$

$$Q = V \cdot I_r = 127 \cdot 2,14 \approx 271,40 var$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127 \cdot 0 = 0 VA$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127 \cdot 10,46 = 1329,00 VA$$

Finalmente, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{1245}{1841} \equiv 0,676$$

A Tabela 51 apresenta os valores calculados e simulados mediante as teorias CPT e CPC. Observa-se que para a condição senoidal, a corrente residual (I_{v_CPT}) da CPT é aproximadamente igual à corrente harmônica gerada pela carga (I_{g_CPT}) da CPT já que a carga é não linear e está sendo alimentada por tensão senoidal. Consequentemente, as correntes dispersas ativa e reativa da CPT e dispersa da CPC são iguais à zero uma vez que não tem harmônicas na tensão. Nota-se também que as correntes ativa e reativa da CPT e CPC são iguais. A potência ativa (P_{CPC}) da CPC é igual a potência do distribuidor (P_d) e equivalente a potência (P_{CPT}) da CPT, consequentemente, o fator de potência é igual. Verifica-se também uma pequena diferença entre o valor teórico e simulado. Em função do nível de distorção da corrente (104 %), a implementação da FFT introduz um pequeno erro, resultando em uma ligeira diferença entre os valores de I_{g_CPT} e I_{c_CPC} .

$$I_{a_CPT} = I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} = I_{r_CPC}$$

$$I_{v_CPT} = \sqrt{I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2} = \sqrt{0^2 + 0^2 + I_g^2} = I_{g_CPT} = 10,46 A$$

$$P_{CPC} = P_d = P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 51 - Dados da carga FTH para o caso senoidal.
Senoidal com $DHT_V = 0,00\%$ e $DHT_I = 104,40\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	1841,00	1841,00	A (VA)	1841,00	1841,00
P (W)	1244,00	1245,00	P_d (W)	1244,00	1245,00
			P_c (W)	0,00	0,00
Q (var)	271,40	271,40	Q (var)	271,40	271,40
D_{as} (VA)	0,00	0,00	D_s (VA)	0,00	0,00
D_{rs} (var)	0,00	0,00			
D_g (VA)	1329,00	1329,00	D_c (VA)	1329,00	1329,00
I (A)	14,49	14,49	I (A)	14,49	14,49
I_a (A)	9,80	9,80	I_a (A)	9,80	9,80
I_r (A)	2,14	2,14	I_r (A)	2,14	2,14
I_{as} (A)	0,00	0,00	I_s (A)	0,00	0,00
I_{rs} (A)	0,00	0,00			
I_g (A)	10,46	10,46	I_c (A)	10,46	10,46
λ	0,676	0,676	λ	0,676	0,676

4.2.5.2 Condição 1 (5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

- *Cálculo dos valores teóricos para a CPT:*

Considerando os valores eficazes da tensão: $V_1 = 127 V$, $V_3 = V_5 = V_7 = 6,35 V$, frequência de $60 Hz$ e $\omega = 2\pi 60 = 376,9911 rad/s$, com o auxílio do software MATLAB/SIMULINK®, obtém a tensão e corrente de cada ordem harmônica, neste caso, foram obtidos até a 23^a ordem harmônica, resultando em um $DHT_I = 94,22\%$, lembrando que o valor real é $DHT_I = 94,28\%$. As Figuras 29 e 30 mostram os espectros harmônicos da tensão e corrente, respectivamente. Calculou-se também os valores eficazes da tensão e corrente.

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_3^2 + V_5^2 + V_7^2} = \sqrt{127^2 + 6,35^2 + 6,35^2 + 6,35^2} = 127,48 V$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{43} I_h^2} = 13,40 A$$



Figura 29 - Espectro Harmônico da Tensão para carga FTH (Condição 1).

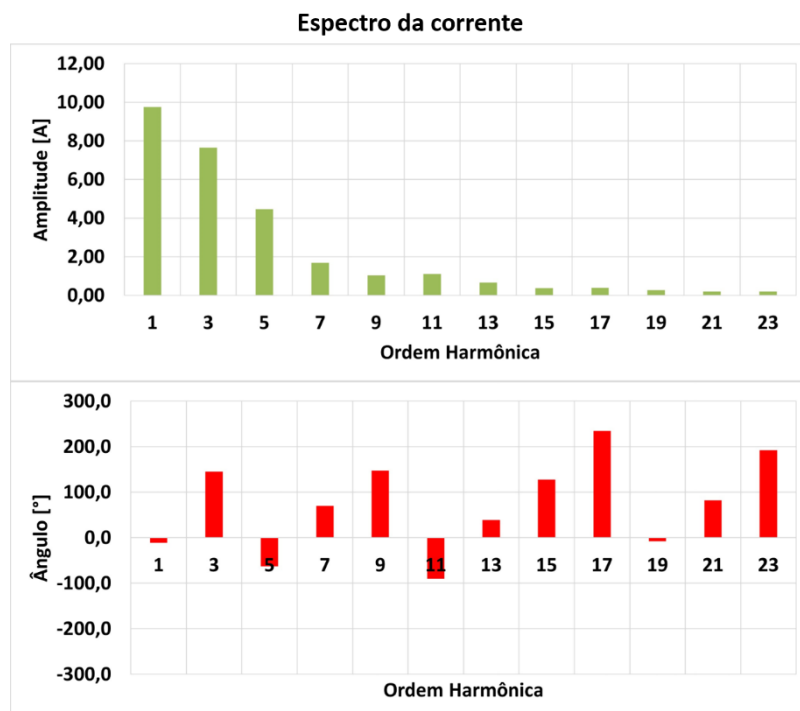


Figura 30 - Espectro Harmônico da Corrente para carga FTH (Condição 1).

Logo, através das tensões V_h , correntes I_h e dos ângulos θ_h calcula-se as potências P_h e Q_h para cada ordem harmônica:

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 = 127 \cdot 9,76 \cdot \cos(11,2^\circ) = 1215,42 \text{ W}$$

$$P_3 = V_3 I_3 \cos \theta_3 = 6,35 \cdot 7,65 \cdot \cos(-145,3^\circ) = -39,95 \text{ W}$$

$$P_5 = V_5 I_5 \cos \theta_5 = 6,35 \cdot 4,46 \cdot \cos(62,6^\circ) = 13,03 \text{ W}$$

$$P_7 = V_7 I_7 \cos \theta_7 = 6,35 \cdot 1,70 \cdot \cos(-69,9^\circ) = 3,70 \text{ W}$$

$$P_9 = P_{11} = \dots = P_{43} = 0 \text{ W}$$

$$P = \sum_{h=1}^{43} P_h = P_1 + P_3 + P_5 + P_7 + \dots + P_{43} = 1192,20 \text{ W}$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 = 127 \cdot 9,76 \cdot \sin(11,2^\circ) = 240,66 \text{ var}$$

$$Q_3 = V_3 I_3 \sin \theta_3 = 6,35 \cdot 7,65 \cdot \sin(-145,3^\circ) = -27,66 \text{ var}$$

$$Q_5 = V_5 I_5 \sin \theta_5 = 6,35 \cdot 4,46 \cdot \sin(62,6^\circ) = 25,14 \text{ var}$$

$$Q_7 = V_7 I_7 \sin \theta_7 = 6,35 \cdot 1,70 \cdot \sin(-69,9^\circ) = -10,11 \text{ var}$$

$$Q_9 = Q_{11} = \dots = Q_{43} = 0 \text{ var}$$

Através da potência ativa e das tensões V_h , calcula-se a condutância equivalente e as condutâncias G_h :

$$G_e = \frac{P}{V^2} = \frac{1192}{127,48^2} = 0,073 \text{ S}$$

$$G_1 = \frac{P_1}{V_1^2} = \frac{1215,42}{127^2} = 0,075 \text{ S}$$

$$G_3 = \frac{P_3}{V_3^2} = \frac{-39,95}{6,35^2} = -0,991 \text{ S}$$

$$G_5 = \frac{P_5}{V_5^2} = \frac{13,03}{6,35^2} = 0,323 \text{ S}$$

$$G_7 = \frac{P_7}{V_7^2} = \frac{3,70}{6,35^2} = 0,092 \text{ S}$$

Através da potência reativa e das correntes I_h , tem-se as reatividades \mathcal{B}_h :

$$\mathcal{B}_1 = \frac{h\omega I_1 \sin(\theta_1)}{V_1} = \frac{1 \cdot 376,9911 \cdot 9,76 \cdot \sin(11,2^\circ)}{127} = 5,625 \text{ H}^{-1}$$

$$\mathcal{B}_3 = \frac{h\omega I_3 \sin(\theta_3)}{V_3} = \frac{3 \cdot 376,9911 \cdot 7,65 \cdot \sin(-145,3^\circ)}{6,35} = -775,85 \text{ H}^{-1}$$

$$\mathcal{B}_5 = \frac{h\omega I_5 \sin(\theta_5)}{V_5} = \frac{5 \cdot 376,9911 \cdot 4,46 \cdot \sin(62,6^\circ)}{6,35} = 1175,13 \text{ H}^{-1}$$

$$\mathcal{B}_7 = \frac{h\omega I_7 \sin(\theta_7)}{V_7} = \frac{7 \cdot 376,9911 \cdot 1,70 \cdot \sin(-69,9^\circ)}{6,35} = -661,51 \text{ H}^{-1}$$

Calcula-se a integral imparcial da tensão para cada ordem harmônica e seu valor eficaz:

$$\hat{V}_1 = \frac{V_1}{h\omega} = \frac{127}{376,9911} = 0,3369 \text{ Vs/rad}$$

$$\hat{V}_3 = \frac{V_3}{h\omega} = \frac{6,35}{3 \cdot 376,9911} = 0,0056 \text{ Vs/rad}$$

$$\hat{V}_5 = \frac{V_5}{h\omega} = \frac{6,35}{5 \cdot 376,9911} = 0,0034 \text{ Vs/rad}$$

$$\hat{V}_7 = \frac{V_7}{h\omega} = \frac{6,35}{7 \cdot 376,9911} = 0,0024 \text{ Vs/rad}$$

$$\begin{aligned} \hat{V} &= \sqrt{\hat{V}_1^2 + \hat{V}_3^2 + \hat{V}_5^2 + \hat{V}_7^2} = \\ &= \sqrt{0,3369^2 + 0,0056^2 + 0,0034^2 + 0,0024^2} = 0,3370 \text{ V} \cdot \text{s/rad} \end{aligned}$$

Logo, obtém-se a energia reativa para cada ordem harmônica e a reatidade equivalente:

$$W_{r1} = \mathcal{B}_1 \cdot \hat{V}_1^2 = 5,625 \cdot 0,3369^2 = 0,6384 \text{ J}$$

$$W_{r3} = \mathcal{B}_3 \cdot \hat{V}_3^2 = -775,85 \cdot 0,0056^2 = -0,0245 \text{ J}$$

$$W_{r5} = \mathcal{B}_5 \cdot \hat{V}_5^2 = 1175,13 \cdot 0,0034^2 = 0,0133 \text{ J}$$

$$W_{r7} = \mathcal{B}_7 \cdot \hat{V}_7^2 = -661,51 \cdot 0,0024^2 = -0,0038 \text{ J}$$

$$W_r = \sum_{h=1}^{43} W_{rh} = 0,6384 - 0,0245 + 0,0133 - 0,0038 = 0,6234 \text{ J}$$

$$\mathcal{B}_e = \frac{W_r}{\hat{V}^2} = \frac{0,6234}{0,3370^2} = 5,491 \text{ H}^{-1}$$

Portanto, obtém-se as correntes da CPT:

$$I_a = G_e \cdot V = 0,073 \cdot 127,48 = 9,35 \text{ A}$$

$$I_r = \mathcal{B}_e \cdot \hat{V} = 5,491 \cdot 0,3370 = 1,85 \text{ A}$$

$$I_v = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2} = \sqrt{13,40^2 - 9,35^2 - 1,85^2} = 9,42 \text{ A}$$

$$\begin{aligned} I_{as} &= \sqrt{\sum_1^h (G_k - G_e)^2 \cdot V_k^2} \\ &= \sqrt{(0,075 - 0,073)^2 \cdot 127^2 + (-0,991 - 0,073)^2 \cdot 6,35^2 + \dots} \\ &\quad \sqrt{\dots + (0,323 - 0,073)^2 \cdot 6,35^2 + (0,092 - 0,073)^2 \cdot 6,35^2} \\ &= 6,95 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
I_{rs} &= \sqrt{\sum_1^h (\mathcal{B}_k - \mathcal{B}_e)^2 \cdot \hat{V}_k^2} \\
&= \sqrt{(5,625 - 5,491)^2 \cdot 0,3369^2 + (-775,85 - 5,491)^2 \cdot 0,0056^2 + \dots} \\
&\quad \sqrt{\dots + (1175,13 - 5,491)^2 \cdot 0,0034^2 + (-661,51 - 5,491)^2 \cdot 0,0024^2} \\
&= 6,11 \text{ A} \\
I_g &= \sqrt{I_v^2 - I_{as}^2 - I_{rs}^2} = \sqrt{9,42^2 - 6,95^2 - 6,11^2} = 1,78 \text{ A}
\end{aligned}$$

As potências da CPT, portanto são:

$$\begin{aligned}
A &= V \cdot I = 127,48 \cdot 13,40 \approx 1709,00 \text{ VA} \\
Q &= V \cdot I_r = 127,48 \cdot 1,85 \approx 235,90 \text{ var} \\
D &= V \cdot I_v = 127,48 \cdot 9,42 \approx 1201,00 \text{ VA} \\
D_{as} &= V \cdot I_{as} = 127,48 \cdot 6,95 \approx 885,47 \text{ VA} \\
D_{rs} &= V \cdot I_{rs} = 127,48 \cdot 6,11 \approx 779,05 \text{ var} \\
D_g &= V \cdot I_g = 127,48 \cdot 1,78 \approx 227,30 \text{ VA}
\end{aligned}$$

Finalmente,

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \frac{1192}{\sqrt{1192^2 + 235,90^2 + 1201^2}} \equiv 0,698$$

- *Cálculo dos valores teóricos para a CPC:*

Anteriormente, foram calculados a corrente e tensão eficaz e a corrente e tensão de cada ordem harmônica (vide Figura 29 e 30), e as potências P e Q e a corrente ativa I_a . Na CPC, utiliza-se da susceptância da carga, logo:

$$\begin{aligned}
B_1 &= \frac{I_1 \sin(\theta_1)}{V_1} = \frac{9,76 \cdot \sin(11,2^\circ)}{127} = 0,015 \text{ S} \\
B_3 &= \frac{I_3 \sin(\theta_3)}{V_3} = \frac{7,65 \cdot \sin(-145,3^\circ)}{6,35} = -0,686 \text{ S} \\
B_5 &= \frac{I_5 \sin(\theta_5)}{V_5} = \frac{4,46 \cdot \sin(62,5^\circ)}{6,35} = 0,623 \text{ S} \\
B_7 &= \frac{I_7 \sin(\theta_7)}{V_7} = \frac{1,70 \cdot \sin(-70^\circ)}{6,35} = -0,251 \text{ S}
\end{aligned}$$

Por se tratar de uma carga não linear, precisa-se analisar o fluxo harmônico, logo, a tensão do consumidor vale $V_c = 6,35 \text{ V}$, já que para a 3ª harmônica, a diferença angular da 3ª harmônica é maior que 90° e $V_d = \sqrt{127^2 + 6,35^2 + 6,35^2} = 127,32 \text{ V}$. Analogamente,

calcula-se as Potências do distribuidor e do consumidor, $P_d = 1215,42 + 13,07 + 3,68 = 1232,14 W$ e $P_c = -39,95 W$.

Obtém-se a condutância equivalente:

$$G_{eD} = \frac{P_d}{V_d^2} = \frac{1232,14}{127,32^2} = 0,076 S$$

Portanto, calcula-se as correntes da CPC:

$$I_a = G_{eD} \cdot V_d = 0,076 \cdot 127,32 = 9,68 A$$

$$\begin{aligned} I_r &= \sqrt{\sum_1^h B_h^2 \cdot V_h^2} = \sqrt{0,015^2 \cdot 127^2 + 0,623^2 \cdot 6,35^2 + 0,251^2 \cdot 6,35^2} \\ &= 4,67 A \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_s &= \sqrt{\sum_1^h ((G_h - G_{ed}) \cdot V_h)^2} \\ &= \sqrt{(0,075 - 0,076)^2 \cdot 127^2 + (0,323 - 0,076)^2 \cdot 6,35^2 + \dots} \\ &\quad \sqrt{\dots + (0,092 - 0,076)^2 \cdot 6,35^2} \\ &= 1,57 A \end{aligned}$$

$$I_c = \sqrt{I^2 - I_a^2 - I_r^2 - I_s^2} = \sqrt{13,40^2 - 9,68^2 - 4,67^2 - 1,57^2} = 7,86 A$$

As potências da CPC, portanto resultam:

$$A = V \cdot I = 127,48 \cdot 13,40 \approx 1709,00 VA$$

$$Q = V \cdot I_r = 127,48 \cdot 4,67 \approx 595,10 var$$

$$D_s = V \cdot I_s = 127,48 \cdot 1,57 \approx 200,74 VA$$

$$D_c = V \cdot I_c = 127,48 \cdot 7,86 = 1001,57 VA$$

Finalmente, o fator de potência é:

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{P_d - P_c}{A} = \frac{1232,14 - 39,95}{1709} = \frac{1192,20}{1709} \approx 0,698$$

Similarmente, para a condição 1, a Tabela 52 mostra os dados calculados e simulados mediante as teorias CPT e CPC, respectivamente. Para a condição não senoidal, a equivalência entre a corrente residual (I_{v_CPT}) e a corrente harmônica gerada pela carga (I_{g_CPT}) não é mais válida, pois tem harmônicas presentes na tensão e as correntes ativa e reativa são diferentes

entre as teorias. Para esta condição, a potência ativa da CPC não é mais equivalente a potência do distribuidor devido a presença da potência do consumidor, entretanto, a potência ativa é igual entre as teorias CPT e CPC, assim, o fator de potência também é similar. Novamente, o valor teórico está diferente do valor simulado.

$$I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{v_CPT} = \sqrt{I_{as}^2 + I_{rs}^2 + I_g^2} = \sqrt{6,80^2 + 5,81^2 + 1,99^2} \neq I_{g_CPT}$$

$$I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d - P_c = 1232 - 39,96 = 1192,04 \text{ W} \approx P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 52 - Dados da carga FTH para a condição 1.
Condição 1 (5%) com $DHT_V = 8,66\%$ e $DHT_I = 94,28\%$

CPT			CPC		
Parâmetros	MATLAB	Teórico	Parâmetros	MATLAB	Teórico
A (VA)	1709,00	1709,00	A (VA)	1709,00	1709,00
P (W)	1192,00	1192,00	P _a (W)	1232,00	1232,14
			P _c (W)	39,96	39,95
Q (var)	236,60	235,90	Q (var)	595,30	595,10
D _{as} (VA)	885,60	885,47	D _s (VA)	201,20	200,74
D _{rs} (var)	778,80	779,05			
D _g (VA)	231,80	227,30	D _c (VA)	1002,00	1001,57
I (A)	13,41	13,40	I (A)	13,41	13,40
I _a (A)	9,35	9,35	I _a (A)	9,68	9,68
I _r (A)	1,86	1,85	I _r (A)	4,67	4,67
I _{as} (A)	6,95	6,95	I _s (A)	1,58	1,57
I _{rs} (A)	6,11	6,11			
I _g (A)	1,82	1,78	I _c (A)	7,86	7,86
λ	0,697	0,698	λ	0,697	0,698

As correntes I_g e I_c possuem também uma grande diferença de valores. Além disso, como a tensão contém harmônicos, as componentes dispersas ativa e reativa da CPT e dispersa da CPC são diferentes de zero.

4.2.5.3 Condição 2 (5% de 3ª harmônica, 7% de 5ª harmônica e 5% de 7ª harmônica)

Os valores calculados pela CPT e CPC para a condição 2 podem ser observados na Tabela 53. Similarmente que para a condição anterior, os valores da corrente ativa e reativa são diferentes entre as teorias assim como as correntes I_g e I_c . A potência ativa da CPC não é igual a potência do distribuidor, porém, é igual a potência da CPT.

$$I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d - P_c = 1251 - 41,34 = 1209,66 \text{ W} \approx P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 53 - Dados da carga FTH para a condição 2.
Condição 2 com $DHT_V = 9,95\%$ e $DHT_I = 100,60\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	1786,00	1786,00	A (VA)	1786,00	1786,00
P (W)	1210,00	1210,00	P _d (W)	1251,00	1251,00
			P _c (W)	41,34	41,32
Q (var)	249,00	249,20	Q (var)	693,90	693,90
D _{as} (VA)	916,10	915,90	D _s (VA)	208,70	208,73
D _{rs} (var)	879,10	879,19			
D _g (VA)	230,50	226,10	D _c (VA)	1047,00	1046,12
I (A)	14,00	13,99	I (A)	14,00	13,99
I _a (A)	9,48	9,48	I _a (A)	9,82	9,81
I _r (A)	1,95	1,95	I _r (A)	5,44	5,44
I _{as} (A)	7,18	7,18	I _s (A)	1,64	1,64
I _{rs} (A)	6,89	6,89			
I _g (A)	1,81	1,77	I _c (A)	8,20	8,20
λ	0,677	0,677	λ	0,677	0,677

4.2.5.4 Condição 3 (6,5% de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas)

A Tabela 54 apresenta os valores calculados e simulados pela CPT e CPC para a condição 3. Verifica-se que as correntes ativa e reativa possuem valores diferentes entre as teorias. As correntes dispersas e a corrente harmônica gerada pela carga e a corrente do

consumidor também são divergentes. A potência ativa da CPC não é igual a potência do distribuidor, porém, é similar a potência da CPT.

$$I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d - P_c = 1229 - 51,37 = 1177,63 \text{ W} \approx P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 54 - Dados da carga FTH para a condição 3.
Condição 3 (6,5%) com $DHT_V = 11,26\%$ e $DHT_I = 91,34\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	1675,00	1674,00	A (VA)	1675,00	1674,00
P (W)	1177,00	1177,00	P _a (W)	1229,00	1228,39
			P _c (W)	51,37	51,38
Q (var)	223,90	224,80	Q (var)	537,60	537,90
D _{as} (VA)	890,70	890,94	D _s (VA)	176,30	176,29
D _{rs} (var)	715,70	715,46			
D _g (VA)	250,90	247,00	D _c (VA)	984,00	983,27
I (A)	13,10	13,10	I (A)	13,10	13,10
I _a (A)	9,21	9,21	I _a (A)	9,63	9,63
I _r (A)	1,75	1,76	I _r (A)	4,21	4,21
I _{as} (A)	6,97	6,97	I _s (A)	1,38	1,38
I _{rs} (A)	5,60	5,60			
I _g (A)	1,96	1,93	I _c (A)	7,70	7,69
λ	0,703	0,703	λ	0,703	0,703

4.2.5.5 Condição 4 (7,5% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Para a condição 4, os dados calculados e simulados pela CPT e CPC são apresentados na Tabela 55. Nota-se que as correntes e potências calculadas são diferentes entre as teorias: corrente ativa, reativa, dispersas e harmônica gerada pela carga e do consumidor. A potência ativa da CPC não é igual a potência do distribuidor, porém, é igual a potência da CPT.

$$I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d - P_c = 1226 - 58,86 = 1167,14 \text{ W} \approx P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 55 - Dados da carga FTH para a condição 4.
Condição 4 (7,5%) com $DHT_V = 12,99\%$ e $DHT_I = 89,47\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	1653,00	1653,00	A (VA)	1653,00	1653,00
P (W)	1167,00	1167,00	P_d (W)	1226,00	1226,28
			P_c (W)	58,86	58,85
Q (var)	215,10	214,90	Q (var)	498,70	498,60
D_{as} (VA)	895,20	895,23	D_s (VA)	161,20	161,32
D_{rs} (var)	672,90	672,82			
D_g (VA)	265,40	262,10	D_c (VA)	972,80	972,17
I (A)	12,91	12,91	I (A)	12,91	12,91
I_a (A)	9,12	9,12	I_a (A)	9,60	9,60
I_r (A)	1,68	1,68	I_r (A)	3,89	3,89
I_{as} (A)	6,99	6,99	I_s (A)	1,26	1,26
I_{rs} (A)	5,25	5,25			
I_g (A)	2,07	2,05	I_c (A)	7,60	7,59
λ	0,706	0,706	λ	0,706	0,706

4.2.5.6 Condição 5 (8% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Os valores calculados e simulados pela CPT e CPC para a condição 5 podem ser observados na Tabela 56. Similarmente as condições anteriormente analisadas, as correntes ativas e as correntes reativas resultam diferentes entre as teorias, assim como as correntes harmônica gerada pela carga e do consumidor. Novamente, a potência (P_{CPC}) é igual a potência (P_{CPT}), conseqüentemente, o fator de potência é equivalente. Por outro lado, observa-se que, em função do incremento da DHT de tensão, os valores das correntes dispersas (I_{as} e I_{rs}) da CPT são superiores ao valor da corrente dispersa da CPC (I_s).

$$I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC} \text{ e } I_{as_CPT} > I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d - P_c = 1225 - 62,57 = 1162,43 \text{ W} \approx P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} \approx \lambda_{CPT}$$

Tabela 56 - Dados da carga FTH para a condição 5.
Condição 5 (8%) com $DHT_v = 13,86\%$ e $DHT_I = 88,58\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	1643,00	1643,00	A (VA)	1643,00	1643,00
P (W)	1163,00	1163,00	P _d (W)	1225,00	1225,31
			P _c (W)	62,57	62,60
Q (var)	210,60	210,00	Q (var)	479,30	479,00
D _{as} (VA)	897,80	898,27	D _s (VA)	154,20	154,34
D _{rs} (var)	651,30	650,70			
D _g (VA)	273,10	270,00	D _c (VA)	967,60	966,98
I (A)	12,82	12,81	I (A)	12,82	12,81
I _a (A)	9,07	9,07	I _a (A)	9,59	9,59
I _r (A)	1,64	1,64	I _r (A)	3,74	3,74
I _{as} (A)	7,00	7,01	I _s (A)	1,20	1,20
I _{rs} (A)	5,08	5,08			
I _g (A)	2,13	2,11	I _c (A)	7,55	7,54
λ	0,707	0,708	λ	0,708	0,708

4.2.5.7 Condição 6 (11% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Para a condição 6, na Tabela 57 podem ser analisados os dados calculados e simulados pela CPT e CPC. Nota-se que mais uma vez, as correntes são diferentes entre as teorias: corrente ativa, reativa, dispersas e harmônica gerada pela carga e do consumidor, porém, a potência ativa é similar entre as teorias.

$$I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d - P_c = 1219 - 84,41 = 1134,59 \text{ W} \approx P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 57 - Dados da carga FTH para a condição 6.
Condição 6 (11%) com $DHT_V = 19,05\%$ e $DHT_I = 83,97\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	1593,00	1593,00	A (VA)	1593,00	1593,00
P (W)	1134,00	1134,00	P_a (W)	1219,00	1218,56
			P_c (W)	84,41	84,36
Q (var)	182,50	182,10	Q (var)	366,50	366,60
D_{as} (VA)	917,00	916,52	D_s (VA)	120,80	120,54
D_{rs} (var)	522,20	522,99			
D_g (VA)	324,00	321,00	D_c (VA)	941,40	940,65
I (A)	12,32	12,32	I (A)	12,32	12,32
I_a (A)	8,77	8,77	I_a (A)	9,48	9,48
I_r (A)	1,41	1,41	I_r (A)	2,83	2,84
I_{as} (A)	7,09	7,09	I_s (A)	0,93	0,93
I_{rs} (A)	4,04	4,05			
I_g (A)	2,51	2,48	I_c (A)	7,28	7,28
λ	0,712	0,712	λ	0,712	0,712

4.2.5.8 Condição 7 (15% de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas)

Os dados calculados e simulados pela CPT e CPC para a condição 7 são apresentados na Tabela 58. Os valores das componentes de corrente e potência para ambas as teorias, nesta condição, também resultaram diferentes, apenas a potência ativa é igual entre as teorias.

$$I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC}$$

$$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC}$$

$$I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC}$$

$$I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC}$$

$$P_{CPC} = P_d - P_c = 1210 - 112,50 = 1097,50 \text{ W} \approx P_{CPT} \Rightarrow \lambda_{CPC} = \lambda_{CPT}$$

Tabela 58 - Dados da carga FTH para a condição 7.
Condição 7 (15%) com $DHT_V = 25,98\%$ e $DHT_I = 80,81\%$

Parâmetros	CPT		Parâmetros	CPC	
	MATLAB	Teórico		MATLAB	Teórico
A (VA)	1558,00	1557,00	A (VA)	1558,00	1557,00
P (W)	1097,00	1097,00	P_a (W)	1210,00	1209,44
			P_c (W)	112,50	112,42
Q (var)	142,90	143,80	Q (var)	254,60	255,30
D_{as} (VA)	950,30	950,07	D_s (VA)	110,40	110,59
D_{rs} (var)	371,50	372,14			
D_g (VA)	401,50	398,30	D_c (VA)	924,20	923,16
I (A)	11,87	11,87	I (A)	11,87	11,87
I_a (A)	8,36	8,36	I_a (A)	9,32	9,32
I_r (A)	1,09	1,10	I_r (A)	1,94	1,95
I_{as} (A)	7,24	7,24	I_s (A)	0,84	0,84
I_{rs} (A)	2,83	2,84			
I_g (A)	3,06	3,04	I_c (A)	7,04	7,04
λ	0,704	0,705	λ	0,704	0,705

As Figuras 31 e 32 apresentam as formas de onda corrente total e o somatório das correntes decompostas das teorias CPT e CPC para todas as condições simuladas, observa-se que as correntes estão sobrepostas (corrente total igual a sua reconstrução do sinal).

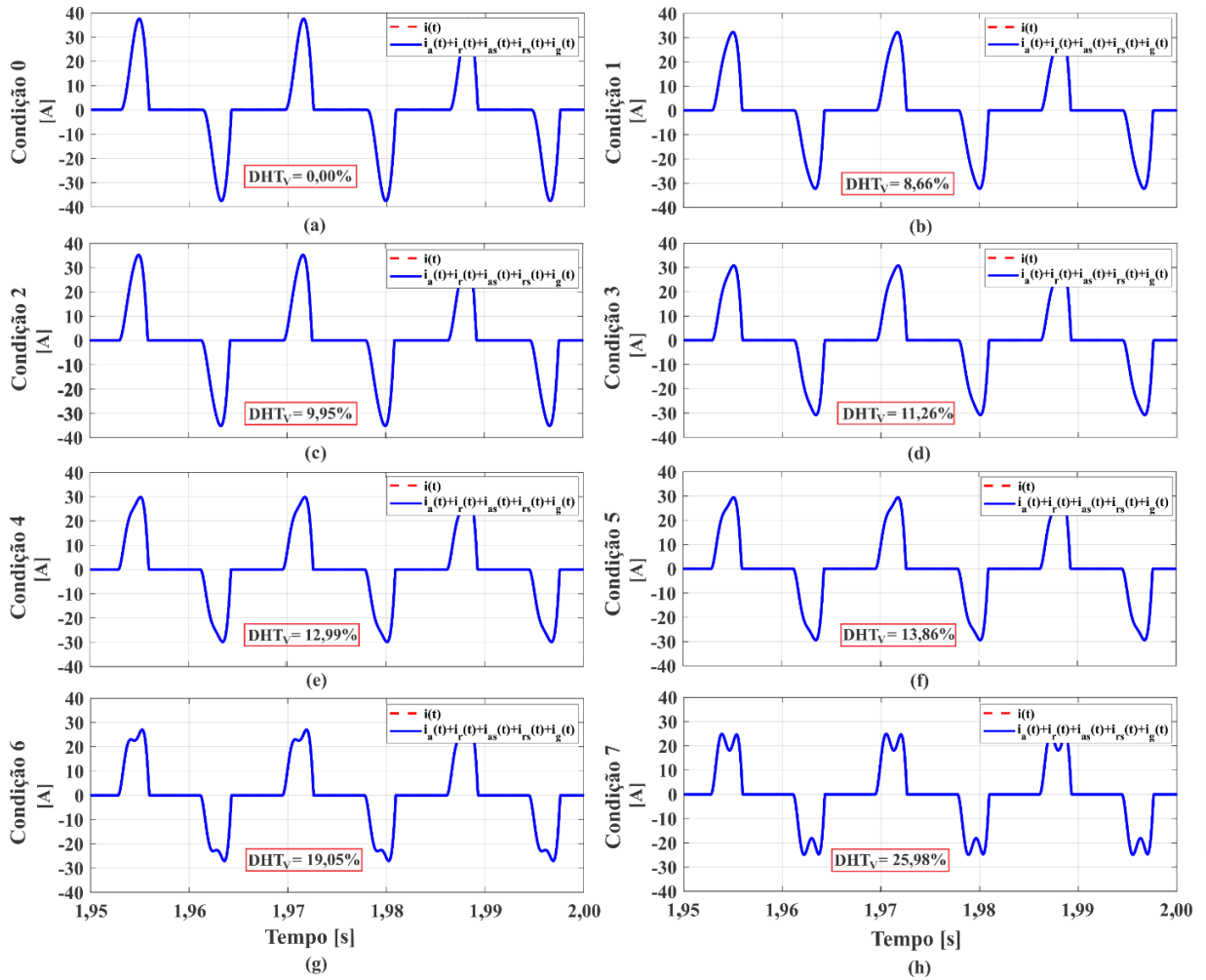


Figura 31 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPT para carga FTH.

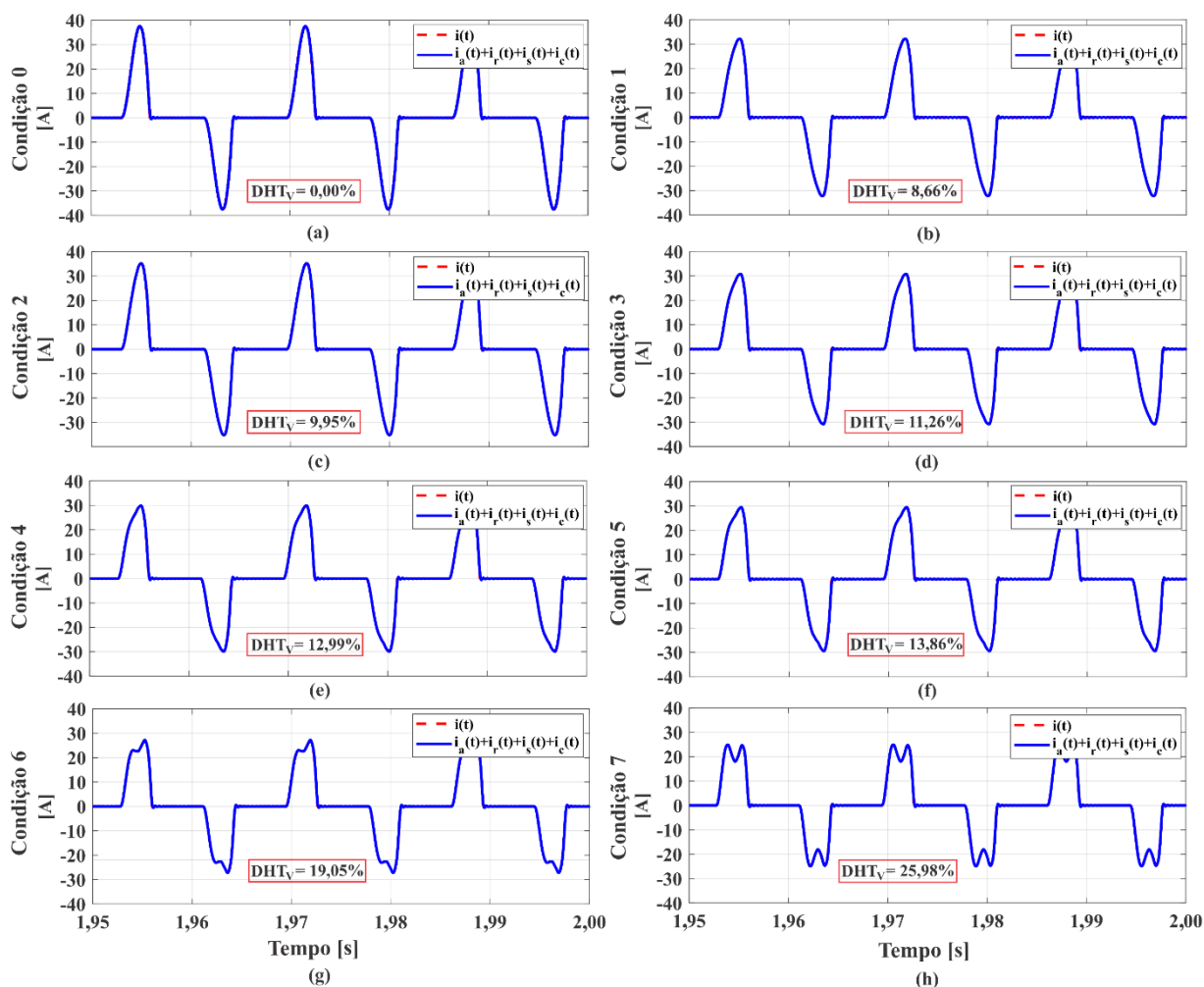


Figura 32 - Formas de onda da corrente total e da reconstrução do sinal da CPC para carga FTH.

4.2.5.9 Discussões sobre a operação da Carga FTH

Similarmente que os casos anteriores, com o auxílio do MATLAB/SIMULINK considerando as 90 amostras, obtém-se as Figuras 33 e 34 e as Tabelas 59 e 60 de forma automatizada, na qual mostram os dados com as variações percentuais das correntes decompostas em função da distorção de tensão (DHT_V). Para a carga FTH foi possível observar que conforme a distorção harmônica de tensão aumenta, a corrente ativa (I_{a_CPT}) da CPT aumenta até 20% de DHT_V e depois começa a diminuir, já a corrente ativa da CPC (I_{a_CPC}) tendem a aumentar devido ao surgimento de harmônicas comuns entre a tensão e corrente. A componente reativa (I_{r_CPT}) da CPT tende a diminuir, 7% para um DHT_V de 30%, contrariamente à componente dispersa reativa (I_{rs_CPT}) da CPT que atinge o valor máximo em 1,25% de DHT_V e depois começa a diminuir. A componente gerada pela carga (I_{g_CPT}) da CPT atinge o menor valor em 1,25% de DHT_V e teve um aumento em 19% para um DHT_V de 30%.

Isto pode estar associado à inversão da fase das harmônicas provocadas pela interação do capacitor no lado CC e o incremento da distorção de tensão. A corrente ativa dispersa (I_{as_CPT}) tende a aumentar com aumento do DHT_V e a corrente dispersa (I_{s_CPC}) da CPC tende a diminuir e a partir de 25% de DHT_V tende a aumentar. Além disso, observa-se que a componente reativa (I_{r_CPC}) da CPC atinge o valor máximo em 0,25% de DHT_V , começa a diminuir e depois em 30% de DHT_V tende a aumentar. A componente do consumidor (I_{c_CPC}) da CPC atinge seu valor mínimo em 0,25% de DHT_V , depois tende a aumentar ligeiramente. Nas Figuras 33 e 34, o período inicial das correntes dispersas da CPT e CPC (I_{as_CPT} , I_{rs_CPT} e I_{s_CPC}) são devido a aproximação dos valores das tensões harmônicas, evitando uma divisão por zero nas equações (21), (40) e (41). Como a potência ativa foi igual entre as teorias tanto em condição senoidal quanto não senoidal, o fator de potência foi similar e teve um incremento de acordo com o aumento do DHT_V .

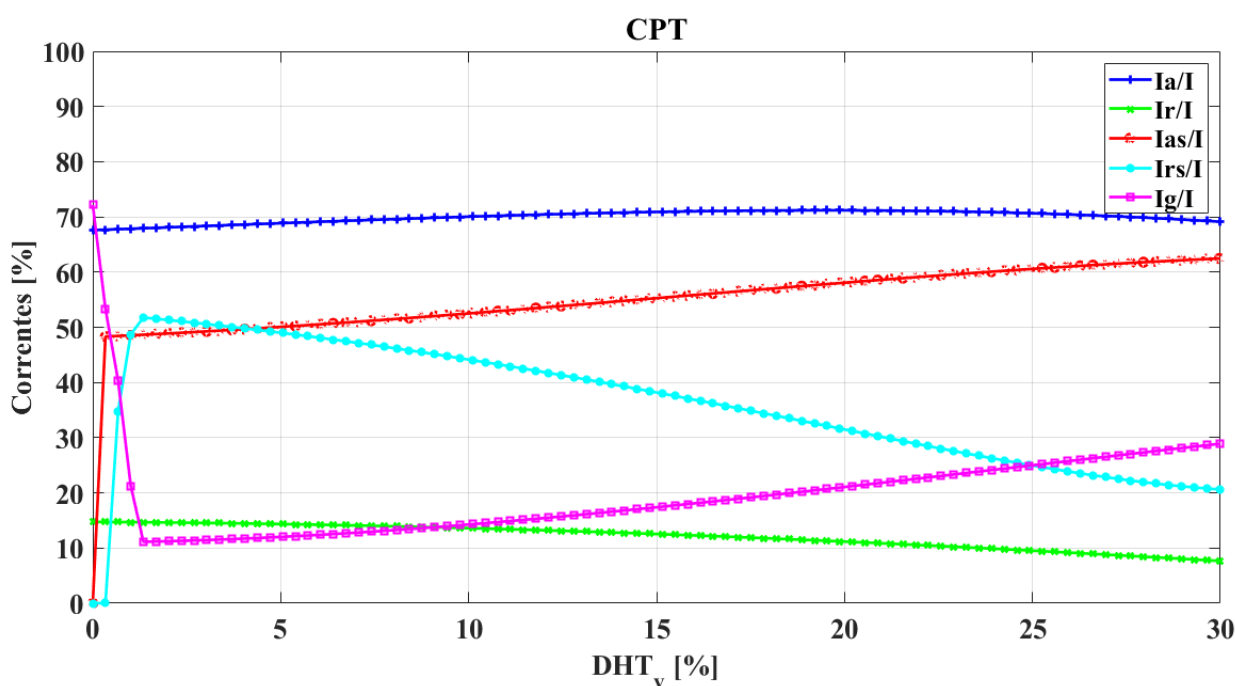


Figura 33 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHT_V da carga FTH.

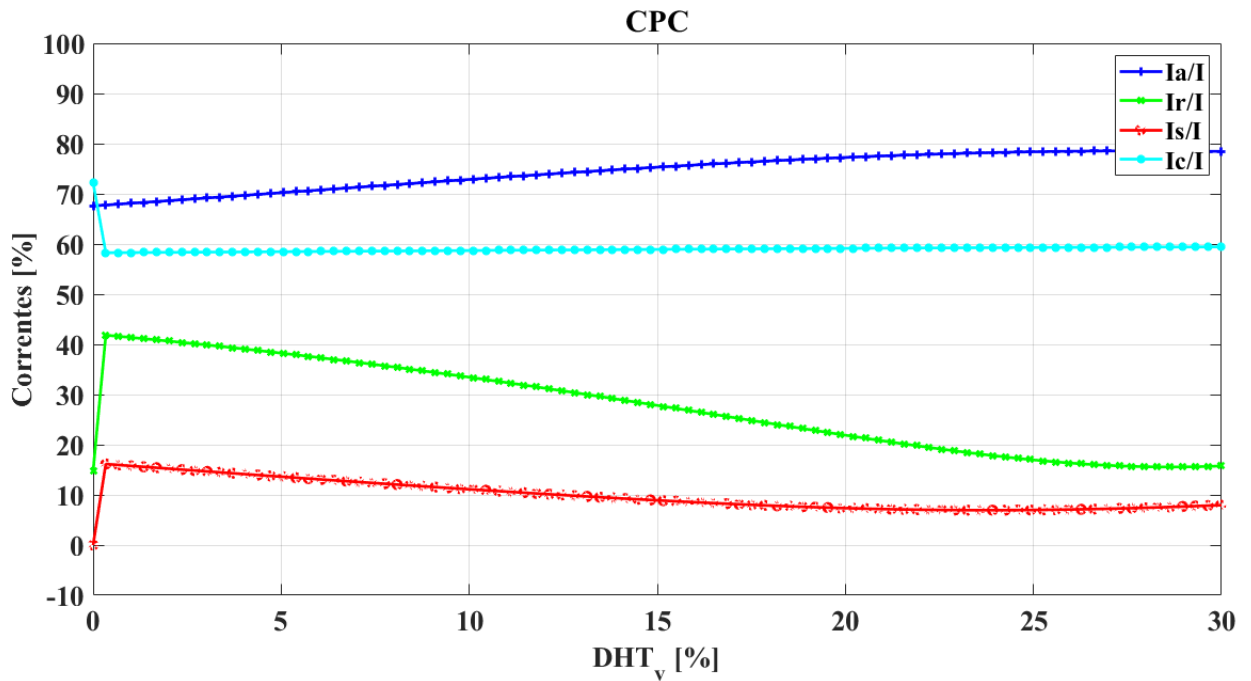


Figura 34 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHT_v da carga FTH.

Para obter uma melhor visualização das Figuras 33 e 34, analisar a influência das harmônicas na faixa de 0 a 5% de DHT_v , novas formas de onda são obtidas que podem ser observadas nas Figuras 35 e 36. Nota-se que esse aumento em escada da corrente I_{rs_CPT} é devido a integral utilizada no cálculo e como no cálculo da corrente I_{g_CPT} subtrai desta corrente I_{rs_CPT} , então tem um decaimento da corrente da mesma forma.

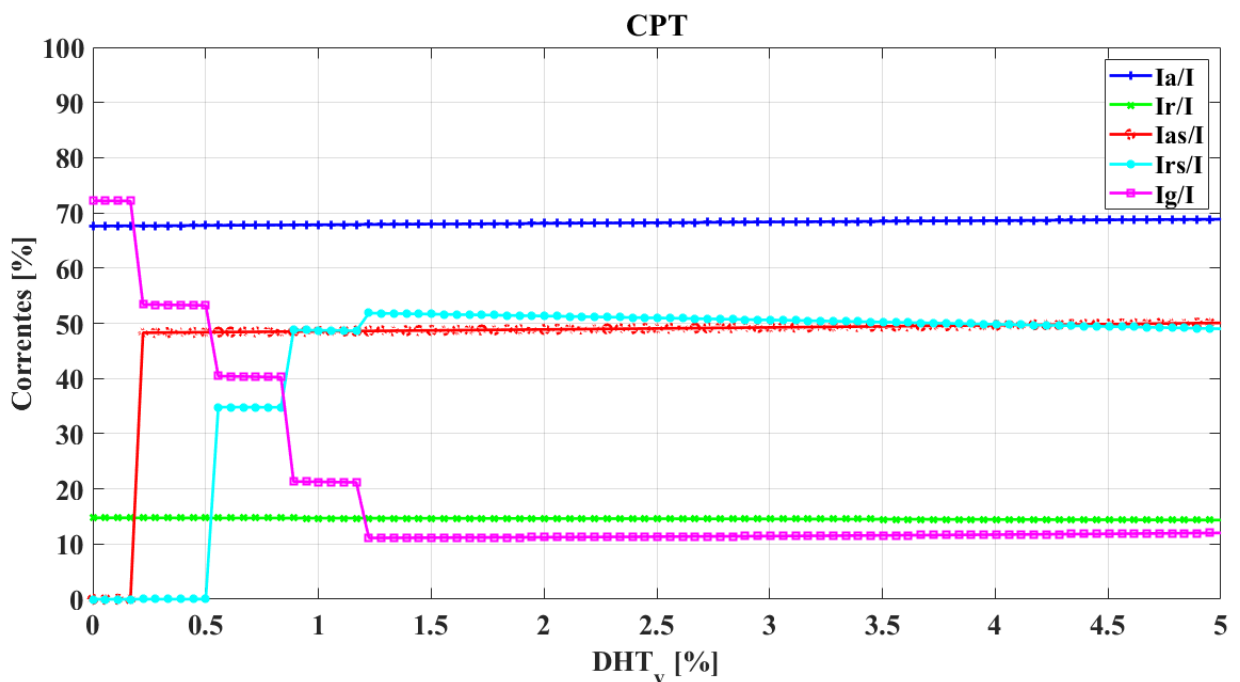


Figura 35 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPT em função do DHT_v = 5% da carga FTH.

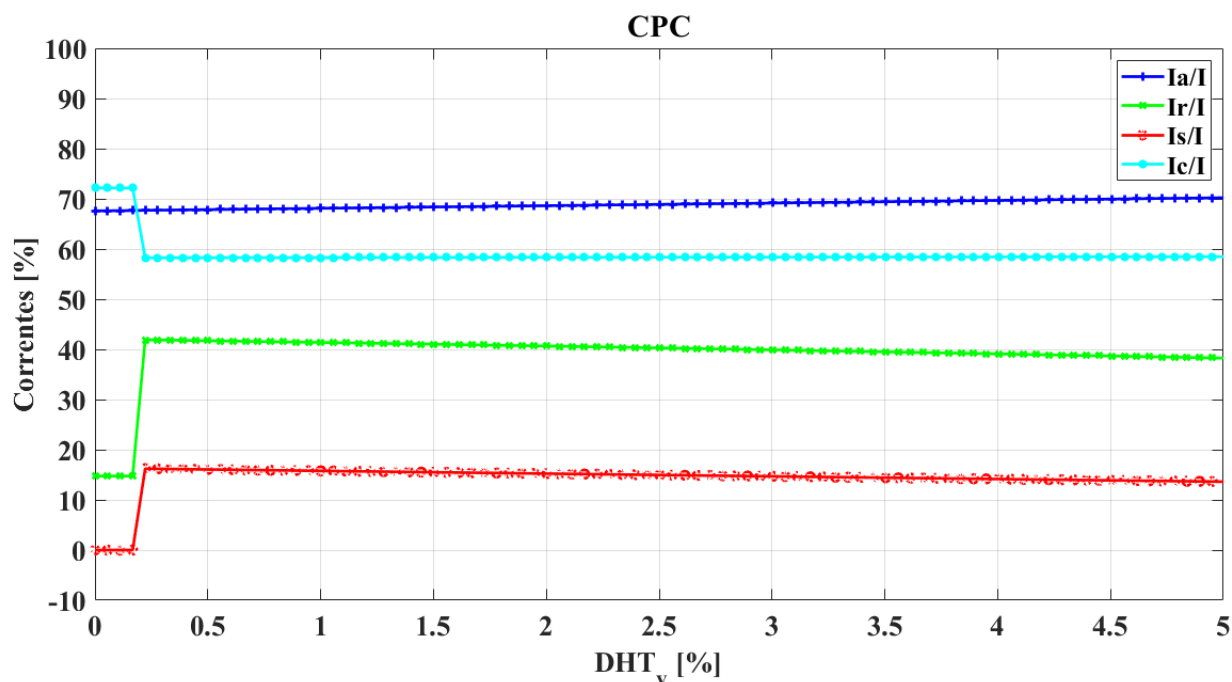


Figura 36 - Variações Percentuais das correntes decompostas da CPC em função do DHT_v = 5% da carga FTH.

Tabela 59 - Variações Percentuais das correntes da CPT para a carga FTH.

DHT_v [%]	I [A]	I_a/I [%]	I_r/I [%]	I_{as}/I [%]	I_{rs}/I [%]	I_g/I [%]
0,00	14,49	67,60	14,75	0,00	0,00	72,20
5,00	13,85	68,87	14,34	50,09	48,96	12,04
8,00	13,48	69,61	13,93	51,52	46,15	13,28
10,00	13,24	70,06	13,59	52,56	44,03	14,32
15,00	12,68	70,92	12,51	55,37	37,98	17,50
20,00	12,26	71,19	11,21	58,01	31,66	20,96
25,00	11,92	70,67	9,55	60,54	25,05	24,93
30,00	11,74	69,14	7,67	62,46	20,62	28,89

Tabela 60 - Variações Percentuais das correntes da CPC para a carga FTH.

DHT_v [%]	I [A]	I_a/I [%]	I_r/I [%]	I_s/I [%]	I_c/I [%]
0,00	14,49	67,60	14,75	0,00	72,19
5,00	13,85	70,25	38,21	13,60	58,47
8,00	13,48	71,86	35,40	12,06	58,61
10,00	13,24	72,92	33,34	11,07	58,71
15,00	12,68	75,38	27,65	8,86	58,93
20,00	12,26	77,21	22,05	7,39	59,13
25,00	11,92	78,37	17,03	6,99	59,30
30,00	11,74	78,45	15,76	7,96	59,43

Analisando os valores obtidos nas Tabelas 59 e 60 e relacionando com as normas de distorção de tensão, IEEE ($DHT_v = 8\%$) e PRODIST ($DHT_v = 10\%$), percebe-se a

necessidade do domínio da frequência para o entendimento do fenômeno de potência (fenômenos físicos) das cargas FTH.

A Tabela 61 resume a análise comparativa entre ambas às teorias. Observa-se que, as correntes ativas resultaram diferentes para todas as condições em que a tensão é distorcida ($I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC}$), isto é, devido a 3ª harmônica ser atribuída ao consumidor (análise do fluxo harmônico), o mesmo acontece para as componentes dispersa e ativa dispersa ($I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC}$) e para as componentes gerada pela carga e consumidor ($I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC}$). No caso das correntes ativas e reativas, apenas para a condição de tensão senoidal resultam iguais.

Tabela 61 - Análise comparativa entre as teorias para a carga FTH.

Senoidal	Não senoidal
$I_{a_CPT} = I_{a_CPC} \neq 0$	$I_{a_CPT} \neq I_{a_CPC} \neq 0$
$I_{r_CPT} = I_{r_CPC} \neq 0$	$I_{r_CPT} \neq I_{r_CPC} \neq 0$
$I_{as_CPT} = I_{s_CPC} = 0$	$I_{as_CPT} \neq I_{s_CPC} \neq 0$
$I_{rs_CPT} = 0$	$\sqrt{I_{r_CPT}^2 + I_{rs_CPT}^2} \neq I_{r_CPC}$
$I_{g_CPT} = I_{c_CPC} \neq 0$	$I_{g_CPT} \neq I_{c_CPC} \neq 0$

Com os resultados e as análises obtidas para as cargas simuladas nas condições senoidal e não senoidal, a seguir serão apresentadas as conclusões gerais do trabalho e os trabalhos que posteriormente podem complementar as discussões obtidas.

Capítulo 5 - Conclusões Finais

Este trabalho apresentou as análises das distorções harmônicas de tensão em cargas monofásicas lineares e não lineares através das teorias de potência CPT e CPC. No capítulo 1 foi abordada a contextualização do tema proposto (distorções harmônicas). No capítulo 2 foi realizada uma breve revisão bibliográfica com as pesquisas correlatas e a discussão de algumas normas, técnicas e teorias de potência que podem ser empregadas no contexto deste trabalho. No capítulo 3 apresentou-se o equacionamento e as definições das componentes de corrente e potência das teorias CPT e CPC. No capítulo 4, através de cálculos teóricos e a implementação dos algoritmos da CPT e CPC no software MATLAB/SIMULINK®, propôs a discussão e análise das grandezas de corrente e potência das teorias para cargas lineares e não lineares sob condição senoidal e não senoidal através de formas de onda e tabelas.

Com os resultados obtidos das simulações e contas teóricas para estas cargas e condições específicas (3^a, 5^a e 7^a harmônicas), pode-se observar que para as cargas lineares com o aumento da distorção harmônica de tensão, têm-se o aumento das correntes dispersas de ambas as teorias, além de resultarem equivalentes. Já para as cargas não lineares simuladas, com o aumento da distorção harmônica de tensão, teve-se uma diminuição nas correntes dispersas, em função da mudança da fase das harmônicas provocadas pelas incremento do DHT_v . Os cálculos teóricos obtidos ajudam a observar o sentido do fluxo harmônico para a carga FTH, nota-se que a 3^a harmônica tem um sentido contrário das demais, ou seja, a potência P_3 e a condutância G_3 são negativas, isso significa que o fluxo harmônico está voltando da carga para a rede, logo, na carga ocorre um processo de transformação de energia em diferentes frequências. Lembrando que fisicamente não existe condutância negativa, apenas auxilia na observação do fluxo harmônico.

Do ponto de vista teórico para o entendimento físico (fenômeno de potência), há a necessidade de decompor a corrente residual da CPT, pois traz as variações das condutâncias e reatividades equivalentes em função da frequência harmônica, auxiliando na interpretação dos fenômenos envolvidos na análise de circuitos elétricos alimentados com tensões não senoidais. Do ponto de vista de compensação de distúrbios de corrente, conforme demonstrado por Brandão et al, Bonaldo, Paredes e Pomilio [10],[11],[22], não há essa necessidade do uso do domínio da frequência, não apenas pela limitação da distorção de tensão pelas normas, mas também pela impossibilidade de compensar as harmônicas impostas pela fonte de tensão. Do ponto de vista de entendimento de outros fenômenos é interessante a decomposição da corrente residual, por

exemplo, para cargas que empregam bancos capacitivos para correção de fator de potência sob condições de tensão distorcida, neste caso, o efeito das harmônicas de tensão que amplifica as harmônicas irá se manifestar na corrente reativa dispersa. Em cargas não lineares, as teorias CPT e CPC permitem identificar as harmônicas geradas pela carga e as correntes harmônicas impostas pela fonte de tensão.

Nota-se também que para atribuir responsabilidade devido às distorções harmônicas, é necessário definir qual a condição ideal do fornecimento de tensão, logo que, a corrente harmônica gerada pela carga e a corrente do consumidor não está associada ao nível de distorção harmônica de tensão, uma vez que há um processo de conversão das frequências impostas pela fonte de tensão, seja na fundamental ou nas harmônicas para outras frequências harmônicas.

Portanto, nas redes de baixa tensão, em que se predomina as 3^a, 5^a e 7^a ordens harmônicas, se o DHT_v é igual ou menor que 5%, no caso da CPT, para a decomposição da corrente residual não há necessidade do uso do domínio da frequência. A componente residual pode ser analisada e interpretada diretamente no domínio do tempo. Não entanto, para circuitos (redes) elétricas que possuam DHT_v maior que 5%, para análise e interpretação do fenômeno de potência é necessário o uso do domínio da frequência.

5.1 Continuidade do Trabalho

Diante dos resultados obtidos por meio das simulações apresentadas nos capítulos anteriores, passa a ser interessante a realização de outros estudos complementares com o intuito de continuar o entendimento dos conceitos relacionados com cada teoria, sendo:

- Expandir a análise do fluxo harmônico realizando contas teóricas mais detalhadas, principalmente para as cargas tipo FTH e FCH;
- Expandir a análise para outros tipos de carga não lineares e alterar a fase das harmônicas impostas pela fonte (diferente de 0°);
- Realizar a análise considerando a impedância de linha assim como usuários (carga) que consome e geram sua própria energia (geração distribuída);
- Realizar parte experimental destas cargas e condições simuladas;
- Discussão da necessidade de analisar e empregar o domínio da frequência na CPT para aplicações como filtragem ativa, multifuncionalidade de inversores, dentre outros, quando a DHT de tensão é superior aos limites estabelecidos pelas normas (maiores a 8%).

5.2 Publicações realizadas pelo autor

1. D. T. Rodrigues, M. B. Arcadepani, H. K. M. Paredes, A. C. Moreira, J. P. Bonaldo. “Aplicação da teoria de potência conservativa para compartilhamento de responsabilidade devido à distorções harmônicas de tensão”, *Congresso Brasileiro de Automática – (CBA)*, 2020.
2. M. V. Rodrigues, H. K. M. Paredes; F. L. Paes, M. B. Arcadepani, F. A. S Gonçalves, F. P Marafão. Aprimoramento da Qualidade da Energia Elétrica em Instalações Monofásicas. In: *International Conference on Industry Applications – (INDUSCON)*, 2021.

Referências Bibliográficas

- [1] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, “Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída,” Nota técnica DEA 07/13, Rio de Janeiro, 2013.
- [2] B. Lasseter, "Microgrids [distributed power generation]," *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37194)*, Columbus, OH, USA, 2001, pp. 146-149 vol.1, doi: 10.1109/PESW.2001.917020.
- [3] R. H. Lasseter, "MicroGrids," *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309)*, New York, NY, USA, 2002, pp. 305-308 vol.1, doi: 10.1109/PESW.2002.985003.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica”, Brasília, 2016.
- [5] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução Normativa N° 482, “Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”, Abril de 2012.
- [6] A. J. D. Rathnayaka, V. M. Potdar, O. Hussain and T. Dillon, "Identifying prosumer's energy sharing behaviours for forming optimal prosumer-communities," *2011 International Conference on Cloud and Service Computing*, Hong Kong, China, 2011, pp. 199-206, doi: 10.1109/CSC.2011.6138520.
- [7] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução Normativa N° 687, “Altera a Resolução Normativa No 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos procedimentos de Distribuição – PRODIST. Novembro de 2015.
- [8] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, P. Rodríguez “Control of power converters in AC microgrids”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 27, No. 11, pp. 4734-4749, Nov. 2012.
- [9] Z. Zeng, H. Yang, S. Tang, R. Zhao, “Objective-Oriented Power Quality Compensation of Multifunctional Grid-Tied Inverters and Its Application in Microgrids”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No.3, pp. 1255-1265, March 2015.
- [10] D. I. Brandao, H. K. Morales-Paredes, A. Costabeber, and F. P. Marafao, “Flexible active compensation based on load conformity factors applied to non-sinusoidal and asymmetrical voltage conditions,” *IET Power Electronics*, vol. PP, No. 00, pp. 1-9, 2015.
- [11] J. P. Bonaldo, H. K. Morales-Paredes, J. A. Pomilio, “Control of single-phase power converters connected to low voltage distorted power systems with variable compensation objectives”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, vol. 31, pp. 2039-2052, 2016.

- [12] J. P. Bonaldo, G. Schiavon, H. K. M. Paredes and J. A. Pomilio, "Multifunctional operation of current controlled VSI based on the harmonic content of PCC voltage," *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Florianopolis, 2017, pp. 1-6.
- [13] J. A. Pomilio and S. M. Deckmann, "Characterization and compensation of harmonics and reactive power of residential and commercial loads," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol.22, no.2, pp.1049-1055, April 2007.
- [14] N. R. Watson, T. L. Scott and S. J. J. Hirsch, "Implications for distribution networks of high penetration of compact fluorescent lamps," *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1521-1528, July 2009.
- [15] C. Muscas, "Power quality monitoring in modern electric distribution systems," *IEEE Instrumentation Measurement Magazine*, vol. 13, no. 5, pp. 19-27, October 2010.
- [16] M. H. J. Bollen et al., "Power quality concerns in implementing smart distribution-grid applications," *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol. 8, no. 1, pp. 391-399, Jan. 2017.
- [17] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), June, 2014.
- [18] *IEEE Draft Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems*, IEEE P519.1/D12, July 2012, pp.1-124, Feb. 26 2015.
- [19] J. A. Pomilio, J. P. Bonaldo, H. K. Morales-Paredes, P. Tenti, "About power factor and THDI in the smart micro-grid scenario", 13th Brazilian Power Electronics Conference (COBEP) and 1st Southern Power Electronics Conference (SPEC), Fortaleza, 2015.
- [20] H. K. Morales-Paredes, P. H. F. Reis, S. M. Deckmann, "Linear and Non-linear Load Characterization Under Non-Sinusoidal Conditions. Brazilian Journal of Power Electronics, vol. 22, pp 50-62, 2017.
- [21] C. P. Vineetha and C. A. Babu, "Smart grid challenges, issues and solutions," *2014 International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, Taipei, Taiwan, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/IGBSG.2014.6835208.
- [22] H. K. Morales-Paredes, "Teoria de potência conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.
- [23] F. P. Marafão, "Análise e controle da energia elétrica através de técnicas de processamento digital de sinais", Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

- [24] L. S. Czarnecki, "Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, vol. 1, no. 37, pp. 30–34, March 1988.
- [25] L. S. Czarnecki, "Currents' Physical Components (CPC) concept: A fundamental of power theory," *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Lagow, 2008, pp. 1-11, doi: 10.1109/ISNCC.2008.4627483.
- [26] H. Ginn and Guangda Chen, "Switching compensator control strategy based on CPC power theory," 2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, 2008, pp. 1-11, doi: 10.1109/ISNCC.2008.4627484.
- [27] J. C. Maxwell, "A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field," *Phil. Trans. of the Royal Society London*, vol. 155, pp. 459-512, 1865.
- [28] O. B. Shallenberger, "The Energy of Alternating Currents," *Electrical World*, vol. 3, pp. 114-115, March 1888.
- [29] A. E. Emanuel, "Harmonic in the Early of Electrical Engineering: A brief review of events, people and documents," in *IEEE - Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP*, Orlando, 2000, pp. 1-7.
- [30] C. P. Steinmetz, *Theory and Calculation of Alternating Current Phenomena*. New York: McGrawHill, 1897.
- [31] C. I. Budeanu. *Reactive and fictitious power*. Instituto Romeno de Energia, 1927.
- [32] L. S. Czarnecki. "What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned," *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, IM-36(3):834–837, 1987.
- [33] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations. A survey of north american electric utility concerns regarding nonsinusoidal waveforms. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 11(1):73–78, January 1996.
- [34] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations. Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: A discussion. *IEEE Transaction on Power Delivery*, 11(1):79–101, January 1996.
- [35] IEEE. Std-1459, *Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*, 2000, (Full-Use August 2002).

- [36] IEEE 1459, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions, 2010, (Revision of IEEE 1459-2000).
- [37] S. Fryze, "Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current". *Przeglad Elektrotechniczny*, 1932.
- [38] F. Buchholz, "Das Begriffssystem Rechteistung, Wirkleistung, totale Blindleistung," *Selbstverlag München*, 1950.
- [39] M. Depenbrock, "The FBD-Method, a generally applicable tool for analyzing power relations," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 381-387, May. 1993.
- [40] M. Depenbrock, "Investigation of the Voltage and Power Conditions at Converter Without Energy Storage", 1962, PhD thesis, Technical University of Hannover, Germany.
- [41] H. K. M. Paredes, F. P. Marafao and L. C. P. da Silva, "A comparative analysis of FBD, PQ and CPT current decompositions — Part I: Three-phase, three-wire systems," *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, Bucharest, 2009, pp. 1-8, doi: 10.1109/PTC.2009.5282173.
- [42] F. P. Marafao, H. K. M. Paredes and L. C. P. da Siva, "Critical evaluation of FBD, PQ and CPT current decompositions for four-wire circuits," *2009 Brazilian Power Electronics Conference*, Bonito-Mato Grosso do Sul, 2009, pp. 49-57, doi: 10.1109/COBEP.2009.5347595.
- [43] H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions On Industry Applications*, 1A-20(3):625–630, May/June 1984.
- [44] H. Akagi, S. Ogasawara, and H. Kim. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems: A comprehensive approach. *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, pages 431–439, 1999.
- [45] H. Akagi, Y. Kanazawa and A. Nabae, "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits," in *IPEC – International Power Electronics Conference*, Tokyo, 1983, pp. 1375-1386.
- [46] H. Akagi and A. Nabae. The p-q theory in three-phase systems under non-sinusoidal conditions. *European Transaction Electrical Power Engineering*, 3(1):27–31, January/February 1993.
- [47] P. Tenti, P. Mattavelli, "A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions," *L'Energia Elettrica*, vol. 81, p. 75.84, 2004.

- [48] P. Tenti, P. Mattavelli, H. K. Morales P., “Conservative power theory, sequence components and accountability in smart grids,” *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 86, no. 6, pp. 30-37, June 2010.
- [49] F. P. Marafao, E. V. Liberado, H. K. M. Paredes and L. C. P. da Silva, “Three-phase four-wire circuits interpretation by means of different power theories,” *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Lagow, 2010, pp. 168-173, doi: 10.1109/ISNCC.2010.5524494.
- [50] F. P. Marafao, E. V. Liberado, H. K. M. Paredes, L. C. P. Silva. Three-phase four-wire circuits interpretation by means of different power theories. *Przegląd Elektrotechniczny*, v. 87, p. 28-33, 2011.
- [51] Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. Material Disciplina de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Capítulo 4: Distorção harmônica: causas, efeitos e soluções. pp.1-37. UNICAMP. Campinas-SP. 2010c. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a4.pdf>. Acesso em: 01/08/2020.
- [52] H. K. M. Paredes, F. P. Marafão, S. M. Deckmann, L. C. P. Silva. “Influência de harmônicas na tarifação de energia elétrica”, *Conferência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica – CBQEE*, Agosto, Santos, 2007.
- [53] P. Tenti, H. K. M. Paredes, F.P. Marafao, P. Matavelli. “Accountability in smart microgrids based on conservative power theory”, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol.60, no.9, pp.3058-3069, 2011a.
- [54] P. Tenti, A. Costabeber, P. Mattavelli, F. P. Marafão and H. K. M. Paredes, "Load Characterization and Revenue Metering Under Non-Sinusoidal and Asymmetrical Operation," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 2, pp. 422-431, Feb. 2014, doi: 10.1109/TIM.2013.2280480.
- [55] P. H. F. Reis. “Contribuições para o estudo de atribuição de responsabilidades em circuitos elétricos de baixa tensão” Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista (unesp), Bauru, 2015.
- [56] D. T. Rodrigues, M. B. Arcadepani, H. K. M. Paredes, A. C. Moreira, J. P. Bonaldo. “Aplicação da teoria de potência conservativa para compartilhamento de responsabilidade devido à distorções harmônicas de tensão”, *Congresso Brasileiro de Automática – (CBA)*, 2020.
- [57] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia”, Revisão 12, 2021.

- [58] *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*, IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003), February, 2018.
- [59] International Electrotechnical Commission – IEC. *Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 2, Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A per phase)*, Edition 3.0, IEC: 2005.
- [60] L. S. Czarnecki, “Current’s Physical Components (CPC) – based power theory. a review, part i: power properties of electrical circuits and systems. *Przegląd Elektrotechniczny*, 1 (10), 1-11. doi: 10.15199/48.2019.10.01.
- [61] L. S. Czarnecki. “Dynamic, power quality oriented approach to power theory and compensation of asymmetrical systems under nonsinusoidal conditions”. *Second International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-sinusoidal Conditions*, pages 63–81, 1993. Stresa-Italy.
- [62] L. S. Czarnecki. “Power theory of electrical circuits with quasi-periodical waveforms of voltages and currents”, *Third International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-sinusoidal Conditions*, pages 13–19, 1995. Milano-Italy.
- [63] L. S. Czarnecki, “Critical comments on the Conservative Power Theory (CPT)”, *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation – (ISNCC)*, Łagów, Poland, 2015.
- [64] L.S. Czarnecki, Comparison of the Conservative Power Theory (CPT) with Budeanu’s power theory, *Annales of the University of Craiova*, 2016.
- [65] L. S. Czarnecki, “Critical comments on the Conservative Power Theory (CPT)”, *Przegląd Elektrotechniczny*, R3, No. 1, pp. 268-274, 2017.

Apêndice A – Influência da escolha do janelamento da FFT

A Tabela 62 mostra os dados da carga FTH para o caso senoidal com e sem a presença dos transitórios. Nota-se um erro maior com a presença dos transitórios nos cálculos, principalmente para as potências P , P_d , Q e D_C e o fator de potência λ . Além disso, nas Figuras 37 e 38, observa-se este erro nas formas de onda da corrente total e do sinal reconstruído, principalmente para a CPC que é uma teoria desenvolvida interinamente no domínio da frequência. As formas de onda da CPT não são apresentadas, pois não é visível igual ao da CPC.

Tabela 62 – Comparação dos dados da Carga FTH para o caso senoidal.

Senoidal com $DHT_v = 0,00\%$ e $DHT_I = 104,40\%$

CPT				CPC			
Parâmetros	Com Transitório	Sem Transitório	Teórico	Parâmetros	Com Transitório	Sem Transitório	Teórico
A (VA)	1841,00	1841,00	1841,00	A (VA)	1841,00	1841,00	1841,00
P (W)	1276,00	1245,00	1245,00	P_d (W)	1276,00	1244,00	1245,00
				P_c (W)	0,00	0,00	0,00
Q (var)	238,50	271,40	271,40	Q (var)	238,50	271,40	271,40
D_{as} (VA)	0,00	0,00	0,00	D_s (VA)	0,00	0,00	0,00
D_{rs} (var)	0,00	0,00	0,00				
D_g (VA)	1330,00	1329,00	1329,00	D_C (VA)	1289,00	1329,00	1329,00
I (A)	14,49	14,49	14,49	I (A)	14,49	14,49	14,49
I_a (A)	10,04	9,80	9,80	I_a (A)	10,04	9,80	9,80
I_r (A)	1,88	2,14	2,14	I_r (A)	1,88	2,14	2,14
I_{as} (A)	0,00	0,00	0,00	I_s (A)	0,00	0,00	0,00
I_{rs} (A)	0,00	0,00	0,00				
I_g (A)	10,47	10,46	10,46	I_c (A)	10,15	10,46	10,46
λ	0,693	0,676	0,676	λ	0,693	0,676	0,676

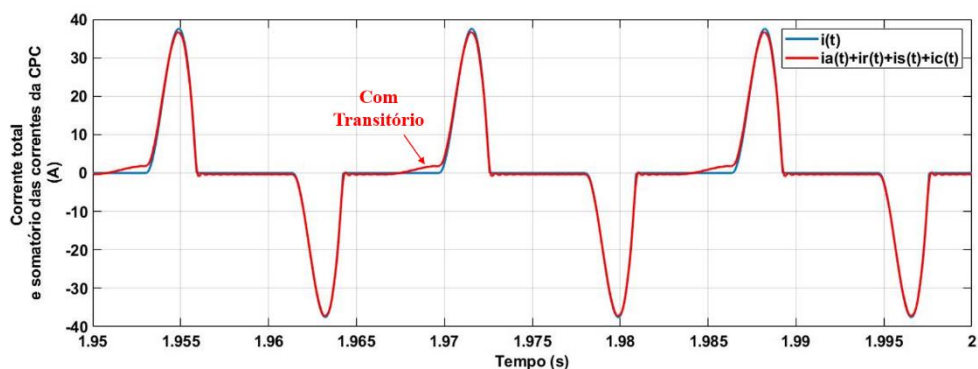


Figura 37 - Corrente total e sinal reconstruído com transitórios para a CPC.

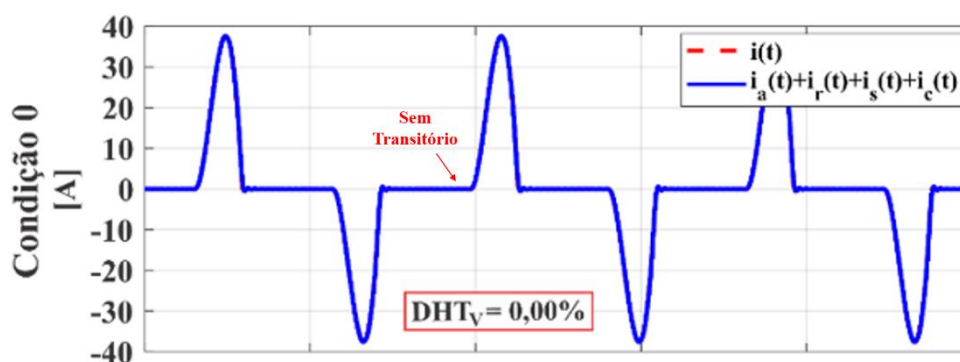


Figura 38 - Corrente total e sinal reconstruído sem transitórios para a CPC.

Com as análises obtidas anteriormente, é possível observar a importância da escolha de uma janela adequada para a FFT, pois verifica-se que ocorre imprecisões (erros) que influenciam nos cálculos das correntes/potências decompostas, podendo levar a interpretações não adequadas dos circuitos analisados. Escolheu-se a carga FTH para esta análise, pois foi a carga que apresentou maior influência dos transitórios nos estudos.