



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE BAURU
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU

**CONTRIBUIÇÕES PARA O ESTUDO DE ATRIBUIÇÃO DE
RESPONSABILIDADES EM CIRCUITOS ELÉTRICOS DE BAIXA
TENSÃO**

Bauru – SP

2015

PAULO HENRIQUE FERREIRA DOS REIS

**CONTRIBUIÇÕES PARA O ESTUDO DE ATRIBUIÇÃO DE
RESPONSABILIDADES EM CIRCUITOS ELÉTRICOS DE BAIXA
TENSÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Automação

Linha de Pesquisa: Sistemas de energia

Orientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes

BAURU – SP

2015

Reis, Paulo Henrique Ferreira dos
Contribuições para o estudo de atribuição de
responsabilidades em circuitos elétricos de baixa
tensão / Paulo Henrique Ferreira dos Reis, 2015
142 f.

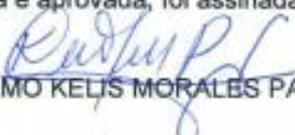
Orientador: Helmo Kelis Morales Paredes

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2015.

1. Metodologia de atribuição de responsabilidades.
2. Análise de Circuitos elétricos. 3. Teoria de
potência conservativa. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE PAULO HENRIQUE FERREIRA DOS REIS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

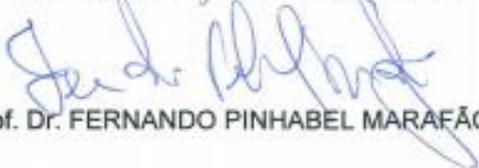
Aos 05 dias do mês de novembro do ano de 2015, às 09:30 horas, no(a) Câmpus de Sorocaba/UNESP, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES do(a) Engenharia de Controle e Automação/ Unidade de Sorocaba, Prof. Dr. SIGMAR MAURER DECKMANN do(a) Departamento de Engenharia Elétrica e Computação / Universidade Estadual de Campinas, Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO do(a) Engenharia de Controle e Automação/ Unidade de Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de PAULO HENRIQUE FERREIRA DOS REIS, intitulado "ESTUDO DE ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES EM AMBIENTES DE MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: Aprovado. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. HELMO KELIS MORALES PAREDES



Prof. Dr. SIGMAR MAURER DECKMANN



Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:
PAULO HENRIQUE FERREIRA DOS REIS

DE: "ESTUDO DE ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADES EM AMBIENTES DE
MICRORREDES DE BAIXA TENSÃO"

PARA:

Contribuições para o estudo de atribuição de
responsabilidades em circuitos elétricos de
baixa tensão

Bauru, 05 de novembro de 2015.



Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes
Orientador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida;

Em segundo lugar agradeço a toda minha família. Em especial a minha mãe Solange, meu pai João Batista e aos meus queridos irmãos João Victor e Luiz Gustavo. Vocês todos são meus exemplos;

Ao suporte contínuo, disposição e atenção do meu orientador Professor Helmo Kelis Morales Paredes;

A Grazielle pelo apoio constante e compreensão;

Aos professores Paulo José Amaral Serni e Flávio Alessandro Serrão Gonçalves que muito contribuíram no exame de qualificação, bem como aos professores Fernando Pinhabel Marafão e Sigmar Maurer Deckmann aceitarem ser banca desse trabalho. Obrigado pelo profissionalismo e conhecimento que só abrilhantaram a defesa;

Aos amigos do Laboratório GASI: Geninho e Wesley, que nunca negaram esforços para dar suporte, ensinar, trocar “boas e longas” ideias. Aos amigos Alexandre, Felipe e Jefferson que também sempre me apoiaram;

Aos irmãos de Bauru: Minutti, Fernando, Borto e Matheus que sempre estiveram comigo nesses anos de Sorocaba. Parceria de Bauru fortalecida em Sorocaba!

Ao Grupo Schaeffler e a todos meus companheiros de trabalho pelo incentivo. Em especial aos grandes amigos: Leonardo Bartalini Baruffaldi pela amizade, compreensão e ensinamentos compartilhados (grande mestre), ao Clodoaldo Borges Chagas por ser um parceiro de todas as horas (obrigado pelo empurrão) e ao Thiago Caetano de Freitas pelas boas conversas sobre o futuro;

A UNESP Campus de Sorocaba por continuar sendo minha casa mesmo após a graduação;

Ao Programa de Pós Graduação da UNESP de Bauru;

Enfim, agradeço a todos que diretamente ou indiretamente participaram dessa etapa da minha vida.

“Getting better all the time”

Lennon & McCartney

RESUMO

O presente trabalho aborda o assunto da atribuição de responsabilidades em circuitos elétricos monofásicos com características de baixa tensão (baixo nível de curto circuito). Nesse cenário, o avanço das cargas eletrônicas e das fontes chaveadas propiciou um ambiente na qual tensão e corrente carregam alto conteúdo harmônico desfavorecendo, de certa forma, a Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Nesse contexto, o objetivo do trabalho é estudar o comportamento de cargas lineares e não lineares e traçar conclusões a respeito de atribuição de responsabilidades. Para tanto, utilizou-se a Teoria de Potência Conservativa (CPT) (do inglês, *Conservative Power Theory*) que é um modelo matemático para análise de circuitos elétricos sob condições senoidais e não senoidais. Além disso, a CPT permite expandir a análise do problema proposto através de uma Metodologia de Atribuição de Responsabilidades que leva em consideração um circuito equivalente com as informações da impedância de linha (equivalente Thévenin da rede visto pelo PAC) e dos parâmetros equivalentes da carga, mostrando um diferencial frente às metodologias estudadas. Para tanto, um circuito elétrico composto por diferentes cargas lineares e não lineares foi proposto e se pode estudar e discutir o compartilhamento de responsabilidades, buscando respostas acerca de quais parcelas de potência devam ser apontadas às cargas geradoras dos distúrbios harmônicos. A caracterização de cargas e estimação de impedância de linha apresentaram resultados bastante satisfatórios. Assim, a metodologia de atribuição de responsabilidades sugere que a potência ativa fundamental deveria ser de responsabilidade das cargas, uma vez que ela representa de fato o fluxo de potência da fonte de alimentação para a carga. Além disso, o trabalho mostrou a fragilidade do PRODIST frente à norma IEEE em relação aos níveis de distorção harmônica de tensão no PAC, por exemplo.

Palavras-chave: Atribuição de responsabilidades; Teoria de Potência Conservativa; Estimação de impedância de linha; Caracterização de cargas; Circuitos elétricos monofásicos.

ABSTRACT

This work aims to the study of the accountability problem focused on single-phase circuits with low voltage characteristics (low level of short circuit). In this scenario, the advancement of electronic loads and switching devices have promoted an environment in which voltages and currents present high harmonic content, reducing the electrical power quality. In this context, the objective of this work is to study the behavior of linear and nonlinear loads and draw conclusions on accountability in electrical grids, i.e., responsibility in the harmonic content generation. For this purpose, it was applied the Conservative Power Theory (CPT) which is a mathematical tool for electrical circuits analysis on both sinusoidal and nonsinusoidal conditions. Furthermore, the CPT allows the application of a Accountability Methodology that takes into account information of the line impedance (equivalent Thévenin viewed by point of common coupling) and the equivalent parameters of the load. These two considerations represent a differential in relation to the studied methodologies. So, an electrical circuit containing linear and non-linear loads was proposed, and the Accountability Methodology was studied and discussed, seeking answers about the power portions that should be accountable to the harmonic loads. The load characterization and line impedance estimation presented satisfactory results. Then, the Accountability Methodology proposes that the fundamental active power should be accountable to the loads, since it represents the power portion that really flows from the power source to the load. In addition, the work showed the fragility of PRODIST in relation to the IEEE standard concerning the harmonic voltage distortion established limits at the point of common coupling.

Keywords: Accountability; Conservative Power Theory; Line impedance estimation; Load characterization; Single-phase electrical circuits.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Circuito equivalente pelas variáveis da CPT ($W_r > 0$).....	51
Figura 2 - Circuito equivalente pelas variáveis da CPT ($W_r < 0$).....	52
Figura 3 – Caracterização de carga pelas variáveis fundamentais ($W_{r_f} > 0$).....	54
Figura 4 - Caracterização de carga pelas variáveis fundamentais ($W_{r_f} < 0$).....	55
Figura 5 – Modelo da impedância da rede no PAC.....	56
Figura 6 – Circuito relacionando a parcela fundamental de corrente.....	58
Figura 7 – Circuito relacionando as parcelas harmônicas de tensão e corrente.....	58
Figura 8 – Circuito relacionando a parcela fundamental de tensão.....	59
Figura 9 – Circuito considerando todas as variáveis calculadas.....	59
Figura 10 - Circuito do exemplo 1.....	62
Figura 11 - a) tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – sem capacitor.....	63
Figura 12 - a) tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – com capacitor.....	65
Figura 13 - a) Condutância equivalente; b) reatidade equivalente, c) fonte de corrente harmônica e d) circuitos equivalentes de carga com e sem capacitor.....	66
Figura 14 - Circuito do exemplo 2.....	66
Figura 15 - a) tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa.....	67
Figura 16 – Caracterização da carga: a) condutância fundamental; b) reatidade fundamental e c) fonte de corrente harmônica.....	68
Figura 17 - Circuito do exemplo 3.....	68
Figura 18 - a) Tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – sem impedância de linha.....	69
Figura 19 - a) Resistência fundamental, b) capacitância fundamental e c) fonte de tensão harmônica – sem impedância de linha.....	70
Figura 20 - a) Tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – com impedância de linha.....	70
Figura 21 - a) Resistência fundamental, b) capacitância fundamental e c) fonte de tensão harmônica – com impedância de linha.....	71

Figura 22 – Estimação da impedância de linha: a) resistência e indutância e b) tensão fundamental na fonte.....	72
Figura 23 - Circuito do exemplo 4.	72
Figura 24 - a) Tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – sem impedância de linha.	73
Figura 25 - a) Resistência fundamental, b) capacitância fundamental e c) fonte de tensão harmônica – sem impedância de linha.	73
Figura 26 - a) Tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – com impedância de linha.	74
Figura 27 - a) Resistência fundamental, b) capacitância fundamental e c) fonte de tensão harmônica – com impedância de linha.	74
Figura 28 - Estimação da impedância de linha: a) resistência e indutância e b) tensão fundamental.	75
Figura 29 - Circuito equivalente do transformador utilizado no modelo.....	77
Figura 30 – Circuito elétrico da rede modelada.....	80
Figura 31 – Formas de onda da carga R: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.....	83
Figura 32 - Formas de onda da carga RL: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.....	85
Figura 33 - Formas de onda da carga RL//C: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.....	87
Figura 34 – Formas de onda da carga FTH: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.....	90
Figura 35 – Formas de onda da carga FCH: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.....	92
Figura 36 – Representação dos parâmetros equivalentes estimados de cada carga.	94
Figura 37– Representação dos fatores de conformidade da CPT para cada carga.	95
Figura 38 – Distorções harmônicas totais de tensão e corrente no PAC para cada carga.	95
Figura 39 – Formas de onda da carga equivalente R+RL (medição no PAC): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.	97

Figura 40 – Formas de onda da carga equivalente R+RL//C (medição no PAC): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.	99
Figura 41– Formas de onda da carga equivalente R+RL//C+FTH (medição no PAC): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.....	101
Figura 42 – Formas de onda da carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH (medição no PAC): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.....	103
Figura 43 – Evolução dos parâmetros equivalentes das cargas através da CPT (PAC).	106
Figura 44 – Evolução da caracterização das cargas equivalentes pela fundamental (PAC).	107
Figura 45 – Evolução dos fatores de conformidade das cargas equivalentes (PAC).	107
Figura 46 – Evolução dos DHTs de tensão e corrente considerando as cargas equivalentes (PAC).	108
Figura 47 - Formas de onda da carga equivalente a) R+RL, b) R+RL//C, c) R+RL//C+FTH, d) R+RL//C+FTH+FCH (medição na carga R): superior (tensão e corrente), inferior (componentes de corrente decompostas através da CPT). .	109
Figura 48 – Evolução da caracterização das cargas equivalentes (Carga R).	111
Figura 49 – Formas de onda da carga equivalente a) R+RL, b) R+RL//C, c) R+RL//C+FTH, d) R+RL//C+FTH+FCH (medição na carga RL//C): superior (tensão e corrente), inferior (componentes de corrente decompostas através da CPT).....	112
Figura 50 – Conteúdo harmônico da tensão no PAC e corrente da carga (RL//C) para carga equivalente R+RL//C+FTH.....	113
Figura 51 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC e corrente da carga (RL//C) para carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH.....	114
Figura 52 – Evolução da caracterização das cargas equivalentes (Carga RL//C)...	116
Figura 53 – Evolução do DHT de corrente considerando as cargas equivalentes (Carga RL//C).....	117

Figura 54 – Evolução dos fatores de conformidade das cargas equivalentes (Carga RL//C).....	117
Figura 55 - Efeito do capacitor na corrente da carga RL//C	118
Figura 56 – Formas de onda da carga equivalente a) R+RL//C+FTH, b) R+RL//C+FTH+FCH (medição na carga FTH): superior (tensão e corrente), inferior (componentes de corrente decompostas através da CPT).	118
Figura 57 – Evolução dos fatores de conformidade das cargas equivalentes (Carga FTH).....	119
Figura 58 - Evolução do DHT de corrente considerando as cargas equivalentes (Carga FTH).	120
Figura 59 – Evolução da caracterização das cargas equivalentes (Carga FTH).....	120
Figura 60 - Formas de onda da carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH (medição na carga FCH): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.	121
Figura 61 - Caracterização da carga equivalente (FCH).	122
Figura 62 – Resultado da estimação de impedância de linha durante simulação. ...	124
Figura 63 – Circuito utilizado para fins de atribuição de responsabilidades vista pelo PAC.....	125
Figura 64 - Circuito utilizado para fins de atribuição de responsabilidades para cada carga.	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Estimação de impedância de linha (exemplo 3).....	71
Tabela 2-Estimação de impedância de linha (exemplo 4).....	75
Tabela 3-Paramentos equivalentes do transformador.....	78
Tabela 4-Valor teórico da carga R (carga 1).....	78
Tabela 5-Valores teóricos para carga RL//C (carga 2).	79
Tabela 6-Valores teóricos para carga FTH (carga 3).	79
Tabela 7-Valores teóricos para carga FCH (carga 4).	80
Tabela 8 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga R.	84
Tabela 9 – Parâmetros equivalentes estimados para a carga R.....	84
Tabela 10 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga RL.	86
Tabela 11 - Parâmetros equivalentes estimados para a carga RL.....	86
Tabela 12 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga RL//C.....	88
Tabela 13 – Parâmetros equivalentes estimados para a carga RL//C.	89
Tabela 14 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga FTH.	91
Tabela 15 - Parâmetros equivalentes estimados para a carga FTH.	92
Tabela 16 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga FCH.....	93
Tabela 17 - Parâmetros equivalentes estimados para a carga FCH.	93
Tabela 18 – Resumo da dinâmica do chaveamento das cargas	97
Tabela 19 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL (medição no PAC).	98

Tabela 20 – Parâmetros equivalentes e caracterização da carga estimada: carga equivalente R+RL (medição no PAC).	98
Tabela 21 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL//C (medição no PAC).....	100
Tabela 22 – Parâmetros equivalentes e caracterização da carga estimados: carga equivalente R+RL//C (medição no PAC).....	101
Tabela 23 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL//C+FTH (medição no PAC).....	102
Tabela 24 – Parâmetros equivalentes e caracterização da carga estimados: carga equivalente R+RL//C+FTH (medição no PAC).....	103
Tabela 25 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH (medição no PAC).	104
Tabela 26 – Parâmetros equivalentes e caracterização da carga estimada: carga equivalente R+RL//C+FTH (medição no PAC).....	105
Tabela 27 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente a) R+RL, b) R+RL//C, c) R+RL//C+FTH, d) R+RL//C+FTH+FCH (medição carga R).	110
Tabela 28 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente a) R+RL, b) R+RL//C, c) R+RL//C+FTH, d) R+RL//C+FTH+FCH (medição carga RL//C).....	115
Tabela 29 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente a) R+RL//C+FTH, b) R+RL//C+FTH+FCH (medição carga FTH).	119
Tabela 30 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH (medição carga FCH).	121

Tabela 31 – Valores de impedância de linha estimados.	123
Tabela 32 - Potências e fatores de conformidade apontados ao PAC	127
Tabela 33 - Potências e fatores de conformidade atribuídos à carga R.....	128
Tabela 34 – Potências e fatores de conformidade apontados à carga RL//C	128
Tabela 35 - Potências e fatores de conformidade apontados à carga FTH	130
Tabela 36 - Potências e fatores de conformidade apontados à carga FCH	131

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CPT	Teoria de Potência Conservativa
FCH	Carga do tipo fonte de corrente harmônica
FTH	Carga do tipo fonte de tensão harmônica
IEC	Comissão Internacional Eletrotécnica
IEEE	Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LCK	Lei de Correntes de Kirchhoff
LTK	Lei de Tensões de Kirchhoff
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PAC	Ponto de Acoplamento Comum

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Potência aparente da CPT
A_{ℓ}	Potência aparente apontada à carga
B_e	Reatividade equivalente
B_f	Reatividade fundamental
C_e	Capacitância equivalente
C_f	Capacitância pela fundamental
D	Potência residual
DHI_I	Distorção harmônica individual de corrente
DHI_V	Distorção harmônica individual de tensão
DHT_I	Distorção harmônica total de corrente
DHT_V	Distorção harmônica total de tensão
D_B	Potência de distorção de Budeanu
D_I	Potência de distorção de corrente
D_H	Potência de distorção harmônica
D_{ℓ}	Potência residual apontada à carga
D_V	Potência de distorção de tensão
e_H	Fonte de tensão harmônica
e_f	Fonte de tensão fundamental
e_m	Fonte de tensão harmônica (caracterização de carga)
e_n	Fonte de tensão harmônica (circuito equivalente da CPT)
f	Frequência de oscilação da rede
FP	Fator de potência da IEEE STD 1459-2010
FP_f	Fator de potência fundamental ou fator de deslocamento
G_e	Condutância equivalente

G_f	Condutância fundamental
h	Ordem harmônica
i	Corrente instantânea
\hat{i}	Integral imparcial da corrente
\check{i}	Derivada temporal da corrente
i_f	Corrente fundamental
i_a	Corrente ativa
i_H	Corrente harmônica
i_ℓ	Corrente apontada à carga
i_r	Corrente reativa
i_v	Corrente residual
j	Fonte de corrente harmônica
L_e	Indutância equivalente
L_S	Indutância da linha
N	Potência não ativa
p	Potência instantânea
P	Potência ativa
P_f	Potência ativa fundamental
P_H	Potência ativa harmônica
P_ℓ	Potência ativa apontada à carga
Q	Potência reativa
Q_f	Potência reativa fundamental
Q_B	Potência reativa de Budeanu
Q_F	Potência reativa de Fryze
Q_ℓ	Potência reativa apontada à carga

R_e	Resistência equivalente
R_f	Resistência pela fundamental
R_S	Resistência da linha
S	Potência aparente da IEEE STD 1459-2010
S_f	Potência aparente fundamental
S_H	Potência aparente harmônica
T	Período de oscilação
v	Tensão instantânea
\hat{v}	Integral imparcial de tensão
\check{v}	Derivada temporal da tensão
v_f	Tensão fundamental
v_H	Tensão harmônica
v_ℓ	Tensão apontada à carga
w_r	Energia reativa
w_{rf}	Energia reativa fundamental
Z_L	Impedância de linha
λ	Fator de potência da CPT
λ_Q	Fator de Reatividade
λ_D	Fator de Não Linearidade
α	Ângulo de fase da tensão
φ	Ângulo de fase da corrente
\emptyset	Função objetivo da minimização
θ	Ângulo de fase da tensão em relação a corrente
ω	Frequência angular

SUMÁRIO

1. Introdução.....	23
1.1. Contextualização do Tema	23
1.2. Estrutura da dissertação	29
2. Revisão Bibliográfica.....	31
2.1. Componentes harmônicas no sistema elétrico	31
2.2. Normas Regulatórias	32
2.2.1. Norma IEC 6001-3-2	32
2.2.2. PRODIST	32
2.2.3. Norma IEEE 519-2014	33
2.3. Metodologias sobre atribuição de responsabilidades.....	33
2.3.1. Fluxo de Potência Harmônica.....	33
2.3.2. Corrente Conforme e não Conforme	35
2.3.3. Método da Superposição.....	35
2.3.4. Método da Superposição Modificado	36
2.3.5. Análise de Espectro de Frequências.....	36
2.3.6. Método do Chaveamento de Capacitores	36
2.4. Caracterização de cargas	37
2.5. Estimação de impedância de linha.....	40
2.6. Teorias de Potência	41
2.6.1. Teoria de Potência de Budeanu	41
2.6.2. Teoria de Potência de Fryze	42
2.6.3. Normativa IEEE 1459-2010.....	43
2.7. Conclusões preliminares.....	44
3. Metodologia para atribuição de responsabilidades em circuitos elétricos monofásicos	45
3.1. Teoria de potência conservativa (CPT) – conceitos básicos e definições...45	
3.1.1. Definições matemáticas	46
3.1.2. Termos conservativos da CPT	47
3.1.3. Definição dos termos de corrente e potência	48
3.1.4. Modelagem equivalente de cargas genéricas pela CPT	51

3.1.5. Fatores de desempenho ou conformidade de carga	52
3.2. Caracterização de Carga	53
3.3. Estimação de impedância de linha.....	56
3.4. Metodologia de Atribuição de Responsabilidades	57
3.5. Conclusões Preliminares	60
4. Aplicação dos conceitos da CPT	62
4.1. Exemplo 1	62
4.2. Exemplo 2	66
4.3. Exemplo 3	68
4.4. Exemplo 4	72
4.5. Conclusões preliminares	76
5. Avaliação da metodologia de atribuição de responsabilidades	77
5.1. Modelo base proposto.....	77
5.2. Resultados e análise dos dados	83
5.2.1. Cargas separadas	83
5.2.1.1. Carga R.....	83
5.2.1.2. Carga RL série	85
5.2.1.3. Carga RL série com capacitor em paralelo (RL//C).....	87
5.2.1.4. Carga tipo fonte de tensão (FTH).....	90
5.2.1.5. Carga tipo fonte de corrente (FCH)	92
5.2.1.6. Comentários Gerais	94
5.2.2. Cargas conectadas juntas	96
5.2.3. Medição no ponto de acoplamento comum (PAC)	97
5.2.3.1. Carga R+RL	97
5.2.3.2. Carga R+RL//C.....	99
5.2.3.3. Carga R+RL//C+FTH.....	101
5.2.3.4. Carga R+RL//C+FTH+FCH	103
5.2.3.5. Comentários gerais	105
5.2.4. Medição nos terminais de cada carga	108
5.2.4.1. Medição e análise para carga R.....	109
5.2.4.2. Medição e análise para a carga RL//C	112
5.2.4.3. Medição e análise para a carga tipo fonte de tensão (FTH).....	118

5.2.4.4. Medição e análise para a carga tipo fonte de corrente (FCH).....	121
5.3. Estimação da Impedância de Linha	122
5.4. Metodologia de atribuição de responsabilidades	124
5.5. Conclusões preliminares.....	131
6. Conclusões gerais	133
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

1. Introdução

1.1. Contextualização do Tema

A energia elétrica é sem dúvida uma das maiores promotoras do processo de industrialização da sociedade, já que a facilidade de seu transporte e baixo índice de perdas na transmissão e conversões, comparado com outras formas de energia, incentivou a vasta utilização da eletricidade no mundo todo até os dias atuais (TOUPS, 2011).

Historicamente, o primeiro passo dado para a revolução da eletricidade foi realizado por Michael Faraday, em 1831. Faraday descobriu o fenômeno da indução eletromagnética, permitindo, assim, a construção de máquinas para a produção de eletricidade. Anos depois, Thomas Edison, por sua vez, proporcionou a comercialização da energia elétrica na forma de corrente contínua (CC). Logo após, Nikola Tesla verificou que o uso da eletricidade na forma de corrente alternada (CA) traria maior eficiência na transferência de energia de um ponto a outro de uma rede, contribuindo, assim, para menores perdas no sistema. Com isso, após muitos anos de debates, os Estados Unidos decidiram usar a forma de corrente alternada como padrão para desenvolver o seu sistema de potência (TOUPS, 2011). Não obstante, o Brasil hoje também se utiliza majoritariamente de energia na forma de corrente alternada em seu sistema de potência, ainda que exista uma pequena parcela representando um elo de transmissão na forma de corrente contínua entre a usina hidrelétrica binacional de Itaipú em Foz do Iguaçu-PR e Ibiúna-SP ativo desde 1984. Entretanto, em Ibiúna há a conversão para forma de corrente alternada em 60Hz, que é o padrão da frequência fundamental de oscilação da rede elétrica brasileira (BRASIL, 2015).

A maioria das unidades residenciais, comerciais ou industriais está conectada ao sistema elétrico de potência. A rede provê eletricidade a seus consumidores, interligando-os a um sistema que compreende geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Assim, de acordo com sua classificação (alta, média ou baixa tensão), os usuários são conectados ao sistema elétrico e, então, cobrados pelo uso da energia. Estes, por sua vez, são taxados de maneira diferenciada dependendo de sua classificação em relação ao nível de tensão: grupo A ($>2300V$) e grupo B ($\leq 2300V$). Consumidores do grupo B têm tarifação monômnia, ou seja, são cobrados exclusivamente pelo consumo de energia elétrica ativa (kWh). Já os consumidores do grupo A têm tarifação binômnia, sendo cobrados pelo consumo ativo (kWh), bem como pela demanda faturável (kW) (PROCEL, 2011).

Classicamente, as tensões e correntes do sistema elétrico se comportavam de forma senoidal na frequência fundamental, podendo ser facilmente aplicadas as técnicas de análise de circuitos amplamente divulgadas e aceitas pela comunidade científica (PAREDES, 2011), (YUMAN, 2011). Contudo, com o advento da tecnologia de semicondutores, novos utensílios eletrônicos foram inventados e hoje fazem parte de nosso dia-a-dia, como notebooks, tablets, celulares, televisores digitais, aparelhos micro-ondas, aparelhos de som transistorizados, dentre outros. Essas cargas, em sua grande maioria, possuem um estágio de retificação de entrada que drenam da rede correntes com formas de onda não senoidais, representando a presença de conteúdo harmônico¹. Essa é uma realidade cada vez mais abrangente em ambientes de baixa tensão e, portanto, pode promover problemas relacionados com qualidade de energia elétrica (QEE) (MANTOVANI, 2011).

A questão da QEE, um assunto de extrema importância em sistemas elétricos de potência não apenas no Brasil, mas em todo cenário energético mundial (DECKMANN, 2010a), é usado de modo amplo para expressar as mais variadas

¹Jean-Baptiste Joseph **Fourier** (1778-1830) mostrou que uma função temporal $f(t)$ periódica, pode ser decomposta em um somatório infinito de funções trigonométricas seno e cosseno. Mesmo uma forma de onda periódica com característica não senoidal pode ser escrita por funções senoidais (e cossenoidais) de frequências distintas. Dentre essas, as frequências múltiplas inteiras da fundamental são chamadas de harmônicas.

características na qual a energia elétrica é entregue a seus consumidores, como por exemplo, fatores relacionados à continuidade e conformidade de suprimento (tensão elétrica). Certos parâmetros são considerados desejáveis para uma operação segura da rede, sendo que um destes parâmetros é justamente o de distorção harmônica (DECKMANN, 2010a). As distorções, todavia, estão bastante relacionadas com a disseminação das cargas ditas não lineares no sistema elétrico. Cargas não lineares são entendidas como aquelas que representam a forma de onda de corrente diferente da tensão de alimentação que alimenta seus terminais (POMILIO, 2006) e (MANTOVANI, 2011). Hoje elas fazem parte do sistema justamente pela maior utilização de fontes chaveadas e componentes eletrônicos das cargas, muitas vezes pelo fato de serem mais eficientes; podemos citar nesse contexto as lâmpadas fluorescentes (POMILIO, 2006). Conseqüentemente, a presença de harmônicos no sistema elétrico pode ocasionar alguns problemas de QEE da rede elétrica, dentre elas aponta-se as ressonâncias, geração de perdas adicionais, ruídos, aquecimentos excessivos dos componentes, interferências eletromagnéticas, dentre outros (DECKMANN, 2010b).

É inegável a ocorrência de correntes não lineares nos ambientes de baixa tensão. Somado ao fato da grande disseminação de equipamentos eletrônicos que provêm altos níveis de distorção harmônica de corrente tem-se a característica de baixo nível de curto-circuito da baixa tensão, que corrobora com a deterioração das formas de onda vistas pelo ponto de acoplamento comum (PAC), trazendo a tona distúrbios de QEE.

Nesse contexto, diversos organismos relacionados ao controle da QEE trabalharam e produziram normas e referências visando regulamentar níveis permissíveis e valores de referência a esses distúrbios harmônicos. Alguns exemplos são as normas IEEE 519 (do inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) (IEEE, 2014), IEC 6001-3-2 (do inglês, *International Electrotechnical Commission*) (IEC, 2005), bem como a regulamentação do PRODIST (*Procedimentos de Distribuição*) em seu módulo no. 8 de qualidade de energia elétrica (ANEEL, 2012) que é a vigente no Brasil.

Apesar das regulamentações, consiste em uma tarefa bastante árdua apontar quais são as cargas geradoras dos distúrbios harmônicos através apenas de avaliações ou medições realizadas no ponto de acoplamento comum (PAC)². Fato é que quando há a circulação de correntes com conteúdo harmônico em uma rede, a impedância de linha (componente intrínseco do sistema) promove uma queda de tensão em seus terminais tornando essa diferença de potencial (d.d.p.), vista pelo PAC, não senoidal (PAREDES, 2007). Sendo assim, são necessárias ferramentas e métodos para se tentar identificar o causador destes distúrbios vistos pelo PAC.

Não obstante, um ponto de partida e de extrema importância nessa avaliação é a análise de circuitos em condições não senoidais, pois as definições que envolvem os fenômenos elétricos nessas condições podem ser um tanto quanto divergentes daquelas já consagradas (senoidais). Assim, a existência de distorção harmônica é um dos parâmetros que dificulta o entendimento da resposta do circuito elétrico, pois modifica toda a dinâmica de análise daquela situação convencional (ou clássica).

Nesse propósito, diversas discussões no sentido de organizar definições de análise de circuitos, tanto em condição senoidal como em situação não senoidal de operação, vêm sendo discutidas ao longo dos anos (DEPPENBROCK, 1979), (WILLEMS, 1996), (WATANABE, 2008), (PAREDES, 2011), (CZARNECKI, 1987). E na busca de dar luz a conceitos novos visando dar um ponto de vista diferente às questões existentes surgiram as chamadas Teorias de Potência. O termo Teoria de Potência foi inicialmente utilizado por Fryze, em 1931 (CZARNECKI, 2011) e hoje é amplamente disseminado nessa área da Engenharia Elétrica.

Antes da elaboração de uma teoria de potência, por assim dizer, alguns marcos notórios foram verificados nos anos antecessores em relação ao comportamento de um circuito elétrico. Maxwell, em 1895, foi um dos primeiros a levantar questionamentos quanto às características elétricas de alguns modelos

² Ponto de acoplamento comum (PAC) é definido como o ponto da rede de alimentação elétrica, eletricamente mais próximo a uma dada carga, ao qual outras cargas estão ou poderão ser ligadas (ABNT, 1999).

analisados e, por sua vez, introduziu o conceito de deslocamento de fase (STAUDT, 2008). Já Steinmetz, em 1892, observou o fato de que correntes não ativas eram drenadas por cargas não lineares, e que esse tipo de corrente não contribuía para transferência de energia ativa do sistema (STAUDT, 2008).

No decorrer dos anos, o estudo e desenvolvimento de uma teoria de potência buscou sempre uma contribuição no sentido de contabilizar e avaliar o uso da energia elétrica (CZARNECKI, 1984). Entretanto, cada teoria tem sua peculiaridade. Algumas são desenvolvidas no domínio da frequência, outras no domínio do tempo, mas em geral são desenvolvidas na busca de solucionar problemas pontuais para distintas aplicações, como compensação de reativos, tarifação de energia, compensação ativa de distúrbios etc. Mas, sem distinção, todas tentam buscar um significado físico às suas quantidades decompostas de corrente, tensão e potência, ainda que algumas já tenham mostrado fragilidades nesse quesito como, por exemplo, as potências reativa Q_B e de distorção D_B de Budeanu (CZARNECKI, 1987), a potência reativa Q_F de Fryze, bem como as teorias de Shepherd & Zakhikani e a de Page (CZARNECKI, 1984), questionamentos em relação às definições monofásicas da norma IEEE 1459-2010 (YUMAK, 2011), dentre outras.

Algumas teorias propostas e discutidas ao longo dos últimos anos, por exemplo, são as teorias de Budeanu (BUDEANU, 1927), de Shepherd e Zakikhani (SHEPHERD, 1973), a Teoria CPC (do inglês, *Current's Physical Components*) de Czarnecki (CZARNECKI, 1984), a de Page (PAGE, 1980), a Teoria de Fryze (FRYZE, 1931), a de Kusters & Moore (KUSTERS, 1980), a FBD de Deppenbrock (STAUDT, 2008), a Teoria das Potências Instantâneas (Teoria p-q) de Nabae & Akagi (WATANABE, 2008), a CPT (do inglês, *Conservative Power Theory*) (TENTI, 2010), a Norma 1459-2010 da IEEE (IEEE, 2010), dentre outras.

Sabe-se que o Brasil discute novos modelos e definições de potência para repensar seu modelo de tarifação vigente, como se verifica na abertura da nota técnica (ANEEL, 2012). Nessa proposta a ANEEL buscava aprimorar a regulamentação acerca do fator de potência e da cobrança do excedente de reativos. Portanto, fica clara a necessidade de uma convergência nas definições de potência que sejam válidas em qualquer regime de operação. Nessa temática, vários

trabalhos científicos vêm sendo apresentados ultimamente mostrando que a CPT é uma teoria de potência com bastante utilidade, principalmente na área de controle cooperativo de compensadores e atribuição de responsabilidades (TENTI, 2008), (PAREDES, 2010), (PAREDES, 2011), (TENTI, 2011a), (TENTI, 2011b), (PAREDES, 2012) e (TENTI, 2014).

A Teoria de Potência Conservativa (CPT), apresentada por Tenti e coautores em (TENTI, 2010) e explicitada detalhadamente em (PAREDES, 2011) é uma proposta para a decomposição dos sinais de tensão e corrente, realizada no domínio do tempo, resultando em parcelas de correntes e potências associadas a diferentes características da carga (ativos, reativos, harmônicas e assimetrias). Embora sabendo que tal teoria possa ser utilizada em diversas aplicações do sistema elétrico, monofásico ou trifásico, como comentado acima, este trabalho visa o estudo e aplicação da CPT para a avaliação dos efeitos relacionados às distorções harmônicas em uma instalação com cargas monofásicas, proporcionando, assim, um ambiente adequado para se estudar a questão da atribuição ou identificação de responsabilidades na geração desses distúrbios harmônicos.

Como visto as técnicas usadas para medição de potência nos sistemas elétricos devem contemplar definições que mantenham seus significados físicos tanto no caso senoidal, quanto nos casos contendo distorções harmônicas e assimetrias, ou seja, não senoidais. Entretanto, essa justamente é uma peculiaridade da CPT, que utiliza quantidades relacionadas ao fluxo de potência e armazenamento de energia que, para qualquer rede ou circuito elétrico analisado, são conservativas independentemente das formas de onda de correntes e tensões.

Além disso, a CPT torna possível a aplicação de uma metodologia de atribuição de responsabilidades, assunto esse que está na pauta de algumas pesquisas científicas nos últimos anos (SANTOS, 2011), (PAREDES, 2011), (PAREDES, 2012), (REIS, 2013), (STAUDT, 2008), (REIS, 2014) e (SANTOS, 2015), mostrando grandes desafios nessa área de pesquisa. Dentro desse contexto se englobam dois pontos de alto interesse nesses estudos: a caracterização de cargas e a estimação da impedância de linha, esse último componente vital e intrínseco do sistema. Trabalhos relacionados com os temas acima colocados vêm sendo

apresentados na busca de contribuir ao tema de atribuição de responsabilidades, ou seja, caracterização de cargas (COSTA, 2009), (MANTOVANI, 2011), (TENTI, 2011a) e (FOGAÇA, 2013), e a estimação de impedância de linha (PAREDES, 2012). Nessa dissertação, a metodologia de atribuição de responsabilidades, baseada nas definições de (PAREDES, 2012), busca englobar esses dois assuntos em sua definição.

Finalmente, dentro do contexto explicitado, o trabalho propõe o estudo da atribuição de responsabilidades num âmbito de baixa tensão. Para tanto, utiliza modelos lineares e não lineares de cargas, no intuito de generalizar o estudo sob a ótica da presença de conteúdos harmônicos em uma rede monofásica. Torna-se necessário o conhecimento acerca das teorias de análise de circuitos elétricos sob condição não senoidal, pois elas descrevem matematicamente os fenômenos observados no circuito. Além de comentar acerca de algumas teorias existentes, a CPT (foco do trabalho) será apresentada e explicada. Será exposta, também, uma metodologia para atribuição de responsabilidades na presença de distúrbios harmônicos baseada em (PAREDES, 2012), com a contribuição em realizá-la num âmbito monofásico, considerando a caracterização de cargas e estimação de impedância de linha. É nesse contexto, portanto, que a presente dissertação se posiciona, buscando traçar discussões, resultados e possíveis contribuições acerca desse complexo tema.

1.2. Estrutura da dissertação

O capítulo 2 apresenta a revisão da literatura. Nesse capítulo serão abordados os temas referentes à dissertação que se encontram na literatura e vem sendo estudadas como alguns métodos para atribuição de responsabilidades, referências sobre caracterização de cargas não lineares e estimação de impedância de linha, bem como teorias de potência. O intuito é posicionar o tema acerca da problemática na qual o trabalho se encontra.

O Capítulo 3 apresenta as definições matemáticas da Teoria de Potência Conservativa (CPT) e da metodologia de atribuição de responsabilidades utilizada no trabalho.

O Capítulo 4 apresenta alguns circuitos elétricos no intuito de estudar os assuntos que permeiam o objetivo do trabalho e garantir o entendimento das parcelas da CPT. Com alguns exemplos essas questões são exploradas buscando a compreensão e reforço dos conceitos da CPT.

O Capítulo 5 apresenta o modelo de estudo proposto. Assim, faz-se as análises e discussões a partir dos resultados simulados. Aqui são feitas explicações do comportamento dos circuitos, apresentando figuras e tabelas, bem como comparações e conclusões. Os resultados são apresentados de forma sistemática de forma que em cada bloco de simulação busca-se apresentar e explicar os resultados obtidos, criando um ambiente mais complexo conforme os casos vão evoluindo.

O capítulo 6 se concentra em apresentar as conclusões gerais do trabalho e propostas de trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Este capítulo se concentra na revisão da bibliografia, discorrendo sobre os aspectos que trazem à tona a problemática do trabalho. Apresenta alguns estudos e pesquisas realizadas acerca dos tópicos de interesse da presente dissertação.

2.1. Componentes harmônicas no sistema elétrico

Numa situação ideal de operação, as tensões e correntes em uma rede elétrica apresentariam características senoidais. Contudo, esse comportamento é praticamente uma utopia. Distúrbios de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) relacionados, por exemplo, com a presença de distorções harmônicas têm uma presença constante nas linhas de distribuição. Dentre os vários distúrbios que comprometem os sistemas de energia elétrica, as distorções harmônicas ganham uma posição de destaque, uma vez que se caracterizam por fenômenos permanentes na rede, ao contrário dos demais que podem ocorrer de forma esporádica (MANTOVANI, 2011).

A disseminação das cargas não lineares introduziu na rede elétrica formas de onda com evidente conteúdo harmônico. Sinais de tensão e corrente elétrica com distorções harmônicas são caracterizadas por apresentarem, além da componente fundamental, parcelas harmônicas com frequências de ordens superiores múltiplas inteiras da fundamental. Ainda, algumas cargas possuem a característica de apresentarem componentes inter-harmônicas e harmônicas moduladas, como é o caso de fornos a arcos e de compensadores reativos controlados por tiristores (DECKMANN, 2010c). Além disso, transformadores e motores, cujos núcleos são ferromagnéticos, estão sujeitos à saturação e, nessas condições, também apresentam características não lineares (DECKMANN, 2010c).

Como comentado, essa realidade é bastante notável na baixa tensão onde a maioria dos usuários são conectados a rede elétrica. Os efeitos que as componentes harmônicas introduzem na rede estão diretamente relacionados com a deterioração da QEE.

A presença de correntes harmônicas provoca, conseqüentemente, a distorção de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) de uma instalação pela existência da impedância de linha numa rede com baixo nível de curto-circuito. Ainda que normas regulatórias tentem apresentar valores de referência a componentes harmônicos de tensão e/ou de corrente, elas ainda carecem da aplicação de algum tipo de penalidade, uma vez que a separação e contabilização desses distúrbios entre fornecedor e consumidor de energia é um assunto complexo e ainda em discussão, devido principalmente às características de utilização da rede pelos consumidores instalados na baixa tensão.

Entretanto, a seguir são apresentadas algumas normas regulatórias relativas a limites da circulação de componentes harmônicas.

2.2. Normas Regulatórias

2.2.1. Norma IEC 6001-3-2

A norma IEC 6001-3-2 (IEC, 2005) aponta limites para as distorções harmônicas individuais de corrente DHI_I para equipamentos que drenam até 16 A por fase, fazendo a separação em diversas classes relativas à utilização. Não há, portanto, uma orientação para o total de correntes que fluem no PAC, mas, sim, uma regulamentação limitando a quantidade de um dispositivo em drenar correntes harmônicas.

2.2.2. PRODIST

O PRODIST (ANEEL, 2012), por sua vez, apresenta valores de referência individuais e totais relacionados às distorções harmônicas de tensão medidas no PAC de uma instalação. Para unidades com alimentação de até 1kV, por exemplo, onde se concentra o cenário dessa dissertação, o valor de referência de distorção

harmônica total de tensão DHT_V é de 10%. Entretanto, o PRODIST estabelece apenas valores de referência e, por enquanto, esses não são passíveis de penalidades para valores além dos estipulados (MANTOVANI, 2011).

2.2.3. Norma IEEE 519-2014

Já a norma IEEE 519 (IEEE, 2014) apresenta limites de harmônicas de corrente, mas diferentemente da norma IEC 6001-3-2, que estabelece limites máximos para os equipamentos, a IEEE se preocupa com o sistema elétrico em um determinado PAC e apresenta limites individuais de harmônicos nessa situação. De fato, os limites máximos estão atrelados à razão entre corrente de curto circuito (capacidade do sistema) e corrente nominal de um consumidor. Já para as instalações com tensão de alimentação inferiores a 69kV, as distorções harmônicas individuais de tensão DHI_V são limitadas em 3% e a DHT_V em 5%.

De um modo geral, esses documentos não apontam métodos para definir e separar as responsabilidades a serem atribuídas aos consumidores ou ao fornecedor de energia na geração das distorções harmônicas provenientes no PAC. Certamente, esta questão envolve um impacto financeiro bastante relevante a quem gerencia a energia elétrica, mostrando uma alta relevância no estudo de atribuição de responsabilidades, contudo sem descartar as dificuldades existentes em tal área de pesquisa.

Algumas pesquisas já buscaram e ainda buscam entender a questão da atribuição de responsabilidades sobre os distúrbios harmônicos. Portanto, no intuito de entender o cerne da pesquisa, a seguir serão apresentados alguns métodos sobre atribuição de responsabilidades existentes na literatura.

2.3. Metodologias sobre atribuição de responsabilidades

2.3.1. Fluxo de Potência Harmônica

A potência ativa de cada ordem harmônica P_h pode ser definida como:

$$P_h = V_h I_h \cos \theta_h \quad (2.1)$$

onde V_h e I_h representa o valor eficaz de tensão e corrente, e θ_h representa a diferença entre as fases de corrente e tensão da ordem harmônica h .

Assim, para se obter a potência ativa P soma-se algebricamente as potências das ordens harmônicas h existentes.

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos \theta_h \quad (2.2)$$

Assim, essa metodologia define, através da análise do valor do cosseno do ângulo de defasagem, se P_h é maior ou menor que zero. Com isso se estabelece que:

- se o valor de potência harmônica for positivo, o fornecedor de energia deve ser responsabilizado, pois nessa situação P_h seria gerada pelo fornecedor e;
- se P_h for negativo, o consumidor, ou seja, a carga é quem deve ser responsabilizada pelos distúrbios, pois seriam gerados por ela.

Entretanto, não há uma definição certa das parcelas de responsabilidades, mas apenas a indicação de quem é o responsável pelo distúrbio através do sinal da potência ativa harmônica (de cada ordem separadamente). Conseqüentemente, o método não foi muito bem aceito pela comunidade científica (SANTOS, 2015).

Por outro lado, em (PAREDES et. al., 2007) se observou que para diferentes ordens harmônicas a potência ativa P , bem como a reativa Q , poderiam ser positiva ou negativa, simbolizando que o fluxo de potência ora era da fonte para a carga (+), ora da carga para a fonte (-). Além disso, por esse fato, revelou-se que a potência ativa total P poderia ser menor que a potência ativa fundamental P_f , pelo fato das harmônicas superiores poderem ser negativas, conforme equação (2.3).

$$P = P_f \pm \sum_{h=2}^{\infty} V_h I_h \cos \theta_h \quad (2.3)$$

Em geral, concluiu-se que as cargas não lineares provocam o efeito da conversão de energia de 60Hz para outras frequências, a qual é dissipada como perdas na rede devido à circulação de correntes harmônicas (PAREDES et al., 2007). Disso decorre o fato da existência de potências harmônicas positivas ou negativas.

2.3.2. Corrente Conforme e não Conforme

Essa metodologia, detalhada em (SANTOS, 2007), parte do princípio da separação da corrente total drenada pela carga em duas, ou seja, a parte conforme e a não conforme. A justificativa dessa separação se dá pela premissa de que existem cargas que não produzem distorções harmônicas além das já existentes na tensão de alimentação, chamada de grupo 1 (por exemplo, uma carga resistiva que drena correntes idênticas à tensão em seus terminais), bem como aquelas que produzem distorções harmônicas adicionais às existentes na tensão de alimentação, chamada de grupo 2. Assim, em síntese, as cargas do grupo 1 drenariam correntes conformes e cargas do grupo 2, não conformes.

Entretanto, esse método utiliza uma hipótese simplificadora propondo que a impedância utilizada seja constante independentemente da ordem harmônica analisada. Por fim, a principal fragilidade dessa metodologia encontra-se ao considerar que a impedância da carga não muda com alteração da ordem harmônica, o que vai contra as teorias básicas de circuitos elétricos, pois justamente a reatância indutiva é diretamente proporcional à variação de frequência, enquanto a capacitiva é inversamente proporcional.

2.3.3. Método da Superposição

A partir de um conceito clássico de análise de circuitos elétricos (teoria da superposição), essa metodologia (SANTOS, 2015) busca analisar o problema da atribuição de responsabilidades a partir de um modelo simplificado contendo dois tipos básicos de carga, ou seja, linear e não linear. Além disso, o método considera tensões que possam apresentar distorções harmônicas já provenientes do fornecedor de energia elétrica. Entretanto, devido ao fato da teoria da superposição ser uma característica de circuitos lineares é necessário um modelo equivalente correspondente a cada ordem harmônica a ser analisada. Além disso, o método carece de alguns dados necessários para a realização dos cálculos como as impedâncias harmônicas da linha e, principalmente, às da carga. Contudo, apresenta-se como uma metodologia baseada em conceitos bastante sólidos de circuitos elétricos.

2.3.4. Método da Superposição Modificado

Já o método da superposição modificado, detalhadamente descrito em (SANTOS, 2011), parte da dificuldade encontrada no da superposição de se conhecer os dados das impedâncias harmônicas tanto do consumidor como da fonte de alimentação. Para tapar essa lacuna é introduzido no PAC um filtro com característica de baixa impedância, sintonizado em uma frequência de interesse ao compartilhamento de responsabilidades. Com isso a mesma estratégia descrita na metodologia da superposição é depois aplicada. Entretanto, seu emprego prático é dificultado pela necessidade de uma impedância dominante no PAC para cada ordem harmônica analisada.

2.3.5. Análise de Espectro de Frequências

O método se baseia em três hipóteses de atribuição de responsabilidades entre o consumidor e o fornecedor de energia, ou seja, a responsabilidade pode ser única e exclusiva do consumidor, ou do fornecedor, ou ainda pode ser uma divisão dos dois interessados. A metodologia propõe que a corrente e tensão elétrica sejam normalizadas e decompostas pela série de Fourier. Por fim, através de algumas operações, o método sugere as atribuições de cada envolvido. Entretanto, mostrou-se que esse método aponta bastantes fragilidades, principalmente em suas definições teóricas, uma vez que é considerado que o consumidor possua característica resistiva, o que não é verdade na prática, já que a maioria das cargas também possuem componentes reativos (SANTOS 2015).

2.3.6. Método do Chaveamento de Capacitores

Esse método, apresentado detalhadamente em (SANTOS, 2015), parte da fragilidade do método da superposição na obtenção das impedâncias do consumidor (como comentado acima esse método considerava impedância constante). A utilização do chaveamento de capacitores em tal método se dá pela presença em instalações reais de bancos de capacitores para correção de fator de potência, justificando, a utilização do presente método. Fazendo, portanto, o equacionamento dos circuitos equivalentes considerando as leis de correntes de Kirchhoff (LCK) e

partindo da premissa de que as correntes harmônicas geradas pela carga permanecem constantes antes e após o fechamento das chaves que controlam o banco capacitivo, pode-se obter a impedância harmônica da carga. Um ponto interessante é que, pelo fato da premissa utilizada, a impedância desejada não está em função das correntes drenadas pelo banco capacitivo. Por fim, utiliza-se o valor dessa impedância calculada e aplica-se o método da superposição convencional. Entretanto, embora obtido resultados expressivos, a metodologia aponta a necessidade de uma atenção maior no que se diz respeito à modelagem de cargas não lineares e, também, ao fato da necessidade de obter um capacitor (filtro) sintonizado na harmônica de interesse.

Enfim, como se pode perceber, o assunto de atribuição de responsabilidades permeia questões relacionadas a caracterização de cargas lineares e não lineares e, de certa forma, ao conhecimento da impedância de linha do sistema elétrico. Nesse contexto, faz-se um breve resumo de alguns trabalhos relacionados aos respectivos assuntos supracitados.

2.4. Caracterização de cargas

A ideia de caracterizar as cargas parte do princípio de se conhecer as cargas conectadas em um determinado PAC. A partir, então, das formas de onda medidas e parcelas de potência calculadas tenta-se identificar um modelo que represente essa caixa preta. Em um sistema puramente senoidal, se uma carga drena apenas potência ativa (fator de potência unitário), conhecendo tensão e corrente, pode-se chegar a uma condutância ou resistência elétrica relacionando esses parâmetros. Se, ainda a carga apresenta apenas defasagem da corrente em relação a tensão, conhecendo essas duas parcelas pode-se chegar a valores equivalentes de indutância ou capacitância (de acordo com o sinal do ângulo de fase) e resistência. Agora, quando as componentes de tensão e corrente são não senoidais o problema não é mais trivial. Peng em (PENG, 1998) introduziu os conceitos de cargas tipo fonte de tensão e tipo fonte de corrente. Ora, as do tipo fonte de tensão poderiam ser caracterizadas apenas por uma fonte de tensão harmônica, assim como a de corrente apenas por uma fonte de corrente harmônica.

Mantovani, em sua dissertação, buscou estudar a questão da caracterização de cargas não lineares através da utilização de redes neurais artificiais (MANTOVANI, 2011). O trabalho se baseou na aplicação de uma rede neural recorrente para o reconhecimento de cargas não lineares, simulando e estimando uma corrente harmônica gerada a partir da alimentação de um circuito genérico por uma tensão senoidal. O método apresentou, de modo geral, certa eficácia, mas estudos complementares foram considerados com a utilização de outras cargas não lineares (pois houve um cenário limitado de estudo). Ademais, a comparação dos resultados com outros estudos foi prejudicada, uma vez que os níveis de distorção considerados foram bem maiores que os limites harmônicos encontrados na literatura (MANTOVANI, 2011).

Costa, por sua vez, utilizou três metodologias existentes na literatura para caracterização de cargas visando à utilização das respostas no método da superposição para atribuição de responsabilidades (anteriormente descrito). As propostas denominadas de números 1 e 2 divergiram bastante dos valores equivalentes das grandezas desejadas (valores conhecidos). No método 3, entretanto, uma melhoria foi observada, porém quando houve a consideração de cargas não lineares o procedimento apresentou um aumento nas discrepâncias entre os valores obtidos e os de interesse. Por fim, foi observado que maiores estudos seriam necessários devido às inconsistências e dificuldades encontradas nos métodos escolhidos, que se explica pelo alto grau de dificuldade do assunto abordado (COSTA, 2009).

Já Fogaça, em seu trabalho (FOGAÇA, 2013), utilizou a Teoria de Potência Conservativa para estudar a questão da caracterização de cargas em circuitos elétricos de características residenciais. Através das decomposições de corrente (ativa, reativa e residual da CPT), pode-se relacionar a corrente ativa i_a com uma condutância equivalente G_e e a corrente reativa i_r com uma reatidade equivalente B_e (que pode ser entendida como o inverso da indutância, e não como susceptância) (PAREDES, 2011). Tendo essas duas parcelas G_e e B_e , juntamente com uma fonte de corrente representando a presença de corrente residual i_v (distorções harmônicas), pode-se modelar uma carga equivalente. Quando o circuito apresenta

característica indutiva, esses componentes mencionados encontram-se todos em paralelo. Caso ele apresente característica capacitiva, calcula-se, então, uma resistência equivalente R_e (corrente ativa), uma capacitância equivalente C_e (corrente reativa) e uma fonte de tensão harmônica e_h (devido às distorções harmônicas). Nesse caso, todos os componentes são conectados em série. Caso a tensão seja não senoidal, os parâmetros da caracterização da carga (condutância, reatividade, capacitância) são obtidos mediante as componentes fundamentais de tensão e corrente.

A distinção entre característica indutiva ou capacitiva é realizada através de uma variável apresentada na CPT, a energia reativa W_r , que pode ser tanto negativa (característica capacitiva), como nula (característica resistiva) ou positiva (característica indutiva). Os resultados teóricos e experimentais são bastante interessantes e inovadores, as cargas equivalentes resultantes podem ser caracterizadas por circuitos série ou paralelo contendo bipolos elétricos com fontes harmônicas de tensão ou corrente, e não apenas por fontes de tensão e corrente harmônica como proposto por Peng.

Em (REIS, 2013), para avaliar a caracterização de cargas em um sistema composto por cargas lineares e não lineares, foram analisadas duas técnicas distintas utilizando a Teoria de Potência Conservativa como ferramenta. Além disso, avaliou-se o efeito da variação da impedância da linha no modelo, que associou valores considerados alto (10% de queda em relação ao PAC) e baixo (3% de queda em relação ao PAC). Ainda, a tensão de alimentação utilizada variava em senoidal (127V@60Hz) e não senoidal (com adição de 5% de 3ª. e 5ª. harmônicas (sobre o valor fundamental)). A primeira técnica consistia em obter as parcelas de condutância e reatividade equivalentes e fonte harmônica de corrente através da alimentação puramente senoidal do circuito. Para tanto, era realizada a separação da parcela fundamental da tensão. Com isso, as parcelas obtidas foram a condutância fundamental G_f , a reatividade fundamental B_f e a fonte de corrente harmônica j . A segunda consistia em utilizar os próprios valores equivalentes da CPT. Entretanto, os métodos não abordavam a questão da estimação da impedância de linha, e como comentado, apenas aplicou-se a mudança dos valores

para avaliar essa variável de estudo. Enfim, como era de se esperar, a variação da impedância de linha mostrou efeito nas distorções harmônicas de tensão no PAC.

Esse trabalho visou avaliar os efeitos da impedância de linha no circuito. Entretanto, em um ambiente de baixo nível de curto circuito é bastante interessante o conhecimento dessa grandeza, uma vez que ela é parte do sistema elétrico e interfere diretamente na questão de atribuição de responsabilidades e geração de harmônicos no PAC. Ou seja, é de interesse uma técnica para se tentar estimar a impedância de linha (ou o equivalente de Thévenin da rede visto pelo PAC), pois assim torna-se possível expandir o horizonte da análise de atribuição de responsabilidades. A seguir é mostrada uma técnica de estimação da impedância de linha na qual se baseia a presente dissertação.

2.5. Estimação de impedância de linha

Em (PAREDES, 2012) foi apresentada uma metodologia de atribuição de responsabilidades utilizando também a CPT como ferramenta de análise. Nesse trabalho é discutida, além de uma técnica para estimação de impedância de linha em circuitos trifásicos, a caracterização de carga através dos parâmetros fundamentais de tensão e corrente. A impedância de linha Z_L é estimada através de um método de minimização dos componentes harmônicos de tensão no PAC, ou seja, a partir da minimização desse distúrbio DHT_V busca-se um valor ótimo para Z_L , mais especificamente para R_L e L_L , componentes passivos da impedância de linha. Além disso, o método emprega também a técnica de superposição entre os circuitos equivalentes considerados. De fato, a questão da atribuição de responsabilidades está relacionada diretamente ao fato da existência de distorção harmônica no circuito (que no caso é monofásico), pois senão não há necessidade de se atribuir responsabilidades às cargas, já que não havendo distorção harmônica de tensão, o sistema é tido como ideal (alto nível de curto circuito) e a carga não introduz não linearidades ao PAC. No caso trifásico, além das distorções harmônicas, pode haver desbalanços entre as tensões das linhas e/ou cargas, simbolizando outras motivações para esse estudo. Nesse contexto, mesmo partindo de algumas premissas simplificadoras, o método se mostrou bastante interessante (PAREDES,

2012). Uma dessas premissas é a necessidade do baixo nível de curto circuito do sistema para que exista DHT_V . Essa característica, portanto, se enquadra no cenário de estudo desse trabalho, ou seja, nos ambientes de distribuição de energia (cargas consumidoras). Esse fator propõe que as impedâncias da linha interferem no perfil de tensões e correntes no PAC. Conseqüentemente, isso contribui para a utilização desse método na presente dissertação.

2.6. Teorias de Potência

Como comentado, esse trabalho tem base alicerçada em uma teoria de potência, a CPT. Entretanto, outras teorias foram desenvolvidas ao longo dos anos visando sanar as dúvidas relacionadas ao comportamento dos circuitos em condições não senoidais e aplicações existentes nesses domínios, como a correção de reativos, por exemplo. Algumas delas foram e ainda são bastante expressivas dentro do contexto científico, como é o caso da Teoria de Potência de Budeanu (BUDEANU, 1927). Essa Teoria é definida no domínio da frequência e por muito tempo foi utilizada como padrão em alguns países. Czarnecki em (CZARNECKI, 1987) aponta que essa Teoria foi bem aceita por muito tempo e sustentada por alguns pesquisadores da época. Outra é a Teoria de Potência de Fryze (FRYZE, 1931), definida no domínio do tempo, que introduziu pela primeira vez o conceito de ortogonalidade entre as correntes decompostas. Outra mais recente, que não é reconhecida como uma Teoria de Potência em si, é a normativa da IEEE 1459-2010 (IEEE, 2010). Essa é uma referência de definições para circuitos senoidais e não senoidais da IEEE tido com bastante aceitação atualmente, e é baseada nas definições propostas por um grupo de trabalho liderado pelo Prof. Emanuel (EMANUEL, 2004). Na sequência são discutidas sumariamente as três propostas acima citadas. Em detalhe elas são apresentadas em (PAREDES, 2011) e (REIS, 2013).

2.6.1. Teoria de Potência de Budeanu

Budeanu apresentou seu trabalho em análise de circuitos em condições não senoidais em 1927. Tal formulação foi bem aceita durante muito tempo sendo até

estabelecida como padrão de normas em muitos países (apenas nas definições da IEEE 1459 de 2010 que a formulação de Budeanu foi deixada de lado). Em 1972, Shepherd & Zakikhani foram os primeiros a registrar as deficiências no método descrito por Budeanu, insinuando que a potência reativa de Budeanu Q_B e a potência de distorção D_B não apresentavam significado físico algum, sugerindo, então, que outra parcela fosse chamada de potência reativa (SHEPHERD, 1972). Já Czarnecki em seu famigerado trabalho (CZARNECKI, 1987), conclui através de equações e exemplos numéricos que tanto Q_B quanto D_B não possuíam atributo algum que os relacionassem com fenômenos de potência, reafirmando a falha de significado físico das parcelas já mencionadas por Shepherd & Zakikhani, ainda que a potência ativa P descrita fosse coerente e aceita. Com sua Teoria, Budeanu introduziu o tetraedro de potências. Entretanto, a maior fragilidade de sua técnica poderia estar relacionada ao fato da não existência de componentes de corrente ortogonais que pudessem ser relacionadas à P , Q_B e D_B (PAREDES, 2011).

2.6.2. Teoria de Potência de Fryze

Com o trabalho publicado em 1931 (FRYZE, 1931), Fryze partiu de uma análise realizada no domínio do tempo e definiu a potência ativa P de um circuito como sendo o valor médio da multiplicação entre tensão e corrente, independentemente de suas formas de onda. A potência aparente, por sua vez, foi definida como a multiplicação dos valores eficazes entre tensão e corrente. Tendo, portanto, as potências ativa e aparente, Fryze utilizou os conceitos relacionados a ortogonalidade e definiu a potência reativa de Fryze Q_F como sendo a raiz quadrada da subtração dos quadrados das potências aparente e ativa. Essa estratégia permitiu, pela primeira vez, a ideia de decomposição de corrente, ou seja, a corrente reativa (ou não ativa) somada a corrente ativa resultava na corrente total do circuito.

Entretanto, a corrente e potência reativas definidas por Fryze representavam todo o conteúdo não ativo do circuito em questão, não promovendo a separação dos efeitos das distorções harmônicas dos reativos, por exemplo. Assim, essa parcela mostrou que carecia de significado físico quando em situação não senoidal de operação (CZARNECKI, 1987).

2.6.3. Normativa IEEE 1459-2010

Em meados de 2010, O Comitê de Instrumentação de Medição de Sistemas de Potência da IEEE publicou a norma 1459 no intuito de determinar critérios para o projeto e instrumentação da medição de energia elétrica sob condições senoidais, não senoidais, balanceadas e desbalanceadas de operação. Esse grupo foi liderado pelo Prof. Emanuel (EMANUEL, 2004). No início, a interação entre as formas de onda corrente e tensão foram analisadas no intuito de determinar um conceito de fluxo de potência com significados físicos para cada parcela de potência analisada. No caso senoidal, as definições clássicas de potências ativa, reativa e aparente, que já são bem conhecidas e aceitas na comunidade científica, foram preservadas. Entretanto, conforme (YUMAN, 2011), quando parte-se para a análise de circuitos não senoidais as definições apresentam problemas de significado físico, assim como as parcelas de potência de Budeanu.

Inicialmente, o equacionamento sugere a separação entre parcelas de tensão e corrente fundamental e harmônica (a parcela harmônica representando todo o conteúdo harmônico existente adicionado ao conteúdo CC). Nessa mesma ideia, define-se potência ativa P e divide-a em potência ativa fundamental P_f e potência ativa harmônica P_H . A soma de P_f com P_H , portanto, deve ser igual a P . Já a potência reativa Q_f , diferentemente de P , é definida apenas na frequência fundamental.

A IEEE 1459-2010 aponta várias potências derivadas da potência aparente S , que é calculada conforme equação clássica. O problema envolve a definição da potência de distorção harmônica D_H , pois a torna, segundo Yuman, uma parcela de difícil compreensão, ou seja, bastante não intuitivo, pois a normativa sugere além de D_H , as potências de distorção de corrente D_I e tensão D_V . O trabalho de (YUMAN, 2011), por fim, mostrou que essa parcela de potência tem bastante similaridade com a potência de distorção de Budeanu, por não apresentar uma definição física consistente.

2.7. Conclusões preliminares

Esse capítulo buscou abranger todos os aspectos que serão tratados na dissertação. Em relação às normas apresentadas, verifica-se que há várias lacunas ainda, uma vez que não há discussões sobre atribuição de responsabilidades, mas valores limites ou referências tentam amenizar essa questão na busca de um “compartilhamento” das responsabilidades. Um ponto crítico é justamente a da referência brasileira, o PRODIST, que limita em 10% o DHT_V (um valor que representa o dobro da norma da IEEE no nível de baixa tensão) e não diz absolutamente nada acerca dos limites de corrente totais e individuais.

Na sequência, apresentaram-se algumas metodologias de atribuição de responsabilidades existentes na literatura. Apesar de perceber um nítido avanço nos métodos, este ainda é um assunto bastante aberto a sugestões, justamente pelas dificuldades nos pontos centrais da discussão: caracterização de carga e estimação de impedância de linha. Enfim, somando a essa questão, foi apresentado que a Teoria de Potência Conservativa a CPT, surgiu como uma ferramenta de análise de circuitos poderosa na busca de dar respostas a essas questões, como foi mostrado por alguns trabalhos. A seguir, portanto, no intuito de adentrar ao assunto que tange a dissertação, a Teoria de Potência Conservativa e a metodologia de atribuição de responsabilidades serão apresentadas e discutidas no próximo capítulo.

3. Metodologia para atribuição de responsabilidades em circuitos elétricos monofásicos

Este capítulo apresenta a metodologia de atribuição de responsabilidades proposta em (PAREDES, 2012), expondo todo fundamento necessário para seu entendimento. Primeiramente, a CPT, teoria de potência em que se estabelece a análise dos circuitos elétricos de natureza senoidal e não senoidal será explicitada. Posteriormente, os aspectos acerca de caracterização de carga e estimação de impedância de linha serão expostos. Por último, portanto, a metodologia de atribuição de responsabilidades descrita detalhadamente.

3.1. Teoria de potência conservativa (CPT) – conceitos básicos e definições

A CPT, Teoria de Potência Conservativa (do inglês, *Conservative Power Theory*), apresentada por Tenti (TENTI, 2010) e detalhada em (PAREDES, 2011), é uma proposta que, assim como a de Fryze, se estabelece no domínio do tempo. Segundo (LIBERADO, 2012), a CPT tem sido desenvolvida como uma modelagem matemática que busca associar características particulares dos circuitos elétricos como parcelas de corrente e potência. Assim, ela fornece a decomposição de parcelas de correntes – e, por conseguinte de potências – de um circuito elétrico genérico, de forma a explicitar os fenômenos de potência que ocorrem na rede em parcelas distintas. Para isso, a CPT baseia-se em um conceito de termos conservativos. A seguir apresentam-se as definições matemáticas da CPT.

3.1.1. Definições matemáticas

Assumem-se, para as seguintes definições, grandezas periódicas de período T , frequência f e frequência angular ω , onde $\omega = 2\pi f$ [rad/s]. Definem-se, portanto:

- Valor médio: Seja o sinal periódico no tempo $x(t)$, seu valor médio \bar{x} é calculado através da integral média desse sinal sobre o período T .

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (3.1)$$

- Produto interno: Sejam dois sinais periódicos no tempo $x(t)$ e $y(t)$, o produto interno $\langle x, y \rangle$ é calculado através da integral média do produto dos sinais sobre o período T .

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t) dt \quad (3.2)$$

- Norma euclidiana (valor eficaz): Seja o sinal periódico no tempo $x(t)$, a norma euclidiana $\|x\|$ é calculada através da raiz quadrada da integral média desse sinal elevado ao quadrado sobre o período T .

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = X \quad (3.3)$$

onde X corresponde ao valor eficaz da variável $x(t)$.

- Integral imparcial: A CPT define uma operação matemática denominada integral imparcial (do inglês, *unbiased integral*), que pode ser entendida em retirar o valor médio da integral de um sinal periódico sobre o período T .

Seja $x(t)$ um sinal periódico no tempo, então a integral imparcial de $x(t)$, escrita como $\hat{x}(t)$, é definida como:

$$\hat{x}(t) = x_f(t) - \bar{x}_f \quad (3.4)$$

onde $x_f(t)$ é a integral no tempo de $x(t)$, definida como:

$$x_f(t) = \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (3.5)$$

e \bar{x}_f é o valor médio da integral no tempo, definido como:

$$\bar{x}_f = \frac{1}{T} \int_0^T x_f(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\int_0^t x(\tau) d\tau \right] dt \quad (3.6)$$

- Derivada no tempo: A derivada no tempo (do inglês, *time derivative*) de uma variável periódica no tempo $x(t)$ é expressa como:

$$\dot{x}(t) = \frac{d}{dt} x(t) \quad (3.7)$$

3.1.2. Termos conservativos da CPT

Como propõem o nome, a CPT estabelece uma propriedade para algumas grandezas elétricas a partir do conceito de conservação de energia (PAREDES, 2010), onde se estabelece que uma grandeza é dita conservativa se o produto escalar (ou suas derivadas e integrais imparciais) entre tensão e corrente respeitam as Leis de tensão e corrente de Kirchhoff (LCK e LTK) e, conseqüentemente, ao Teorema de Tellegen (PENFIELD, 1970).

Assim, são definidas como parcelas conservativas as grandezas potência instantânea p e energia reativa instantânea w_r .

- Potência instantânea p [W]

$$p = vi \quad (3.8)$$

- Energia reativa instantânea w_r [J]

$$w_r = \hat{v}i = v\hat{i} \quad (3.9)$$

onde v e i são tensão e corrente, respectivamente e \hat{v} é a integral imparcial de tensão.

Em (PAREDES, 2011) é mostrado que as quantidades p e w_r são conservativas para qualquer circuito elétrico independentemente das formas de onda de v e i .

Calculando o valor médio das parcelas conservativas acima definidas, obtém-se potência ativa P [W] e energia reativa W_r [J]. Assim,

$$P = \bar{p} = \langle v, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \quad (3.10)$$

$$W_r = \bar{w}_r = \langle \hat{v}, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v} i dt = \frac{1}{T} \int_0^T w_r dt \quad (3.11)$$

A definição de P através da CPT é idêntica àquela denominada clássica. Entretanto, para representar os fenômenos caracterizados pela defasagem entre tensão e corrente, os autores da CPT usam a energia reativa W_r , pois essa é uma grandeza independente da frequência e, assim sendo, torna-se uma alternativa para se analisar circuitos não senoidais (LIBERADO, 2012), já que compreende uma análise temporal.

3.1.3. Definição dos termos de corrente e potência

A partir das definições acima apresentadas, segundo (TENTI, 2011a) e (PAREDES, 2011) a corrente instantânea i pode ser decomposta nas seguintes componentes:

- Corrente ativa i_a

$$i_a = \frac{\langle v, i \rangle}{\|v\|^2} v = \frac{P}{V^2} v = G_e v = \frac{1}{R_e} v \quad (3.12)$$

onde G_e é a condutância equivalente do circuito, medida em Siemens [S] ou $[\Omega^{-1}]$. De fato, G_e é o inverso da resistência equivalente R_e [Ω], tomado isoladamente.

A corrente i_a é definida como a corrente de norma mínima (ou seja, com mínimo valor eficaz) necessária para transportar potência ativa P através dos terminais da carga (TENTI, 2011a).

- Corrente reativa i_r

$$i_r = \frac{\langle \hat{v}, i \rangle}{\|\hat{v}\|^2} \hat{v} = \frac{W_r}{\hat{V}^2} \hat{v} \quad (3.13)$$

Pode-se, então, fazer uma relação com o sinal da energia reativa:

- Se $W_r > 0$, então o circuito tem característica indutiva, assim:

$$B_e = \frac{W_r}{\hat{V}^2} = \frac{1}{L_e} \quad (3.14)$$

onde B_e é a reatidade equivalente do circuito, medida em $[H^{-1}]$ e L_e é a indutância equivalente, medida em Henry $[H]$. A grandeza B_e matematicamente representa o inverso da indutância e não deve ser confundida com susceptância (que varia com a frequência).

- Se $W_r < 0$, então o circuito tem característica capacitiva, dessa forma:

$$C_e = \frac{|W_r|}{V^2} \quad (3.15)$$

onde C_e é a capacitância equivalente do circuito, medida em Faraday $[F]^3$.

A corrente i_r é parcela de corrente de norma mínima (mínimo valor eficaz) necessária para transportar energia reativa através dos terminais da carga (TENTI, 2011b).

- Corrente residual instantânea i_v

$$i_v = i - i_a - i_r \quad (3.16)$$

Essa parcela de corrente se caracteriza por não transportar potência ativa nem energia reativa, mas se resume à parte onde se inclui os efeitos das não linearidades.

Todas as componentes de corrente decompostas da CPT são ortogonais entre si, pois o produto interno entre as componentes resulta nulo. Assim, é possível estabelecer que:

$$I^2 = I_a^2 + I_r^2 + I_v^2 \quad (3.17)$$

Dessa forma, podem-se obter as parcelas de potência associadas a cada parcela de corrente. A potência total drenada pela carga é denominada potência

3

$$\begin{aligned} i &= C \frac{dv}{dt} \rightarrow [A] = [F] \frac{[V]}{[s]} \rightarrow [F] = \frac{[A][s]}{[V]} & C_e &= \frac{|W_r|}{V^2} = \frac{[J]}{[V]^2} = \frac{[V][A][s]}{[V]^2} = \frac{[A][s]}{[V]} \\ v &= L \frac{di}{dt} \rightarrow [V] = [H] \frac{[A]}{[s]} \rightarrow [H] = \frac{[V][s]}{[A]} & B_e &= \frac{W_r}{\hat{V}^2} = \frac{[V][A][s]}{[V]^2[s]^2} = \frac{[A]}{[V][s]} = [H^{-1}] \end{aligned}$$

aparente, porém essa, a partir da ortogonalidade entre as correntes mostrada em (3.17) e da tensão eficaz, também pode ser decomposta em potências ativa, reativa e residual, conforme segue.

- Potência Ativa P

$$P = VI_a = \frac{1}{T} \int_0^T v i dt \quad (3.18)$$

Essa parcela representa todo o consumo ativo da carga, ou seja, aquela que gera trabalho útil.

Antes de apresentar a potência reativa introduz-se o conceito de distorção harmônica total de corrente e tensão DHT .

O DHT é utilizado para a quantificação das parcelas harmônicas presentes em todo o espectro do sinal em relação à parcela fundamental. Seja, então, $x(t)$ um sinal periódico (tensão ou corrente, bem como suas integrais imparciais), conforme (ANEEL, 2012), definem-se:

- Distorção Harmônica Total DHT_x

$$DHT_x = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} X_h^2}}{X_1} \quad (3.19)$$

O PRODIST afirma que o cálculo do DHT_V deve ser realizado utilizando no mínimo até a 25ª. ordem harmônica.

- Potência Reativa Q

$$Q = VI_r = \frac{V}{\hat{V}} W_r = \omega W_r \frac{\sqrt{1 + (DHT_V)^2}}{\sqrt{1 + (DHT_{\hat{V}})^2}} \quad (3.20)$$

Essa parcela de potência está relacionada com a defasagem entre tensão e corrente no sistema elétrico. Como se observa, Q é função das distorções harmônicas de tensão e de integral imparcial de tensão e pela variação de frequência da linha. Por isso, ao contrário da definição de W_r , Q é uma parcela não conservativa (PAREDES, 2011).

- Potência Residual D

$$D = VI_v \quad (3.21)$$

Essa parcela de potência representa a potência drenada pelas cargas que apresentam comportamento não linear entre tensão e corrente. Ela não se traduz em potência ativa nem energia reativa, corroborando o efeito da ortogonalidade das correntes da CPT.

- Potência Aparente A

$$A = VI = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.22)$$

A potência aparente A pode ser entendida como toda a potência disponível para a carga. Não tem característica física, mas apenas matemática.

3.1.4. Modelagem equivalente de cargas genéricas pela CPT

Conforme descrito em (PAREDES, 2011) e (TENTI, 2011a), qualquer carga genérica pode ser representada através das parcelas descritas pela CPT. O circuito equivalente pode ser modelado de duas maneiras distintas:

i) Se a W_r é positiva, ela pode ser descrita por meio da condutância equivalente G_e , de uma reatividade equivalente B_e e um gerador de corrente i_v , que representa a corrente harmônica. Todos os elementos são conectados em paralelo, conforme Figura 1. (Nota-se que a fonte de corrente representa o conteúdo harmônico de corrente que advém da conversão de energia na carga de 60Hz para outras frequências).

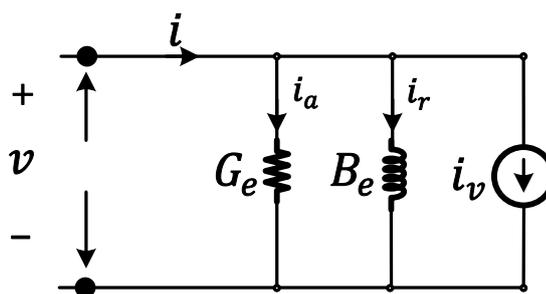


Figura 1 – Circuito equivalente pelas variáveis da CPT ($W_r > 0$).

Fonte: Próprio autor.

ii) Se a W_r é negativa, a carga pode ser descrita por meio da resistência equivalente R_e , de uma capacitância equivalente C_e e uma fonte de tensão harmônica e_n , que representa a tensão harmônica gerada pela carga. Neste caso, os elementos são conectados em série, conforme Figura 2. (Da mesma forma, a fonte

de tensão harmônica representa as harmônicas de tensão através da conversão de energia realizada pela carga).

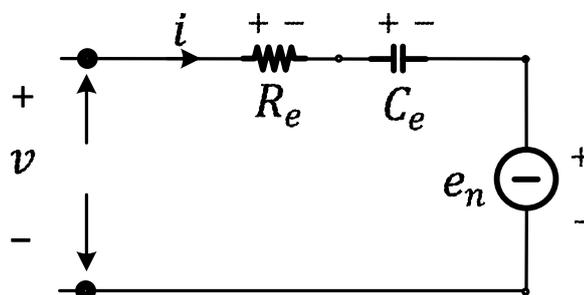


Figura 2 - Circuito equivalente pelas variáveis da CPT ($W_r < 0$).

Fonte: Próprio autor.

3.1.5. Fatores de desempenho ou conformidade de carga

Alguns fatores de desempenho foram definidos como indicadores para analisar a QEE no PAC (PAREDES, 2011). A medição desses indicadores é feita do ponto de vista da carga visando identificar os distúrbios por ela produzidos (LIBERADO, 2012). Os fatores de conformidade de cargas para circuitos monofásicos são os fatores de não linearidade e o fator de reatividade, bem como o clássico fator de potência.

- Fator de potência λ : indicativo universal de utilização da rede, relacionando as potências ativa P e aparente A . Quanto mais próximo da unidade, mais eficiente é a carga. Por exemplo, se $\lambda = 1$ toda energia oferecida à carga é transformada em trabalho útil.

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (3.23)$$

No intuito de caracterizar os diferentes aspectos de operação da carga que afetam o fator de potência, atribui-se outros fatores de conformidade da carga, ambos relacionados à decomposição de potência da CPT.

- Fator de não linearidade λ_D : relação entre as potências residual D e aparente A . Esse fator será diferente de zero na presença de corrente residual no sistema. Quanto maior, mais não linearidade presente no circuito.

$$\lambda_D = \frac{D}{A} = \frac{D}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (3.24)$$

- Fator de reatidade λ_Q : relação entre as potências ativa P e reativa Q . Esse fator será diferente de 0 na presença de energia reativa no circuito (defasagem entre corrente e tensão).

$$\lambda_Q = \frac{|Q|}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3.25)$$

3.2. Caracterização de Carga

A caracterização de carga consiste em um assunto de extrema importância no contexto de atribuição de responsabilidades. A ideia central de método é a de extrair um modelo de carga equivalente, baseada no método apresentado pela CPT, porém definido a partir da alimentação senoidal do circuito.

Utilizam-se, para tanto, os conceitos de separação dos sinais de corrente e tensão em componentes fundamental e harmônico, sendo que essa última representando todo o conteúdo harmônico contido no sinal. Seguindo a mesma ideia, a integral imparcial de tensão e corrente também são separadas nas duas componentes.

$$v = v_f + v_H \quad (3.26)$$

$$i = i_f + i_H \quad (3.27)$$

$$\hat{v} = \hat{v}_f + \hat{v}_H \quad (3.28)$$

$$\hat{i} = \hat{i}_f + \hat{i}_H \quad (3.29)$$

Essa técnica utiliza os elementos passivos do modelo calculados a partir da tensão de alimentação puramente senoidal. Sendo assim, a potência ativa fundamental P_f e energia reativa fundamental W_{r_f} são definidas como:

$$P_f = \langle v_f, i_f \rangle = \langle v_f, i \rangle = \langle v, i_f \rangle \quad (3.30)$$

devido à ortogonalidade entre fundamental e componentes harmônicas. Assim como:

$$W_{r_f} = \langle \hat{v}_f, i_f \rangle = \langle \hat{v}_f, i \rangle = \langle \hat{v}, i_f \rangle \quad (3.31)$$

Conforme apresentado na CPT, pode-se criar um circuito equivalente de carga paralelo se $W_{r_f} > 0$ (característica indutiva) ou um circuito série $W_{r_f} < 0$ (característica capacitiva). O paralelo é composto por uma condutância fundamental G_f , uma reatidade fundamental B_f e uma fonte de corrente harmônica j , conforme Figura 3. O circuito série é composto por uma resistência fundamental R_f , um capacitor fundamental C_f e uma fonte de tensão harmônica e_m , conforme Figura 4. A fonte de corrente aponta os harmônicos oriundos da conversão de energia na carga.

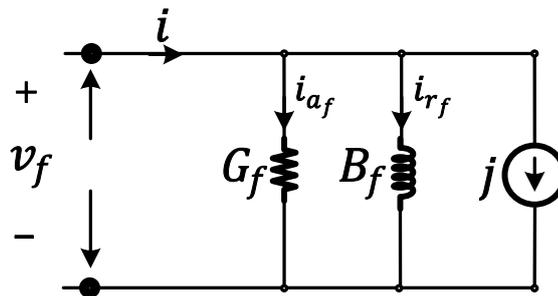


Figura 3 – Caracterização de carga pelas variáveis fundamentais ($W_{r_f} > 0$).

Fonte: Próprio autor.

Considerando o circuito equivalente da Figura 3 podem-se calcular os seguintes parâmetros equivalentes fundamentais:

- Condutância fundamental G_f [S]

$$G_f = \frac{\langle v_f, i \rangle}{\|v_f\|^2} = \frac{P_f}{V_f^2} \quad (3.32)$$

- Reatidade fundamental B_f [H^{-1}]

$$B_f = \frac{\langle \hat{v}_f, i \rangle}{\|\hat{v}_f\|^2} = \frac{W_{r_f}}{\hat{V}_f^2} \quad (3.33)$$

Pode-se afirmar que se G_f e B_f forem alimentados pela tensão fundamental v_f estes devem absorver exatamente a corrente fundamental da carga i_f . Assim,

$$i_f = G_f v_f + B_f \hat{v}_f \quad (3.34)$$

- Fonte de corrente harmônica j [A]:

$$j = i - (G_f v + B_f \hat{v})$$

$$j = i - G_f(v_f + v_H) - B_f(\hat{v}_f + \hat{v}_H)$$

$$j = i - \underbrace{(G_f v_f + B_f \hat{v}_f)}_{i_f} - G_f v_H - B_f \hat{v}_H$$

$$j = (i - i_f) - G_f v_H - B_f \hat{v}_H \Rightarrow j = i_H - G_f v_H - B_f \hat{v}_H \quad (3.35)$$

A mesma ideia é aplicada considerando a energia reativa fundamental negativa (circuito série, conforme Figura 4).

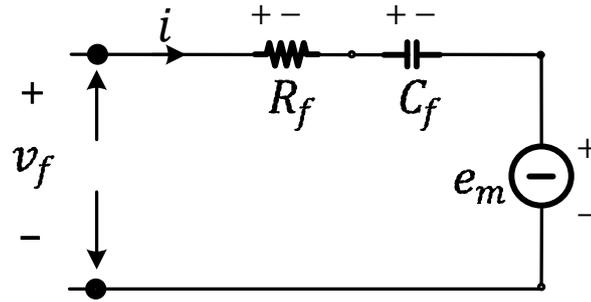


Figura 4 - Caracterização de carga pelas variáveis fundamentais ($W_{r_f} < 0$).

Fonte: Próprio autor.

Assim, podem-se calcular os seguintes parâmetros:

- Resistência fundamental R_f [Ω]

$$R_f = \frac{\langle v_f, i \rangle}{\|i_f\|^2} = \frac{P_f}{I_f^2} \quad (3.36)$$

- Capacitância pela fundamental C_f [F]

$$C_f = -\frac{\|\hat{v}_f\|^2}{\langle \hat{v}_f, i \rangle} = -\frac{\hat{V}_f^2}{W_{r_f}} \quad (3.37)$$

- Fonte de tensão harmônica e_m

$$e_m = v_f - R_f i - \frac{\hat{i}}{C_f} = v_H - R_f i_H - \frac{\hat{i}_H}{C_f} \quad (3.38)$$

Percebe-se que a fonte de tensão harmônica e_m fica em função das componentes harmônicas de tensão e corrente, bem como a parcela harmônica da integral imparcial de corrente. Com os parâmetros calculados, podem-se escrever circuitos equivalentes da caracterização de carga que será utilizado na metodologia de atribuição de responsabilidades.

3.3. Estimação de impedância de linha

O circuito de impedância de linha, ou seja, do equivalente de rede visto pelo PAC (equivalente Thévenin) proposto em (PAREDES, 2012) é composto por uma fonte de tensão e , uma resistência e indutância da linha R_S e L_S conforme Figura 5.

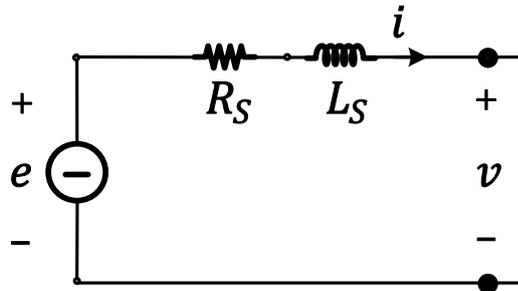


Figura 5 – Modelo da impedância da rede no PAC
Fonte: Próprio autor.

Através da Lei de tensões de Kirchhoff (LTK), pode-se escrever a seguinte equação característica do circuito:

$$e = v + R_S i + L_S \dot{i} \quad (3.39)$$

Separando as parcelas de tensão e corrente em fundamental e harmônica, pode-se reescrever a equação (3.39) como:

$$(e_f + e_H) = (v_f + v_H) + R_S(i_f + i_H) + L_S(\dot{i}_f + \dot{i}_H) \quad (3.40)$$

Entretanto, a estratégia de atribuição de responsabilidades propõe que, para se analisar e contabilizar os distúrbios harmônicos provenientes da carga, as componentes harmônicas da tensão da fonte devem ser minimizadas ($e_H \rightarrow 0$).

Assim, escolhe-se como função objetivo da minimização como sendo:

$$\emptyset = \|e_H\|^2 = \langle e_H, e_H \rangle \quad (3.41)$$

Considerando apenas as componentes harmônicas dos termos da equação (3.40), tem-se:

$$\emptyset = \langle (v_H + R_S i_H + L_S \dot{i}_H), (v_H + R_S i_H + L_S \dot{i}_H) \rangle \quad (3.42)$$

Assim, utilizando as propriedades matemáticas da CPT dispostas em (PAREDES, 2011), tem-se:

$$\Phi = R_S^2 \langle i_H, i_H \rangle + L_S^2 \langle \check{i}_H, \check{i}_H \rangle + \langle v_H, v_H \rangle + 2R_S \langle v_H, i_H \rangle + 2L_S \langle v_H, \check{i}_H \rangle + \underbrace{2R_S L_S \langle i_H, \check{i}_H \rangle}_0$$

$$\Phi = R_S^2 \|i_H\|^2 + L_S^2 \|\check{i}_H\|^2 + \|v_H\|^2 + 2R_S \langle v_H, i_H \rangle + 2L_S \langle v_H, \check{i}_H \rangle \quad (3.43)$$

A impedância de linha pode ser calculada aplicando-se o Lagrangeano em (3.43) com respeito à R_S e L_S . Assim, obtém-se:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial R_S} = 0 \rightarrow 2R_S \|i_H\|^2 + 2 \langle v_H, i_H \rangle = 0 \rightarrow R_S = - \frac{\langle v_H, i_H \rangle}{\|i_H\|^2} \quad (3.44)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial L_S} = 0 \rightarrow 2L_S \|\check{i}_H\|^2 + 2 \langle v_H, \check{i}_H \rangle = 0 \rightarrow L_S = - \frac{\langle v_H, \check{i}_H \rangle}{\|\check{i}_H\|^2} \quad (3.45)$$

Tendo os valores de R_S e L_S , que constituem o modelo da rede fundamental vista pelo PAC, pode-se calcular e_f através da equação (3.46).

$$e_f = v_f + R_S i_f + L_S \check{i}_f \quad (3.46)$$

Assim, o modelo completo do equivalente de rede visto pelo PAC, conforme a Figura 5, pode ser utilizado para fins da metodologia de atribuição de responsabilidades.

3.4. Metodologia de Atribuição de Responsabilidades

Tendo realizado a caracterização das cargas e feito a estimação do modelo do PAC, pode-se aplicar a metodologia de atribuição de responsabilidades. O método utiliza o princípio da superposição com o intuito de separar os distúrbios provenientes da carga e da linha. Assim, podem-se seguir as seguintes etapas:

- i) Inicialmente, faz-se a caracterização de carga conforme descrito na seção 3.2. Obtém-se, então, o modelo de carga paralelo ($W_r > 0$) conforme Figura 3 ou série ($W_r < 0$) conforme Figura 4;
 - ii) Posteriormente, aplica-se o procedimento descrito na seção 3.3. e faz-se a estimação dos parâmetros R_S e L_S da impedância de linha e da fonte de tensão fundamental e_f . Obtém-se com isso o modelo do PAC conforme Figura 5;
-

- iii) Para se calcular a corrente fundamental da carga i_{f_ℓ} alimentam-se os parâmetros passivos provenientes da caracterização de carga (G_f e B_f paralelo, por exemplo) com a tensão fundamental v_f , do PAC conforme Figura 6, considerando a queda de tensão na impedância de linha estimada;

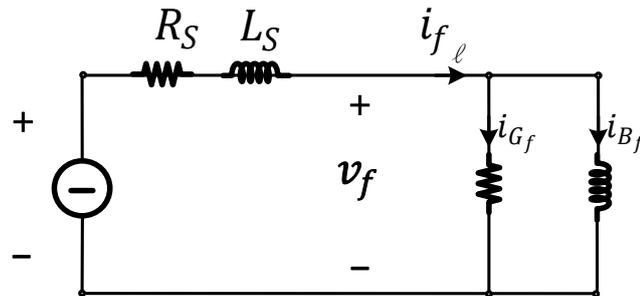


Figura 6 – Circuito relacionando a parcela fundamental de corrente.

Fonte: Próprio autor.

- iv) Do mesmo modo, aplicando-se a fonte de corrente harmônica j aos elementos estimados da impedância de linha, pode-se determinar a tensão harmônica nos terminais da carga, ou seja, v_{H_ℓ} , como se vê na Figura 7. Uma vez que os efeitos harmônicos da tensão de alimentação foram minimizados, a corrente harmônica drenada pela carga pode ser aproximada para a fonte de corrente harmônica da caracterização de carga j , assim, $i_{H_\ell} \approx j$;

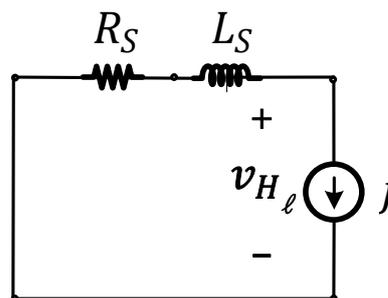


Figura 7 – Circuito relacionando as parcelas harmônicas de tensão e corrente.

Fonte: Próprio autor.

Equacionando, pois, a tensão harmônica nos terminais da carga, tem-se:

$$v_{H_\ell} \approx -R_S j - L_S \frac{dj}{dt} \quad (3.47)$$

- v) Considerando um circuito com os componentes passivos da caracterização de carga, bem como com o circuito de impedância de linha, pode-se, também por meio da superposição, obter a tensão fundamental v_{f_ℓ} nos terminais da carga, conforme Figura 8.

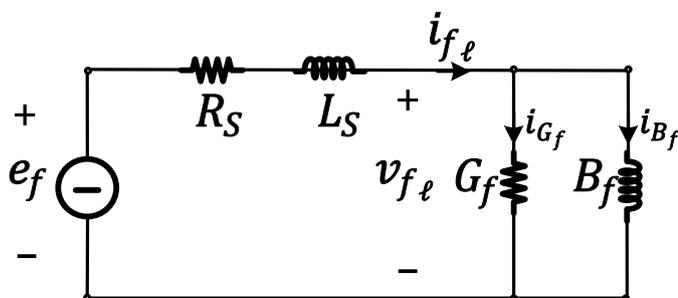


Figura 8 – Circuito relacionando a parcela fundamental de tensão.

Fonte: Próprio autor.

Equacionando a tensão fundamental nos terminais da carga, tem-se:

$$v_{f_\ell} = e_f - R_S i_{f_\ell} - L_S \frac{di_{f_\ell}}{dt} \quad (3.48)$$

- vi) Assim, pode-se computar a tensão e corrente apontadas à carga, ou seja, $v_\ell = v_{f_\ell} + v_{H_\ell}$ e $i_\ell = i_{f_\ell} + i_{H_\ell}$ e montar o circuito considerando todas as variáveis calculadas, conforme Figura 9.

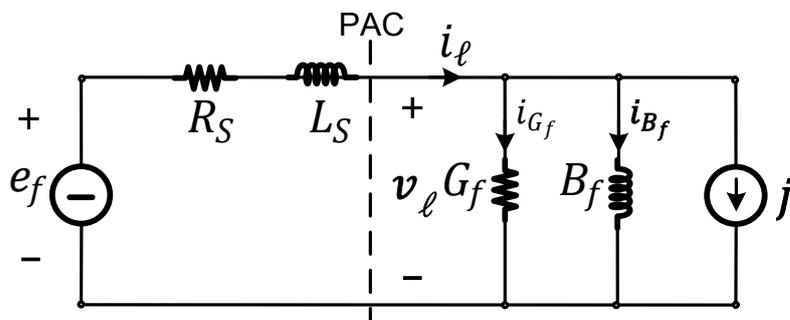


Figura 9 – Circuito considerando todas as variáveis calculadas.

Fonte: Próprio autor.

- vii) A partir daqui pode-se utilizar das definições da CPT para calcular as potências e os fatores de conformidade apontados à carga. O circuito utilizado para os cálculos das potências apontadas à carga é o mesmo da Figura 9, entretanto a metodologia estipula que a tensão de alimentação no PAC seja considerada senoidal

(PAREDES, 2014), ou seja, v_{f_ℓ} , procurando estipular um critério mais adequado no compartilhamento de responsabilidades de todas as cargas conectadas no ponto de acoplamento comum.

Assim, as parcelas de potência apontadas à carga são descritas conforme:

- Potência ativa apontada à carga P_ℓ

$$P_\ell = V_{f_\ell} I_{G_f} \quad (3.49)$$

- Potência reativa apontada à carga Q_ℓ

$$Q_\ell = V_{f_\ell} I_{B_f} \quad (3.50)$$

- Potência residual apontada à carga D_ℓ

$$D_\ell = V_{f_\ell} J \quad (3.51)$$

- Potência aparente da carga A_ℓ

$$A_\ell = V_{f_\ell} I_{f_\ell} \quad (3.52)$$

Conseqüentemente, os fatores de conformidade apontados à carga podem ser escritos como:

- Fator de potência λ_ℓ

$$\lambda_\ell = \frac{P_\ell}{A_\ell} \quad (3.53)$$

- Fator de reatividade λ_{Q_ℓ}

$$\lambda_{Q_\ell} = \frac{|Q_\ell|}{\sqrt{P_\ell^2 + Q_\ell^2}} \quad (3.54)$$

- Fator de não linearidade λ_{D_ℓ}

$$\lambda_{D_\ell} = \frac{D_\ell}{A_\ell} \quad (3.55)$$

3.5. Conclusões Preliminares

O presente capítulo apresentou a CPT, bem como a metodologia de atribuição de responsabilidades que envolvem a caracterização de cargas e

estimação de impedância de linha. Assim, mostrou-se que é possível recriar um retrato da rede analisada por um circuito equivalente completo composto desde a fonte de alimentação até a carga (equivalente do PAC). Além disso, a metodologia estabelece que as parcelas de potência compartilhada no PAC pelas cargas devam ser calculadas a partir da parcela fundamental de tensão e corrente, buscando-se atribuir um critério mais igualitário em relação à utilização de energia.

No próximo capítulo serão avaliados circuitos exemplos para demonstrar as equações aqui apresentadas. A ideia é a de esclarecer as definições referentes à CPT, bem como aspectos referentes à caracterização de carga e estimação da impedância de linha.

4. Aplicação dos conceitos da CPT

A seguir serão apresentados exemplos de análise de circuitos monofásicos com o objetivo de avaliar as parcelas propostas pela CPT, como energia reativa, o circuito equivalente de carga, as parcelas de correntes da CPT etc. Além disso, alguns exemplos também exploram os conceitos de caracterização de carga e estimação de impedância de linha, que fazem parte da metodologia de atribuição de responsabilidades que posteriormente será agregada à análise.

Em todos os exemplos a tensão de alimentação é de 127V eficaz e frequência de 60Hz. Onde se indica PAC nos circuitos, determina-se o ponto de medição de tensão e corrente. As simulações foram realizadas através do software PSIM e os códigos utilizados foram inseridos por um bloco ferramenta de linguagem C.

4.1. Exemplo 1

Seja o circuito da Figura 10.

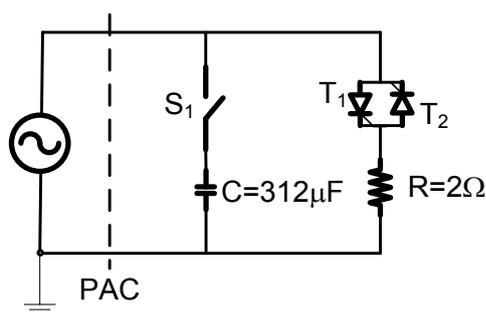


Figura 10 - Circuito do exemplo 1.

Fonte: Próprio autor.

O objetivo principal do primeiro exemplo é o de discutir o conceito da energia reativa W_r . Além disso, também será apresentado o circuito equivalente da carga conforme as definições da CPT.

A carga, composta por dois tiristores conectados em antiparalelo, são ligados em série com uma resistência ($R = 2\Omega$). No outro ramo há um capacitor ($C = 312\mu F$) controlado por uma chave liga/desliga ideal.

O circuito é analisado em duas etapas. Na primeira, com o ramo do capacitor aberto, os tiristores são chaveados quando a tensão se encontra nos ângulos de 120° (T1) e 300° (T2), permitindo que a resistência drene corrente elétrica, tanto no ciclo positivo como no negativo da tensão. Na segunda etapa, portanto, há a introdução do capacitor em paralelo com o primeiro ramo. As formas de onda resultantes são apresentadas na Figura 11.

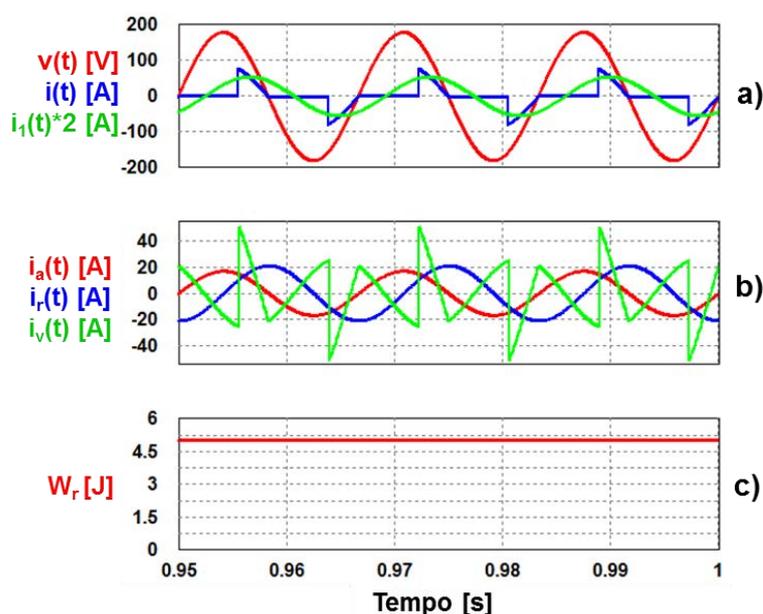


Figura 11 - a) tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – sem capacitor.

Como se pode notar, a corrente drenada pelo circuito é de característica não senoidal. Entretanto, aplicando a separação da corrente total do circuito, verifica-se que a corrente fundamental está atrasada da tensão de alimentação.

Olhando para as correntes decompostas da CPT pode-se verificar a presença de todas as parcelas, ou seja, ativa, reativa e residual. Ora, além de demonstrar o consumo útil através da presença da resistência e corrente residual pela não linearidade introduzida pelo tiristor, a CPT revela que o circuito apresenta energia reativa (“indutiva”), característica essa que não é óbvia.

Um questionamento que se pode levantar parte da natureza do circuito: afinal, deveria esse circuito apresentar energia reativa, uma vez que não há componentes armazenadores de energia? Essa questão nos remete diretamente à definição dessa parcela da CPT.

Classicamente, em sistemas senoidais, os reativos estão associados à presença de elementos armazenadores de energia que, por sua vez, possuem a característica intrínseca de atrasarem (indutor) ou adiantarem (capacitor) a corrente em relação à tensão de alimentação, devido aos campos elétricos e magnéticos gerados nessas cargas. Isso é um fenômeno físico inerente à natureza desses componentes. Já em um sistema não linear, como o circuito estudado, embora não apresente componentes armazenadores de energia, há a presença da energia reativa W_r . De fato, os fenômenos físicos mencionados acima não se relacionam um com o outro, mas ambos simbolizam um deslocamento de fase da tensão em relação à tensão aplicada. Nota-se que a energia reativa pode ser percebida no circuito devido à diferença de fase entre corrente e tensão nas parcelas harmônicas existentes (no caso apenas a fundamental foi utilizada). Com isso, a presença de W_r , como verificado nas equações da CPT, se reflete também na presença de potência reativa Q . Outro fato interessante de se verificar é que a energia reativa (caraterística indutiva, $W_r > 0$) gerada a partir desse circuito pode ser compensada por um capacitor – outra informação bastante não intuitiva. Assim, a partir da energia reativa W_r foi calculado o capacitor C para compensar os reativos na frequência fundamental (fator de potência unitário para 60Hz). Neste caso, o valor do capacitor resultou igual a $312\mu\text{F}$ e foi calculado conforme equação (3.15). As formas de onda depois da introdução do capacitor são apresentadas na Figura 12.

Assim, com a introdução do capacitor, observa-se que a energia reativa, bem com a corrente reativa são compensadas (Figura 12c) e (Figura 12b). Nesse mesmo contexto, nota-se que a corrente fundamental realmente entra em fase com a tensão após a inserção do capacitor (Figura 12a). Da corrente total restaram apenas as correntes ativa e residual (Figura 12b), que com a inserção do capacitor não se alteraram, corroborando o fato de que as parcelas de corrente decompostas da CPT

são ortogonais. Sendo assim, para compensar os distúrbios harmônicos restantes no circuito seria necessário, por exemplo, um filtro ativo de potência.

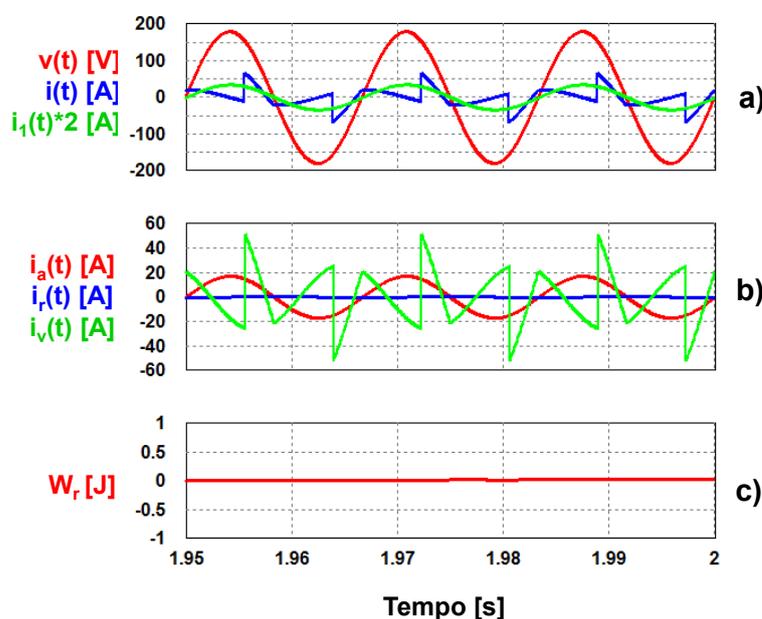


Figura 12 - a) tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – com capacitor.

Dessa forma, a energia reativa não relaciona somente a troca de energia entre a fonte e os componentes armazenadores de energia, mas tem um significado mais abrangente, ou seja, independente do que a promova (seja por campo eletromagnéticos presentes em indutores e capacitores, seja por controle de disparo de chaves eletrônicas), a energia reativa está relacionada com a defasagem entre tensão e corrente em cada frequência (como se pode verificar aqui pela componente fundamental através da série de Fourier). Portanto, a partir das definições da CPT, o circuito da Figura 10 pode ser representado por um circuito equivalente em paralelo ($W_r > 0$) contendo uma condutância G_e e uma reatidade B_e equivalentes, bem como uma fonte de corrente harmônica i_v . Isso explica, num outro ponto de vista, que com a introdução do capacitor, a reatidade equivalente é compensada. Os parâmetros da carga equivalente são apresentados na Figura 13. No tempo igual a 1s o capacitor é conectado ao circuito. Verifica-se que o capacitor compensa apenas os reativos, uma vez que G_e e i_v não são modificados com sua introdução (devido à ortogonalidade das parcelas de corrente). Ou seja, todas as componentes de corrente da CPT são desacopladas.

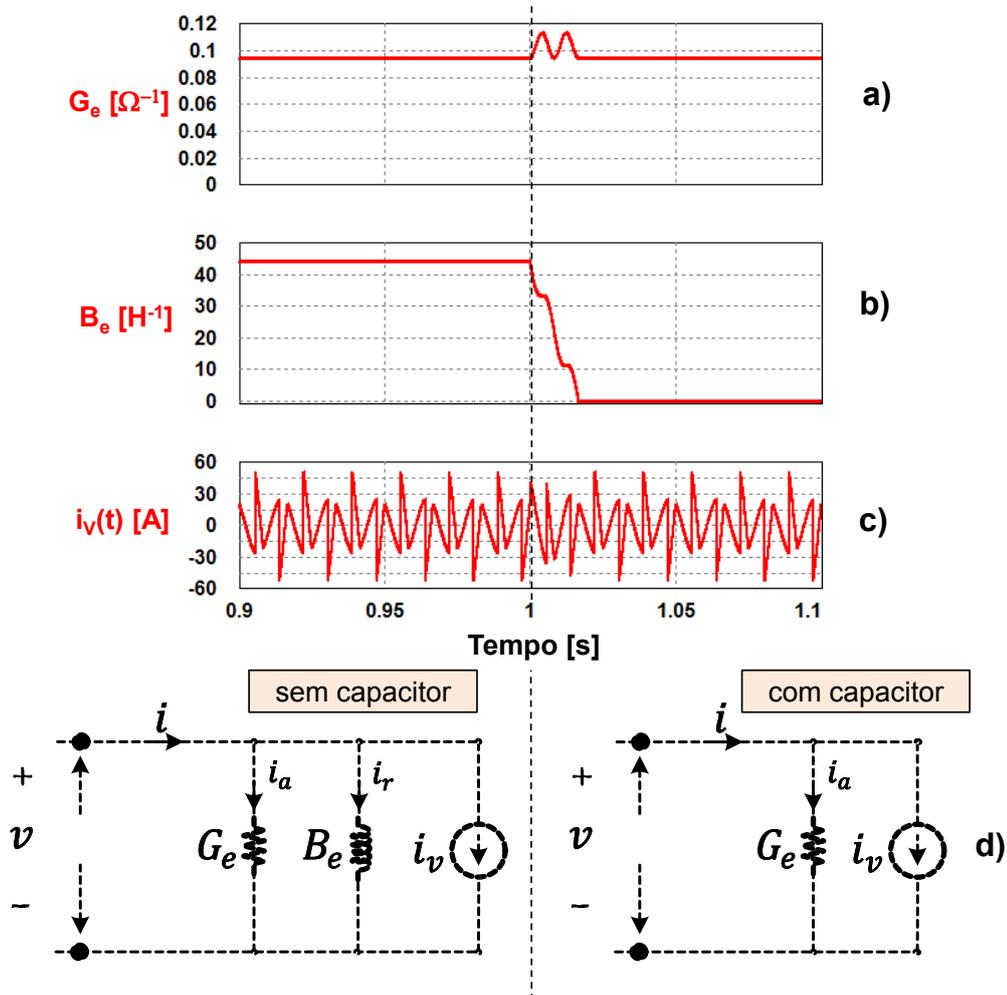


Figura 13 - a) Condutância equivalente; b) reatância equivalente, c) fonte de corrente harmônica e d) circuitos equivalentes de carga com e sem capacitor.

4.2. Exemplo 2

Seja o circuito da Figura 14.

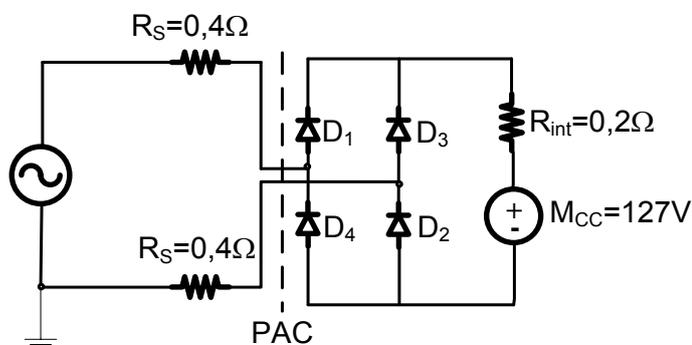


Figura 14 - Circuito do exemplo 2.

Fonte: Próprio autor.

O exemplo 2 apresenta uma carga composta por uma ponte H monofásica a diodos e na saída uma fonte de tensão CC ($M_{CC} = 127V$) e uma resistência interna ($R_{int} = 0,2\Omega$), representando o modelo ideal de um motor de corrente contínua. O objetivo desse circuito é o de debater novamente sobre os conceitos da CPT. Neste caso considera-se resistência de linha (ida e volta $0,8\Omega$).

As formas de onda são apresentadas na Figura 15.

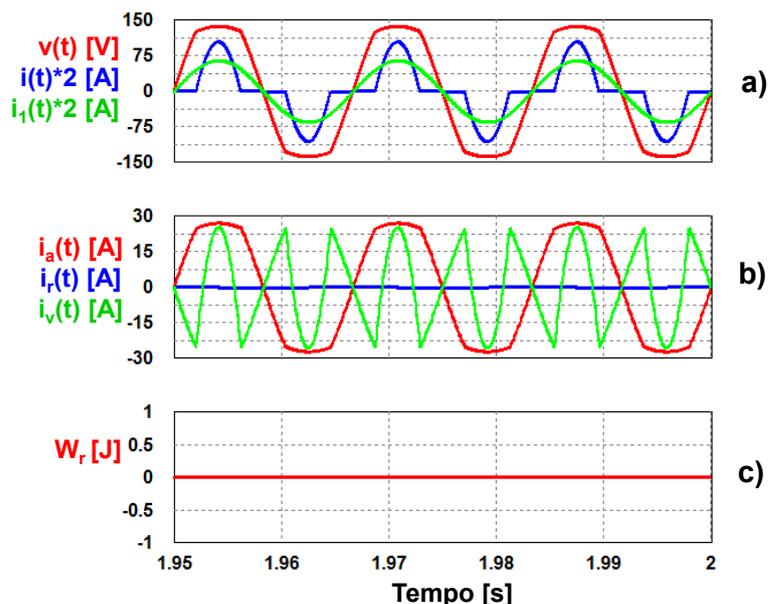


Figura 15 - a) tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa.

Verifica-se na Figura 15a que a forma de onda da corrente fundamental está em fase com a tensão de alimentação. Assim, por não haver defasagem entre tensão e corrente, conforme discutido anteriormente, a energia reativa é nula (Figura 15c). Esta afirmação pode ser confirmada olhando para as correntes da CPT na Figura 15b, e de fato nota-se que não há circulação de corrente reativa. Observa-se, portanto, apenas as correntes ativa e residual.

Pelo fato desse circuito apresentar a tensão no PAC não senoidal, pode-se aplicar a caracterização de cargas através das parcelas fundamentais de tensão e corrente medidas no PAC. Assim, pode-se caracterizar essa carga por uma condutância fundamental G_f , uma reatidade fundamental B_f e uma fonte de corrente harmônica j . Os parâmetros da caracterização são apresentados na Figura 16.

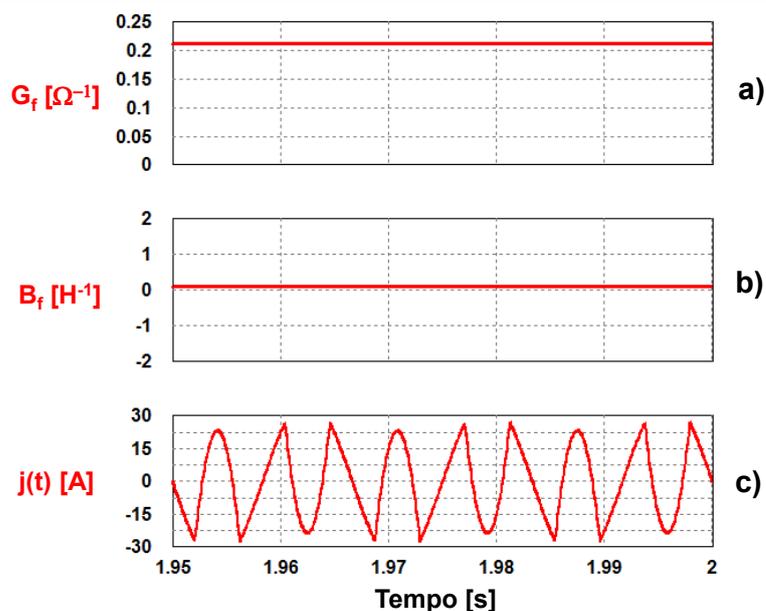


Figura 16 – Caracterização da carga: a) condutância fundamental; b) reatidade fundamental e c) fonte de corrente harmônica.

Nota-se que o circuito realmente não apresenta circulação de reativos (reatividade fundamental praticamente nula), sendo assim, ele pode ser caracterizado apenas pela condutância fundamental e pela fonte de corrente harmônica.

4.3. Exemplo 3

Seja o circuito da Figura 17.

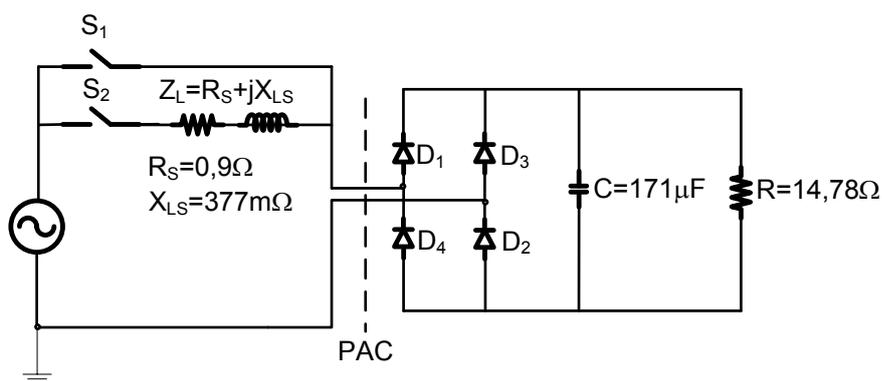


Figura 17 - Circuito do exemplo 3.

Fonte: Próprio autor.

Esse circuito é composto por um retificador de onda completa em ponte a diodos com filtro capacitivo. O circuito será contemplado em duas situações, ou seja, com e sem a consideração da impedância de linha (de característica RL). O objetivo, num primeiro momento (sem impedância de linha), é o de analisar a carga e apresentar a caracterização de carga através das componentes fundamentais de tensão e corrente. Além disso, com a introdução da impedância de linha, visa-se apresentar a estimativa da impedância de linha, uma vez que ela promove a distorção de tensão nos terminais da carga. As formas de onda da primeira etapa são apresentadas na Figura 18.

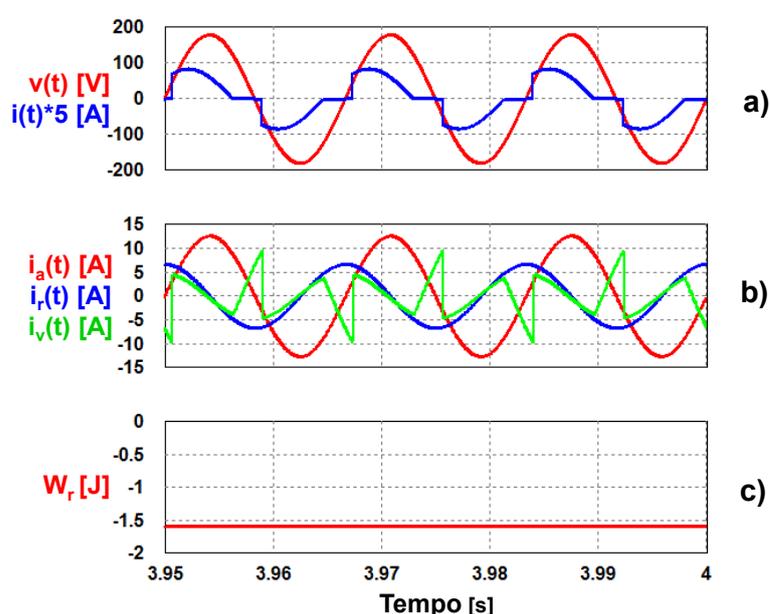


Figura 18 - a) Tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – sem impedância de linha.

Notoriamente, a corrente drenada pela carga apresenta um adiantamento em relação à tensão, comprovado por sua característica capacitiva. Esse fato também é verificado pela corrente reativa da CPT que está adiantada 90° em relação à corrente ativa. De acordo com a característica da carga, portanto a energia reativa é negativa. Assim, esta carga pode ser caracterizada por uma carga tipo fonte de tensão harmônica. Como esse circuito possui característica capacitiva ($W_r < 0$), esta carga pode ser caracterizada por um circuito série composto por uma resistência fundamental, uma capacitância fundamental e uma fonte de tensão harmônica. Os parâmetros da caracterização de carga são apresentados na Figura 19.

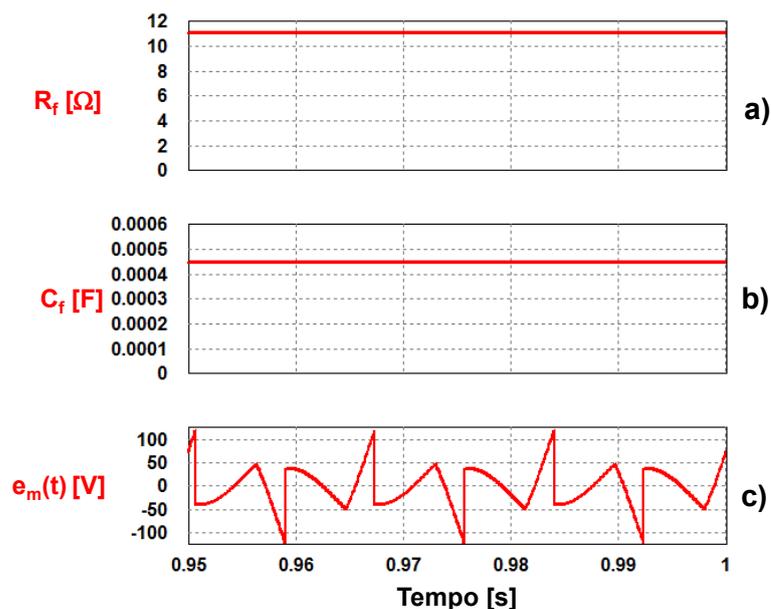


Figura 19 - a) Resistência fundamental, b) capacitância fundamental e c) fonte de tensão harmônica – sem impedância de linha.

Nota-se que $R_f = 11,08\Omega$, $C_f = 449,71\mu F$ e uma fonte de tensão harmônica com a forma de onda descrita em (Figura 19c) e valor eficaz $e_{m_{RMS}} = 40,89V$ são os parâmetros da caracterização da carga. A Figura 20 apresenta as formas de onda considerando a impedância de linha (5% de queda de tensão em Z_L).

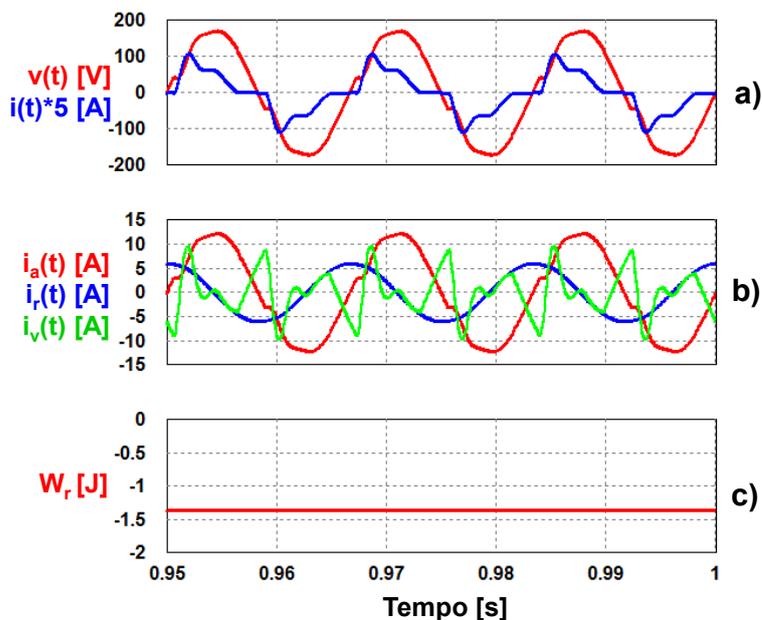


Figura 20 - a) Tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – com impedância de linha.

A introdução da impedância acarreta em aparente distorção de corrente e tensão pela introdução da impedância de linha. Com isso, há mudança nas formas de onda das correntes da CPT. A reatidade da carga apresenta maior relevância do que a reatidade provinda da impedância de linha, assim a energia reativa ainda se apresenta com característica capacitiva ($W_r < 0$), significando um modelo em série de caracterização de carga, apresentada na Figura 21.

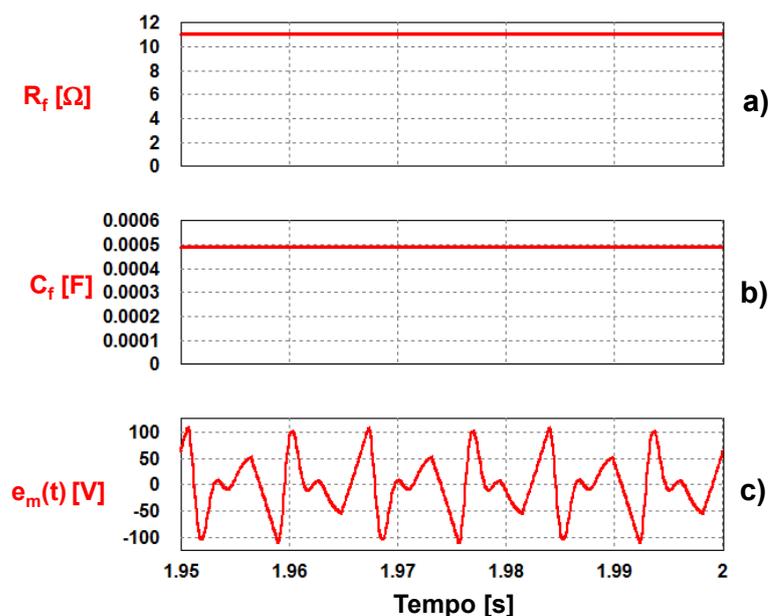


Figura 21 - a) Resistência fundamental, b) capacitância fundamental e c) fonte de tensão harmônica – com impedância de linha.

Os valores resultantes do modelo de caracterização da carga são $R_f = 11,12\Omega$, $C_f = 491,23\mu F$ e a uma fonte de tensão harmônica com a forma de onda descrita na Figura 21c), com valor eficaz $e_{m_{RMS}} = 51,10V$. Considerando o circuito equivalente apresentado no capítulo 3, a impedância é composta por R_s , X_{LS} e e_f . Os resultados da estimação são apresentados na Tabela 1 e na Figura 22.

Tabela 1-Estimação de impedância de linha (exemplo 3).

Parâmetro	Valor teórico	Valor estimado	Erro [%]
R_s [Ω]	0,9	0,9036	0,4
X_{LS} [Ω]	0,377	0,372	1,3
$e_{f_{RMS}}$ [V]	127	127,05	0,04

Conforme erro relativo calculado, os valores estimados apresentaram resultados aceitáveis comparados com os teóricos. A reatância X_{LS} apresentou erro de 1,3% (maior erro entre os parâmetros).

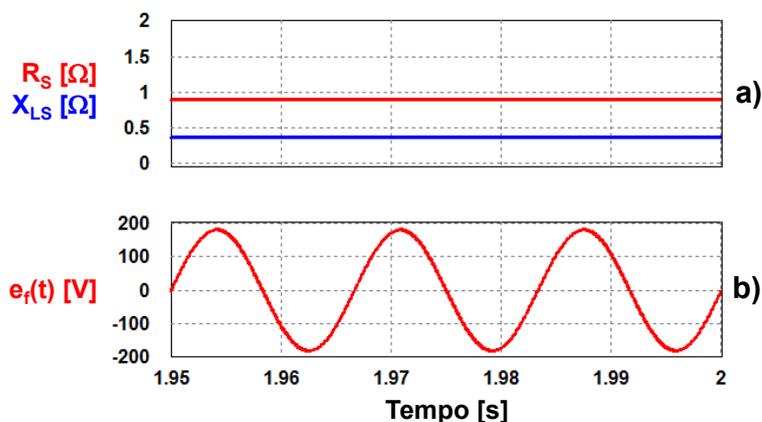


Figura 22 – Estimação da impedância de linha: a) resistência e indutância e b) tensão fundamental na fonte.

4.4. Exemplo 4

Seja o circuito da Figura 23.

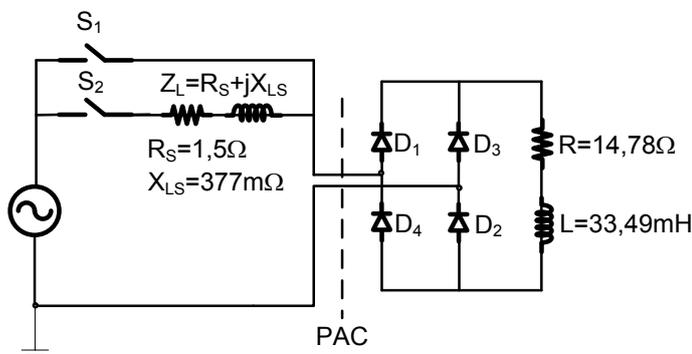


Figura 23 - Circuito do exemplo 4.

Fonte: Próprio autor.

Similarmente ao exemplo 3, esse circuito é composto por um retificador de onda completa em ponte a diodos, porém com filtro indutivo. O circuito é estudado conforme o exemplo 3, em duas etapas, ou seja, com e sem impedância de linha, tendo também por objetivo estudar a caracterização de carga e estimação de impedância de linha. As formas de onda considerando a primeira etapa são apresentadas na Figura 24.

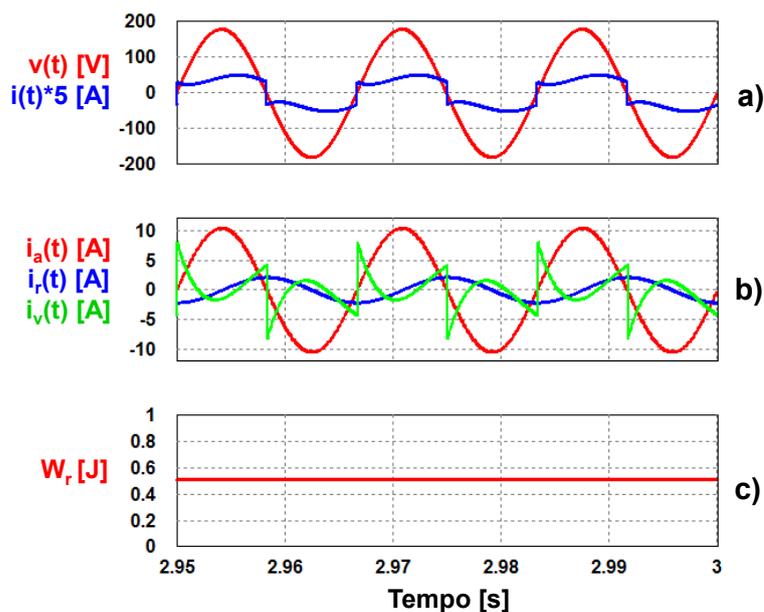


Figura 24 - a) Tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – sem impedância de linha.

Essa carga drena uma corrente bastante não linear, com característica quase de ser quadrada. Pode-se notar a corrente reativa atrasada em 90° (característica indutiva), portanto $W_r > 0$. A Figura 25 apresenta a caracterização de carga que apresenta uma condutância e reatância fundamentais e fonte de corrente harmônica j conectados em paralelo.

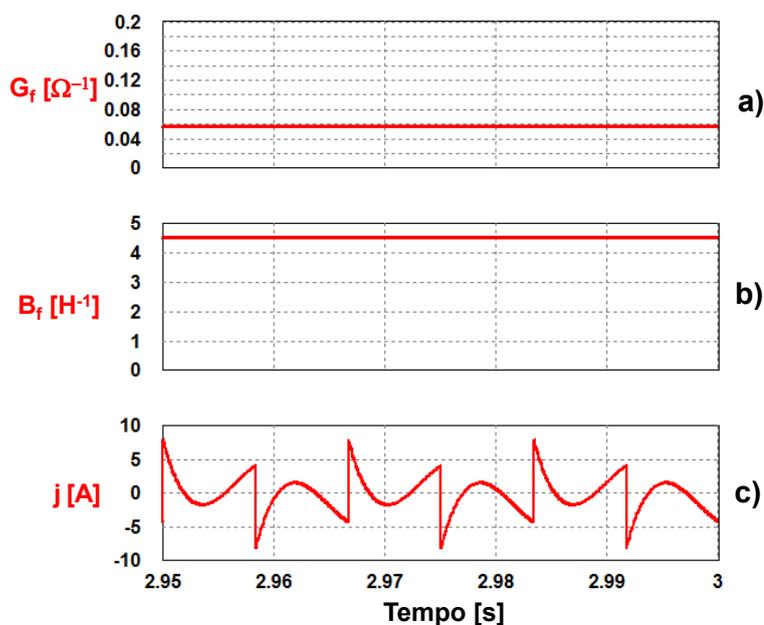


Figura 25 - a) Resistência fundamental, b) capacitância fundamental e c) fonte de tensão harmônica – sem impedância de linha.

Os valores obtidos são $G_f = 0,0579\Omega^{-1}$, $B_f = 4,53H^{-1}$ e a forma de onda da corrente j que apresenta valor eficaz igual a 2,60 A. Com a inserção da impedância de linha no circuito, obtêm-se as formas de onda conforme Figura 26.

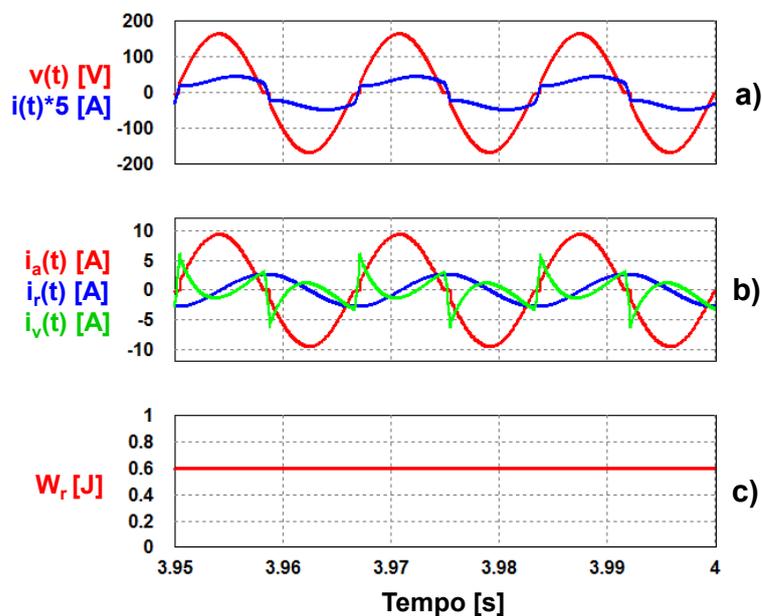


Figura 26 - a) Tensão, corrente e corrente fundamental; b) correntes da CPT e c) energia reativa – com impedância de linha.

A Figura 27 apresenta os parâmetros da caracterização da carga.

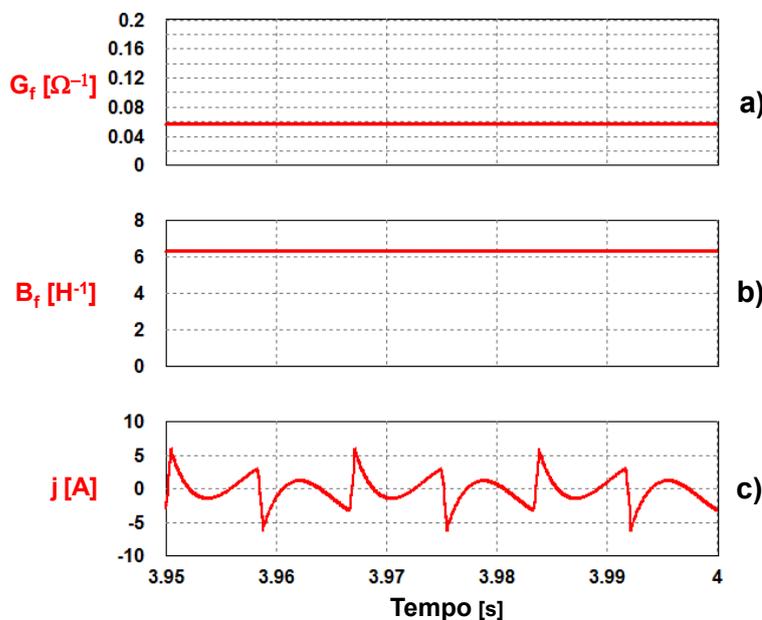


Figura 27 - a) Resistência fundamental, b) capacitância fundamental e c) fonte de tensão harmônica – com impedância de linha.

A tensão apresenta pequena distorção harmônica causada pela impedância de linha, mas alta distorção de corrente. De fato essa carga é caracterizada por ser do tipo fonte de corrente harmônica.

Conforme os resultados da caracterização de carga, após a inserção da impedância de linha obteve-se $G_f = 0,0571\Omega^{-1}$, $B_f = 6,35H^{-1}$ e a forma de onda da corrente j apresenta valor eficaz igual a 1,93 A. Nota-se um acréscimo dos reativos no circuito devido à inserção da impedância de linha, mas uma redução da corrente harmônica eficaz.

Por último, apresenta-se a estimativa da impedância de linha conforme Tabela 2 e Figura 28.

Tabela 2-Estimação de impedância de linha (exemplo 4).

Parâmetro	Valor teórico	Valor estimado	Erro [%]
R_s [Ω]	1,5	1,4968	0,2
X_{LS} [Ω]	0,377	0,360	4,5
$e_{f\text{RMS}}$ [V]	127	126,92	0,06

Considerando o erro relativo calculado, os valores estimados apresentaram resultados aceitáveis comparados com os teóricos. Entretanto, a reatância X_{LS} apresentou erro de 4,5% (maior erro entre os parâmetros). Esse erro pode estar relacionado à derivada da corrente harmônica para o cálculo da indutância da linha, conforme equação (3.45). Além disso, (PAREDES, 2012) já apontava tal dificuldade.

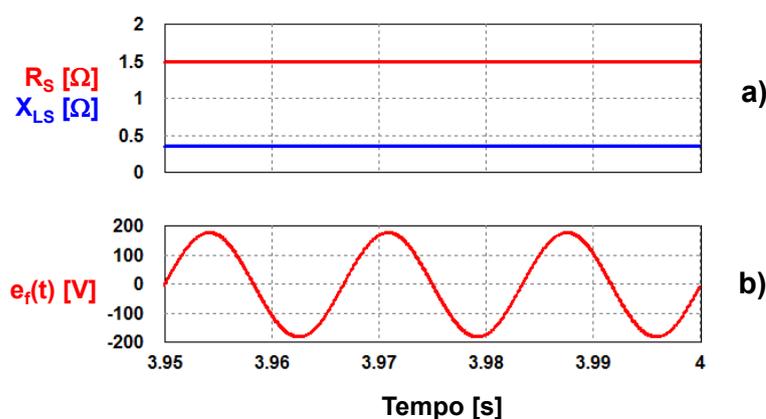


Figura 28 - Estimação da impedância de linha: a) resistência e indutância e b) tensão fundamental.

4.5. Conclusões preliminares

O presente capítulo apresentou alguns exemplos com o intuito de elucidar algumas das características da CPT, como energia reativa, caracterização de cargas e estimação de impedância de linha. Pode-se perceber que a energia reativa, em geral, está relacionada com a defasagem entre tensão e corrente. Além disso, os circuitos equivalentes da CPT e da caracterização de carga são influenciados pelo valor da energia reativa, ou seja, se positiva (característica indutiva) utiliza-se um circuito paralelo e, se negativa, utiliza-se um circuito série (característica capacitiva). Por fim, a estimação da impedância de linha foi apresentada em dois tipos de circuito, ou seja, do tipo fonte de tensão (exemplo 3) e fonte de corrente (exemplo 4) e obtiveram-se resultados expressivos e com erro aceitável, mostrando êxito na técnica. No próximo capítulo será abordado um estudo de caso com algumas topologias de carga conectadas ao PAC com o intuito de abordar de maneira mais abrangente a problemática proposta.

5. Avaliação da metodologia de atribuição de responsabilidades

O presente capítulo visa aplicar a metodologia de atribuição de responsabilidades sobre os distúrbios harmônicos em um modelo de baixa tensão proposto. Propôs-se, portanto, algumas cargas lineares e não lineares com a ideia de realizar o estudo de maneira sistemática. Parte-se então da análise das cargas através da CPT, para posteriormente apresentar a caracterização de carga e estimação da impedância de linha do modelo (equivalente Thévenin do modelo), permitindo, portanto, a aplicação da metodologia de atribuição de responsabilidades (PAREDES, 2012).

5.1. Modelo base proposto

Foi proposto um circuito elétrico com característica de rede de distribuição (baixa tensão, área residencial) a ser usado em todas as simulações. Ele consiste em uma fonte de tensão puramente senoidal (60Hz, 220V eficaz) conectada no primário de um transformador (sem regime de saturação), com as características descritas na Tabela 3. Esse transformador foi definido para uma potência nominal de 10kVA. Seu modelo equivalente é mostrado na Figura 29.

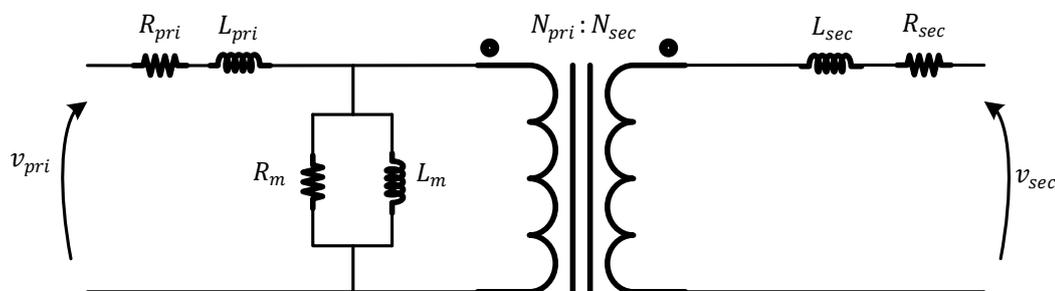


Figura 29 - Circuito equivalente do transformador utilizado no modelo.
Fonte: Próprio autor.

Tabela 3–Parâmetros equivalentes do transformador.

$R_{pri} [\Omega]$	0,052	$R_m [k\Omega]$	48,4
$L_{pri} [\mu H]$	415	$L_m [H]$	23,71
$R_{sec} [\Omega]$	0,052	N_{pri}	86
$L_{sec} [\mu H]$	415	N_{sec}	86

A tabela apresenta os valores das resistências e indutâncias do primário, do secundário e de magnetização do transformador, bem como o número de espiras de cada enrolamento. A presença do transformador nos permite simular um modelo mais realista, e mesmo com razão de transformação de 1:1, ele é parte importante do modelo, pois simula a impedância de linha do sistema. O fato de o transformador possuir uma relação de transformação unitária garante a mesma tensão de 220V tanto no primário quanto no secundário, em condições nominais de operação.

A rede modelada no trabalho é constituída por quatro cargas distintas, sendo duas cargas ditas lineares e duas não lineares. Elas foram projetadas para uma potência aparente de aproximadamente 2,5kVA cada uma, totalizando 10kVA (capacidade nominal do transformador). Uma carga resistiva e uma carga RL série com um capacitor em paralelo são as cargas lineares. Um retificador de onda completa a diodos com filtro capacitivo (RC paralelo) e um retificador de onda completa a diodos com filtro indutivo (RL série) são as duas cargas não lineares. Elas são conectadas em paralelo e o nó de conexão das cargas define o ponto de acoplamento comum (PAC). A primeira é uma carga puramente resistiva (R). Ela pode representar no cenário residencial um chuveiro ou ferro de passar roupa.

Tabela 4–Valor teórico da carga R (carga 1).

$R_1 [\Omega]$	19,36
----------------	-------

A segunda é uma carga de característica basicamente reativa. Ela corresponde a uma carga RLC. Contudo, no trabalho, dividiu-se essa carga em dois estágios distintos. Primeiramente, temos o RL série projetado para fator de potência de 0,6 (indutivo) e potência aparente de 2,5kVA. Conectado a essa carga há uma chave ideal que permite a entrada, num segundo momento (segundo estágio), de um capacitor em paralelo com o RL série. Esse capacitor tem o intuito de corrigir o

fator de potência dessa carga para 0,92 indutivo na fundamental. Em uma residência, raramente se encontra uma carga com esse tipo de comportamento. Entretanto, pequenas empresas (barracões) equipadas com tornos, fresadoras, furadeiras de bancada, ou seja, algumas máquinas operatrizes que possuam um motor de indução sem controle de partida (ou seja, com partida direta), têm esse tipo de característica.

Tabela 5–Valores teóricos para carga RL//C (carga 2).

R_2 [Ω]	11,60
L_2 [mH]	41,082
C_2 [μ F]	74,714

A terceira carga é composta por um retificador de onda completa a diodos em ponte com filtro capacitivo, ou seja, um RC em paralelo na saída do retificador. Essa carga é considerada do tipo fonte de tensão harmônica FTH e, segundo (POMILIO, 2006), essa carga não linear tem vasta abrangência no uso doméstico e comercial, apresentando um comportamento que evidencia uma corrente com alto conteúdo harmônico (alto DHT_1) e baixo fator de potência. Alguns exemplos são computadores, reatores eletrônicos sem correção de fator de potência, lâmpadas fluorescentes compactas, carregadores de bateria de celulares e notebooks, aparelhos de TV, som, aparelhos micro-ondas etc. Além dos componentes descritos na Tabela 6, a carga apresenta quatro diodos ideais conectados em ponte H, caracterizando o retificador.

Tabela 6–Valores teóricos para carga FTH (carga 3).

R_3 [Ω]	55
C_3 [μ F]	1000

Já a quarta carga é composta por um retificador de onda completa a diodos em ponte com filtro indutivo, ou seja, um RL série na saída do retificador. Essa carga é considerada do tipo fonte de corrente (FCH) e, segundo (POMILIO, 2006), essa carga não linear tem alta abrangência não apenas em ambientes industriais, mas também em comerciais e residenciais, sendo que alguns exemplos são refrigeradores, máquinas de lavar, aparelho de ar condicionado, bombas, dentre outros.

Tabela 7–Valores teóricos para carga FCH (carga 4).

R_4 [Ω]	17,92
L_4 [mH]	41,082

Todas as cargas são inseridas na rede por chaves do tipo liga/desliga. O circuito elétrico da rede modelada é apresentado na Figura 30.

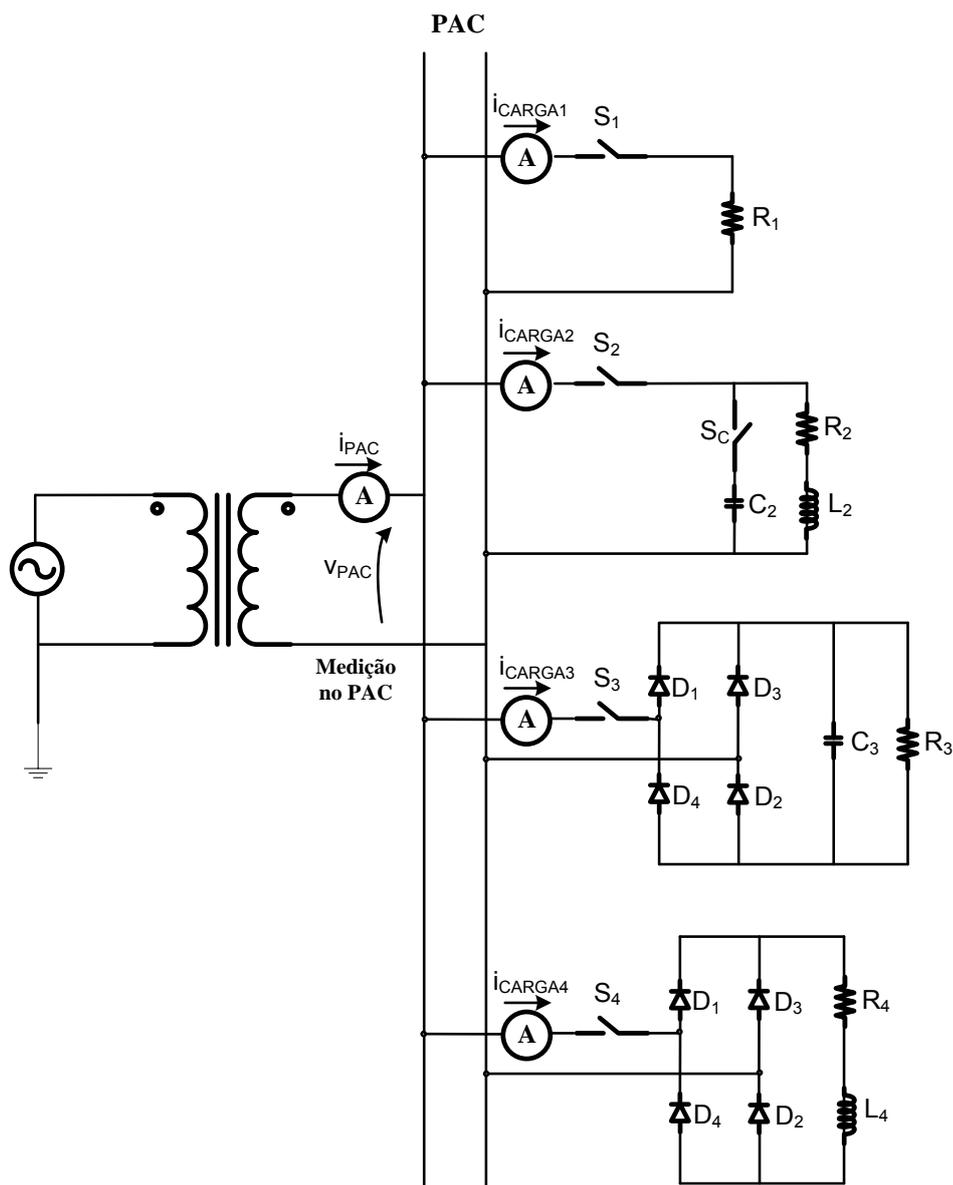


Figura 30 – Circuito elétrico da rede modelada.

Fonte: Próprio autor.

Todas as simulações foram feitas no Software PSIM e os códigos relacionados à CPT e à metodologia de atribuição de responsabilidades foram inseridas no software através da ferramenta de programação em linguagem C.

Inicialmente, as cargas foram estudadas separadamente e seus comportamentos foram avaliados em regime permanente. As cargas foram conectadas e desconectadas do PAC na seguinte sequência:

1. Carga resistiva (carga R);
2. Carga RL série (carga RL) e, num segundo momento, conecta-se o capacitor formando a carga RL série com C_2 paralelo (carga RL//C);
3. A carga tipo fonte de tensão (carga FTH), ou seja, retificador de onda completa a diodos com filtro capacitivo;
4. A carga tipo fonte de corrente (FCH), ou seja, retificador de onda completa a diodos com filtro indutivo.

Como resultado buscou-se avaliar os valores das potências da CPT, fatores de conformidade de carga (fator de potência, fator de reatividade e fator de não linearidade), tensão e corrente medidos no PAC, correntes decompostas da CPT e DHTs de tensão e corrente de cada carga. Além disso, os valores dos parâmetros equivalentes da carga da CPT, ou seja, G_e , B_e e i_v são apresentados. Portanto, além de verificar o comportamento de cada carga no sistema, busca-se ainda traçar alguns comentários pertinentes das análises.

Após esta primeira etapa, as cargas foram estudadas de modo que elas são conectadas ao PAC uma a uma em determinados períodos de tempo (até cada etapa estabelecer um regime permanente). Como compartilham do mesmo ponto de acoplamento (PAC) as cargas são conectadas entre si em paralelo. Essa estratégia visa criar diferentes cargas equivalentes ao passo que elas são conectadas ao PAC. Nesta etapa as cargas foram conectadas conforme seguinte sequência:

1. Carga R (resistiva);
 2. Cargas R+RL (resistiva + RL série);
 3. Cargas R+RL//C (resistiva + RL série com capacitor paralelo),
-

-
4. Cargas R+RL//C+FTH (resistiva + RL série com capacitor paralelo + retificador de onda completa com filtro capacitivo);
 5. Cargas R+RL//C+FTH+FCH (resistiva + RL série com capacitor paralelo + retificador de onda completa com filtro indutivo).

Nessa segunda etapa além da medição de corrente e tensão realizada no PAC, faz-se a medição de corrente em cada ramo de carga separadamente, como pode ser verificado no circuito da Figura 30. Obviamente, os resultados são colhidos assim que o circuito atinge regime permanente de operação. Esta estratégia de análise, portanto, visa observar não apenas o comportamento global dos circuitos equivalentes gerados no PAC, mas como a inserção das cargas lineares e não lineares afetam cada uma separadamente.

Da mesma forma que na etapa anterior, apresentam-se aqui os valores das potências da CPT, fatores de conformidade de carga, tensão e corrente, correntes derivadas da CPT e DHTs de tensão e corrente. Além disso, como as cargas não lineares provocam distorções no sistema elétrico, os valores de G_f , B_f e j relacionados à caracterização das cargas são apresentados juntamente com os parâmetros equivalentes da CPT, proporcionando uma comparação entre esses parâmetros.

Já a terceira etapa avança no estudo do compartilhamento de responsabilidades em circuitos elétricos monofásicos. Para tanto, todas as cargas são conectadas juntas ao PAC permitindo estimar o circuito equivalente de impedância de linha e realizar a caracterização dessa carga equivalente, tornando possível a aplicação da metodologia de atribuição de responsabilidades conforme descrito no capítulo 3, utilizando o circuito equivalente completo para o estudo. Assim, a ideia é a de atribuir a responsabilidade pela geração de harmônicos através das parcelas de potência resultante de cada carga, uma vez que a tensão no PAC apresenta apenas a componente fundamental v_f .

5.2. Resultados e análise dos dados

A ideia central dessa seção é a de realizar a análise dos resultados obtidos em cada simulação, traçar comentários e possíveis conclusões em relação ao comportamento das cargas em duas etapas distintas: cargas separadas e cargas conectadas juntas.

5.2.1. Cargas separadas

O intuito de simular as cargas separadas parte da intenção de se conhecer o comportamento de cada uma de forma isolada, buscando criar um critério de comparação, já que posteriormente as cargas serão conectadas em paralelo. Para tanto, são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente de cada carga no PAC, além das potências, fatores de conformidade de carga, correntes decompostas da CPT e DHTs (tensão e corrente). Ademais, são apresentados e discutidos os parâmetros equivalentes da carga pela CPT.

5.2.1.1. Carga R

Aqui apenas a chave S1 é fechada e a carga resistiva é conectada ao sistema elétrico. As formas de onda de tensão e corrente são apresentadas na Figura 31.

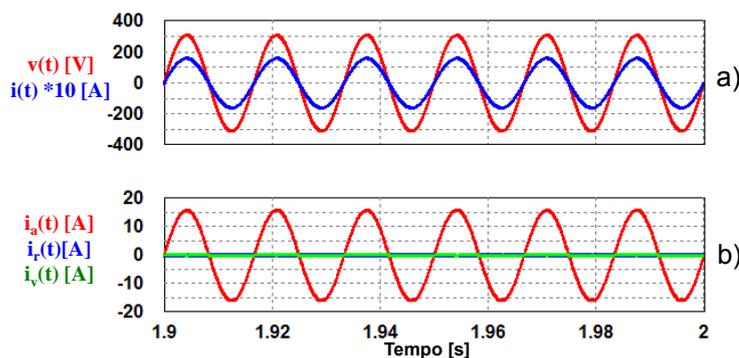


Figura 31 – Formas de onda da carga R: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.

Como esperado, essa carga apresenta a corrente sempre em fase com a tensão aplicada em seus terminais, garantindo assim fator de potência unitário. Esse fato garante que toda energia cedida à carga seja transformada em trabalho útil, ou

seja, toda potência dissipada pela carga é vista como potência ativa. Isso pode ser identificado nas formas de onda das correntes da CPT. Toda corrente drenada pela carga é de característica ativa ($i = i_a$). Os resultados colhidos dos termos de potência, corrente e fatores de conformidade da CPT são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga R.

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2472,63	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	218,78
	P [W]	2472,63		\hat{V} [Vs]	0,58
	Q [VAR]	0,00		I [A]	11,30
	W_r [J]	0,03	Correntes da CPT	I_a [A]	11,30
	D [VA]	0,00		I_r [A]	0,00
λ	1,00	I_v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ_Q	0,00	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	0,00
	λ_D	0,00		DHT _i [%]	0,00

Como descrito acima, a potência drenada por essa carga é de característica puramente ativa. Com isso, a potência aparente é igual à potência ativa ($A = P$). Assim, os valores das potências reativa Q e residual D são nulos, assim como os DHTs. Os fatores de conformidade da carga apresentam características relacionadas a uma carga puramente resistiva, ou seja, o fator de reatividade é nulo e o fator de não linearidade aponta que, de fato, não há corrente ou potência residual. Neste caso, como não há distorção de tensão (tensão senoidal), a modelagem de carga é realizada mediante os valores equivalentes da CPT. A Tabela 9 apresenta os parâmetros (valores) estimados da carga.

Tabela 9 – Parâmetros equivalentes estimados para a carga R.

Parâmetros equivalentes da Carga – CPT	G_e [S]	0,0517
	B_e [H ⁻¹]	0,0000
	$I_{v\ rms}$ [A]	0,0000

Pela CPT verifica-se que apenas a condutância equivalente G_e do circuito é calculada (uma vez que a carga é puramente resistiva). Além disso, devido à tensão ser praticamente senoidal, este valor é exatamente igual ao valor teórico ($G_e = 1/R_1$). Neste caso, o valor teórico do resistor usado na simulação conforme a Tabela 4 é de $19,36\Omega$ ($1/19,36\Omega = 0,05165\Omega^{-1}$). O erro da condutância equivalente é irrisório (0,097%). Portanto, o modelo equivalente da carga puramente resistiva pode ser considerado satisfatório.

5.2.1.2. Carga RL série

Para este caso, a chave S1 é aberta e a chave S2 é fechada, assim a carga RL série é conectada ao modelo. As formas de onda de tensão e corrente são apresentadas na Figura 32.

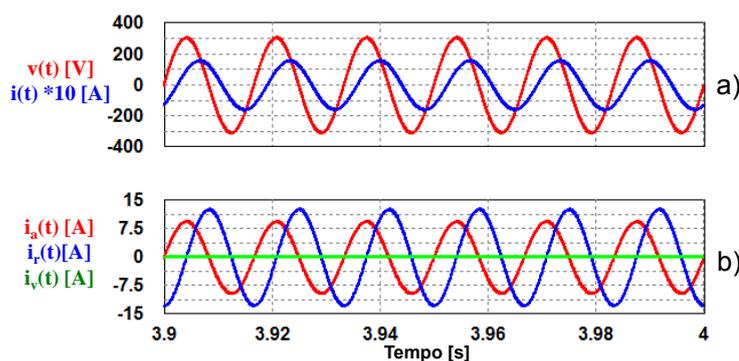


Figura 32 - Formas de onda da carga RL: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.

Como esperado, essa carga apresenta a corrente defasada em relação à tensão. Dessa forma, o fator de potência não mais é unitário como no caso resistivo. Esse comportamento intrínseco da carga indutiva reflete na presença de energia reativa no circuito. De fato, a característica reativa também é identificada nas formas de onda das componentes de correntes da CPT. Neste caso, a corrente drenada pela carga contém parcelas ativa i_a e reativa i_r . Além disso, a forma de onda da corrente ativa é mantida igual à da tensão (proporcionalidade) e a corrente reativa i_r é defasada de 90° em relação à corrente ativa i_a . Os demais resultados colhidos da CPT são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga RL.

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2422,19	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	216,48
	P [W]	1452,06		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VAr]	1938,69		I [A]	11,19
	W_r [J]	5,17	Correntes da CPT	I_a [A]	6,71
	D [VA]	0,03		I_r [A]	8,96
λ	0,60	I_v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ_Q	0,80	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	0,00
	λ_D	0,00		DHT _i [%]	0,00

Pela característica indutiva da carga (RL), observa-se a presença das potências ativa P e reativa Q no circuito, o que também pode ser visto no fator de reatividade e fator de potência. Já o fator de não linearidade aponta que não há corrente ou potência residual circulando no circuito. Apresenta-se na Tabela 11 a estimativa dos parâmetros equivalentes da carga através da CPT.

Tabela 11 - Parâmetros equivalentes estimados para a carga RL

Parâmetros equivalentes da Carga – CPT	G_e [S]	0,0310
	B_e [H ⁻¹]	15,5948
	$I_{v\ rms}$ [A]	0,0001

Verifica-se que, de acordo com a natureza do circuito, a condutância equivalente G_e e a reatividade equivalente B_e são as características mais relevantes no circuito e não há corrente residual devido a não existência de componentes harmônicas. Percebe-se, através do circuito equivalente da CPT, G_e e B_e ($1/G_e$ em paralelo com $X_e = 2\pi f/B_e$) resultam em uma carga com os seguintes valores de $R = 11,601\Omega$ e $L = 41,060mH$ (R em serie com L). Considerando, a partir desses valores, uma impedância calculada na frequência da rede ($Z = 11,601 + j15,4793\Omega$),

obtém-se o fator de deslocamento ($FP_f = 0,60 = \cos \phi$). Pela Tabela 10 verifica-se que os fatores de potência e de reatividade medidos valem 0,60. Assim, conforme na Tabela 5, o resistor e indutor estimados apresentam valores bem próximos aos valores teóricos ($R_2 = 11,60\Omega$ e $L_2 = 41,082mH$) usados na simulação. Portanto, os valores representaram uma boa estimativa da carga. O fato dos valores equivalentes serem muito próximos dos valores teóricos é resultado da característica senoidal da tensão. Assim, neste caso, não há necessidade de utilizar a metodologia de caracterização de carga.

5.2.1.3. Carga RL série com capacitor em paralelo (RL//C)

Neste caso, o capacitor C foi conectado mediante o fechamento da chave S_C , resultando em uma carga RL série em paralelo com o capacitor. As formas de onda de tensão e corrente são apresentadas na Figura 33.

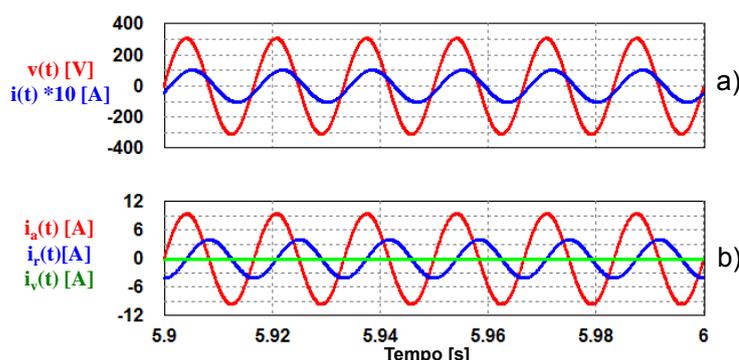


Figura 33 - Formas de onda da carga RL//C: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.

Essa carga apresenta comportamento similar à carga RL série, uma vez que sua característica ainda é indutiva. A ideia foi a de utilizar o capacitor como compensador dos reativos da carga RL série buscando elevar o fator de potência. Fazendo a comparação, então, com a carga analisada anteriormente (RL) - que apresentava fator de potência de aproximadamente 0,6 indutivo -, vê-se que a introdução do capacitor proporciona uma atenuação da corrente total do circuito, o que culmina na redução da potência reativa. Além disso, o ângulo de fase também diminui (mais próximo à fase da tensão) o que resultou no aumento do fator de

potência. Estas características também podem ser identificadas nas formas de onda das correntes da CPT.

Enfim, como o capacitor é um elemento armazenador de energia que garante a troca de energia reativa com o indutor, a introdução desse dispositivo proporciona uma espécie de alívio para fonte de alimentação no fornecimento total dos reativos à carga, o que se observa também na diminuição da potência aparente A e potência reativa Q . Com isso o fator de potência é corrigido para 0,92 indutivo (vide Tabela 12), que é justamente o valor de referência segundo norma vigente (ANEEL, 2010). Cabe o comentário de que o capacitor foi projetado para compensação passiva da componente fundamental ($\cos \phi = 0,92$). Como aqui não há componentes harmônicas na tensão, a compensação ocorre conforme esperado. Os resultados colhidos da CPT são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga RL//C.

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	1605,98	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	218,37
	P [W]	1477,52		\hat{V} [Vs]	0,58
	Q [VAr]	629,39		I [A]	7,35
	W_r [J]	1,70	Correntes da CPT	I_a [A]	6,77
	D [VA]	0,06		I_r [A]	2,88
λ	0,92	I_v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ_Q	0,39	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	0,00
	λ_D	0,00		DHT _i [%]	0,00

O fator de reatividade responde à presença de reativos. Já o fator de não linearidade aponta que não há corrente ou potência residual com relevância ao circuito (de fato as cargas são lineares e a tensão de alimentação é senoidal).

Apresenta-se na Tabela 13 os parâmetros equivalentes da carga através das definições da CPT. Como a energia reativa ainda é positiva, o circuito tem

característica indutiva e o circuito equivalente de carga apresenta a mesma configuração paralela.

Tabela 13 – Parâmetros equivalentes estimados para a carga RL//C.

Parâmetros equivalentes da Carga – CPT	G_e [S]	0,0310
	B_e [H^{-1}]	4,9755
	$I_{v\ rms}$ [A]	0,0000

Verifica-se que a carga (RL//C) apresenta condutância equivalente G_e similar ao caso anterior (carga RL), porém a reatidade equivalente B_e é diferente. Neste caso, do circuito equivalente da CPT ($1/G_e$ em paralelo com $X_e = 2\pi f/B_e$), G_e e B_e resultam em uma estimativa de $R = 27,3083\Omega$ e $L = 32,4268mH$. Considerando, a partir desses valores, uma impedância calculada na frequência da rede ($Z = 27,3083 + j11,6262\Omega$)⁴ obtém-se o fator de deslocamento ($\cos \phi$) $FD = FP_f = 0,92$.

Pela Tabela 12 verifica-se que o fator de potência e fator de reatidade medidos valem, de fato, 0,92. Assim, o resistor e indutor estimados garantem um circuito equivalente com uma característica equivalente à carga real simulada. Conforme Tabela 5, o resistor e o indutor equivalentes estimados apresentam valores próximos aos valores equivalentes teóricos (R_{2L_2}/C_2 , $R_{2e} = 27,3204\Omega$ e $L_{2e} = 32,3944mH$). Novamente, o fato dos valores equivalentes serem muitos próximos dos valores teóricos é devido ao fato da tensão ser senoidal.

⁴ Para uma carga RL//C pode-se calcular a impedância complexa equivalente: $Z_e = R_e + jX_e \rightarrow R_e = \frac{R}{(-\omega^2 LC + 1)^2 + (\omega RC)^2} [\Omega]$ e $X_e = \omega \frac{(-R^2 C - \omega^2 L^2 C + L)}{(-\omega^2 LC + 1)^2 + (\omega RC)^2} [\Omega]$. Nota-se que os elementos armazenadores de energia influenciam não apenas nos reativos, mas no consumo ativo da carga também.

5.2.1.4. Carga tipo fonte de tensão (FTH)

A carga tipo fonte de tensão foi conectada ao circuito mediante o fechamento da chave S3 e a abertura das chaves S1 e S2. As formas de onda de tensão e corrente são apresentadas na Figura 34.

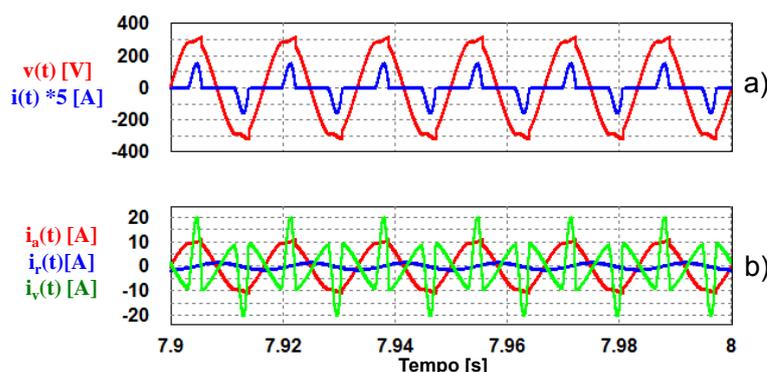


Figura 34 – Formas de onda da carga FTH: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.

As formas de onda de tensão e corrente apresentam uma característica bastante distante de uma onda puramente senoidal, principalmente a corrente. De fato, essa carga drena uma corrente com alto conteúdo harmônico. Isso também pode ser notado nas formas de onda das correntes da CPT. De fato, a corrente residual i_r tem um papel bastante relevante nessa carga. A corrente ativa i_a , como comentado, apresenta forma de onda idêntica à da tensão (proporcionalidade) e, além disso, estão sempre em fase. A corrente reativa i_r apresenta baixa amplitude. Fato notório é que, devido ao seu equacionamento, i_r sempre apresenta forma de onda senoidal com 90° de defasagem em relação à corrente ativa. De certa forma, deve-se fazer uma atribuição e computar toda a responsabilidade pelos distúrbios à carga, uma vez que a impedância de linha é um elemento intrínseco ao circuito estudado. A questão maior é quando essa carga está conectada em paralelo com outras dividindo o mesmo PAC. A partir do momento que a tensão nesse ponto de acoplamento entre as cargas contém harmônicas, todas as cargas compartilharam dos efeitos provindos desse ponto. Por hora, analisaremos o que acontece apenas nessa carga em específico. Os resultados colhidos são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga FTH.

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2476,85	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	219,20
	P [W]	1620,77		\hat{V} [Vs]	0,58
	Q [VAR]	227,61		I [A]	11,30
	W_r [J]	0,69	Correntes da CPT	I_a [A]	7,40
	D [VA]	1859,07		I_r [A]	1,04
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,65	Distorção Harmônica Total	I_v [A]	8,48
	λ_Q	0,14		DHT _v [%]	5,71
	λ_D	0,75		DHT _i [%]	112,08

De fato, como podemos verificar, a DHT_i é aproximadamente 112% o que promove um DHT_v de 5,7%. A potência residual D é bastante relevante nessa carga, representando alto valor de corrente residual $I_v = 8,48A$ e fator de não linearidade $\lambda_D = 0,75$ (mostrando alto conteúdo harmônico no circuito). Assim, a carga demonstra um baixo fator de potência $\lambda = 0,65$. O fator de reatividade apresenta baixo valor referente aos reativos do circuito. Nota-se que o fator de não linearidade tem alta influencia no baixo fator de potência.

Apresentam-se, a seguir, os parâmetros equivalentes da carga através das definições da CPT. Como a energia reativa é positiva, o circuito tem característica indutiva e o circuito equivalente de carga pode ser representado por um circuito paralelo ($G_e // B_e //$ fonte de corrente harmônica) contendo uma resistência, indutância e uma fonte de corrente harmônica, os valores desse circuito equivalente são mostrados na Tabela 15. Esse fato acontece justamente pela interação da impedância de linha com o circuito. Nota-se o alto valor de corrente harmônica no circuito equivalente.

Tabela 15 - Parâmetros equivalentes estimados para a carga FTH.

Parâmetros equivalentes da Carga CPT	G_e [S]	0,0338
	B_e [H ⁻¹]	1,7901
	$I_{v\ rms}$ [A]	8,4834

5.2.1.5. Carga tipo fonte de corrente (FCH)

A carga tipo fonte de corrente foi conectada ao sistema elétrico mediante a abertura das chaves S1, S2 e S3 e o fechamento da chave S4. As formas de onda de tensão e corrente são apresentadas na Figura 35.

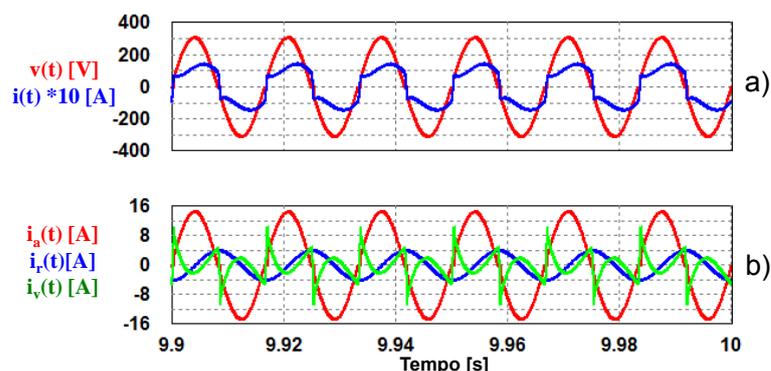


Figura 35 – Formas de onda da carga FCH: a) tensão e corrente, b) componentes de corrente decompostas da CPT.

Como se pode notar, a corrente é bastante não linear, se distanciando de uma onda senoidal o que acarreta em uma corrente com conteúdo harmônico relevante. Isso pode ser notado nas formas de onda das correntes (tanto a medida quanto a da CPT). Apesar da parcela residual de corrente i_v ser bastante evidente, a corrente ativa i_a é a que apresenta maior valor eficaz dentre as correntes da CPT. Isso se mostra evidente nas potências da CPT. A Tabela 16 apresenta os resultados da simulação para a carga FCH.

Tabela 16 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga FCH.

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2427,79	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	218,11
	P [W]	2251,27		\hat{V} [Vs]	0,58
	Q [VAR]	623,64		I [A]	11,13
	W_r [J]	1,69	Correntes da CPT	I_a [A]	10,32
	D [VA]	661,07		I_r [A]	2,86
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,93	Distorção Harmônica Total	I_v [A]	3,03
	λ_Q	0,27		DHT _v [%]	3,56
	λ_D	0,27		DHT _i [%]	27,53

Pode-se verificar que a potência ativa, em comparação com as outras parcelas de potência da CPT, nessa carga em especial, apresenta uma participação bastante grande, influenciando em seu alto fator de potência, aproximadamente 0,93 indutivo. O fator de reatividade λ_Q aponta a baixa presença de reativos e, o fator de não linearidade, a presença de corrente residual no circuito.

Apresenta-se, na Tabela 17, a estimativa dos parâmetros equivalentes da carga através da CPT. Da mesma forma que a carga anterior, como a energia reativa é positiva, o circuito tem característica indutiva e a carga pode ser representada pela mesma configuração da carga anterior ($G_e // B_e //$ fonte de corrente harmônica i_v).

Tabela 17 - Parâmetros equivalentes estimados para a carga FCH.

Parâmetros equivalentes da Carga - CPT	G_e [S]	0,0473
	B_e [H ⁻¹]	4,9464
	$I_{v\ rms}$ [A]	3,0313

5.2.1.6. Comentários Gerais

A Figura 36 apresenta os parâmetros equivalentes da CPT para cada carga simulada. Vale ressaltar que o valor eficaz de corrente residual é apontado para i_v no retângulo cinza (apenas para fins de visualização do resultado), uma vez que a proposta da CPT propõe a existência de uma fonte de corrente harmônica tal qual i_v . A forma de onda de i_v é também mostrada com detalhes na imagem. Percebe-se de forma clara o efeito do capacitor na redução dos reativos (carga RL//C), bem como ao fato das duas cargas FTH e FCH apresentarem corrente residual i_v .

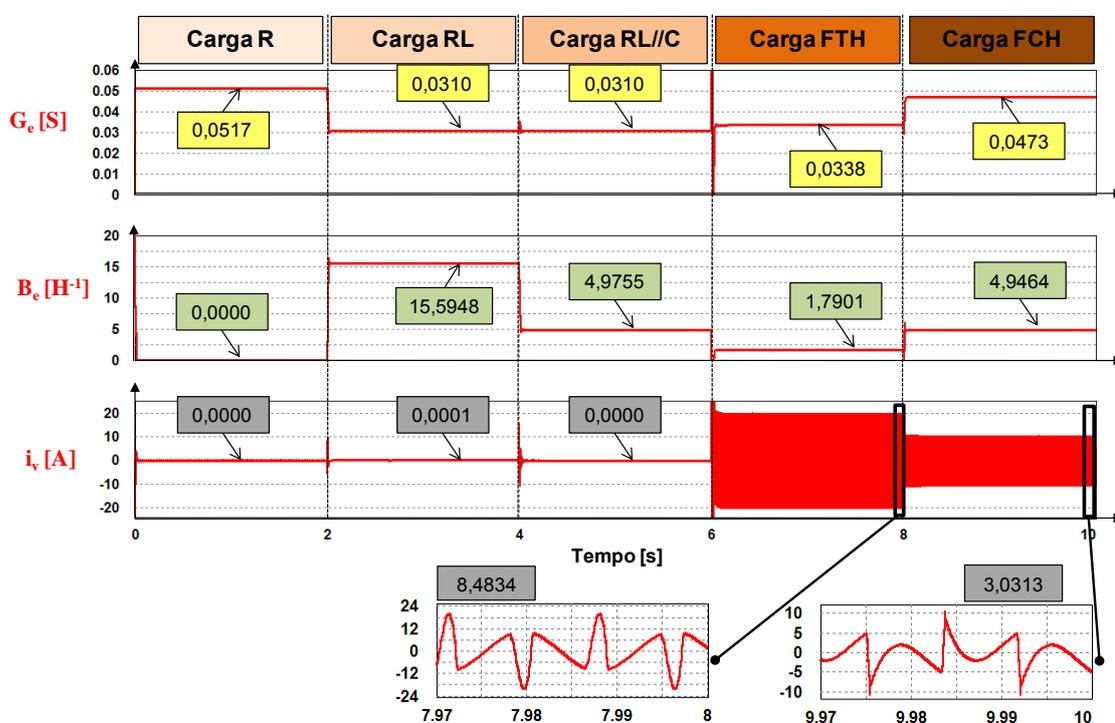


Figura 36 – Representação dos parâmetros equivalentes estimados de cada carga.

Da figura anterior, podemos observar que, para operação (cargas individuais) com tensão senoidal, qualquer carga linear ou não linear pode ser caracterizada através dos valores equivalentes fornecidos pela CPT. Portanto, nestas condições, do ponto de vista de atribuição de responsabilidades, todas as parcelas de potência da CPT deverão ser atribuídas à carga especificamente. Além disso, todas as distorções de tensão e corrente também devem ser atribuídas à carga causadora desses distúrbios.

Da mesma forma, os fatores de conformidade de carga e as distorções de tensão e corrente em função das cargas são mostradas nas Figura 37 e Figura 38. Pode-se verificar principalmente a diferença entre os fatores de potência de cada carga analisada assim como os DHTs de tensão e corrente no PAC.

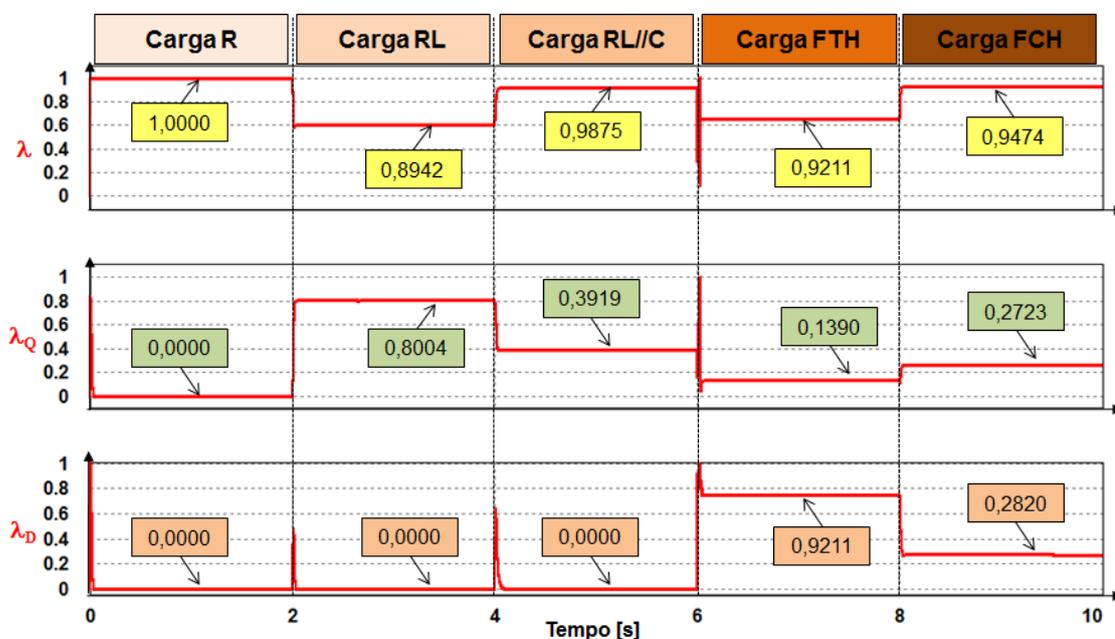


Figura 37– Representação dos fatores de conformidade da CPT para cada carga.

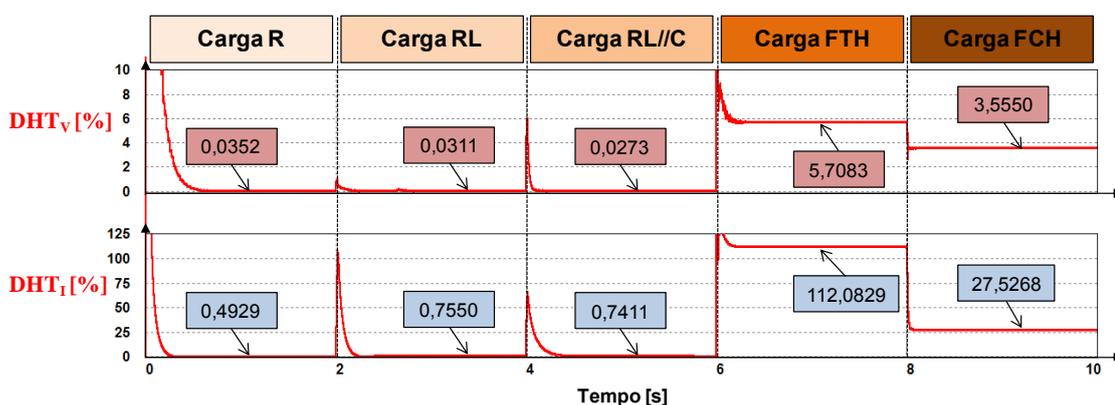


Figura 38 – Distorções harmônicas totais de tensão e corrente no PAC para cada carga.

Verifica-se, ademais, a relevância do DHT_I nas cargas não lineares. A carga do tipo FTH apresenta a distorção de corrente muito maior do que a carga do FCH, o que se reflete no DHT_V do PAC. Finalmente, nota-se que as distorções de tensão

estão abaixo do regulamentado pelo PRODIST, ainda que exista uma distorção de corrente bastante alta e prejudicial às outras cargas.

5.2.2. Cargas conectadas juntas

Conhecer o comportamento de cada carga separadamente permitiu iniciar essa análise sistemática. Essa primeira etapa nos forneceu informações sobre cada carga, criando uma espécie de banco de dados para fins de comparação com essa próxima. A ideia, aqui, foi a de avançar no estudo da atribuição de responsabilidades, conectando as cargas em paralelo “uma após a outra”, até que todas estejam inseridas no modelo. Esse processo parte da intenção de verificar o comportamento das variáveis de circuito (corrente e tensão), ao passo que as cargas são conectadas. Não apenas serão realizadas as medições de corrente e tensão no PAC, mas também da corrente em cada carga. Isso permitirá expandir os resultados e as análises, garantindo informações detalhadas do comportamento do sistema composto por cargas lineares e não lineares. Para tanto, além dos parâmetros equivalentes da CPT, serão apresentados os valores da caracterização de carga da metodologia de atribuição de responsabilidades. Como na seção anterior, são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente no PAC em cada carga, além das potências, fatores de conformidade de carga, correntes da CPT e DHTs. A ideia é de que a caracterização de carga se mantenha condizente com os resultados da seção anterior.

O circuito proposto foi simulado em um tempo total de 10 segundos. A cada dois segundos uma nova carga foi introduzida no PAC. No primeiro instante apenas a carga resistiva está conectada. Após dois segundos a carga RL série é conectada. No quarto segundo o capacitor é conectado no intuito de corrigir o fator de potência da carga RL série. Aos seis segundos a primeira carga não linear (FTH) é inserida e, por último, a carga do FCH é ligada ao PAC aos 8 segundos. A Tabela 18 mostra a sequência de chaveamento das cargas no PAC. Entre parênteses é indicado, de forma simplificada, o bloco de cargas a ser apresentado. Inicialmente as respostas relacionadas às medições feitas no PAC são mostradas e, posteriormente, as medições realizadas no ramo de cada carga são introduzidas.

Tabela 18 – Resumo da dinâmica do chaveamento das cargas

Tempo de simulação (s)	Cargas conectadas ao PAC
0	Carga Resistiva (R)
2	Cargas R + RL série (R+RL)
4	Cargas R + RL série com capacitor em paralelo (R+RL//C)
6	Cargas R + RL//C + tipo fonte de tensão (R+RL//C+FTH)
8	Cargas R+ RL//C + FTH + tipo fonte de corrente (R+RL//C+FTH+FCH)

5.2.3. Medição no ponto de acoplamento comum (PAC)

Quando a carga R está conectada, se repetem as informações presentes na seção 5.2.1.1. Assim, esta seção inicia-se com a carga equivalente R+RL.

5.2.3.1. Carga R+RL

As formas de onda de tensão e corrente da carga são mostradas na Figura 39.

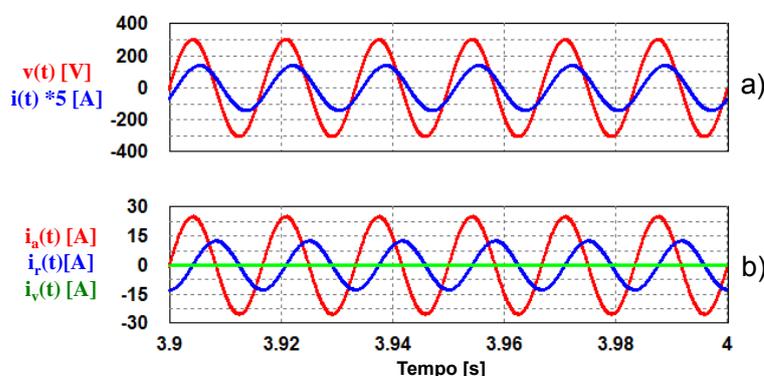


Figura 39 – Formas de onda da carga equivalente R+RL (medição no PAC): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.

Como era esperado, pelas formas de onda percebe-se que a carga equivalente (R+RL) apresenta característica indutiva, justamente pela diferença de fase entre corrente e tensão, além de ser notória a presença de corrente reativa i_r . A carga não drena corrente residual i_v pelo fato de ter característica linear. A Tabela

19 apresenta as parcelas de potências e correntes da CPT, fatores de conformidade da carga e DHTs.

Tabela 19 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL (medição no PAC).

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	4283,91	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	215,29
	P [W]	3830,77		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VA _r]	1917,55		I [A]	19,90
	W _r [J]	5,12	Correntes da CPT	I _a [A]	17,79
	D [VA]	0,03		I _r [A]	8,91
λ	0,89	I _v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ_Q	0,45	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	0,00
	λ_D	0,00		DHT _i [%]	0,00

Nessa configuração percebe-se o fator de potência e o fator de reatividade respondem à característica indutiva da carga equivalente, justificando o fato de que essa combinação das cargas R+RL proporciona um valor de fator de potência de 0,89 no PAC, que é o resultado da associação paralela entre duas cargas, uma de fator de potência unitário (R) e outra com fator de potência 0,6 indutivo (RL).

Apresenta-se, na Tabela 20, os parâmetros equivalentes da carga através das definições da CPT e, neste caso, também os valores através da caracterização da carga.

Tabela 20 – Parâmetros equivalentes e caracterização da carga estimada: carga equivalente R+RL (medição no PAC).

Parâmetros equivalentes da Carga – CPT	G _e [S]	0,0826	Caracterização da Carga – CPT	G _f [S]	0,0825
	B _e [H ⁻¹]	15,5948		B _f [H ⁻¹]	15,6900
	i _{v rms} [A]	0,0001		j _{rms} [A]	0,0001

Percebe-se bastante semelhança entre os valores dos parâmetros equivalentes e os valores caracterizados da carga. Esta proximidade entre os valores acontece pelo fato da tensão no PAC ser praticamente senoidal.

Tomando novamente os valores teóricos apresentados das Tabelas 4 e 5, nota-se que a impedância total (valor teórico) da combinação da carga R_1 e R_2L_2 ($R_1//R_2L_2$), resulta, $Z_{teórico} = 9,6769 + j4,8439 \Omega$. Da Tabela 20, observa-se que os valores dos parâmetros equivalentes, assim como da caracterização da carga são muito próximos ao equivalente entre valores definidos conforme expressão [$Z_e = (1/G_e)/(jX_e = 2\pi f/B_e) = 9,6789 + j4,8473 \Omega$]. Como, $Z_e = Z_{teórico}$, pode-se considerar que o circuito equivalente de carga apresentou uma boa estimativa.

5.2.3.2. Carga R+RL//C

As formas de onda de tensão e corrente são mostradas na Figura 40.

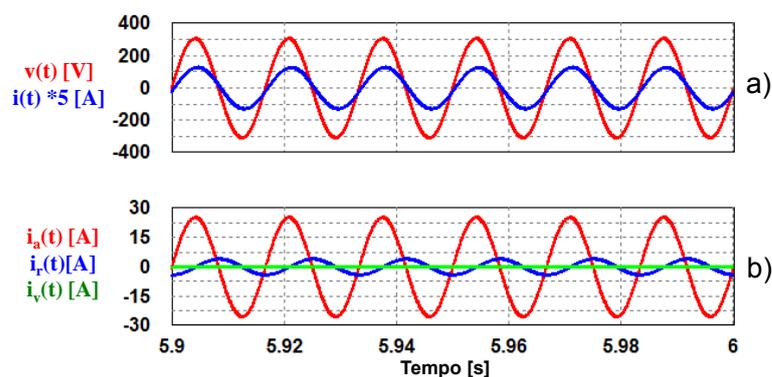


Figura 40 – Formas de onda da carga equivalente R+RL//C (medição no PAC): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.

Nota-se que com a introdução do capacitor na carga RL série, a defasagem entre a tensão e a corrente é diminuída, assim o fator de potência da carga (R+RL) é elevado consideravelmente. Nota-se que, o equivalente paralelo das cargas RL//C e R faz com que a corrente no PAC esteja praticamente em fase com a tensão. De fato, observando as formas de onda das correntes da CPT, nota-se que a corrente reativa foi atenuada, ou seja, ela é bem menor comparada com a ativa. Novamente, como a carga equivalente é dita linear, a corrente residual é nula. A Tabela 21

apresenta as parcelas de potências e correntes da CPT, fatores de conformidade da carga e DHTs.

Tabela 21 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL//C (medição no PAC).

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	3946,58	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	217,15
	P [W]	3897,20		\hat{V} [Vs]	0,58
	Q [VA _r]	622,41		I [A]	18,17
	W _r [J]	1,68	Correntes da CPT	I _a [A]	17,94
	D [VA]	0,00		I _r [A]	2,87
λ	0,99	I _v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ_Q	0,16	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	0,00
	λ_D	0,00		DHT _i [%]	0,00

Primeiramente, observa-se que como a participação das distorções harmônicas é nula, sendo assim, tanto a potência e corrente residuais D e I_v , como o fator de não linearidade λ_D são nulos. É muito difícil se deparar com um circuito elétrico de configuração das cargas similar a essa, pois os diversos componentes eletrônicos existentes contribuem para o aumento das distorções harmônicas. Enfim, o fato do fator de potência quase ser unitário garante um baixo valor de potência reativa. No PAC, portanto, o paralelo entre duas cargas: uma com fator de potência unitário (R) e outra 0,92 indutivo (RL//C), mostra um fator de potência de 0,99. É importante ressaltar o aumento da tensão no PAC e, em consequência disso, o aumento do consumo de potência ativa em comparação com o caso anterior (RL). Isso ocorre devido ao efeito Ferranti, uma vez que o capacitor alivia a fonte de tensão no fornecimento de reativos, promovendo, assim, uma maior disponibilidade de potência proveniente de seus terminais.

Apresenta-se, na Tabela 22, os parâmetros equivalentes da carga através das definições da CPT e da metodologia de caracterização da carga.

Tabela 22 – Parâmetros equivalentes e caracterização da carga estimados: carga equivalente R+RL//C (medição no PAC).

Parâmetros equivalentes da Carga – CPT	G_e [S]	0,0826	Caracterização da Carga – CPT	G_f [S]	0,0826
	B_e [H ⁻¹]	4,9755		B_f [H ⁻¹]	5,0481
	$i_{v\ rms}$ [A]	0,0000		j_{rms} [A]	0,0423

Novamente, como a tensão é praticamente senoidal, os resultados referentes à caracterização da carga e os parâmetros equivalentes da CPT são muito próximos. As condutâncias apresentam valores idênticos. A resistividade B_f apresenta um erro de 1,44% frente à B_e . Da Tabela 22, a impedância equivalente estimada ($Z_e = (1/G_e)/(jX_e = 2\pi f/B_e)$) resulta $Z_e = 11,8051 + j1.8862\Omega$, por outro lado, das Tabelas 4 e 5, o valor teórico da impedância total da carga ($R_1//R_2L_2//C_2$) resulta, $Z_{total} = 11,8006 + j1.8846\Omega$. Portanto, pode-se considerar que o circuito equivalente de carga apresentou uma boa estimativa $Z_e = Z_{total}$.

5.2.3.3. Carga R+RL//C+FTH

As formas de onda de tensão e corrente da carga são mostradas na Figura 41.

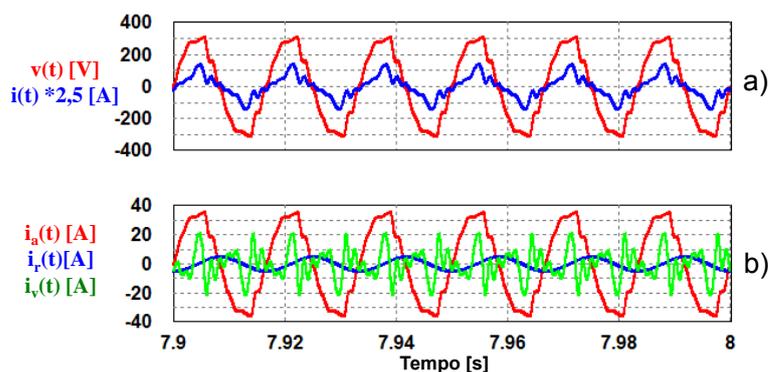


Figura 41– Formas de onda da carga equivalente R+RL//C+FTH (medição no PAC): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.

Como se pode notar, a introdução da carga do tipo fonte de tensão harmônica promove uma não linearidade ao circuito, como se verifica nas formas de onda de tensão e corrente. Pelo fato das outras cargas estarem em paralelo a distorção de tensão provocada por esta carga é transmitida às outras pelo fato de compartilharem

o mesmo ponto de acoplamento (PAC). Nota-se ainda que essa carga promove uma grande parcela de corrente residual i_v . A Tabela 23 apresenta as parcelas de potências e correntes da CPT, fatores de conformidade da carga e DHTs dessa carga equivalente.

Tabela 23 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL//C+FTH (medição no PAC).

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	5892,26	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	216,83
	P [W]	5427,12		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VAR]	745,48		I [A]	27,17
	W_r [J]	2,07	Correntes da CPT	I_a [A]	25,02
	D [VA]	2170,11		I_r [A]	3,44
λ	0,92	I_v [A]		10,01	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ_Q	0,14	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	8,16
	λ_D	0,37		DHT _i [%]	37,92

Interessante notar que, apesar da forma de onda do PAC ser bastante distorcida, como pode ser notado nos altos níveis de DHT_i e DHT_v , aproximadamente 38% e 8%, respectivamente, o fator de potência no PAC está no valor mínimo permitido por norma no Brasil (ANEEL), bem como o DHT_v está dentro do limite estabelecido (10%). Além disso, o fator de reatividade se mostrou bastante baixo (pouca influencia dos reativos), mostrando que na fundamental, tensão e corrente devem estar praticamente em fase. Mesmo com cargas lineares conectadas em paralelo com a carga não linear do tipo FTH no PAC, elas irão, de certa forma, ser penalizadas por uma alimentação não senoidal em seus terminais causada por esta carga. Além disso, observa-se que, devido ao efeito de ressonância entre a tensão harmônica no PAC e o capacitor, aumenta-se o nível de distorção de tensão, quando comparado com a análise da carga FTH ($DHT_{V(R+RL//C+FTH)} = 8,16 > 5,70 = DHT_{V(FTH)}$), vide Tabela 14 e Tabela 23.

Apresenta-se na Tabela 24 os parâmetros equivalentes da carga através das definições da CPT e os provenientes da caracterização de carga.

Tabela 24 – Parâmetros equivalentes e caracterização da carga estimados: carga equivalente R+RL//C+FTH (medição no PAC).

Parâmetros equivalentes da Carga – CPT	G_e [S]	0,1154	Caracterização da Carga – CPT	G_f [S]	0,1164
	B_e [H ⁻¹]	5,9962		B_f [H ⁻¹]	6,2919
	$i_{v\ rms}$ [A]	10,0063		j_{rms} [A]	10,0001

A caracterização da carga é interessante pelo fato de considerar os cálculos através das componentes fundamentais de tensão e corrente. Percebe-se que o erro estimado não se distancia muito do valor teórico que seria pela análise da CPT. Assim, G_f apresenta um erro de 0,86% frente a G_e , B_f um erro de 4,7% em relação a B_e e a corrente harmônica j um erro de 0,06% em relação a i_v . De fato, a reatidade equivalente mostra-se diferente da fundamental, justamente pela presença de componentes harmônicas existentes na tensão nos terminais do PAC.

5.2.3.4. Carga R+RL//C+FTH+FCH

As formas de onda de tensão e corrente da carga são mostradas na Figura 42.

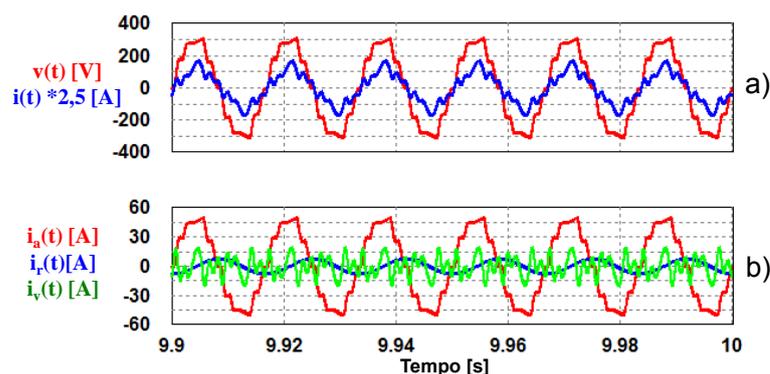


Figura 42 – Formas de onda da carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH (medição no PAC): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.

Como se nota, a introdução da carga FCH ao PAC introduz ainda mais não linearidades ao circuito, fato esse que pode ser facilmente verificado nas formas de onda de tensão e corrente. A Tabela 25 apresenta as parcelas de potências e

correntes da CPT, fatores de conformidade da carga e DHTs dessa carga equivalente.

Tabela 25 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH (medição no PAC).

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	7925,54	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	215,41
	P [W]	7508,77		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VA _r]	1199,36		I [A]	36,79
	W _r [J]	3,26	Correntes da CPT	I _a [A]	34,85
	D [VA]	2234,77		I _r [A]	5,57
λ	0,95	I _v [A]		10,37	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ_Q	0,16	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	10,16
	λ_D	0,28		DHT _i [%]	26,77

O mesmo tipo de comportamento descrito anteriormente pode ser verificado aqui. Essa carga equivalente drena uma corrente com alto conteúdo harmônico, ocasionando a tensão distorcida no PAC, fazendo com que todas as cargas sofram reflexo dessa tensão distorcida. Observa-se, ainda, que existe uma atenuação no pico de corrente residual i_v em relação à situação anterior, mostrando mais influência das parcelas residuais de corrente e potência.

Observa-se, novamente, que apesar das formas de onda representar corrente e tensão com alto conteúdo harmônico, de fato tem-se aproximadamente 27% e 10% de DHT_i e DHT_v , respectivamente, o fator de potência dessa carga está acima do valor mínimo estabelecido pela norma brasileira ($0,95 > 0,92$). Alguns questionamentos podem ser levantados em torno do DHT_v . Nota-se que seu valor está ligeiramente acima do estipulado pelo PRODIST (10%). Por outro lado, o dobro de DHT_v é verificado quando comparado com o limite da norma da IEEE 519. Ainda, como comentado, o PRODIST apresenta apenas um valor de referência para distorção harmônica de tensão, mas não determina penalidades nem um método

para se atribuir ou compartilhar as responsabilidades entre as cargas que compõem o PAC em relação à geração desses distúrbios.

Assim, nota-se uma relevante parcela potência e corrente residuais D e I_v , demonstrando a presença de não linearidades no circuito. O fator de reatividade, por sua vez é baixo e representa os reativos do circuito não senoidal.

A Tabela 26 apresenta os parâmetros equivalentes da carga através das definições da CPT e os parâmetros da caracterização da carga.

Tabela 26 – Parâmetros equivalentes e caracterização da carga estimada: carga equivalente R+RL//C+FTH (medição no PAC).

Parâmetros equivalentes da Carga – CPT	G_e [S]	0,1617	Caracterização da Carga – CPT	G_f [S]	0,1636
	B_e [H ⁻¹]	9,7925		B_f [H ⁻¹]	10,0778
	$i_{v\ rms}$ [A]	10,3536		j_{rms} [A]	10,3825

Novamente, em função da tensão distorcida no PAC, notam-se valores distintos entre os dois métodos como já era de esperar, pois a caracterização de carga calcula seus termos considerando apenas as componentes fundamentais de suas variáveis. A condutância fundamental G_f apresenta um erro de 1,16% em relação a G_e , a reatividade B_f um erro de 3,13% em frente a B_e e j um erro de 0,28% em relação a i_v , mostrando que a caracterização representa baixo erro em relação aos valores do modelo equivalente da carga analisada.

5.2.3.5. Comentários gerais

Primeiramente, pode-se notar como as grandezas no PAC se comportam com a inserção das diferentes cargas. Como esperado, até a introdução de todas as cargas lineares, nenhum distúrbio harmônico foi verificado. A partir da introdução das cargas FTH e FCH se introduziram os conteúdos harmônicos tanto de corrente como de tensão. Portanto, as cargas lineares deverão ser influenciadas pela existência desses componentes harmônicos, uma vez que compartilham o mesmo PAC. Verificou-se, portanto, que as cargas não lineares são responsáveis pelo surgimento das distorções harmônicas e seus efeitos são transmitidos às cargas

vizinhas pela existência da impedância de linha do sistema. Nesse trabalho, esse componente não é variável, ou seja, mantém seus valores constantes em todos os casos analisados. Em situações de geração distribuída de energia, onde esse componente pode variar ao longo do tempo, torna-se um ponto de bastante discussão a questão da real responsabilidade dos distúrbios no PAC. Logo, uma vez que esse valor é fixo neste trabalho, cabem às cargas as responsabilidades desses distúrbios. O problema se encontra na percepção de qual consumidor é o não linear, e o quanto de distúrbio este provoca. As Figura 43 e Figura 44 apresentam a evolução dos parâmetros equivalentes estimados das cargas da CPT e pela caracterização de carga, considerando a conexão das cargas uma após a outra, ou seja, da condutância, reatidade e corrente residual. Vale ressaltar que o valor eficaz de corrente é apontado para i_v no retângulo cinza. Percebe-se de forma clara como a introdução das cargas FTH e FCH introduzem distorção harmônica no circuito.

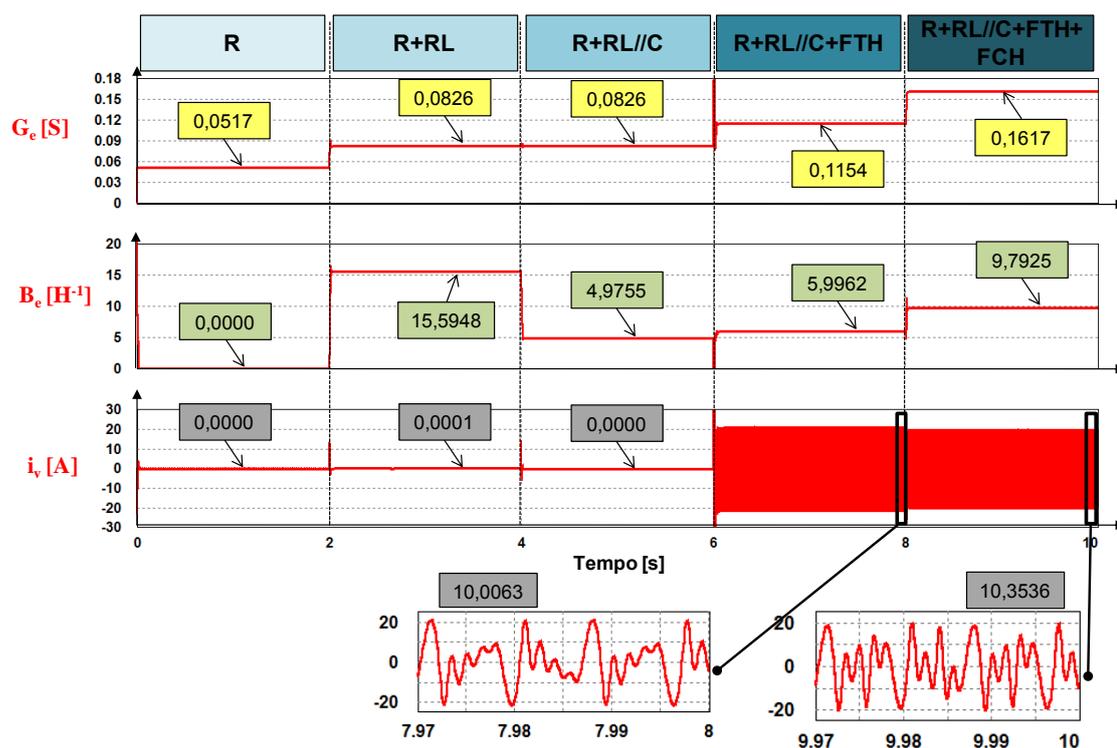


Figura 43 – Evolução dos parâmetros equivalentes das cargas através da CPT (PAC).

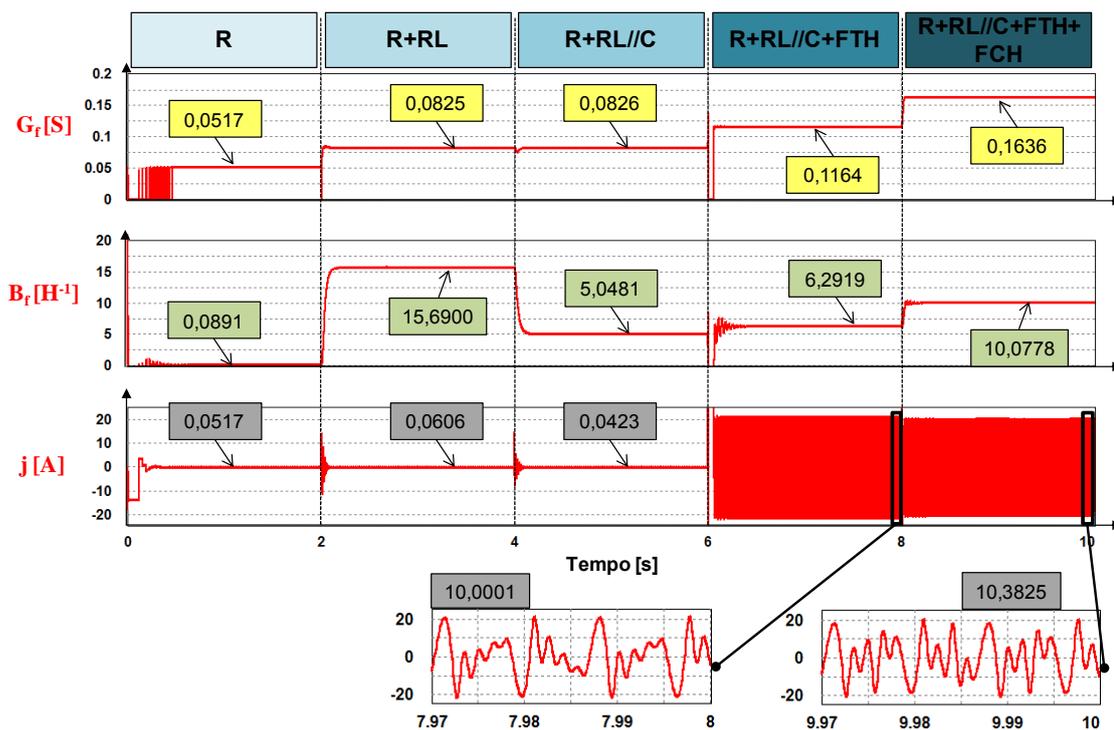


Figura 44 – Evolução da caracterização das cargas equivalentes pela fundamental (PAC).

Os fatores de conformidade de carga e os DHTs de tensão e corrente em são mostrados nas Figura 45 e Figura 46.

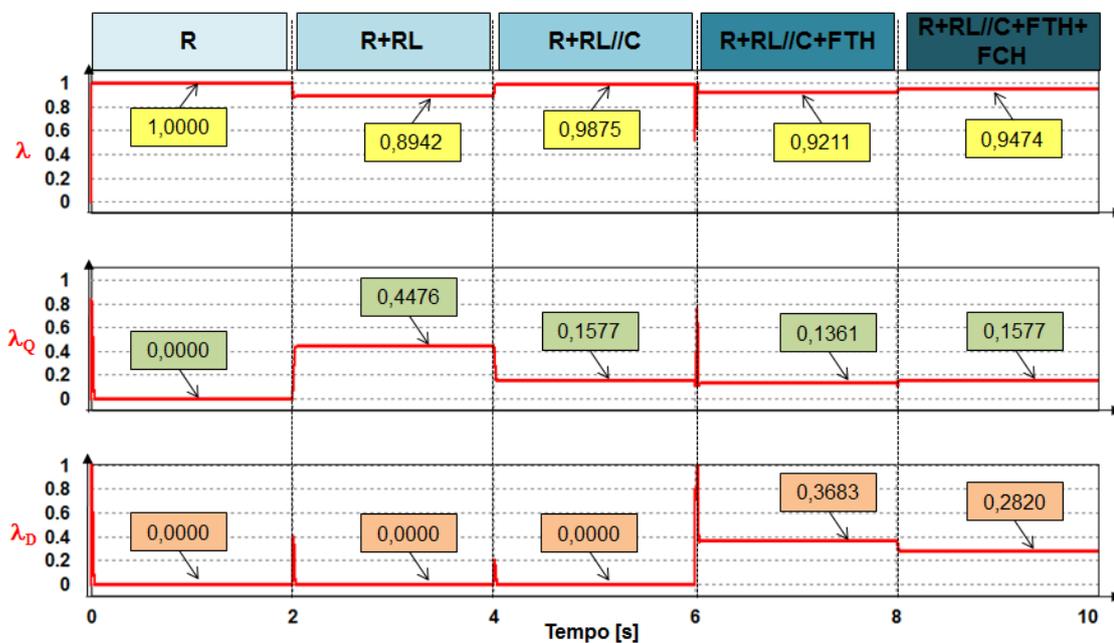


Figura 45 – Evolução dos fatores de conformidade das cargas equivalentes (PAC).

Nota-se que as cargas foram inseridas no circuito a cada 2 segundos de simulação. Os transitórios estão relacionados com o fechamento das chaves ideais (S1, S2, S3, S4 e S_C) e a consequente entrada das cargas no circuito.

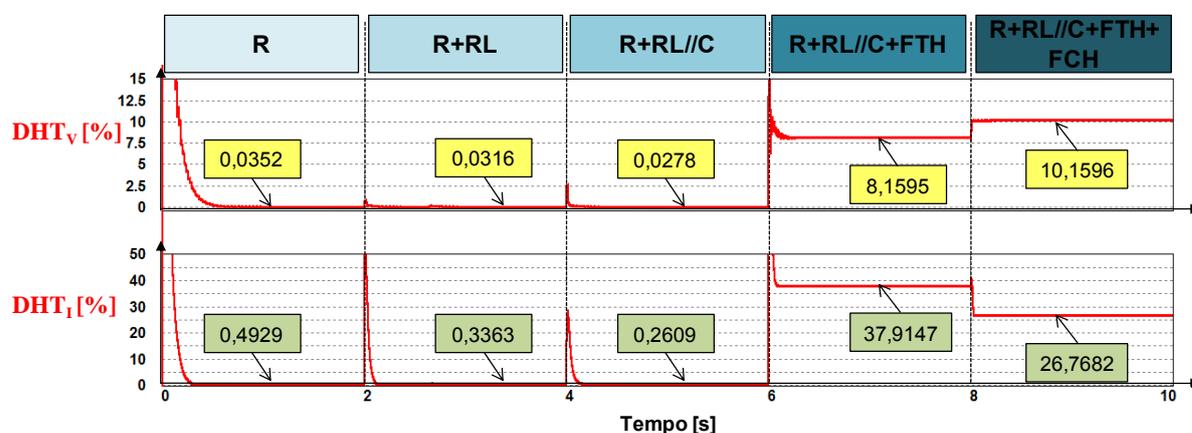


Figura 46 – Evolução dos DHTs de tensão e corrente considerando as cargas equivalentes (PAC).

A partir da introdução das cargas não lineares é que, de fato, surge o efeito das distorções harmônicas no sistema. Ainda, com o chaveamento da carga FCH há uma diminuição na DHT_I (37,91% para 26,77%) e um pequeno aumento da DHT_V no PAC. Observa-se que a diminuição do DHT_I , também pode ser verificada pelo fator de distorção da CPT (em %) que varia de 36,83% para 28,20%.

Na próxima seção será analisado o comportamento em cada carga isoladamente quando as outras vão sendo conectadas ao sistema. É um espelho desta seção, porém ao invés de se analisar o PAC será feito um estudo focado em cada carga separadamente. Isso proporcionará uma ideia quantitativa e qualitativa em relação à influência dos distúrbios harmônicos nas características de cada carga.

5.2.4. Medição nos terminais de cada carga

As análises foram realizadas na mesma sistemática proposta anteriormente. A ideia é proporcionar uma estratégia mais abrangente na visualização do comportamento das cargas quando outra vizinha é conectada ao PAC. Como as cargas estão em paralelo, a tensão foi medida no PAC. A corrente, por sua vez, foi medida em cada carga (ver Figura 30). Nesse contexto, inicialmente será mostrado os resultados a partir das medições provenientes na carga R com o chaveamento

das cargas ao longo do tempo, conforme realizado na etapa anterior, mas a partir da carga R+RL (para não repetir resultados).

5.2.4.1. Medição e análise para carga R

As formas de onda de tensão e corrente são mostradas na Figura 47.

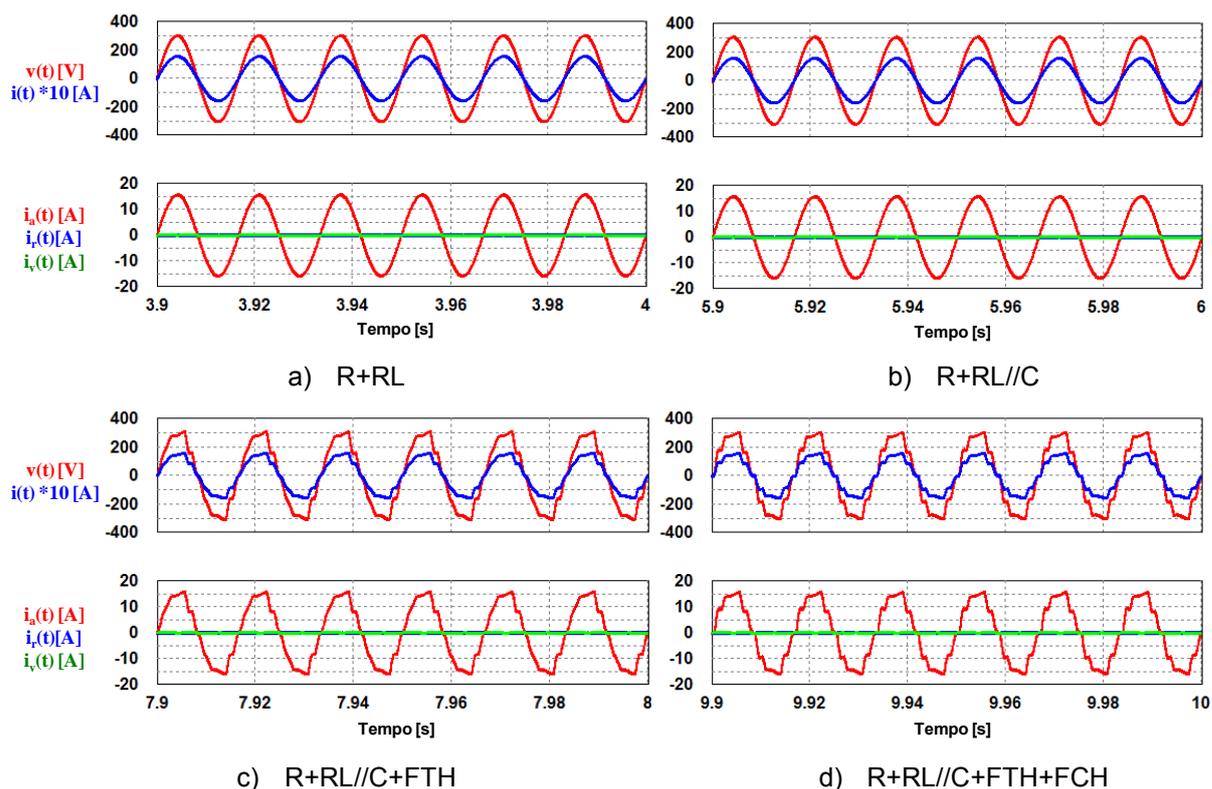


Figura 47 - Formas de onda da carga equivalente a) R+RL, b) R+RL//C, c) R+RL//C+FTH, d) R+RL//C+FTH+FCH (medição na carga R): superior (tensão e corrente), inferior (componentes de corrente decompostas através da CPT).

Verifica-se que, como tensão e corrente são proporcionais em todas as situações, a carga R sempre apresenta fator de potência unitário e, de acordo com a CPT, apenas corrente ativa i_a circula nessa carga. Como a corrente ativa é o reflexo da tensão de alimentação, não há circulação de correntes reativa nem residual nessa carga, mesmo na presença de distorção de tensão, como se observa nas formas de onda em c) e d). De fato, com a introdução das cargas não lineares (FTH e FCH), observa-se as distorções harmônicas na tensão, podendo prejudicar o comportamento dessa carga, causando sobre aquecimento devido às harmônicas,

por exemplo. A Tabela 27 apresenta as parcelas de potências e correntes da CPT, fatores de conformidade da carga e DHTs para a carga R.

Tabela 27 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente a) R+RL, b) R+RL//C, c) R+RL//C+FTH, d) R+RL//C+FTH+FCH (medição carga R).

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2394,55	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	215,29
	P [W]	2394,55		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VA _r]	0,00		I [A]	11,21
	W _r [J]	0,03	Correntes da CPT	I _a [A]	11,21
	D [VA]	0,00		I _r [A]	0,00
		I _v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	1,00	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	0,00
	λ_Q	0,00		DHT _i [%]	0,00
	λ_D	0,00			

a) R+RL

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2436,07	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	217,15
	P [W]	2436,07		\hat{V} [Vs]	0,58
	Q [VA _r]	0,00		I [A]	11,22
	W _r [J]	0,02	Correntes da CPT	I _a [A]	11,22
	D [VA]	0,00		I _r [A]	0,00
		I _v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	1,00	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	0,00
	λ_Q	0,00		DHT _i [%]	0,00
	λ_D	0,00			

b) R+RL//C

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2428,95	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	216,83
	P [W]	2428,95		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VA _r]	0,00		I [A]	11,20
	W _r [J]	0,02	Correntes da CPT	I _a [A]	11,20
	D [VA]	0,00		I _r [A]	0,00
		I _v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	1,00	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	8,16
	λ_Q	0,00		DHT _i [%]	8,17
	λ_D	0,00			

c) R+RL//C+FTH

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2397,18	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	215,41
	P [W]	2397,18		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VA _r]	0,00		I [A]	11,13
	W _r [J]	0,02	Correntes da CPT	I _a [A]	11,13
	D [VA]	0,00		I _r [A]	0,00
		I _v [A]		0,00	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	1,00	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	10,16
	λ_Q	0,00		DHT _i [%]	10,17
	λ_D	0,00			

d) R+RL//C+FTH+FCH

Como se observa, toda potência aparente A é convertida em potência ativa P , o que se reflete também nas correntes: a corrente total I corresponde à corrente ativa I_a . Assim, independente da forma de onda essa carga utiliza toda a energia fornecida pelo sistema.

Nota-se que, a introdução do capacitor para corrigir o fator de potência da carga RL faz com que a tensão no PAC aumente. De fato, o efeito da compensação resulta uma folga na capacidade do sistema (efeito Ferranti), pois a fonte não

precisa fornecer toda potência reativa necessária, uma vez que o capacitor troca localmente energia com o indutor. A carga R sente reflexo disso, uma vez que há um pequeno acréscimo no consumo de ativos, o que, de certa forma, pode não ser interessante para esse usuário, com o vizinho corrigindo o fator de potência, o que é excelente para a distribuidora de energia.

Outra interessante observação é a questão do DHT de tensão que é causado pelas cargas não lineares. Neste caso também há um incremento na potência ativa, principalmente com a entrada da carga FTH, portanto o usuário também irá consumir mais ativos, mas devido às parcelas harmônicas.

- **Comentários gerais**

A Figura 48 apresenta a evolução da caracterização da carga equivalente através da CPT.

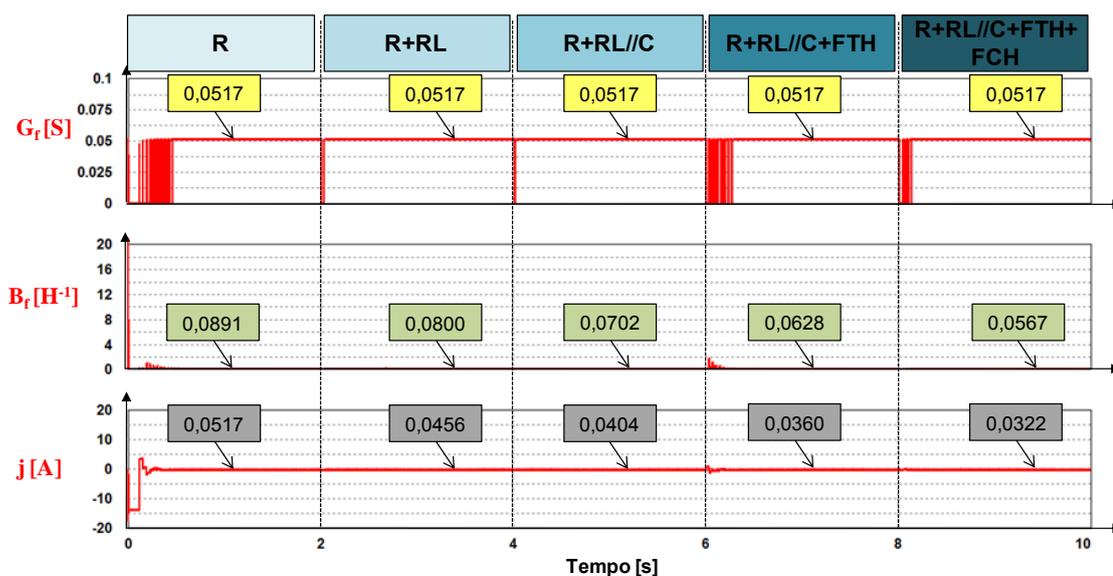


Figura 48 – Evolução da caracterização das cargas equivalentes (Carga R).

É interessante verificar que a carga resistiva mantém a sua característica ao longo da análise, ou seja, mesmo com todas as cargas conectadas e na presença de distorção harmônica, o valor da resistência pela caracterização da carga se mantém $G_f = 1/R_f = 19,34\Omega$. Além disso, o valor estimado é aproximadamente igual ao valor teórico $R_1 = 19,36\Omega$. Uma ideia é utilizar a potência ativa que relaciona este valor para fins de tarifação, uma vez que esse representa o consumo ativo e não se modifica na presença de harmônicas.

5.2.4.2. Medição e análise para a carga RL//C

As formas de onda de tensão e corrente para todas as respectivas cargas equivalentes são mostradas na Figura 49.

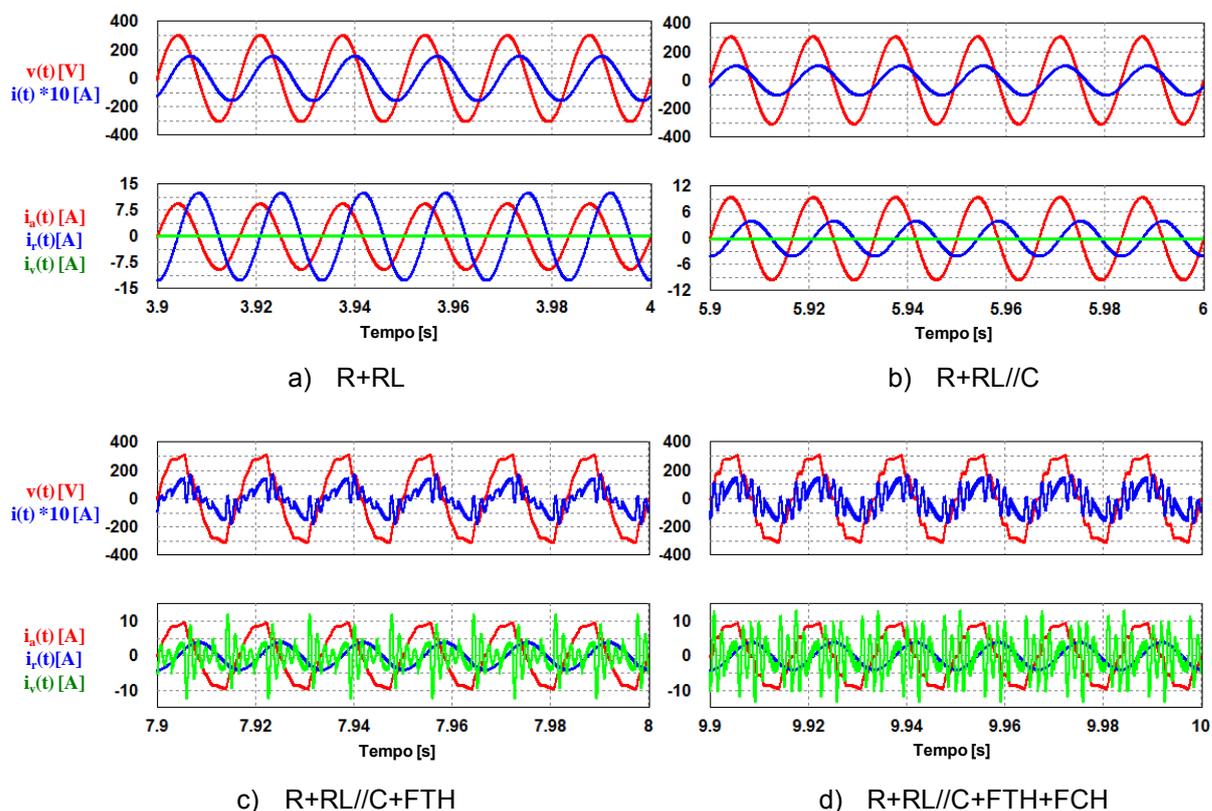


Figura 49 – Formas de onda da carga equivalente a) R+RL, b) R+RL//C, c) R+RL//C+FTH, d) R+RL//C+FTH+FCH (medição na carga RL//C): superior (tensão e corrente), inferior (componentes de corrente decompostas através da CPT).

O comportamento dessa carga se mantém como esperado apenas na presença de cargas lineares e tensão senoidal, ou seja, formas de onda a) e b). Neste caso, a corrente apresenta um ângulo de fase atrasado em relação à tensão (característica que a CPT demonstra pela corrente reativa). Assim, o capacitor conectado contribui para a redução dos reativos, reduzindo o ângulo de fase em relação à tensão e reduzindo o pico de corrente reativa da CPT.

No entanto, o fato da carga FTH introduzir distorção de tensão no PAC, faz com que a carga apresente um comportamento não linear, surgindo um alto valor de corrente residual da CPT. Esta componente de corrente na carga RL//C é devido ao fato de carga ser alimentada por uma tensão no PAC com componentes harmônicas,

que por sua vez entra num processo de ressonância paralela com as componentes harmônicas da tensão. A Figura 50 mostra o espectro harmônico da tensão do PAC e corrente da carga (RL//C) em valores percentuais, ou seja, em relação à fundamental dos respectivos sinais, com as cargas R+RL//C+FTH conectadas ao PAC.

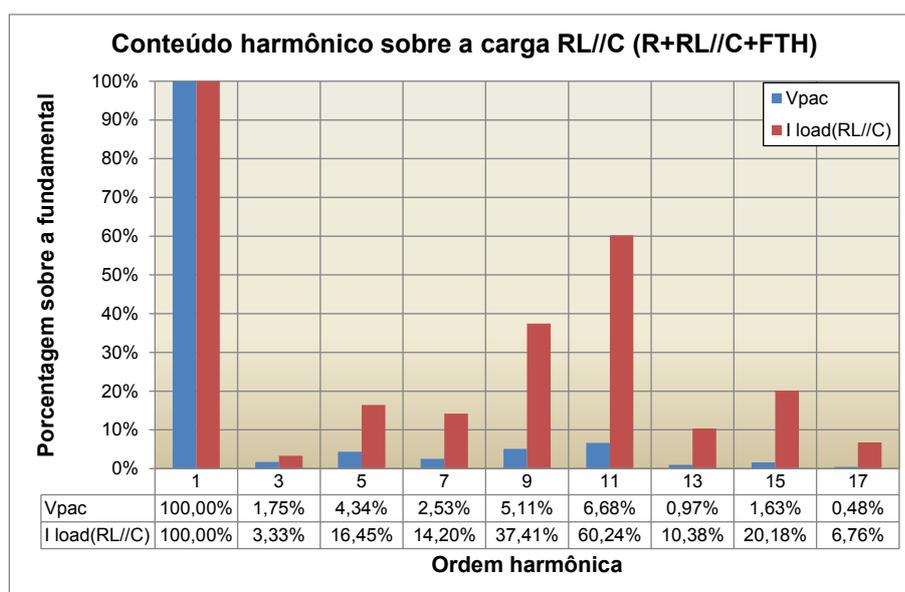


Figura 50 – Conteúdo harmônico da tensão no PAC e corrente da carga (RL//C) para carga equivalente R+RL//C+FTH.

De fato, pode-se notar que a corrente é altamente influenciada pela distorção de tensão. A porcentagem das harmônicas de corrente em relação a fundamental chegam a valores como 37% e 60%, por exemplo, considerando a nona e décima primeira ordem. Mas, em geral, todas as ordens harmônicas da tensão são excitadas pela corrente, causando o alto DHT_I verificado.

Entretanto, essa carga não deveria ser penalizada pela corrente residual desde que este efeito foi gerado pela carga FTH. Diferentemente da carga resistiva alimentada por tensão não senoidal, a carga RL//C é muito mais sensível a distorções harmônicas de tensão. Comentários similares são válidos quando a carga FCH é conectada. Neste caso, observa-se que o efeito de ressonância provoca um incremento na distorção da forma de onda da corrente, resultando numa alta corrente residual. A Figura 51 mostra o espectro harmônico da tensão do PAC e

corrente da carga (RL//C) em valores percentuais, ou seja, em relação à fundamental dos respectivos sinais, com todas as cargas conectadas ao PAC.

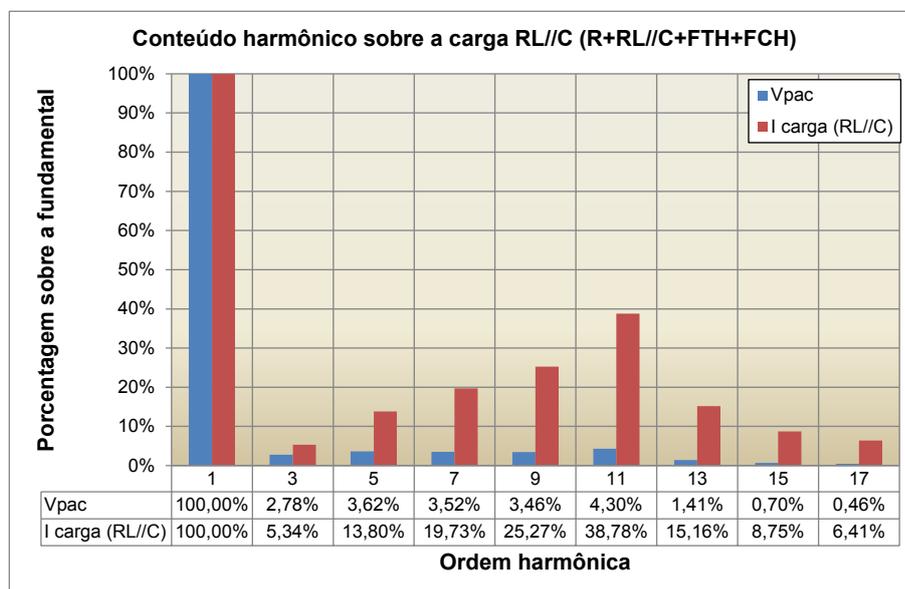


Figura 51 - Conteúdo harmônico da tensão no PAC e corrente da carga (RL//C) para carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH.

Da mesma forma, todas as harmônicas de tensão excitam as harmônicas de corrente que sofrem grande influência dessa distorção, como se mostra os valores como 25% e 38% (nona e décima primeira ordem harmônica) em relação à fundamental. Nota-se uma redução dos picos de corrente, mas o DHT_I é maior que a situação anterior (carga FCH desconectada). A Tabela 28 apresenta os valores de potências, correntes e fatores de conformidade de carga da CPT, bem como os DHTs resultantes dessa análise. O PRODIST ao permitir um nível de DHT_V até 10% promove que circule altíssimo nível de distorção de corrente pelos consumidores, que irão sofrer esse reflexo. Assim, a tendência do IEEEE que limita o DHT_V em no máximo 5% deveria ser seguida em nossa norma também, evitando possíveis distúrbios de QEE na baixa tensão.

Tabela 28 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente a) R+RL, b) R+RL//C, c) R+RL//C+FTH, d) R+RL//C+FTH+FCH (medição carga RL//C).

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2395,78	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	215,29	Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	1588,17	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	217,15
	P [W]	1436,23		\hat{V} [Vs]	0,57		P [W]	1461,13		\hat{V} [Vs]	0,58
	Q [VAR]	1917,55		I [A]	11,13		Q [VAR]	622,41		I [A]	7,31
	W_r [J]	5,12	Correntes da CPT	I_a [A]	6,67		W_r [J]	1,68	Correntes da CPT	I_a [A]	6,73
	D [VA]	0,03		I_r [A]	8,91		D [VA]	0,01		I_r [A]	2,87
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,60	Distorção Harmônica Total	I_v [A]	0,00	Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,92	Distorção Harmônica Total	I_v [A]	0,00
	λ_Q	0,80		DHT _v [%]	0,00		λ_Q	0,39		DHT _v [%]	0,00
	λ_D	0,00		DHT _i [%]	0,00		λ_D	0,00		DHT _i [%]	0,00

a) R+RL

b) R+RL//C

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	1810,21	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	216,83	Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	1987,58	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	215,41
	P [W]	1446,43		\hat{V} [Vs]	0,57		P [W]	1421,31		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VAR]	610,13		I [A]	8,35		Q [VAR]	601,69		I [A]	9,22
	W_r [J]	1,66	Correntes da CPT	I_a [A]	6,67		W_r [J]	1,65	Correntes da CPT	I_a [A]	6,60
	D [VA]	901,35		I_r [A]	2,81		D [VA]	1252,32		I_r [A]	2,79
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,80	Distorção Harmônica Total	I_v [A]	4,16	Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,72	Distorção Harmônica Total	I_v [A]	5,81
	λ_Q	0,39		DHT _v [%]	8,16		λ_Q	0,39		DHT _v [%]	10,16
	λ_D	0,50		DHT _i [%]	56,34		λ_D	0,63		DHT _i [%]	79,58

c) R+RL//C+FTH

d) R+RL//C+FTH+FCH

De fato, quando os níveis de tensão são próximos do senoidal, a carga (RL//C) se comporta conforme esperado, como é observado pelos valores de fator de potência, que passa de aproximadamente 0,6 para 0,92 indutivo. Assim, o capacitor atinge o seu objetivo adequadamente, proporcionando um aumento da tensão no PAC, como já comentado anteriormente. Neste caso, como a tensão nos terminais da carga é senoidal não há presença de conteúdo harmônico na corrente nem na tensão. Portanto a componente residual da CPT também resulta desprezível. No entanto os 8% de distorção harmônica de tensão provocados pela inserção da carga FTH, promove cerca de 56% de DHT_i . Esse fato também pode ser verificado pelo

alto valor na potência e corrente residuais, bem como no fator de distorção (não linearidade, $\lambda_D = 50\%$). Observe que nesta condição, o capacitor não atinge o seu objetivo, resultando um valor de fator de potência abaixo do previsto (0,8 indutivo). Comentários similares são válidos para a entrada da carga FCH, porém nesta condição, observa-se que os níveis de distorção de tensão e corrente aumentaram de 8% para 10,2% e de 56% para 79,6%, respectivamente. Isso também se verifica pelo incremento do fator de não linearidade que (0,50 para 0,63) e pela redução do fator de potência (0,80 para 0,72) que surgem pelo incremento do nível de ressonância entre o capacitor e as harmônicas de tensão provocadas pelo equivalente das cargas no PAC (R+RL//C+FTH+FCH). Assim, a carga RL//C não deveria ser penalizada pelas componentes de corrente ou potência residuais da CPT.

- **Comentários gerais**

A Figura 52 apresenta a evolução da caracterização da carga R+RL e R+RL//C conforme todas as cargas se conectam no PAC.

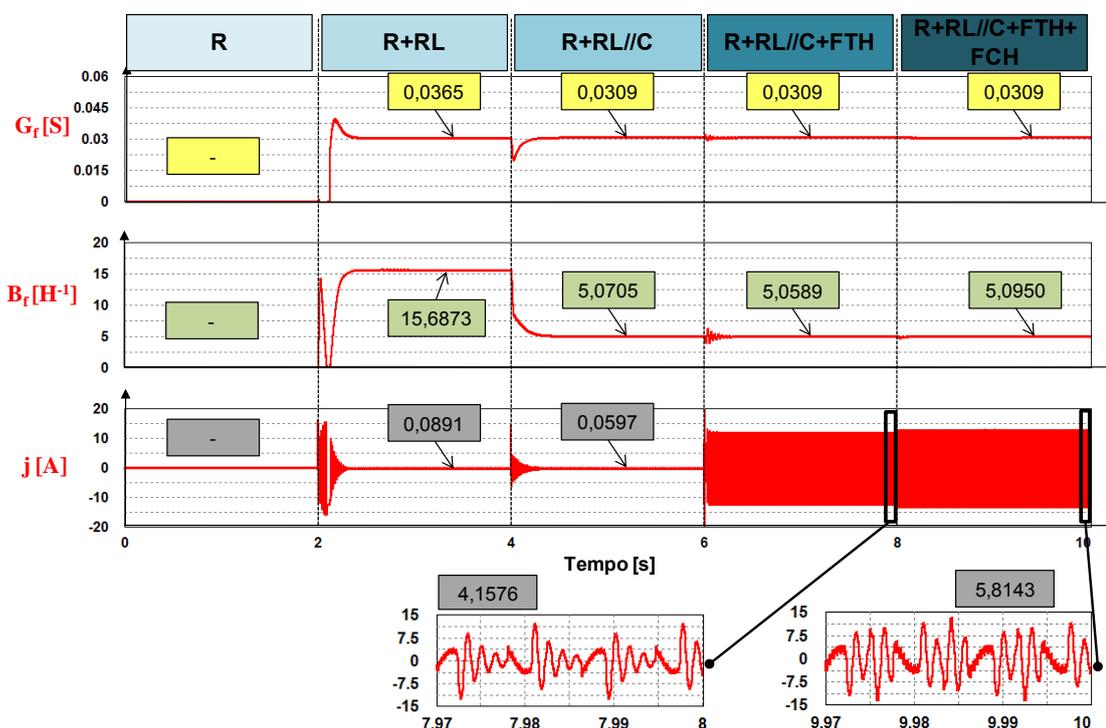


Figura 52 – Evolução da caracterização das cargas equivalentes (Carga RL//C).

Observa-se que, quando a tensão é distorcida a condutância e reatidade estimada pela caracterização da carga (G_f e B_f) resultam em 0,0309S e

aproximadamente $5H^{-1}$. Por outro lado, estes valores são muito próximos aos valores teóricos ($0,0310S$ e $4,9755H^{-1}$). Já as componentes harmônicas de corrente j devem ser apontadas às cargas não lineares. Para corroborar a afirmação, as Figura 53 e Figura 54 apresentam a evolução da distorção harmônica de corrente DHT_1 e os fatores de conformidade da carga (λ_Q e λ_D) medido nos terminais da carga RL//C. Nota-se que a distorção de corrente está relacionada com a introdução das cargas FTH e FCH. O aumento da distorção de corrente reflete no aumento do fator de não linearidade, enquanto o fator de potência cai.

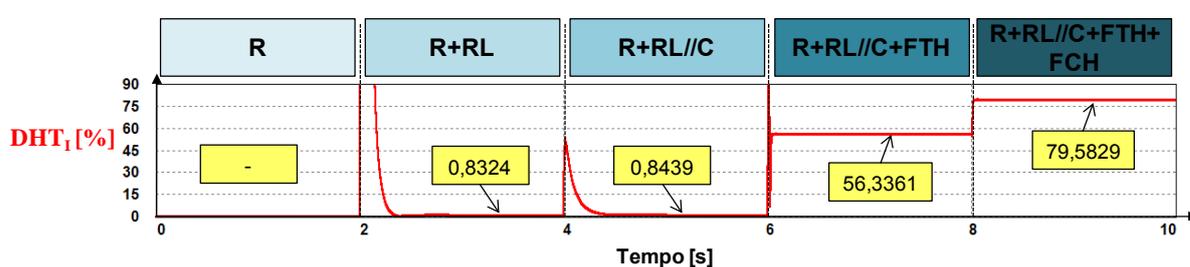


Figura 53 – Evolução do DHT de corrente considerando as cargas equivalentes (Carga RL//C)

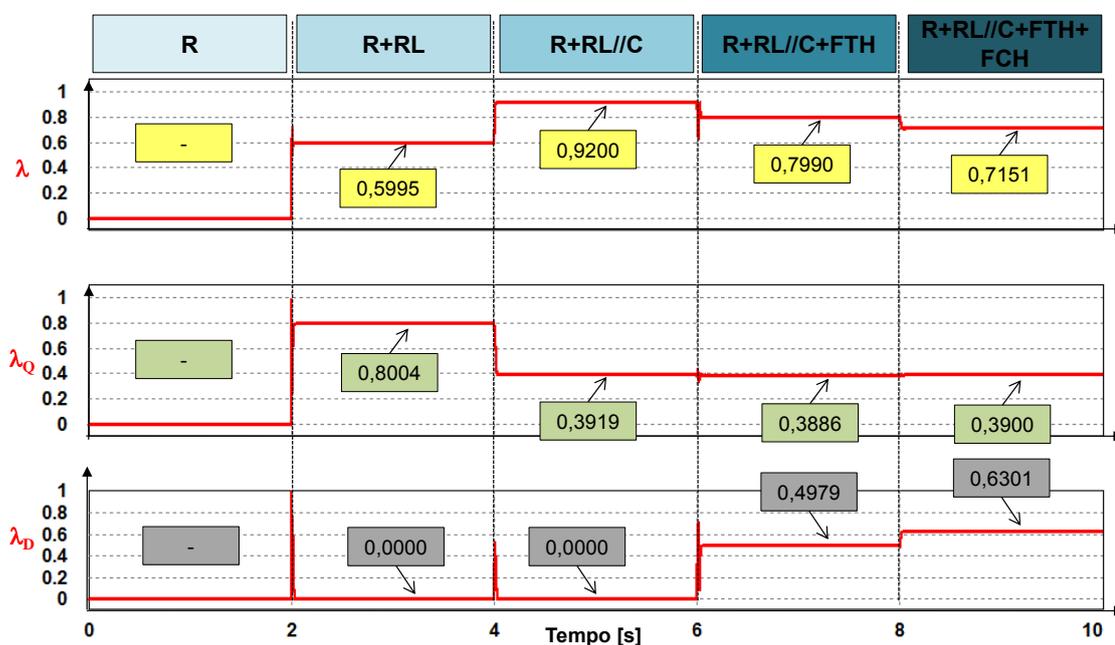


Figura 54 – Evolução dos fatores de conformidade das cargas equivalentes (Carga RL//C)

Como critério de comparação, simulou-se a situação onde a carga FTH harmônica foi chaveada com o capacitor conectada e, logo após, desconectou-se o

capacitor, com a medição de corrente na carga RL//C. Notou-se que o capacitor realmente sofre os efeitos dos harmônicos provenientes da carga FTH, pois quando se retira o capacitor, a distorção de corrente cai drasticamente. As formas de onda são mostradas na Figura 55.

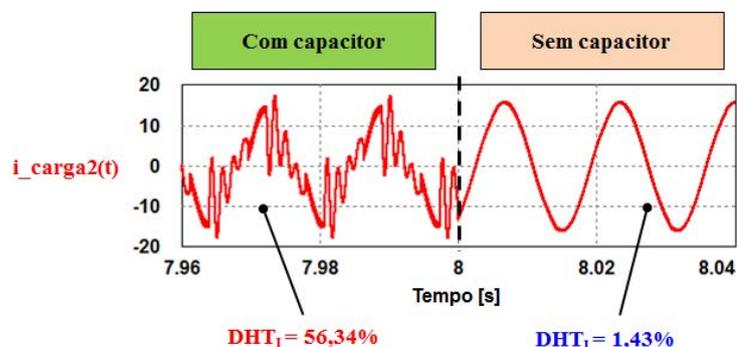


Figura 55 - Efeito do capacitor na corrente da carga RL//C

5.2.4.3. Medição e análise para a carga tipo fonte de tensão (FTH)

A Figura 56 apresenta as formas de onda de tensão e corrente na carga FTH.

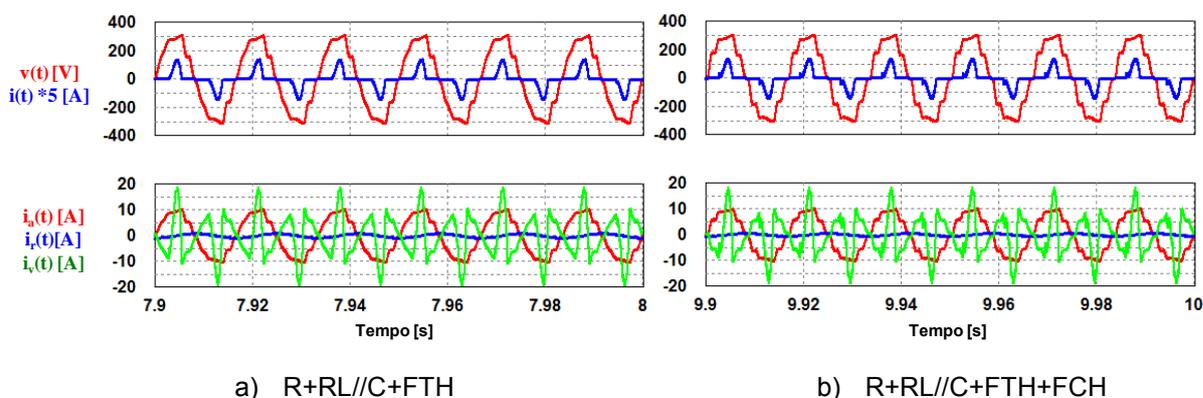


Figura 56 – Formas de onda da carga equivalente a) R+RL//C+FTH, b) R+RL//C+FTH+FCH (medição na carga FTH): superior (tensão e corrente), inferior (componentes de corrente decompostas através da CPT).

Nota-se que a carga FTH também sofre os efeitos provocados pela carga FCH, aumentando o nível de distorção na forma de onda da tensão no PAC. A Tabela 29 apresenta os termos de potência e corrente da CPT, fatores de conformidade de carga e distorções de tensão e corrente.

Tabela 29 – Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente a) R+RL//C+FTH, b) R+RL//C+FTH+FCH (medição carga FTH).

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2305,77	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	216,83	Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2212,97	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	215,41
	P [W]	1551,74		\hat{V} [Vs]	0,57		P [W]	1524,26		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VAR]	135,35		I [A]	10,63		Q [VAR]	83,22		I [A]	10,27
	W_r [J]	0,45	Correntes da CPT	I_a [A]	7,16		W_r [J]	0,29	Correntes da CPT	I_a [A]	7,08
	D [VA]	1700,11		I_r [A]	0,62		D [VA]	1602,17		I_r [A]	0,39
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,67	Distorção Harmônica Total	I_v [A]	7,84	Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,69	Distorção Harmônica Total	I_v [A]	7,44
	λ_Q	0,09		DHT _v [%]	8,16		λ_Q	0,05		DHT _v [%]	10,16
	λ_D	0,74		DHT _i [%]	104,94		λ_D	0,72		DHT _i [%]	100,73

a) R+RL//C+FTH

b) R+RL//C+FTH+FCH

A evolução dos fatores de conformidade pode ser observada nas Figura 57 e Figura 58.

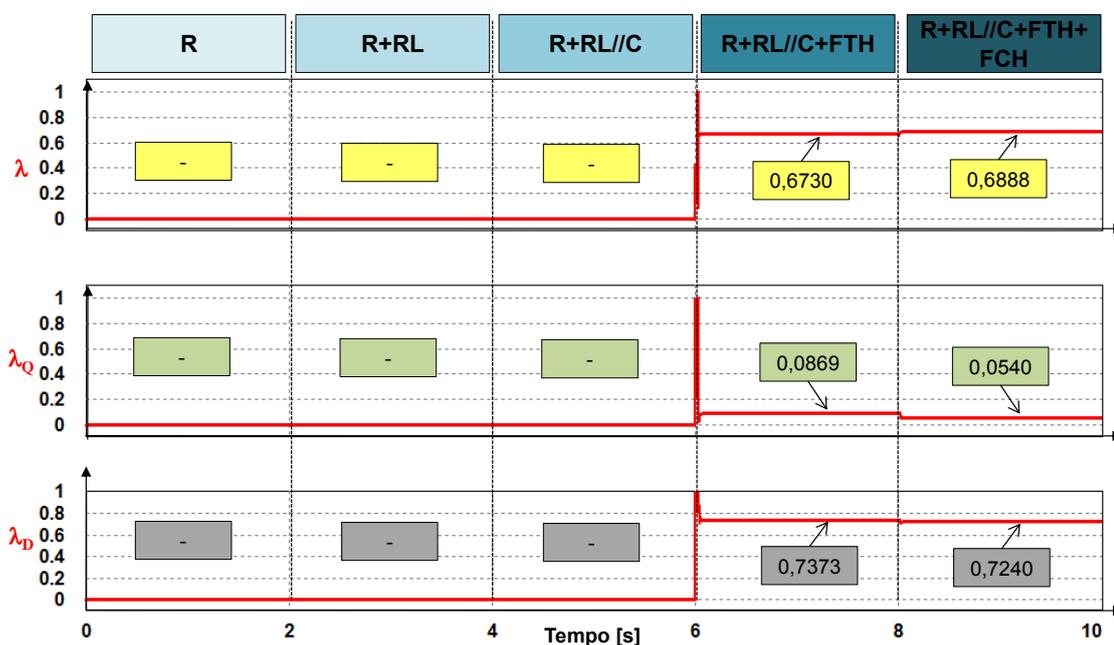


Figura 57 – Evolução dos fatores de conformidade das cargas equivalentes (Carga FTH)

O incremento no nível de DHT_v provocado pela introdução da carga FCH (de 8,2% para 10,2%) não está diretamente relacionado com o aumento da potência residual da CPT, que de fato diminui (de 1700,11 VA para 1602,17 VA). Verifica-se que o fator de não linearidade (de 0,74 para 0,72) e o DHT_i (de 104,94% para

100,73%) também diminuem. Além disso, podemos observar que os efeitos introduzidos pela carga FCH influenciam muito pouco no valor do fator de potência, que neste caso foi incrementado ligeiramente (de 0,67 para 0,69).

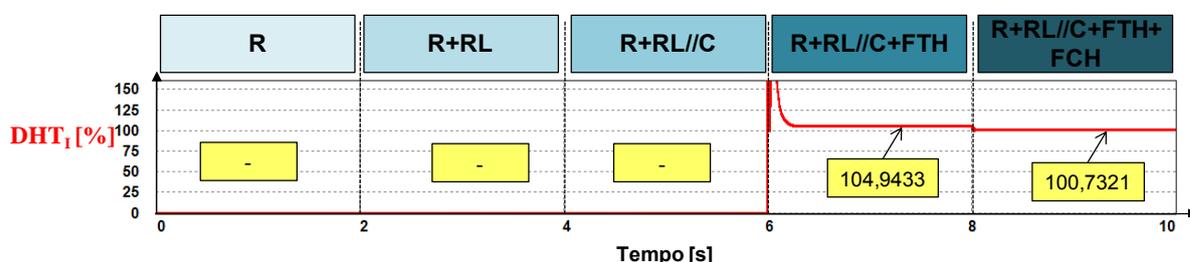


Figura 58 - Evolução do DHT de corrente considerando as cargas equivalentes (Carga FTH).

• Comentários gerais

A Figura 59 apresenta os parâmetros da caracterização da carga.

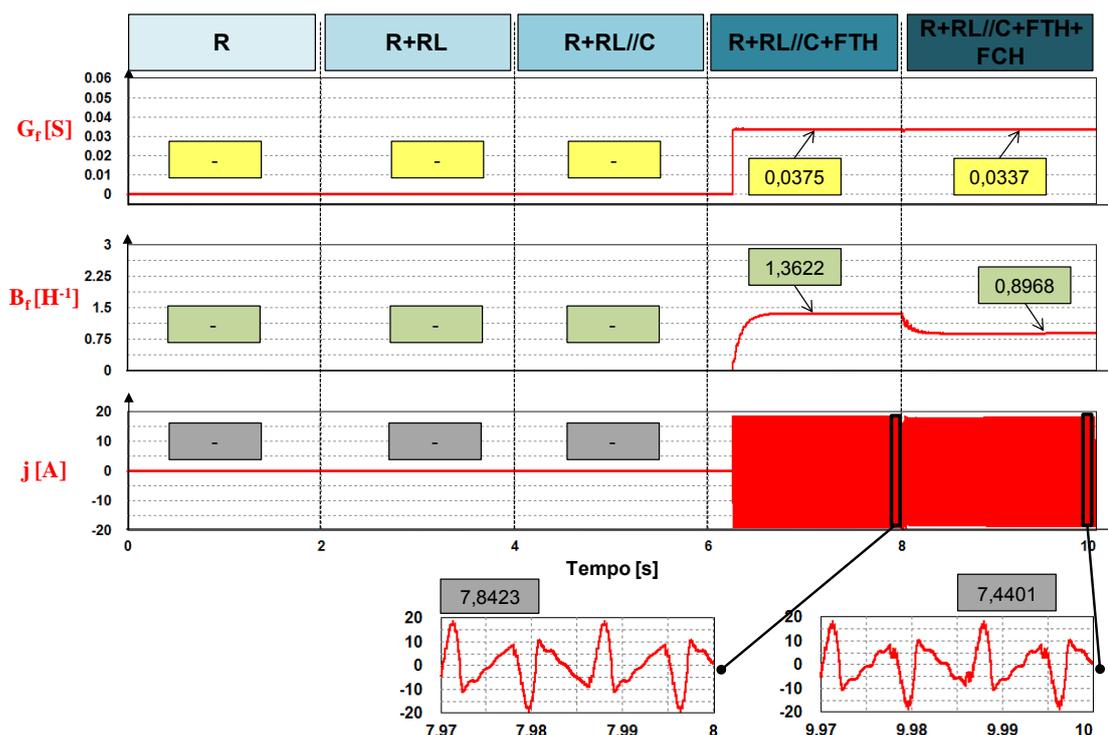


Figura 59 – Evolução da caracterização das cargas equivalentes (Carga FTH).

Observa-se que, a caracterização da condutância da carga é mantida aproximadamente constante (0,0337S) e muito próximo do valor teórico (0,0338S), por outro lado a reatidade estimada apresenta uma diferença, que pode estar relacionado com baixos valores da energia reativa (equação 3.33).

5.2.4.4. Medição e análise para a carga tipo fonte de corrente (FCH)

As formas de onda de corrente e tensão é apresentada na Figura 60.

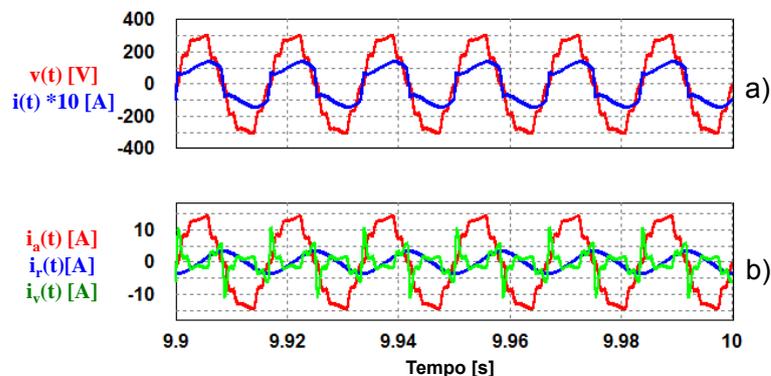


Figura 60 - Formas de onda da carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH (medição na carga FCH): a) tensão e corrente e b) componentes de corrente decompostas através da CPT.

Observa-se que, quando todas as cargas estão ligadas a forma de onda da tensão é mais distorcida que no caso anterior. Assim neste caso há um compartilhamento de responsabilidade entre as duas cargas não lineares, desde que ambas contribuem com a distorção da tensão no PAC. A Tabela 30 apresenta os resultados simulados.

Tabela 30 - Termos de potência, corrente, fatores de conformidade de carga, energia reativa e integral imparcial de tensão através da CPT e DHTs de tensão e corrente para a carga equivalente R+RL//C+FTH+FCH (medição carga FCH).

Potências e Energia Reativa da CPT	A [VA]	2341,66	Tensão e Corrente & Integral Imparcial de Tensão da CPT	V [V]	215,41
	P [W]	2166,03		\hat{V} [Vs]	0,57
	Q [VA _r]	514,44		I [A]	10,89
	W _r [J]	1,40	Correntes da CPT	I _a [A]	10,05
	D [VA]	725,99		I _r [A]	2,39
		I _v [A]		3,37	
Fatores de Conformidade de Carga da CPT	λ	0,93	Distorção Harmônica Total	DHT _v [%]	10,16
	λ_Q	0,23		DHT _i [%]	29,33
	λ_D	0,31			

Mesmo apresentando distorção harmônica de corrente e de tensão de, aproximadamente 29% e 10%, respectivamente, essa carga contém alto fator de

potência ($>0,92$). Portanto, mesmo que a carga esteja injetando harmônicas na rede, esta não será penalizada pelo fator de potência. Finalmente, a Figura 61 mostra a caracterização da carga.

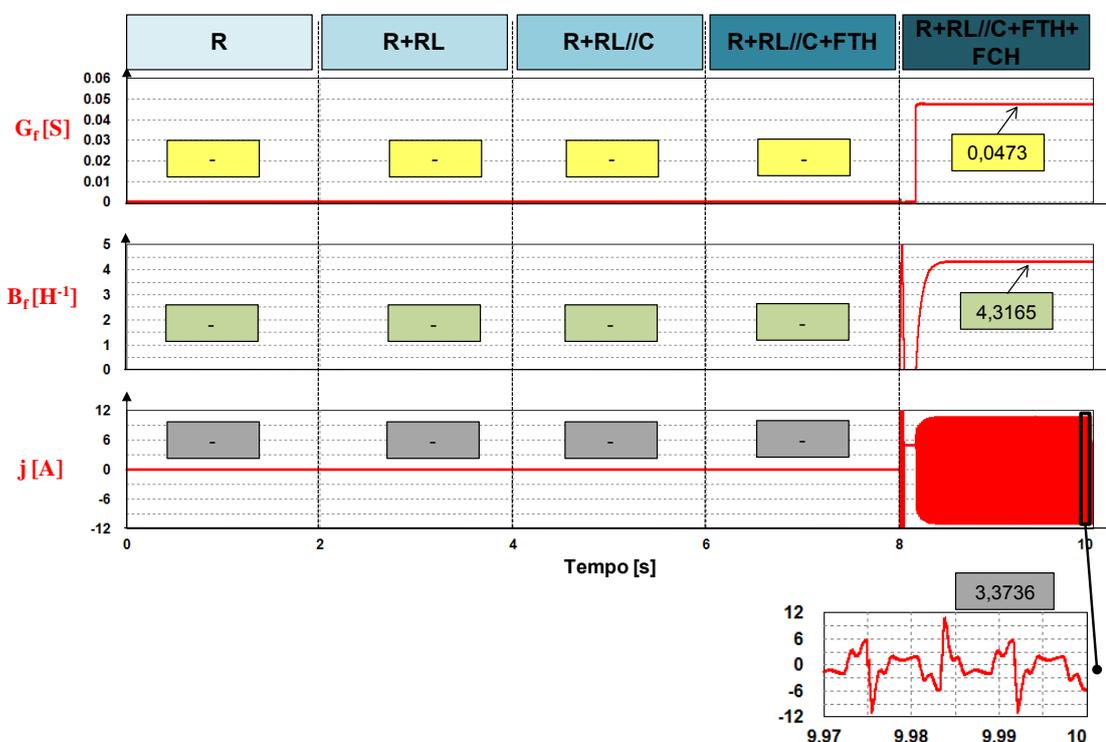


Figura 61 - Caracterização da carga equivalente (FCH).

5.3. Estimação da Impedância de Linha

Com as análises anteriores, foi possível conhecer o comportamento de cada carga em duas situações distintas: de forma isolada (analisada separadamente) e conectadas uma após a outra no PAC. Esta segunda situação permitiu identificar como uma carga interfere em outra, principalmente levando em consideração as não linearidades. Além disso, investigou-se a questão da modelagem de carga a partir das definições da CPT, tanto nas situações isoladas, como variando as cargas no PAC e observando o comportamento da modelagem das cargas. Nestas condições, observou-se que as correntes harmônicas drenadas pelas cargas não lineares, mediante a impedância de linha, influenciam nos níveis de distorção na tensão no PAC. Assim, esta etapa visa estudar a questão da estimação da impedância de linha do sistema. Com isso, pode-se avançar no estudo permitindo modelar um circuito

equivalente contendo além da impedância de linha (estimada), a caracterização (modelo estimado) de carga extraído das simulações anteriores e, assim, aplicar a metodologia de atribuição de responsabilidades aos circuitos equivalentes.

Quando não existem distorções harmônicas na rede, ou seja, condição senoidal, a separação de responsabilidades assim como a estimação da impedância de linha, torna-se desnecessária, uma vez que as cargas se responsabilizam pelas energias ativa ou reativa que consomem. Entretanto, na presença de não linearidades, viu-se que é necessária uma métrica ou metodologia que busque separar as contribuições (responsabilidades) de cada carga. A estratégia da metodologia de separação de responsabilidades está justamente na identificação das parcelas de potência da CPT considerando apenas a componente fundamental da tensão e corrente, que justamente seria o que a fonte de tensão está fornecendo às cargas, assim como discutido em (PAREDES et. al, 2007). Portanto, tendo estimado (gerado) um circuito equivalente contendo a impedância de linha (estimada) e a caracterização da carga, pode-se aplicar a metodologia de atribuição de responsabilidades e extrair as parcelas de potência da CPT apontadas às cargas.

Portanto, nessa etapa, para estimar a impedância de linha usou-se justamente a situação onde todas as cargas estão conectadas ao PAC. Dessa forma, garante-se uma condição em que exista distorção harmônica de tensão e corrente no PAC. A Figura 5, no capítulo 3, apresenta o esquemático do circuito equivalente da impedância de linha que contém uma fonte de tensão senoidal e_f , uma resistência de linha R_s e uma indutância de linha L_s . A estimação é realizada conforme as equações (3.45), (3.46) e (3.47) descritas no capítulo 3.

Os valores estimados são mostrados na Tabela 31. A tensão $e_{f_{RMS}}$ da tabela corresponde ao valor eficaz da fonte de tensão que é senoidal.

Tabela 31 – Valores de impedância de linha estimados.

Estimação da Impedância de linha	R_s [Ω]	0,1040
	L_s [μ H]	808,9613
	$e_{f_{rms}}$ [V]	219,9358

A resistência R_S estimada obteve valor idêntico à soma das resistências do primário e secundário do transformador ($R_{PRI} = R_{SEC} = 0,052\Omega$). A soma das indutâncias do primário e secundário vale $830\mu H$ ($415\mu H$ cada). A indutância L_S estimada foi de $809\mu H$. Assim, o erro entre a indutância estimada e as somas das do transformador (L_{PRI} e L_{SEC}) é de 2,53% (De fato, a reatância de magnetização X_m pode ser desprezada dos cálculos, pois simboliza um circuito aberto – alta impedância). A fonte de alimentação senoidal utilizada no circuito foi de 220V eficaz. A estimação garantiu uma fonte de tensão senoidal de 219,9358V. O erro entre os dois é de 0,03%. No geral, a estimação de impedância de linha apresentou êxito. A Figura 62 apresenta os resultados da estimação através da simulação.

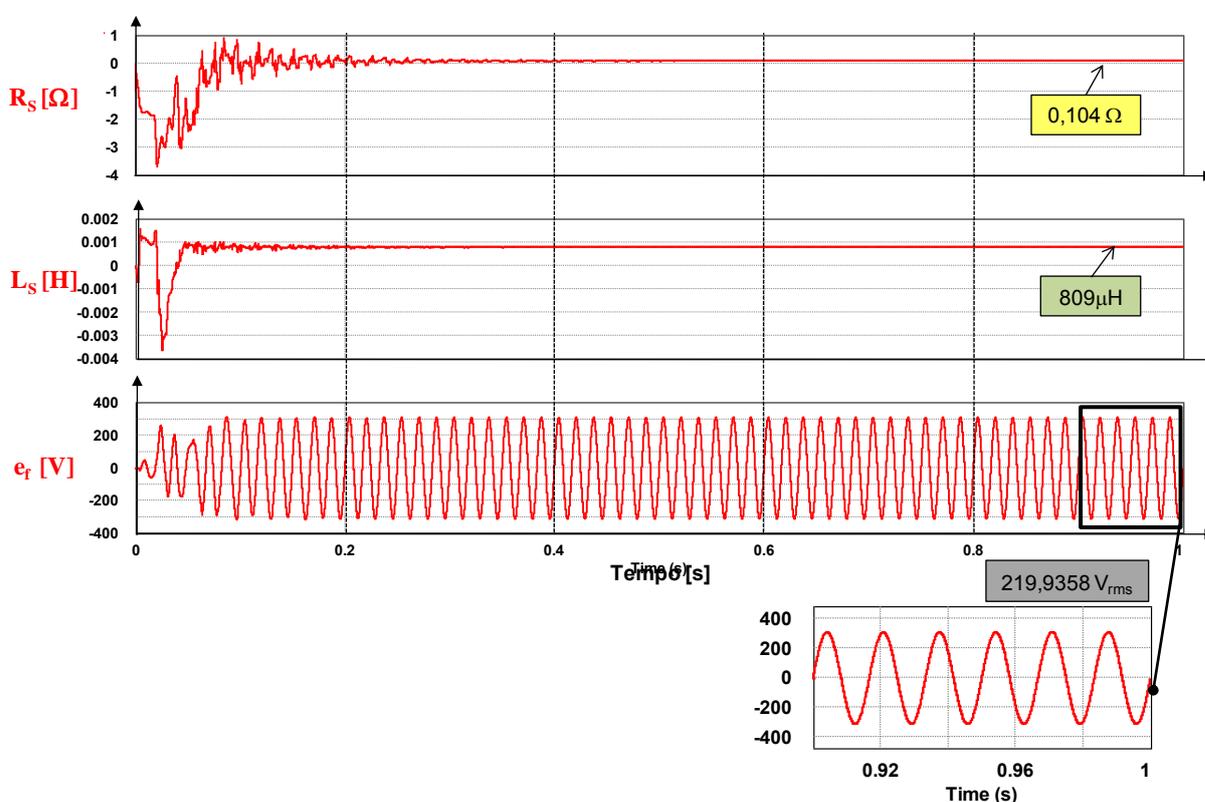


Figura 62 – Resultado da estimação de impedância de linha durante simulação.

5.4. Metodologia de atribuição de responsabilidades

A metodologia de atribuição de responsabilidades tem objetivo de ser uma referência no sentido de apontar as parcelas de potência que as cargas, conectadas em um ponto comum, deveriam ser responsabilizadas. Como as cargas não lineares

contribuem e interferem na idealidade da tensão do barramento, todas as outras cargas sentirão as distorções harmônicas de tensão. Essa metodologia considera, para tanto, a utilização apenas da componente fundamental da tensão do barramento para fins de atribuição de responsabilidades.

Assim, a partir dos parâmetros da estimação de impedância de linha e caracterização de carga advindos das etapas anteriores do trabalho, aplica-se a metodologia de atribuição de responsabilidades, onde se apontam as parcelas de potência da CPT, bem como os parâmetros de conformidade relacionados às cargas.

A metodologia de atribuição de responsabilidades será aplicada, neste trabalho, considerando a situação na qual todas as cargas estão conectadas ao PAC. Além disso, serão discutidas duas situações (ou circuitos equivalentes). A primeira considera um equivalente visto por todas as cargas (medição no PAC) e a outra considera a medição em cada carga, justamente com o intuito de utilizar os parâmetros da caracterização de carga realizada nas etapas anteriores para a aplicação da metodologia. Com isso pretende-se observar o consumo geral das cargas, bem como os valores apontados a cada carga segundo a metodologia de atribuição de responsabilidades.

Sendo assim, o circuito equivalente da Figura 63 considera a caracterização de carga com os parâmetros vistos pelo PAC, conforme resultados da seção (5.2.3.4.) e os valores da estimação de impedância de linha conforme (seção 5.3.). Como comentado anteriormente, a metodologia calcula as parcelas de potência relacionada a esse circuito equivalente através da componente fundamental de tensão. Nota-se que a fonte de corrente harmônica j é representada pela sua forma de onda, conforme observado nos resultados anteriores (curva abaixo).

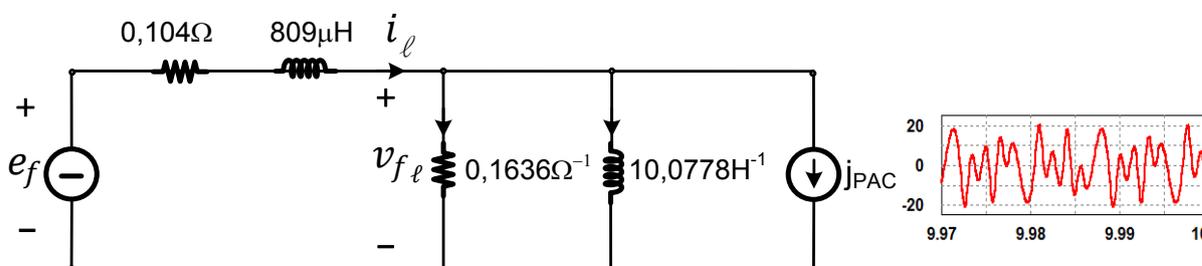


Figura 63 – Circuito utilizado para fins de atribuição de responsabilidades vista pelo PAC.

Fonte: Próprio autor.

Da mesma forma, o circuito equivalente da Figura 64 considera a caracterização de carga referente a cada carga conectada em paralelo no PAC. A caracterização das cargas R (seção 5.2.4.1.), RL//C (seção 5.2.4.2.), da FTH (seção 5.2.4.3.) e da FCH (seção 5.2.4.4.) foram utilizadas juntamente com os valores da estimação de impedância de linha (seção 5.3.). Nota-se que, de acordo com os resultados obtidos, a carga R foi simplificada para apenas a condutância fundamental. Como comentado anteriormente, a metodologia de atribuição de responsabilidade aponta as parcelas de potência relacionadas a cada carga separadamente através da componente fundamental de tensão.

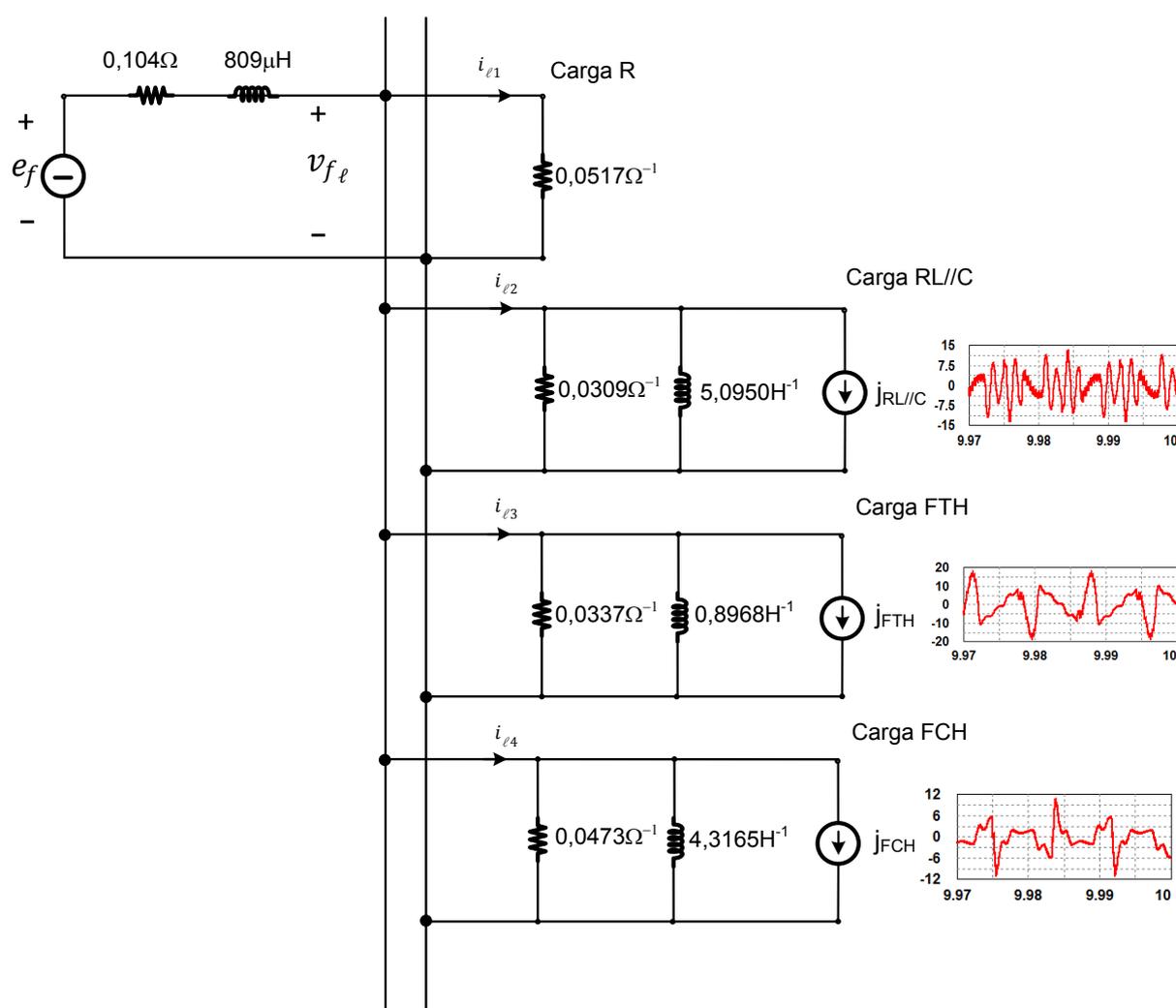


Figura 64 - Circuito utilizado para fins de atribuição de responsabilidades para cada carga.

Fonte: Próprio autor.

- **Medição no PAC**

Os resultados da metodologia de atribuição de responsabilidades vistos pelo PAC são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Potências e fatores de conformidade apontados ao PAC

Potências Apontadas ao PAC	$A_{\ell PAC}$ [VA]	7935,11	Fatores de conformidade - PAC	$\lambda_{\ell PAC}$	0,95
	$P_{\ell PAC}$ [W]	7518,18		$\lambda_{Q_{\ell PAC}}$	0,16
	$Q_{\ell PAC}$ [Var]	1221,58		$\lambda_{D_{\ell PAC}}$	0,28
	$D_{\ell PAC}$ [VA]	2225,01			

Os resultados da Tabela 32 podem ser diretamente relacionados e comparados com os da Tabela 25 (utilização da CPT com todas as cargas conectadas e medição no PAC). Um ponto interessante de se observar é a potência ativa. Olhando para as parcelas calculadas através da metodologia de atribuição de responsabilidades, observa-se que a potência ativa apontada à carga é maior que a potência ativa total ($P_{\ell PAC} = 7535 > 7508 = P$) calculada na Tabela 25 (que considera todo espectro harmônico). Ora, esse resultado vai ao encontro das discussões levantadas em (PAREDES et. al., 2007), onde se questionou sobre tarifação de componentes harmônicas de potência. No estudo verificou-se que as potências ativas de parcelas harmônicas poderiam ser tanto positivas (fluxo de potência da fonte para carga), quanto negativas (fluxo de potência da carga para a fonte), sendo esse último um resultado não intuitivo. Assim, a potência ativa fundamental poderia ser, em determinadas situações, maior que a potência ativa global. Ainda assim, a utilização da potência ativa como critério para atribuição de responsabilidades denota ser um ponto interessante, uma vez que essa parcela representa a potência que realmente é cedida da fonte para a carga (fluxo unidirecional de potência). Similarmente, para a potência reativa, temos que o total é menor que a apontada à carga ($Q_{\ell PAC} = 1221 > 1199 = Q$).

- **Medição na Carga R**

Os resultados da metodologia de atribuição de responsabilidades vistos pela carga R são apresentados na Tabela 33.

Tabela 33 - Potências e fatores de conformidade atribuídos à carga R

Potências Apontadas à Carga R	$A_{\ell 1}$ [VA]	2372,67	Fatores de conformidade - Carga R	$\lambda_{\ell 1}$	1
	$P_{\ell 1}$ [W]	2372,67		$\lambda_{Q\ell 1}$	0
	$Q_{\ell 1}$ [VAr]	0,00		$\lambda_{D\ell 1}$	0
	$D_{\ell 1}$ [VA]	0,00			

Segundo a metodologia, essa carga deveria ser responsabilizada apenas pelo consumo dos ativos na componente fundamental da frequência medida no PAC. De fato, pela natureza da carga, apenas o fluxo unidirecional de potência é realizado (da fonte para a carga). Toda energia fornecida é transformada em trabalho útil. Assim, fazendo um comparativo com os resultados apresentados na Tabela 27d), nota-se que a potência ativa total é de fato maior que a potência ativa apontada à carga ($P_{\ell 1} = 2372 < 2380 = P$), uma vez que as harmônicas também geram trabalho na carga resistiva. Assim, essa carga seria beneficiada por ser taxada pela fundamental. Entretanto, ela sofre os efeitos das distorções no PAC advindas de outras cargas.

- **Medição na Carga RL//C**

Os resultados da metodologia de atribuição de responsabilidades vistos pela carga RL//C são mostradas na Tabela 34.

Tabela 34 – Potências e fatores de conformidade apontados à carga RL//C

Potências Apontadas à Carga RL//C	$A_{\ell 2}$ [VA]	1985,40	Fatores de conformidade - Carga RL//C	$\lambda_{\ell 2}$	0,72
	$P_{\ell 2}$ [W]	1420,74		$\lambda_{Q\ell 2}$	0,40
	$Q_{\ell 2}$ [VAr]	611,63		$\lambda_{D\ell 2}$	0,63
	$D_{\ell 2}$ [VA]	1244,69			

Como visto anteriormente nos resultados da Tabela 28d), com a introdução das cargas não lineares, a carga RL//C começa a se comportar de maneira não convencional, drenando correntes harmônicas devido à ressonância com a tensão do PAC. Isso promove uma grande parcela de potência residual. O mesmo ocorre com os resultados da Tabela 34. As potências são calculadas através da alimentação do circuito pela tensão fundamental. Entretanto, pelo fato da existência

da fonte de corrente harmônica no modelo, as distorções de corrente são consideradas, o que resulta em uma considerável potência residual. Como visto nos resultados da medição no PAC, nota-se que a potência ativa fundamental (apontada à carga pela metodologia) é maior que a total, uma vez que existe um fluxo de potência harmônica da carga para a fonte fazendo com que se criem potências ativas negativas de certas ordens harmônicas.

Ora, do ponto de vista da carga, ela não pode ser responsabilizada pela alta distorção de tensão no PAC, pois conceitualmente não se trata de uma carga não linear. Mas, em tal situação, ela age como se o fosse, pois de acordo com a definição, carga não linear converte corrente com forma de onda diferente da tensão. Ainda assim, responsabilizá-la pela potência residual não seria coerente, pois ainda que ela contribua para o aumento da distorção no PAC, não é ela que as geram.

Dessa maneira, atribuir responsabilidade pela potência ativa fundamental mostra-se uma estratégia mais igualitária. Ademais, o capacitor foi introduzido a essa carga com o intuito de elevar o fator de potência a 0,92 na fundamental, conforme visto nos resultados anteriores. Com a tensão distorcida no PAC o fator de potência foi reduzido para 0,72. Assim, seria correto taxá-la por excedentes de reativos, por ter extrapolado o fator de potência? Enfim, essa discussão permeia regulamentações, teorias de potência, equipamentos medidores de energia, investimentos governamentais etc. Esses são alguns pontos de vista que reforçam a estratégia da metodologia de responsabilizar as cargas pela potência ativa fundamental, não esquecendo, obviamente, das características e comportamentos complexos globais da carga, ainda mais num ambiente com microrredes de energia contribuindo para a dinâmica do sistema, por exemplo.

- **Medição da Carga FTH**

Os resultados da metodologia de atribuição de responsabilidades apontados à carga FTH são apresentados na Tabela 35. Essa carga não linear é uma das causadoras das não linearidades impostas ao PAC. Quando ela foi analisada sozinha, conforme Figura 38, ela drenava uma corrente com 112% de DHT_I . Nessa situação, o DHT_V causado por essa carga especificamente era de 5,7%.

Tabela 35 - Potências e fatores de conformidade apontados à carga FTH

Potências Apontadas à Carga FTH	$A_{\ell 3}$ [VA]	2224,15	Fatores de conformidade - Carga FTH	$\lambda_{\ell 3}$	0,70
	$P_{\ell 3}$ [W]	1548,47		$\lambda_{Q_{\ell 3}}$	0,06
	$Q_{\ell 3}$ [VAr]	97,54		$\lambda_{D_{\ell 3}}$	0,72
	$D_{\ell 3}$ [VA]	1593,61			

Na situação em que as cargas foram sendo conectadas uma após a outra, com a introdução da carga FTH foi medido 105% de DHT_I (conforme Figura 58). Como comentado, a carga RL//C foi altamente prejudicada pelos harmônicos impostos pela FTH, sendo que se observou 56,3% de DHT_I (conforme Figura 53). Além disso, no PAC foram medidos 37,9% de DHT_I e 8,2% de DHT_V , que é uma resultante dos distúrbios acima comentados (Figura 46). Ou seja, apenas com a introdução dessa carga produziu-se os esses níveis de distorção harmônica. Isso é refletido no alto valor de potência residual que, de fato, é maior até que o da potência ativa fundamental, conforme Tabela 35. Entretanto, a concessionária poderia monitorar as distorções nesse PAC e propor estudos de mitigação dos conteúdos harmônicos. Assim, a potência ativa apontada a carga é maior que a potência ativa (conforme Tabela 29b). Talvez em um ambiente com medidores inteligentes interconectados entre si, possa-se conhecer melhor a característica das cargas nos PACs consumidores, quanto aos níveis de distorção harmônica gerados etc. Ainda assim, muito se tem que evoluir no sentido de definições e regulamentações em atribuição de responsabilidades. Similarmente, para a potência reativa, temos que o total é menor que a apontada à carga ($Q_{\ell 3} = 97,54 > 83,22 = Q$).

- **Medição da Carga FCH**

Os resultados da metodologia de atribuição de responsabilidades apontados à carga FCH são apresentados na Tabela 36.

Tabela 36 - Potências e fatores de conformidade apontados à carga FCH

Potências Apontadas à Carga FCH	$A_{\ell 4}$ [VA]	2349,56	Fatores de conformidade - Carga FCH	$\lambda_{\ell 4}$	0,93
	$P_{\ell 4}$ [W]	2176,13		$\lambda_{Q\ell 4}$	0,23
	$Q_{\ell 4}$ [VAr]	512,40		$\lambda_{D\ell 4}$	0,31
	$D_{\ell 4}$ [VA]	722,75			

Essa carga não linear também é uma das causadoras das não linearidades impostas ao PAC. Quando analisada sozinha, conforme Figura 38, ela drenava uma corrente com 27,5% de DHT_I . Nessa situação, o DHT_V causado por essa carga especificamente era de 3,56%.

Na situação em que as cargas foram sendo conectadas uma após a outra, com a introdução da carga FCH foi medido 29,3% de DHT_I (conforme Tabela 30). Como já comentado, a carga RL//C foi altamente prejudicada pelos harmônicos impostos pela FCH, sendo que se observou 79,6% de DHT_I (conforme Figura 53). Além disso, no PAC foram medidos 26,8% de DHT_I e 10,1% de DHT_V , que é uma resultante dos distúrbios acima comentados. Apesar dessa carga também drenar correntes com conteúdos harmônicos, no geral sua inclusão proporciona a diminuição do DHT_I , mas aumento do DHT_V que se apresenta acima do limite de referência do PRODIST. Seria o caso, então, da concessionária tentar mitigar os efeitos das distorções harmônicas no PAC. Entretanto, essa carga apresenta um maior consumo ativo comparado com as potências residual e reativa geradas, como se observa na Tabela 36. Essa carga também apresenta a potência ativa apontada à carga maior que a potência ativa (conforme Tabela 30) $P_{\ell 4} = 2176 > 2166 = P$.

5.5. Conclusões preliminares

O presente capítulo apresentou o circuito modelo de estudo composto por cargas lineares e não lineares, bem como um transformador representando a impedância de linha. As cargas foram analisadas conforme duas estratégias, ou seja, de forma separada e de forma a serem conectadas uma após a outra no PAC. Nessa etapa buscou-se tirar resultados da CPT e discuti-los. Além disso, foi possível

obter o circuito equivalente de carga pela CPT (carga separada) e a caracterização de carga (cargas juntas). Pode-se concluir que, ainda que os parâmetros da caracterização apresente pequenos erros comparados com os equivalentes da CPT, no intuito de atribuição de responsabilidades a condutância fundamental – parâmetro que representa o consumo ativo da carga e com o menor erro calculado – apresentou êxito.

Além disso, utilizou-se a situação em que todas as cargas estavam conectadas ao PAC para se fazer a estimação da impedância de linha. Com o modelo da impedância de linha e com a caracterização das cargas, utilizou-se o modelo equivalente para aplicar a metodologia de atribuição de responsabilidades às cargas. Observou que, tirando a carga resistiva, todas as outras apresentaram a potência ativa apontada à carga (fundamental) maior que a potência ativa total, justamente pela influência do fluxo de potência harmônica da carga para a fonte. Apesar das discussões levantadas, um critério para se responsabilizar as cargas seja utilizando a potência ativa fundamental. Mas isso não é uma conclusão final. Estudos e novas regulamentações devem alavancar esse complexo tema de atribuição de responsabilidades que, por hora, não é comentado nas determinações do PRODIST, por exemplo.

6. Conclusões gerais

Esta dissertação de mestrado explorou a temática da atribuição de responsabilidades em circuitos elétricos monofásicos. No capítulo introdutório foram levantados os aspectos que embasam o entendimento do problema. O capítulo 2 buscou na literatura alguns trabalhos que se encontram dentro do contexto do tema do trabalho. Assim, questões relacionadas à qualidade de energia elétrica com ênfase em distorções harmônicas, algumas normas nacionais e internacionais que evidenciam o problema também foram abordadas. Além disso, uma breve introdução acerca de Teorias de Potência em análise de circuito elétricos sob condição não senoidal também foi explicitada. Nesse contexto, o capítulo 2 ainda abordou os temas de caracterização de carga e estimação de impedância de linha, evidenciando e justificando o trabalho. Algumas metodologias de atribuição de responsabilidades sobre as distorções harmônicas também foram apresentadas e discutidas.

No capítulo 3, toda parte teórica necessária para o entendimento da presente dissertação foi revisada e descrita. As definições da Teoria de Potência Conservativa, bem como as definições da caracterização de carga e estimação de impedância de linha foram explicitadas. Além disso, a metodologia de atribuição de responsabilidades que leva em consideração um modelo equivalente composto pela impedância de linha estimada e pela caracterização de cargas foi também descrita.

O capítulo 4 focou em algumas considerações da Teoria de Potência Conservativa, caracterização de cargas e estimação de impedância de linha. O objetivo desse capítulo foi estudar os conceitos apresentados anteriormente. Para isso foram utilizados alguns exemplos (circuitos elétricos). Verificou-se que a energia reativa está relacionada a uma definição mais geral, ou seja, está relacionada com a defasagem entre corrente e tensão em cada parcela harmônica, e não apenas com a troca de energia entre elementos armazenadores de energia, como apontando em

(TENTI, 2011b). Além disso, mostrou-se a influência da impedância de linha na geração de harmônicos de tensão no PAC. Nesse capítulo, estudou-se, ainda, o modelo equivalente de carga da CPT, onde apresenta circuitos distintos dependendo do sinal da energia reativa, ou seja, se positivo ou negativo. O mesmo estudo foi realizado utilizando a caracterização de carga.

O capítulo 5 apresentou o modelo mais geral utilizado para a aplicação da metodologia de atribuição de responsabilidades. O modelo foi composto por quatro cargas distintas para esse estudo, sendo duas lineares e duas não lineares. Fez-se na primeira etapa a simulação das cargas separadas no PAC e, na segunda sendo conectadas “uma após a outra”. Nessas duas etapas, os circuitos propostos foram avaliados e os resultados foram discutidos. Verificou-se que as cargas não lineares ao PAC que causam correntes harmônicas, são responsáveis pelas distorções harmônicas na tensão no PAC. Esse fenômeno provocou que cargas lineares RL e RL//C drenassem correntes harmônicas pelo fato da ressonância da impedância da carga com as harmônicas da tensão. Nessa etapa, mostrou-se que a caracterização de carga apresenta resultados bastante similares ao circuito equivalente da CPT em relação aos componentes “ativos” (condutâncias e resistências). Por este fato, realizar a caracterização da carga se mostrou uma estratégia interessante quando há presença de harmônicas no sistema.

Além da medição realizada no PAC foi efetuada também a medição de corrente em cada carga, com o objetivo de observar o comportamento de cada carga ao se conectarem as cargas uma após a outra no PAC. Essa estratégia proporcionou uma visão interessante e bastante diferenciada do comportamento do modelo, em relação às formas de onda, componentes de potências etc. Do mesmo modo, foi possível obter a caracterização de carga em vários instantes das análises e compará-las com os modelos obtidos a partir do PAC, bem como avaliar se as características de cada carga variavam. Como comentado, a distorção de tensão influencia na caracterização dos parâmetros da carga, mas no geral, os valores apresentaram resultados aceitáveis, principalmente se tratando dos componentes “ativos”.

Após o estudo das cargas, fez-se a estimação da impedância de linha do modelo. Os resultados da estimação apresentaram pequenos erros comparados com os valores teóricos utilizados, mostrando resultados aceitáveis. Cabe salientar que o transformador utilizado como impedância de linha do modelo não leva em consideração características de saturação.

Por último, estudou-se a aplicação da metodologia de atribuição de responsabilidades (PAREDES, 2012), mas aplicada em circuitos monofásicos, ou seja, a partir do modelo completo proposto contendo a impedância de linha estimada e a caracterização da carga realizada nas etapas anteriores do estudo, aplicou-se a CPT para calcular as parcelas de potência, considerando a tensão fundamental no PAC desse circuito equivalente. Verificou-se que, uma vez que a potência ativa fundamental representa o fluxo de energia unidirecional que flui exclusivamente da fonte de alimentação para a carga, somado ao fato de que a caracterização de carga dos componentes “ativos” apresentou resultados bastante aceitáveis, pode-se concluir que a parcela de potência ativa apontada à carga P_ℓ poderia ser caracterizada como responsabilidade de consumo de cada carga. Em relação às demais parcelas de potência, ou seja, a reativa e a residual apontadas à carga, verificou-se que a separação desses efeitos não se mostrou clara, devido principalmente à presença dos conteúdos harmônicos presente. Por exemplo, seria correto responsabilizar a carga linear RL//C pela sua geração de harmônicos de corrente devido à tensão distorcida do PAC, sendo que quem provoca esse efeito são as cargas não lineares?

Assim, cabe denotar ainda que o PRODIST não entra nesse mérito em suas definições, apenas se limita a estabelecer limites de referência às distorções harmônicas de tensão, sem ao menos estabelecer critérios de taxaço a valores excedentes, por exemplo. Ora, esse fato demonstra a complexidade do problema e que há muito a se estudar, compreender e regulamentar acerca dos fenômenos de potência e desse tema em geral.

Enfim, algumas propostas de trabalhos futuros são:

- Compreender o comportamento das parcelas de corrente da CPT em relação à análise em frequência;
-

-
- Estudar e compreender a atribuição de responsabilidades em um sistema com mais de uma fonte de 60Hz, conectadas em diferentes pontos da rede;
 - Avaliar a questão do desempenho da estimação da impedância de linha em relação à distorção harmônica de tensão;
 - Avaliar a questão da utilização de um modelo que leva em consideração a dinâmica de um transformador;
 - Aplicar a metodologia de atribuição de responsabilidades em equipamentos residenciais, ou seja, realizando a caracterização de carga e estimação da impedância da linha;
-

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Nota Técnica no. 0083/2012: Aprimoramento da Regulamentação Acerca do Fator de Potência e Cobrança do Excedente de Reativos.** 2012. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2012/065/documento/nota_tecnica_0083_daniel_dir.pdf. Acesso em: 17/08/2015.

_____. **PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica.** 2012. Revisão 6. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1877. Acesso em: 16/08/2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Vocabulário Eletrotécnico Internacional.** Capítulo 161: Compatibilidade Eletromagnética. pp. 7, Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: <http://www.abricem2.com.br/web3/pdfs/normas/vocabulario.pdf>. Acesso em: 29/08/2015.

BUDEANU, C. I. **Reactive and Fictitious Power.** Institut Romain de l’Energie, Bucharest, 1927.

BRASIL. **ITAIPU Binacional: integração ao Sistema Brasileiro.** Itaipu Binacional: Energia. Disponível em: <https://www.itaipu.gov.br/energia/integracao-ao-sistema-brasileiro>. Acesso em: 10/08/2015.

COSTA, F. H. da. **Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos Para a Modelagem de Cargas nos Estudos do Compartilhamento das Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas.** 2009. 99 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2009.

CZARNECKI, L. S. **Considerations on the Reactive Power In Nonsinusoidal Situations.** IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements, vol. IM-34, no.3, 1984.

_____. **Power Theories and Meta-Theory of Powers in Electrical Circuits.** Przegląd Elektrotechniczny, v. 87, n. 8, p. 198-201, 2011.

_____. **What's Wrong in Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power And Why it Should Be Abandoned.** IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements, vol. IM-36, no.3, pp 834-837, 1987.

DECKMANN, S. M; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica.** Material Disciplina de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Capítulo 1: A importância da Qualidade de Energia Elétrica. pp.1-10. UNICAMP. Campinas-SP. 2010a. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a1.pdf>. Acesso em: 15/08/2015.

_____. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica.** Material Disciplina de Pós Graduação em Engenharia Elétrica. Capítulo 2: Distúrbios que afetam a qualidade de energia. pp.1-20. UNICAMP. Campinas-SP. 2010b. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a2.pdf>. Acesso em: 15/08/2015.

_____. **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: 15/08/2015.

DEPPENBROCK, M. **Wirk- und Blindleistungen Periodischer Stroeme in Ein- und Mehrphasensystemen mit Periodischen Spannungen Beliebiger Kurvenform.** ETG Fahrberichte, no. 6, pp.17-59,1979.

LIBERADO, E. V. **Metodologia de Projeto Cooperativo para Condicionadores de Qualidade de Energia,** Dissertação de Mestrado, Pós Graduação em Engenharia Elétrica – Faculdade de Engenharia de Bauru – FEB/UNESP, Bauru, 2012.

EMANUEL, A. E. **Summary of IEEE Standard 1459: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions.** 2004. IEEE Transactions on Industry Applications. vol. 40, no.3, 2004.

FOGAÇA, T. V. **Estudo da Teoria de Potência Conservativa para Caracterização de Circuitos Elétricos Monofásicos em Condições Não-Senoidais**. 2013. 81 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Campus Experimental de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba-SP, 2013.

FRYZE, S. **Active, Reactive and Apparent Powers in Nonsinusoidal Systems**. *Przeegląd Elektrotechniczny*, no. 7, pp. 193-203, 1931.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS – IEEE. **Std. 519-2014: Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. IEEE: 2014.

Std. 1459-2010: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions. IEEE: 2010.

INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION – IEC. **Electromagnetical Compatibility (EMC), Part 2, Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current ≤ 16 A per phase)**, Edition 3.0, IEC: 2005.

KUSTERS, N. L.; MOORE, W. J. M. **On the Definition of Reactive Power Under Nonsinusoidal Conditions**. *IEEE Transactions on Power Application Systems*. Vol. PAS-99, pp. 1845-1854, 1980.

MANTOVANI, W. A. **Utilização de Redes Neurais Recorrentes na Caracterização de Cargas Não Lineares em Sistemas Elétricos**. 2011. 81 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, 2011.

MARAFÃO, F. P. **Análise e Controle da Energia Elétrica através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais**, Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, Campinas, 259 pp. 2015.

PAGE, C. H. **Reactive Power In Nonsinusoidal Situations**. in *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, vol. IM-29, pp. 420-423, 1980.

PENG, F. Z.; OTT, G. W.; ADAMS, D. J. **Harmonic and Reactive Power Compensation Based on Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire Systems**. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 13, no. 6, pp. 1174-1181, 1998.

PAREDES, H. K. M. **Teoria de Potência Conservativa: Uma Nova Abordagem Para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações Sobre Atribuição de Responsabilidades**, Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, Campinas, 2011.

PAREDES, H. K. M.; COSTABEBER, A.; TENTI, P. **Application of Conservative Power Theory to Cooperative Control of Distributed Compensators in Smart Grids**, in International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), 2010, vol., no., pp.190-196, 2010.

PAREDES, H. K. M.; MARAFÃO, F. P.; COSTABEBER, A.; TENTI, P. **Application of Conservative Power Theory to Load and Line Characterization and Revenue Metering**. In proc. Applied Measurements for Power Systems (AMPS), Aachen, 2012.

PAREDES, H. K. M., MARAFÃO, F. P., DECKMANN, S. M., SILVA, L. C. P. **Influência de Harmônicas na Tarifação de Energia Elétrica**. In Proc. Sociedade Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE-2007), 2007.

PAREDES, H. K. M., SILVA, L. P., MARAFÃO, F. P. **A Comparative Analysis of FBD, PQ and CPT Current Decompositions Part I: Three-Phase Three-Wire Systems**, In Proc. of IEEE - PowerTech, Bucharest, 2009.

PENFIELD, P.; SPENCER R.; DUINKER S. **Tellegen's Theorem and Electrical Networks**. Cambridge, MA & London: M.I.T. Press, 1970.

POMILIO, J. A., DECKMANN, S. M. **Caracterização e Compensação de Harmônicos e Reativos de Cargas Não Lineares, Residenciais e Comerciais**. Eletrônica de Potência, vol. 11, no. 1. 2006.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA – PROCEL.
Manual de Tarifação da Energia Elétrica. Rio de Janeiro: PROCEL, 2011.

Disponível

em:

<http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel%20EPP%20-%20Agosto-2011.pdf>. Acesso em: 14/08/2015.

REIS, P. H. F. dos. **Estudo da Teoria de Potência Conservativa Para Atribuição de Responsabilidades em Circuitos Monofásicos em Baixa Tensão.** 2013. 85 p. Trabalho de Conclusão de Curso. UNESP - Universidade Estadual Paulista - Campus Experimental de Sorocaba, Sorocaba-SP, 2013.

REIS, P. H. F. dos; MOREIRA, A. C.; SERNI, P. J. A.; PAREDES, H. K. M. **Aplicação da Teoria de Potência Conservativa Para Atribuição de Responsabilidades em Circuitos Monofásicos em Baixa Tensão.** 2014. XX Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte: 2014. Disponível em: <http://www.swge.inf.br/CBA2014/anais/PDF/1569935411.pdf>. Acesso em: 30/02/2015.

SANTOS, A. C. dos. **Uma Contribuição ao Processo do Compartilhamento de Responsabilidades sobre as Distorções Harmônicas via Chaveamento de Unidades Capacitivas.** 2015. 101 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2015.

SANTOS, I. N. **Uma Contribuição à Avaliação de Desempenho dos Principais Métodos Para Avaliação de Responsabilidades Sobre as Distorções Harmônicas.** 2007. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2007.

SANTOS, I. N. **Método da Superposição Modificado Como uma Nova Proposta de Atribuição de Responsabilidades Sobre Distorções Harmônicas.** 2011. 81 p. Tese (Doutorado em Ciências) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2011.

SHEPHERD, W.; ZAKIKHANI, P. **Suggested Definitions of Reactive Power For Nonsinusoidal Systems.** Proc. Inst. Electrical Engineering., vol. 120, pp. 704-706. 1973.

STAUDT, V. **Fryze-Buchholz-Depenbrock: a Time-domain Power Theory**. In Proc. of IEEE International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC-2008), Lagow, 2008.

TENTI, P.; PAREDES, H.K.M.; MARAFÃO, F.P.; MATAVELLI, P. **Accountability in Smart Microgrids Based on Conservative Power Theory**, in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.60, no.9, pp.3058-3069, 2011a.

TENTI, P; MATAVELLI, P., PAREDES, H. K. M. **Conservative Power Theory, Sequence Components and Accountability in Smart Grids**. in International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, ISNCC, pp.37-45. 2010.

TENTI, P.; PAREDES, H. K. M.; MATAVELLI, P. **Conservative Power Theory, a Framework to Approach Control and Accountability Issues in Smart Microgrids**, in IEEE Transactions on Power Electronics, vol.26, no.3, pp.664-673, 2011b.

TENTI, P.; COSTABEBER, A.; MATAVELLI, P.; MARAFÃO, F. P.; PAREDES, H. K. M., **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, 2014.

TOUPS, T. N. **Working Active Power, Reflected Active Power, And Detrimental Active Power in Power Systems**. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Agricultura e Mecânica, Universidade do Estado de Louisiana, Estados Unidos, 2011.

YUMAK, K.; USTA, O. **A Controversial Issue: Power Components In Nonsinusoidal Single-Phase Systems**. In 7th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 2011, vol., no., pp.I-157,I-161, 1-4 Dec. 2011.

WATANABE, E. H., AKAGI, H., AREDES, M. **Instantaneous p-q Power Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems**. In Proc. of IEEE International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC-2008), Lagow, 2008.

WILLEMS, J. L. **A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-Phase Situations**. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 45, no. 1, pp. 293-297. 1996.