



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS SOBRAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

AGNA KELLY UCHÔA FERNANDES

**ESTUDO COMPARATIVO DAS TEORIAS DE POTÊNCIA INSTANTÂNEA E
CONSERVATIVA**

SOBRAL
2019

AGNA KELLY UCHÔA FERNANDES

ESTUDO COMPARATIVO DAS TEORIAS DE POTÊNCIA INSTANTÂNEA E
CONSERVATIVA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira.

Coorientador: Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira.

SOBRAL

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Federal do Ceará

Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F398e Fernandes, Agna.

Estudo comparativo das Teorias de potência Instantânea e Conservativa / Agna Fernandes. – 2019. 70 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Curso de Engenharia Elétrica, Sobral, 2019.

Orientação: Profa. Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira. Coorientação: Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira.

1. Teorias de Potência. 2. potências instantânea. 3. potência conservativa. I. Título.

CDD 330

AGNA KELLY UCHÔA FERNANDES

ESTUDO COMPARATIVO DE TEORIAS DE POTÊNCIA INSTANTÂNEA E
CONSERVATIVA: ANÁLISE TEÓRICA E PRÁTICA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Vanessa Siqueira de Castro Teixeira (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Adson Bezerra Moreira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Francisco Breno Barbosa Freitas
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, os maiores
apoiadores da minha educação.

AGRADECIMENTOS

A meus pais, José Fernandes e Margarida Maria Uchôa Fernandes, um anjo no céu e outro na Terra que guiam o meu caminho.

Aos meus irmãos Rennar, Sedna e Naiani, que tanto me aconselharam para eu ser o que sou hoje em dia.

A professora orientadora Vanessa Siqueira de Castro Rodrigues e ao professor coorientador Adson Bezerra Moreira, que dedicaram seu tempo e compreensão para a realização desse trabalho.

Ao professor Erasmo Saraiva de Castro, que me apoiou e acreditou no meu potencial em um dos momentos mais difíceis da minha vida.

Aos meus amigos de graduação Allyson, Robson, Lara, Maria Clara, Breno, Rafael e Emanuel, companheiros de luta que acompanharam e apoiaram a minha trajetória. São amizades que levarei para a vida.

As minhas amigas de infância Layla, Sanara e Bárbara, que desde o início se fazem presentes na minha vida entre brincadeiras e conversas.

As minhas irmãs de coração, Camila e Mariana, a prova de que família também pode ser escolhida. Estarão eternamente comigo.

A UFC, por ter presente um excelente corpo de professores que foram diferenciais na minha formação profissional.

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela, tampouco, a sociedade muda.”

Paulo Freire

RESUMO

Devido ao crescimento de cargas não lineares no sistema elétrico, viu-se a necessidade de se ter teorias de potência que pudessem representar os distúrbios físicos de rede satisfatoriamente, para então poderem ser compensadas. Ao longo dos anos surgiram várias teorias de potências, sendo que algumas de grande destaque são a Teoria de potência Instantânea, conhecida como teoria pq, e Teoria de potência Conservativa, conhecida como teoria CPT. Esse trabalho tem como objetivo realizar o estudo comparativo para o caso de cargas balanceadas resistiva, resistiva-indutiva e resistiva-capacitiva, caracterizando as decomposições de correntes ativas média, reativa e oscilante no caso da teoria pq e correntes ativa balanceada, reativa balanceada, desbalanço e residual da teoria CPT. Também analisa parcelas de potência ativa, reativa, potências referentes a oscilações e fator de potência. Essas análises são para 4 tipos de casos diferentes de alimentação da carga, que são fonte senoidal equilibrada, senoidal desequilibrada, não-senoidal equilibrada e não-senoidal desequilibrada. Para os casos de fonte não-senoidal, são somadas a fonte as harmônicas de 5ª e 7ª ordem. Para cada caso, há uma análise comparativa das teorias de potência com todos esses fatores em ilustrações e valores eficazes.

Palavras-chave: Teorias de Potência. Potência Instantânea. Potência Conservativa.

ABSTRACT

Due to the growth of non-linear loads in the electrical system, it was necessary to have power theories that could represent the physical disturbances of the network satisfactorily, so that they can be compensated. Over the years several power theories have emerged, some of which are the Instant Power Theory, known as pq theory, and Conservative Power Theory, known as the CPT theory. The purpose of this work is to perform the comparative study for the resistive, resistive-resistive-inductive and resistive-capacitive balanced loads, characterizing the decomposition of active, reactive and oscillating currents in the case of the pq theory and currents active balanced, reactive balanced and residual of CPT theory. It also analyzes plots of active, reactive, power related to oscillations and power factor. These analyzes are for 4 different types of load-feeding cases, which are balanced sinusoidal source, unbalanced sinusoidal, balanced non-sinusoidal and unbalanced non-sinusoidal. For the non-sinusoidal source cases, the 5th and 7th order harmonics are added to the source. For each case, there is a comparative analysis of power theories with all these factors in illustrations and root mean square values.

Keywords: Power Theories. Instant Power. Conservative Power.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Transformação de sistema de coordenadas, (a) Sistema abc ; (b) Sistema $\alpha\beta 0$	17
Figura 2	– Circuito de carga resistiva.....	31
Figura 3	– Caso 1: Valores trifásicos para carga resistiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	32
Figura 4	– Caso 2: Valores trifásicos para carga resistiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	32
Figura 5	– Caso 3: Valores trifásicos para carga resistiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	33
Figura 6	– Caso 4: Valores trifásicos para carga resistiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	33
Figura 7	– Caso 1: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva.....	34
Figura 8	– Caso 2: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva.....	34
Figura 9	– Caso 3: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva.....	34
Figura 10	– Caso 4: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva.....	35
Figura 11	– Caso 1: Potência média dividida pela norma quadrática.....	35
Figura 12	– Caso 2: Potência média dividida pela norma quadrática.....	36
Figura 13	– Caso 3: Potência média dividida pela norma quadrática.....	36
Figura 14	– Caso 4: Potência média dividida pela norma quadrática.....	36
Figura 15	– Caso 1: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva.....	38
Figura 16	– Caso 2: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva.....	38
Figura 17	– Caso 3: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva.....	38
Figura 18	– Caso 4: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva.....	38
Figura 19	– Circuito de carga resistiva-indutiva.....	41
Figura 20	– Caso 1: Valores para carga resistiva-indutiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	42

Figura 21	– Caso 2: Valores para carga resistiva-indutiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	42
Figura 22	– Caso 3: Valores para carga resistiva-indutiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	43
Figura 23	– Caso 4: Valores para carga resistiva-indutiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	43
Figura 24	– Caso 1: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-indutiva.....	44
Figura 25	– Caso 2: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-indutiva.....	44
Figura 26	– Caso 3: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-indutiva.....	45
Figura 27	– Caso 4: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-indutiva.....	45
Figura 28	– Caso 1: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-indutiva.....	45
Figura 29	– Caso 2: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-indutiva.....	46
Figura 30	– Caso 3: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-indutiva.....	46
Figura 31	– Caso 4: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-indutiva.....	46
Figura 32	– Caso 1: Potência reativa média dividida pela norma quadrática.....	47
Figura 33	– Caso 2: Potência reativa média dividida pela norma quadrática.....	47
Figura 34	– Caso 3: Potência reativa média dividida pela norma quadrática.....	48
Figura 35	– Caso 4: Potência reativa média dividida pela norma quadrática.....	48
Figura 36	– Caso 1: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-indutiva.....	49
Figura 37	– Caso 2: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-indutiva.....	49

Figura 38 – Caso 3: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-indutiva.....	49
Figura 39 – Caso 1: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-indutiva.....	49
Figura 40 – Circuito de carga resistiva-capacitiva.....	53
Figura 41 – Caso 1: Valores para carga resistiva-capacitiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	53
Figura 42 – Caso 2: Valores para carga resistiva-capacitiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	54
Figura 43 – Caso 3: Valores para carga resistiva-capacitiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	54
Figura 44 – Caso 4: Valores para carga resistiva-capacitiva, (a) Tensão; (b) Corrente.....	55
Figura 45 – Caso 1: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-capacitiva.....	56
Figura 46 – Caso 2: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-capacitiva.....	56
Figura 47 – Caso 3: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-capacitiva.....	56
Figura 48 – Caso 4: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-capacitiva.....	56
Figura 49 – Caso 1: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-capacitiva.....	57
Figura 50 – Caso 2: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-capacitiva.....	57
Figura 51 – Caso 3: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-capacitiva.....	57
Figura 52 – Caso 4: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-capacitiva.....	58

Figura 53 – Caso 1: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-capacitiva.....	58
Figura 54 – Caso 2: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-capacitiva.....	59
Figura 55 – Caso 3: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-capacitiva.....	59
Figura 56 – Caso 4: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-capacitiva.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativos de correntes das Teorias pq e CPT.....	30
Tabela 2 – Configurações da fonte de tensão e carga.....	30
Tabela 3 – Fontes de tensão para todos os casos.....	31
Tabela 4 – Dados da Teoria pq para carga resistiva.....	39
Tabela 5 – Dados da Teoria CPT para carga resistiva.....	40
Tabela 6 – Dados da Teoria pq para carga resistiva-indutiva.....	51
Tabela 7 – Dados da Teoria CPT para carga resistiva-indutiva.....	52
Tabela 8 – Dados da Teoria pq para carga resistiva-capacitiva.....	60
Tabela 9 – Dados da Teoria CPT para carga resistiva-capacitiva.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPT *Conservative Power Theory*

IEEE *Institute of Electrical and Electronic Engineers*

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
Ω	Ohm – unidade de medida elétrica
A	Ampere – Unidade SI para corrente elétrica
V	Volt – Unidade SI para tensão elétrica
W	Watts – Unidade SI para potência ativa elétrica
VA	Volt-ampere – Unidade SI para potência aparente elétrica
Var	Volt-ampere-reativo – Unidade SI para potência reativa elétrica
abc	Sistema de coordenadas de sequência positiva
$\alpha\beta 0$	Sistema de coordenadas após transformada de Clarke
p	Potência ativa real
q	Potência imaginária
p_0	Potência de sequência zero
v_a	Tensão na fase A do sistema de coordenadas abc
v_b	Tensão na fase B do sistema de coordenadas abc
v_c	Tensão na fase C do sistema de coordenadas abc
i_a	Corrente na fase A do sistema de coordenadas abc
i_b	Corrente na fase B do sistema de coordenadas abc
i_c	Corrente na fase C do sistema de coordenadas abc
v_0	Tensão de sequência 0 do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
v_α	Tensão de sequência α do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
v_β	Tensão de sequência β do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_0	Corrente de sequência 0 do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_α	Corrente de sequência α do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_β	Corrente de sequência β do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
\bar{p}_0	Potência instantânea de sequência 0 média
\tilde{p}_0	Potência instantânea de sequência 0 oscilante
\bar{p}	Potência instantânea média
\tilde{p}	Potência instantânea oscilante
\bar{q}	Potência imaginária instantânea média
\tilde{q}	Potência imaginária instantânea oscilante
$i_{\alpha p}$	Corrente de sequência α em função da potência instantânea

$i_{\alpha\bar{p}}$	Corrente de sequência α em função da potência instantânea média
$i_{\alpha\bar{p}}$	Corrente de sequência α em função da potência instantânea oscilante
$i_{\alpha q}$	Corrente de sequência α em função da potência instantânea imaginária
$i_{\alpha\bar{q}}$	Corrente de sequência α em função da potência instantânea imaginária média
$i_{\alpha\bar{q}}$	Corrente de sequência α em função da potência instantânea imaginária oscilante
$i_{\beta p}$	Corrente de sequência β em função da potência instantânea
$i_{\beta\bar{p}}$	Corrente de sequência β em função da potência instantânea média
$i_{\beta\bar{p}}$	Corrente de sequência β em função da potência instantânea oscilante
$i_{\beta q}$	Corrente de sequência β em função da potência instantânea imaginária
$i_{\beta\bar{q}}$	Corrente de sequência β em função da potência instantânea imaginária média
$i_{\beta\bar{q}}$	Corrente de sequência β em função da potência instantânea imaginária oscilante
i_{a0}	Corrente na fase A decomposta na potência p_0 do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_{b0}	Corrente na fase B decomposta na potência p_0 do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_{c0}	Corrente na fase C decomposta na potência p_0 do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_{ap}	Corrente na fase A decomposta na potência p do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_{bp}	Corrente na fase B decomposta na potência p do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_{cp}	Corrente na fase C decomposta na potência p do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_{aq}	Corrente na fase A decomposta na potência q do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_{bq}	Corrente na fase B decomposta na potência q do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
i_{cq}	Corrente na fase C decomposta na potência q do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$
$p_{\alpha p}$	Potência ativa instantânea de sequência α no eixo $\alpha\beta 0$
$p_{\beta p}$	Potência ativa instantânea de sequência β no eixo $\alpha\beta 0$
$p_{\alpha q}$	Potência imaginária instantânea de sequência α no eixo $\alpha\beta 0$
$p_{\beta q}$	Potência imaginária instantânea de sequência β no eixo $\alpha\beta 0$
$p_{\alpha\beta}$	Potência ativa total instantânea de sequência α no eixo $\alpha\beta 0$
$p_{3\phi}$	Potência ativa trifásica instantânea total no eixo $\alpha\beta 0$
$S_{\alpha\beta 0}$	Potência aparente no eixo $\alpha\beta 0$
$P_{\alpha\beta}$	Potência ativa $\alpha\beta$ eficaz no eixo $\alpha\beta 0$
P_0	Potência ativa de sequência zero no eixo $\alpha\beta 0$
$Q_{\alpha\beta}$	Potência reativa $\alpha\beta$ eficaz no eixo $\alpha\beta 0$
H	Potência harmônica

$\tilde{P}_{\alpha\beta}$	Potência ativa $\alpha\beta$ eficaz oscilatória no eixo $\alpha\beta 0$
$\tilde{Q}_{\alpha\beta}$	Potência reativa $\alpha\beta$ eficaz oscilatória no eixo $\alpha\beta 0$
$FP_{\alpha\beta}$	Fator de potência no eixo $\alpha\beta 0$
\bar{x}	Valor médio do sinal $x(t)$
x_f	Integral no tempo do sinal $x(t)$
\hat{x}	Integral imparcial do sinal $x(t)$
$\langle x, y \rangle$	Produto interno de duas grandezas periódicas $x(t)$ e $y(t)$
$\ x\ $	Norma Euclidiana do sinal $x(t)$
X	Valor eficaz do sinal $x(t)$
\underline{x}	Vetor de $x(t)$
$ \underline{x} $	Magnitude do vetor $x(t)$
$\bar{\underline{x}}$	Valor médio do vetor $x(t)$
$p(t)$	Potência instantânea coletiva
\underline{v}	Vetor de tensão
\underline{i}	Vetor de corrente
p_μ	Potência ativa instantânea de cada fase do sistema
v_μ	Tensão instantânea de cada fase do sistema
i_μ	Corrente instantânea de cada fase do sistema
w_r	Energia reativa coletiva
$\hat{\underline{v}}$	Integral imparcial do vetor de tensão
$\hat{\underline{v}}_\mu$	Integral imparcial de cada fase do sistema
$w_{r\mu}$	Energia reativa coletiva de cada fase do sistema
P	Potência ativa coletiva média
P_μ	Potência ativa coletiva média de cada fase do sistema
W	Energia reativa coletiva média
W_μ	Energia reativa coletiva média de cada fase do sistema
Q	Potência reativa média
ω	Frequência da rede
\underline{i}_a	Vetor de corrente ativa instantânea
$i_{a\mu}$	Corrente ativa instantânea de cada fase do sistema
G_μ	Condutância equivalente por fase da carga

\underline{i}_a^b	Vetor de corrente ativa instantânea balanceada
\underline{i}_a^u	Vetor de corrente ativa instantânea desbalanceada
$i_{a\mu}^u$	Corrente ativa instantânea desbalanceada de cada fase do sistema
G^b	Condutância balanceada
\underline{i}_r	Vetor de corrente reativa instantânea
$i_{r\mu}$	Corrente reativa instantânea de cada fase do sistema
B_μ	Susceptância equivalente por fase da carga
\underline{i}_r^b	Vetor de corrente reativa instantânea balanceada
\underline{i}_r^u	Vetor de corrente reativa instantânea desbalanceada
$i_{r\mu}^u$	Corrente reativa instantânea desbalanceada de cada fase do sistema
B^b	Susceptância balanceada
\underline{i}_v	Vetor de corrente residual
A	Potência aparente
D	Potência residual
I_a^b	Corrente ativa eficaz balanceada
I_r^b	Corrente reativa eficaz balanceada
I_v	Corrente residual eficaz
I_a^u	Corrente ativa eficaz desbalanceada
I_r^u	Corrente reativa eficaz desbalanceada
U_a	Potência de desbalanço ativa
U_r	Potência de desbalanço reativa
U	Potência de desbalanço total
λ	Fator de potência da teoria CPT

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	TEORIAS DE POTÊNCIA ELÉTRICA.....	16
2.1	Teoria de potência instantânea.....	16
2.1.1	<i>Sistema de coordenadas $\alpha\beta$.....</i>	<i>16</i>
2.1.2	<i>Propriedades das potências instantâneas.....</i>	<i>19</i>
2.1.3	<i>Decomposição das correntes no eixo $\alpha\beta$.....</i>	<i>20</i>
2.1.4	<i>Decomposição das potências no eixo $\alpha\beta$.....</i>	<i>21</i>
2.1.5	<i>Definições de potências no eixo $\alpha\beta$.....</i>	<i>22</i>
2.2	Teoria de potência conservativa.....	22
2.2.1	<i>Definições matemáticas importantes.....</i>	<i>22</i>
2.2.2	<i>Potência ativa e energia reativa instantâneas coletivas.....</i>	<i>24</i>
2.2.3	<i>Potência ativa e energia reativa coletivas.....</i>	<i>25</i>
2.2.4	<i>Definições de parcelas de correntes.....</i>	<i>25</i>
2.2.4.1	<i>Corrente ativa.....</i>	<i>26</i>
2.2.4.2	<i>Corrente reativa.....</i>	<i>26</i>
2.2.4.3	<i>Corrente residual.....</i>	<i>27</i>
2.2.5	<i>Definições de potências médias.....</i>	<i>27</i>
2.2.5.1	<i>Potência aparente.....</i>	<i>27</i>
2.2.5.2	<i>Potência ativa.....</i>	<i>28</i>
2.2.5.3	<i>Potência reativa.....</i>	<i>28</i>
2.2.5.4	<i>Potência residual.....</i>	<i>29</i>
2.2.5.5	<i>Potência de desbalanço.....</i>	<i>29</i>
2.2.6	<i>Definição de fator de potência.....</i>	<i>29</i>
3	ANÁLISE COMPARATIVA.....	30
3.1	Carga resistiva.....	31
3.2	Carga resistiva-indutiva.....	41
3.3	Carga resistiva-capacitiva.....	53
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	21
4.1	Conclusões.....	62
4.2	Trabalhos futuros.....	63
	REFERÊNCIAS	64

ANEXO A – SIMULAÇÃO DA TEORIA PQ.....	66
ANEXO B – SIMULAÇÃO DA TEORIA CPT.....	68

1 INTRODUÇÃO

A teoria de potência ativa e reativa convencional tem sido utilizada na análise dos sistemas de energia, sendo válida para grande parte dos casos. Porém, tem-se que sua validade é fisicamente confirmada apenas para sistemas em regime permanente e sem distorção para o caso monofásico, sendo que para ser analisada no sistema trifásico, o mesmo ainda deve ser balanceado (H. WATANABE; AREDES).

Alinhado ao crescimento de cargas não lineares dentro do sistema elétrico com o aumento da eletrônica de potência, percebeu-se a necessidade de se ter uma teoria de potência que fosse capaz de avaliar os impactos dessas novas cargas. Além disso, as cargas precisam de uma boa qualidade de energia elétrica, sendo necessária diminuição dos distúrbios presentes na rede, como harmônicas e desequilíbrios de tensão.

Uma das primeiras propostas a ser escrita foi a de Budeanu, em 1927. Foi então sugerida a definição de uma nova parcela de potência ao cálculo da potência aparente, chamada de potência de distorção, que no caso será nula se não houver componentes harmônicas no sistema (JETSEMA, 2016). Essa proposta é interessante por apresentar o conceito de potência de distorção, porém tem a desvantagem de não isolar parcelas ativas e reativas das parcelas harmônicas, o que pode vir a dificultar a compensação de energia (BUZZO FRAISSAT, 2011).

Outra teoria é de Fryze, em 1932, no domínio do tempo. Fryze propõe a decomposição da corrente total em duas componentes, uma referente a parte ativa e outra a parte reativa (corrente-não ativa) (DE LIMA, 2014). Essa proposta permite até mesmo a criação de filtros ativos para compensar a corrente não-ativa, porém agrupa todos os distúrbios do sistema em uma corrente só, não permitindo a análise detalhada de cada fenômeno físico (POMILIO, 2017).

Já em 1950, Buchholz estendeu o trabalho de Fryze para sistemas polifásicos, sendo que todos os condutores são tratados de formas iguais, inclusive o condutor de neutro. Um grande avanço apresentado por Buchholz foi a introdução do conceito de valores coletivos do sistema para o cálculo da potência aparente. Porém, ainda não permite que se tenha um aprofundamento de todos os tipos de distúrbios presentes no sistema (PAREDES, 2011).

Então em 1962, Depenbrock baseou-se nos trabalhos de Fryze e Buchholz, apresentando a teoria FDB (Fryze-Depenbrock-Buchholz). Apresentou a proposta de medição no ponto estrela virtual para sistemas trifásicos sem condutor de neutro. Além disso, introduziu o conceito de correntes não-ativas, que não contribuem para a transferência de energia do

sistema. Apresenta desvantagem em relação ao ponto estrela virtual quando o sistema é desequilibrado e desbalanceado (PAREDES, 2017).

Em 1988, foi apresentada a teoria proposta por Czarnecki, um dos maiores críticos da teoria proposta por Budeanu (CZARNECKI, 1987). Ele se baseou em uma metodologia em que a decomposição de correntes e potências fossem as mais próximas possíveis de fenômenos físicos. Não tem sido utilizada por muitos autores por ter um equacionamento complexo no domínio da frequência, embora auxilie bastante na compreensão dos fenômenos físicos.

Já no ano de 2000, embora o estudo tenha começado em 1990, a IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) Standart 1459 organizou um trabalho que abordava sobre problemas de instrumentação sob formas de ondas distorcidas ou assimétricas, assim como definições de novas propostas. Nesse trabalho o grupo defende por exemplo, a separação a contribuição das ondas fundamentais de forma positiva de outras parcelas de potência (IEEE, 1990). Porém, apresenta como uma desvantagem que mesmo apresentando parcela que poderiam ser compensadas, essa área ainda não foi suficientemente estudada.

Pode-se destacar em 1983 que foi desenvolvido por Akagi, Kanazawa e Nabae. a teoria de potência instantânea, também conhecida como teoria pq (AKAGI, KANAZAWA, NABAE, 1983). Essa teoria é baseada na transformação de um sistema de coordenadas com base na transformação de Clarke, além de fazer a decomposição de correntes e potências em várias parcelas que podem ser estudadas para controle de filtros ativos e compensação de energia. Inicialmente foi estudada para o sistema a três condutores, mas já existem estudos que indicam sua viabilidade para o sistema a quatro fios. Foi uma grande contribuição no campo da compensação de energia dos últimos anos.

Por fim, tem-se a teoria desenvolvida por Tenti *et al.* chamada de teoria de potência conservativa, em 2004, também conhecida como teoria CPT (*Conservative Power Theory*). Apresenta como diferencial a decomposição de correntes em que cada parcela representa um fenômeno físico, seja corrente ativa, reativa ou de distorção. Além disso, apresentou também o conceito de integral imparcial, utilizadas nos cálculos de tensões. Apresenta viabilidade de utilização nos campos de compensação, controle de geradores distribuídos e tarifação (TENTI *et al.*, 2010).

Devido à grande aceitação das últimas duas teorias propostas, esse trabalho se propõe a realizar o estudo comparativo das teorias de potência instantânea e conservativa, no âmbito teórico.

2 TEORIAS DE POTÊNCIA ELÉTRICA

Nesse tópico, são abordados dois tipos de teorias de potência, a teoria de potência instantânea, conhecida como teoria pq, e a teoria de potência conservativa, conhecida como teoria CPT.

2.1 Teoria de potência instantânea

A teoria de potência instantânea foi escrita no domínio do tempo e se baseia em utilizar a transformada de Clarke, transformando o sistema de coordenadas abc para o sistema $\alpha\beta 0$. Assim, as tensões e correntes passam a ser trabalhadas em um novo sistema de coordenadas. A partir disso, são descritas também três tipos de potências, a potência real (p), a potência imaginária (q) e a potência de sequência zero (p_0).

2.1.1 Sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$

O sistema de coordenadas abc é composto por tensões v_a, v_b e v_c de sequência positiva, e correntes de sequência positiva i_a, i_b e i_c definidas respectivamente por (2.1)-(2.6):

$$v_a = \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t), \quad (2.1)$$

$$v_b = \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t - 120), \quad (2.2)$$

$$v_c = \sqrt{2}V\text{sen}(\omega t + 120). \quad (2.3)$$

$$i_a = \sqrt{2}I\text{sen}(\omega t - \theta), \quad (2.4)$$

$$i_b = \sqrt{2}I\text{sen}(\omega t - 120 - \theta), \quad (2.5)$$

$$i_c = \sqrt{2}I\text{sen}(\omega t + 120 - \theta), \quad (2.6)$$

que θ é a defasagem da corrente em relação a tensão.

Utilizando a transformada de Clarke, as tensões e correntes são definidas no sistema de coordenadas $\alpha\beta$ conforme (2.7) e (2.8):

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (2.7)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

A partir de (2.7) e (2.8), são obtidas equações de tensão e corrente, conforme mostram as equações (2.9)-(2.14):

$$v_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} v_a + \frac{1}{\sqrt{2}} v_b + \frac{1}{\sqrt{2}} v_c \right), \quad (2.9)$$

$$v_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(v_a - \frac{1}{2} v_b - \frac{1}{2} v_c \right), \quad (2.10)$$

$$v_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} v_b - \frac{\sqrt{3}}{2} v_c \right), \quad (2.11)$$

$$i_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} i_a + \frac{1}{\sqrt{2}} i_b + \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \right), \quad (2.12)$$

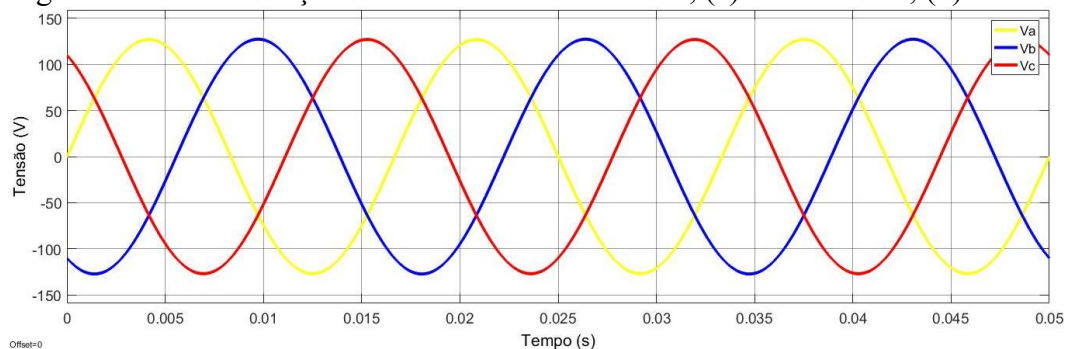
$$i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right), \quad (2.13)$$

$$i_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} i_c \right). \quad (2.14)$$

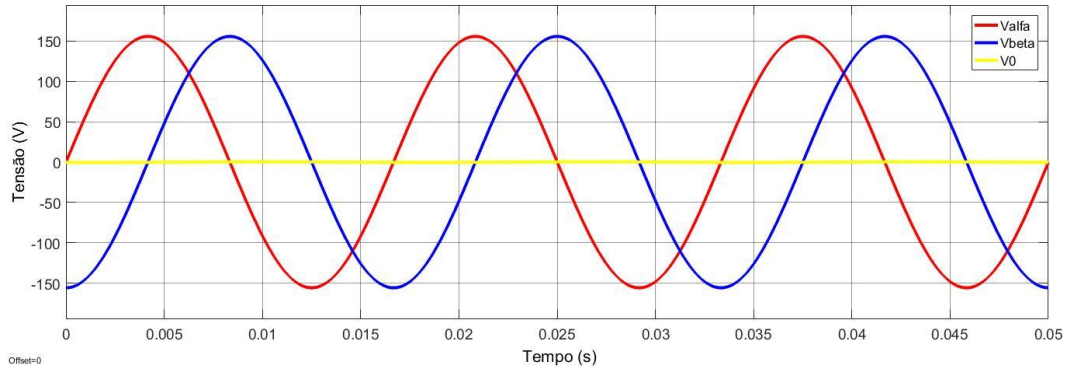
Os sistemas podem ser a três condutores (3F) ou a quatro condutores (3F+N). Quando analisado apenas a três condutores (sem a presença do condutor de neutro), não há a presença das tensões e correntes de sequência zero, eliminando as equações (2.9) e (2.12) da análise.

A figura 1 mostra um exemplo de transformação de coordenadas de tensões para um caso em que não há condutor de neutro no sistema.

Figura 1 – Transformação de sistema de coordenadas, (a) Sistema abc ; (b) Sistema $\alpha\beta 0$.



(a)



(b)

No caso em que não há o condutor de neutro, o sistema pode ser simplificado para as equações (2.15) e (2.16):

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Também é possível realizar a transposição inversa das matrizes das equações (2.7) e (2.8), ou seja, do sistema de coordenadas $\alpha\beta 0$, para o sistema abc .

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.18)$$

A partir da relação inversa apresentada em (2.17) e (2.18), as tensões e correntes do sistema de coordenadas abc podem ser representadas por (2.19)-(2.24):

$$v_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} v_0 + v_\alpha \right), \quad (2.19)$$

$$v_b = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} v_0 - \frac{1}{2} v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta \right), \quad (2.20)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} v_0 - \frac{1}{2} v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta \right), \quad (2.21)$$

$$i_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} i_0 + i_\alpha \right), \quad (2.22)$$

$$i_b = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} i_0 - \frac{1}{2} i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \right), \quad (2.23)$$

$$i_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} i_0 - \frac{1}{2} i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \right). \quad (2.24)$$

2.1.2 Propriedades das potências instantâneas

A teoria pq descreve as propriedades do sistema a partir de três componentes principais de potências: a potência instantânea de sequência zero (p_0), a potência instantânea real (p) e a potência instantânea imaginária (q). A matriz apresentada por (2.25) define as potências:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.25)$$

A partir de (2.25), as potências podem ser representadas por (2.26)-(2.28):

$$p_0 = v_0 i_0, \quad (2.26)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta, \quad (2.27)$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta. \quad (2.28)$$

A potência instantânea trifásica é definida pela soma da potência instantânea real e da potência instantânea de sequência zero, assim como na teoria tradicional.

$$p_{3\phi} = p + p_0 = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0. \quad (2.29)$$

As parcelas de potência ainda podem ser decompostas em duas partes: potência média e potência oscilante. Nesse caso, a parcela de potência oscilante representa todos os desbalanços e presença de harmônicas do sistema.

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0, \quad (2.30)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, \quad (2.31)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}. \quad (2.32)$$

2.1.3 Decomposição das correntes no eixo $\alpha\beta$

É possível realizar uma decomposição de correntes do sistema $\alpha\beta$ em função das potências instantâneas médias e oscilantes analisadas no tópico anterior. Assim, as correntes ortogonais i_α e i_β , podem ser decompostas em parcelas conforme a matriz de transformação da equação (2.33).

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{bmatrix} v_\alpha^2 + v_\beta^2 & 0 & 0 \\ 0 & v_0 v_\alpha & v_0 v_\beta \\ 0 & v_0 v_\beta & -v_0 v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix}. \quad (2.33)$$

Expandindo (2.33) para se obter as equações (2.34)-(2.36):

$$i_0 = \frac{1}{v_0} p_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + i_b + i_c) = \frac{1}{\sqrt{3}} i_{neutro}, \quad (2.34)$$

$$i_\alpha = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p + \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q = i_{\alpha p} + i_{\alpha q}, \quad (2.35)$$

$$i_\beta = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p - \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q = i_{\beta p} + i_{\beta q}. \quad (2.36)$$

Cada corrente ainda pode ser decomposta em partes médias e oscilantes, de acordo com (2.37)-(2.40).

$$i_{\alpha p} = i_{\alpha \bar{p}} + i_{\alpha \tilde{p}} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \bar{p} + \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \tilde{p}, \quad (2.37)$$

$$i_{\alpha q} = i_{\alpha \bar{q}} + i_{\alpha \tilde{q}} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \bar{q} + \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \tilde{q}, \quad (2.38)$$

$$i_{\beta p} = i_{\beta \bar{p}} + i_{\beta \tilde{p}} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \bar{p} + \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \tilde{p}, \quad (2.39)$$

$$i_{\beta q} = i_{\beta \bar{q}} + i_{\beta \tilde{q}} = -\frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \bar{q} - \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \tilde{q}. \quad (2.40)$$

De forma semelhante a matriz apresentada em (2.18), pode-se voltar ao sistema de coordenadas abc através da transformação inversa de *Clarke*.

$$\begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{b0} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} i_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.41)$$

$$\begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix}, \quad (2.42)$$

$$\begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix}. \quad (2.43)$$

As correntes instantâneas podem então ser compostas conforme (2.44):

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{b0} \\ i_{c0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{bmatrix}. \quad (2.44)$$

2.1.4 Decomposição das potências no eixo $\alpha\beta$

A partir das definições sobre correntes apresentadas no tópico 2.1.2, pode-se decompor a potência ativa no sistema $\alpha\beta$, sendo que as mesmas ainda podem ser decompostas em parcelas médias (\bar{p} e \bar{q}) e oscilantes (\tilde{p} e \tilde{q}), a partir de tensões e correntes do sistema $\alpha\beta$:

$$p_{\alpha p} = v_{\alpha} i_{\alpha p} = \left(\frac{v_{\alpha}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) p = \left(\frac{v_{\alpha}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{p} + \left(\frac{v_{\alpha}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \tilde{p}, \quad (2.45)$$

$$p_{\beta p} = v_{\beta} i_{\beta p} = \left(\frac{v_{\beta}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) p = \left(\frac{v_{\beta}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{p} + \left(\frac{v_{\beta}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \tilde{p}, \quad (2.46)$$

$$p_{\alpha q} = v_{\alpha} i_{\alpha q} = \left(\frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) q = \left(\frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{q} + \left(\frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \tilde{q}, \quad (2.47)$$

$$p_{\beta q} = v_{\beta} i_{\beta q} = \left(\frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) q = \left(\frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{q} + \left(\frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \tilde{q}, \quad (2.48)$$

Esses valores médios e oscilantes podem ser obtidos a partir da utilização de um filtro passa-baixa no sistema.

Assim, a potência ativa é obtida a partir da soma das potências das equações (2.45) e (2.46):

$$p_{\alpha\beta} = v_{\alpha} i_{\alpha p} + v_{\beta} i_{\beta p} = \left(\frac{v_{\alpha}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) p + \left(\frac{v_{\beta}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) p. \quad (2.49)$$

Somando-se a potência de (2.49) com a potência de sequência zero (p_0), obtém-se a potência trifásica, conforme (2.50):

$$p_{3\phi} = p_{\alpha\beta} + p_0. \quad (2.50)$$

Nota-se que a soma das potências imaginárias das equações (2.47) e (2.48) é igual a zero, como mostrado em (2.51). Isso se deve ao fato da potência imaginária não contribuir para o fluxo de potência, em outras palavras, fica circulando dentro do sistema elétrico.

$$p_{\alpha q} + p_{\beta q} = v_{\alpha} i_{\alpha q} + v_{\beta} i_{\beta q} = \left(\frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) q + \left(\frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) q = 0 \quad (2.51)$$

2.1.5 Definições de potências no eixo $\alpha\beta$

Podem ser feitas algumas definições acerca de potências e fator de potência. Assim, uma definição importante é a relacionada a potência aparente, que embora não tenha sido definida por Akagi *et al.*, foi proposto por (MARAFÃO, 2001), apresentada na equação (2.52):

$$S_{\alpha\beta 0} = \sqrt{(P_{\alpha\beta} + P_0)^2 + Q_{\alpha\beta}^2} \quad (2.52)$$

A potência harmônica, que representa todas as não linearidades e desbalanços da carga, calculada a partir parcelas de potência ativa e reativa oscilatórias. É importante salientar que os valores dessa equação são valores eficazes.

$$H = \sqrt{\tilde{P}_{\alpha\beta}^2 + \tilde{Q}_{\alpha\beta}^2} \quad (2.53)$$

O fator de potência, que leva em consideração as potências real, de sequência zero e aparente. Nesse caso, é importante salientar que devido a forma como é feito o cálculo, as distorções harmônicas não influenciam no mesmo.

$$FP_{\alpha\beta} = \frac{P_{\alpha\beta} + P_0}{S_{\alpha\beta 0}} \quad (2.54)$$

2.2 Teoria de potência conservativa

A teoria de potência conservativa, também conhecida como teoria CPT (*Conservative Power Theory*), tem como propósito entender os fenômenos e propriedades físicas do sistema elétrico, tendo como base a lei das tensões e correntes de *Kirchoff*. Esses fenômenos físicos podem ser transferência de potência útil, armazenamento de energia, carga desbalanceada e presença de harmônicos, como será visto a seguir.

2.2.1 Definições matemáticas importantes

Considerando um conjunto de sinais reais, contínuos de período T, podem ser definidas uma série de propriedades. Inicialmente, considerando um sinal $x(t)$, tem-se como valor médio nulo, segundo a equação (2.55).

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt = 0. \quad (2.55)$$

A integral no tempo de $x(t)$ é definida segundo (2.56):

$$x_f(t) = \int_0^t x(\tau) d\tau. \quad (2.56)$$

Dessa forma, é introduzida uma definição chamada integral imparcial de $x(t)$, de acordo com (2.57):

$$\hat{x}(t) = x_f(t) - \bar{x}_f. \quad (2.57)$$

Outra definição importante é relacionada ao produto interno de duas grandezas periódicas, sejam elas $x(t)$ e $y(t)$, que pode ser definido por (2.58).

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t) dt. \quad (2.58)$$

A norma Euclidiana da função $x(t)$, é dada por (2.59):

$$\|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} = X, \quad (2.59)$$

sendo X o valor eficaz de $x(t)$.

Dois grandezas podem ser ditas ortogonais caso o produto interno das mesmas resultar em zero.

$$\langle x, y \rangle = 0. \quad (2.60)$$

Todas essas definições podem ser também aplicadas para vetores. Ou seja, considerando-se dois vetores \underline{x} e \underline{y} , de dimensão “ m ”, de acordo com (2.61) e (2.62).

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_m(t) \end{bmatrix}, \quad (2.61)$$

$$\underline{y} = \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \vdots \\ y_m(t) \end{bmatrix}. \quad (2.62)$$

A magnitude do vetor pode ser escrita como a equação (2.63):

$$|\underline{x}| = \sqrt{\underline{x} \cdot \underline{x}} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^m x_{\mu}^2(t)}, \quad (2.63)$$

O valor médio pode ser definido conforme (2.64).

$$\bar{\underline{x}} = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{x}(t) dt = \begin{bmatrix} \bar{x}_1(t) \\ \bar{x}_2(t) \\ \vdots \\ \bar{x}_m(t) \end{bmatrix}. \quad (2.64)$$

A norma do vetor pode ser escrita conforme (2.65), onde \mathbf{X} é o valor eficaz coletivo.

$$\|\underline{x}\| = \sqrt{\langle \underline{x}, \underline{x} \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{\mu=1}^m \int_0^T x_{\mu}^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^m X_{\mu}^2} = \mathbf{X}. \quad (2.65)$$

O produto escalar de dois vetores pode ser escrito como em (2.66).

$$\langle \underline{x}, \underline{y} \rangle = \sum_{\mu=1}^m \langle x_{\mu}, y_{\mu} \rangle = \sum_{\mu=1}^m \frac{1}{T} \int_0^T x_{\mu}(t) y_{\mu}(t) dt. \quad (2.66)$$

Da mesma forma que na equação (2.60), o produto interno resulta em zero quando as duas grandezas são ortogonais.

$$\langle \underline{x}, \underline{y} \rangle = 0. \quad (2.67)$$

2.2.2 Potência ativa e energia reativa instantâneas coletivas

Considerando-se uma rede de energia polifásica, com “ m ” fases, assim como \underline{v} e \underline{i} os vetores instantâneos de tensão e corrente respectivamente, pode-se definir a potência instantânea coletiva segundo a equação (2.68)

$$p(t) = \underline{v}(t) \cdot \underline{i}(t) = \sum_{\mu=1}^m v_{\mu}(t) i_{\mu}(t). \quad (2.68)$$

A potência individual de cada fase do sistema é definida em (2.69).

$$p_{\mu}(t) = v_{\mu}(t) i_{\mu}(t). \quad (2.69)$$

A energia reativa coletiva é definida em (2.70). A mesma representa os elementos armazenadores de energia presentes no sistema.

$$w_r(t) = \underline{\hat{v}}(t) \cdot \underline{i}(t) = \sum_{\mu=1}^m \hat{v}_{\mu}(t) i_{\mu}(t). \quad (2.70)$$

A energia reativa coletiva de cada fase é definida em (2.71):

$$w_{r\mu}(t) = \hat{v}_\mu(t)i_\mu(t). \quad (2.71)$$

2.2.3 Potência ativa e energia reativa coletivas

É possível também definir um conceito de potência coletiva, no caso, segundo a equação (2.72), tem-se o conceito de potência ativa coletiva, que é baseada no produto interno dos valores médios dos vetores de tensão e corrente.

$$P = \langle \underline{v}, \underline{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{v} \underline{i} dt = \frac{1}{T} \sum_{\mu=1}^m v_\mu(t)i_\mu(t) dt = \sum_{\mu=1}^m P_\mu, \quad (2.72)$$

onde P_μ representa a potência ativa de cada fase, que pode ser calculada a partir de (2.73):

$$P_\mu = \langle v_\mu, i_\mu \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v_\mu(t)i_\mu(t) dt. \quad (2.73)$$

A energia reativa coletiva média pode ser calculada a partir do produto interno dos valores médios da integral imparcial de tensão e da corrente. A mesma está representada em (2.74):

$$W = \langle \hat{\underline{v}}, \underline{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\underline{v}} \underline{i} dt = \frac{1}{T} \sum_{\mu=1}^m \hat{v}_\mu(t)i_\mu(t) dt = \sum_{\mu=1}^m W_\mu, \quad (2.74)$$

onde W_μ representa a energia reativa de cada fase, que pode ser calculada a partir de (2.75):

$$W_\mu = \langle \hat{v}_\mu, i_\mu \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{v}_\mu(t)i_\mu(t) dt. \quad (2.75)$$

Todos esses valores de potência ativa e energia reativa são valores conservativos para todas as condições, pois não dependem das formas de onda de tensão e corrente, ou mesmo da referência da medição de tensão (PAREDES, 2010).

Já a potência reativa pode ser calculada a partir de (2.76), porém a mesma só pode ser dita conservativa para tensões puramente senoidais, por depender da frequência da rede.

$$Q = \omega W = VI \sin \varphi \quad (2.76)$$

2.2.4 Definições de parcelas de correntes

Segundo as definições de potência apresentadas em 2.2.2 e 2.2.3, é possível realizar uma decomposição de parcelas de corrente que representem determinados significados físicos. As

correntes são então decompostas em parcelas ativa, reativa e residual, sendo que as parcelas ativa e reativa ainda podem ser subdivididas em parcelas balanceada e desbalanceada.

Ambas as correntes estão diretamente relacionadas a sua parcela de potência, ativa ou reativa.

2.2.4.1 Corrente ativa

A corrente ativa pode ser subdividida em parcela balanceada e desbalanceada. A parcela balanceada representa o fluxo de potência ativa da fonte para a carga, enquanto a parcela desbalanceada representa os desbalanços presentes na carga.

A corrente ativa pode ser calculada conforme a equação (2.78):

$$\underline{i}_a = \{i_{a\mu}\}_{\mu=1}^m, \quad (2.77)$$

$$i_{a\mu} = \frac{\langle v_\mu, i_\mu \rangle}{\|v\|^2} v_\mu = \frac{P_\mu}{V_\mu^2} v_\mu = G_\mu v_\mu. \quad (2.78)$$

A partir da equação (2.78), percebe-se que a corrente ativa leva em consideração a condutância por fase da carga (G_μ).

As correntes ativas balanceada e desbalanceada são definidas nas equações (2.79) e (2.80), respectivamente:

$$\underline{i}_a^b = \frac{\langle v, \underline{i} \rangle}{\|v\|^2} v = \frac{P}{V^2} v = G^b v, \quad (2.79)$$

$$\underline{i}_a^u = \underline{i}_a - \underline{i}_a^b, \quad (2.80)$$

$$\{i_{a\mu}^u\}_{\mu=1}^m = (G_\mu - G^b) v_\mu, \quad (2.81)$$

onde G^b da equação (2.78) representa a condutância balanceada.

2.2.4.2 Corrente reativa

A corrente reativa representa a corrente mínima que transporta energia reativa através da rede, que também pode ser subdividida entre balanceada e desbalanceada. É importante salientar que as correntes reativas não transportam energia útil.

A corrente reativa pode ser calculada conforme a equação (2.83).

$$\underline{i}_r = \{i_{r\mu}\}_{\mu=1}^m, \quad (2.82)$$

$$i_{r\mu} = \frac{\langle \hat{v}_\mu, i_\mu \rangle}{\|\hat{v}_\mu\|^2} \hat{v}_\mu = \frac{W_\mu}{\hat{v}_\mu^2} \hat{v}_\mu = B_\mu \hat{v}_\mu, \quad (2.83)$$

onde B_μ da equação (2.83) representa a susceptância equivalente por fase da carga.

As correntes reativa balanceada e desbalanceada são definidas nas equações (2.84)-(2.86), respectivamente.

$$\underline{i}_r^b = \frac{\langle \underline{\hat{v}}, \underline{i} \rangle}{\|\underline{\hat{v}}\|^2} \underline{\hat{v}} = \frac{W}{\hat{v}^2} \underline{\hat{v}} = B^b \underline{\hat{v}}, \quad (2.84)$$

$$\underline{i}_r^u = \underline{i}_r - \underline{i}_r^b, \quad (2.85)$$

$$\{i_{r\mu}^u\}_{\mu=1}^m = (B_\mu - B^b) \hat{v}_\mu, \quad (2.86)$$

onde B^b representa a susceptância balanceada.

2.2.4.3 Corrente residual

Essa parcela de corrente não está relacionada a potência ativa ou reativa, mas surge devido a presença de cargas não lineares ou tensões distorcidas (exceto em cargas resistivas). Ou seja, está relacionada também a presença de harmônicos na fonte ou na carga.

A corrente residual é calculada a partir da equação (2.87)

$$\underline{i}_v = \underline{i} - \underline{i}_a - \underline{i}_r. \quad (2.87)$$

2.2.5 Definições de potências médias

Cada parcela de potência está diretamente associada a algum fenômeno físico. Assim, a decomposição de potências é obtida a fim de se representar esses fenômenos.

2.2.5.1 Potência aparente

A potência aparente é caracterizada pelo produto dos valores eficazes de tensão e corrente. Não representa um fenômeno físico, mas é considerada uma grandeza matemática, sendo relevante para o dimensionamento da rede elétrica, e é calculada em VA, segundo a equação (2.88):

$$A = \|v\| \|i\| = VI. \quad (2.88)$$

Também é calculada a partir da decomposição das demais potências relacionadas ao sistema.

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}, \quad (2.89)$$

onde P é a potência ativa calculada em W , Q é a energia reativa calculada em Var e D é a potência residual calculada em volt-ampère (VA).

2.2.5.2 Potência ativa

A potência ativa é devido a presença de corrente ativa balanceada, sendo calculada a partir da equação (2.90). Essa parcela é o fluxo de potência entre a fonte e a carga.

$$P = VI_a^b. \quad (2.90)$$

2.2.5.3 Potência reativa

A potência reativa é devido a corrente reativa balanceada, representando as cargas reativas do sistema no fluxo de potência reativa. Pode ser definida pela equação (2.91).

$$Q = VI_r^b = \frac{V}{\hat{V}} W. \quad (2.91)$$

Analisando a tensão eficaz e a norma da tensão eficaz, tem-se a equação (2.92):

$$\frac{V}{\hat{V}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \hat{V}_k^2}} = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} V_k^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_k^2}{\omega^2 k^2}}} = \frac{\sqrt{1 + \frac{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}{V_1^2}}}{\frac{1}{\omega} \sqrt{1 + \frac{\sum_{k=1}^{\infty} \frac{V_k^2}{k^2}}{V_1^2}}} = \omega \sqrt{\frac{1 + DHT_V^2}{1 + DHT_{\hat{V}}^2}}, \quad (2.92)$$

onde ω é a frequência angular do sistema, DHT_V é a taxa de distorção harmônica total e $DHT_{\hat{V}}$ é a taxa de distorção harmônica da integral imparcial de tensão.

Substituindo (2.92) em (2.91), obtém-se (2.93):

$$Q = \omega W \sqrt{\frac{1 + DHT_V^2}{1 + DHT_{\hat{V}}^2}}. \quad (2.93)$$

Percebe-se pela equação (2.93) que a potência reativa não é uma grandeza conservativa, dependendo dos valores da frequência de linha e da distorção harmônica da tensão.

2.2.5.4 Potência residual

É uma potência que não transporta nem potência ativa nem reativa, estando ligada as não linearidades da carga. Está relacionada com a corrente residual, calculada a partir de (2.94):

$$D = VI_v. \quad (2.94)$$

2.2.5.5 Potência de desbalanço

É um termo de potência relacionado aos desbalanços da carga, o qual quando a carga está balanceada, esse termo é nulo. Pode ser subdividida em potência de desbalanço ativa e reativa, conforme (2.95) e (2.96) respectivamente. A equação (2.97) representa todos os desbalanços da carga.

$$U_a = VI_a^u \quad (2.95)$$

$$U_r = VI_r^u \quad (2.96)$$

$$U = U_a + U_r \quad (2.97)$$

2.2.5 Definição de fator de potência

O fator de potência é definido como a relação entre potência ativa e potência aparente e é calculado a partir da equação (2.98).

$$\lambda = \frac{P}{A}. \quad (2.98)$$

O fator de potência é influenciado por outras parcelas de potência que não apenas a potência ativa, como observado em (2.99), substituindo (2.89) em (2.98):

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}, \quad (2.99)$$

percebe-se que tanto a potência reativa quanto a potência residual influenciam no cálculo do fator de potência.

3 ANÁLISE COMPARATIVA

A análise comparativa entre as teorias de Potência Instantânea e a Potência Conservativa foi realizada com o uso do *software* Simulink e teve como base as decomposições de correntes e potências em um circuito trifásico a três condutores (3F).

As correntes a serem comparadas entre as teorias são as correntes ativas médias da Teoria pq ($i_{\bar{p}\mu}$) e as correntes ativas balanceadas da teoria CPT ($i_{a\mu}^b$), correntes reativas médias da Teoria pq ($i_{\bar{q}\mu}$) e correntes reativas balanceadas da teoria CPT ($i_{r\mu}^b$) e parcelas que representam desbalanços ($i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu}$) e não linearidades do circuito ($i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu}$) (BOGILA, 2014).

Tabela 1 – Comparativos de correntes das Teorias pq e CPT

Teoria pq	Teoria CPT
$i_{\bar{p}\mu}$	$i_{a\mu}^b$
$i_{\bar{q}\mu}$	$i_{r\mu}^b$
$i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu}$	$i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu}$

Fonte: elaborada pelo autor.

São utilizados três tipos de circuitos diferentes: resistivos, indutivos e capacitivos. Todos os circuitos têm carga balanceada, configurados segundo a Tabela 2.

Tabela 2 – Configurações da fonte de tensão e carga

Configuração	Fonte de tensão	Carga
Caso 1	Senoidal/ Equilibrada	Balanceada
Caso 2	Senoidal/ Desequilibrada	Balanceada
Caso 3	Não senoidal/ Equilibrada	Balanceada
Caso 4	Não senoidal/ Desequilibrada	Balanceada

Fonte: elaborada pelo autor.

Para as tensões não senoidais (harmônicas), tem-se uma amplitude de 10% da amplitude da tensão fundamental para as harmônicas de 5ª e 7ª ordens somadas a forma de onda fundamental. Na Tabela 3, tem-se a relação de tensões utilizadas no circuito.

Tabela 3 – Fontes de tensão para todos os casos

Tensões	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
V_A	$127 \angle 0^\circ \text{ V}$	$127 \angle 0^\circ \text{ V}$	$127 \angle 0^\circ \text{ V},$ $5^a \text{ e } 7^a$	$127 \angle 0^\circ \text{ V},$ $5^a \text{ e } 7^a$
V_B	$127 \angle -120^\circ \text{ V}$	$113 \angle -104,4^\circ \text{ V}$	$127 \angle -120^\circ \text{ V},$ $5^a \text{ e } 7^a$	$113 \angle -104,4^\circ \text{ V},$ $5^a \text{ e } 7^a$
V_C	$127 \angle 120^\circ \text{ V}$	$147,49 \angle 144^\circ \text{ V}$	$127 \angle 120^\circ \text{ V},$ $5^a \text{ e } 7^a$	$147,49 \angle 144^\circ \text{ V},$ $5^a \text{ e } 7^a$

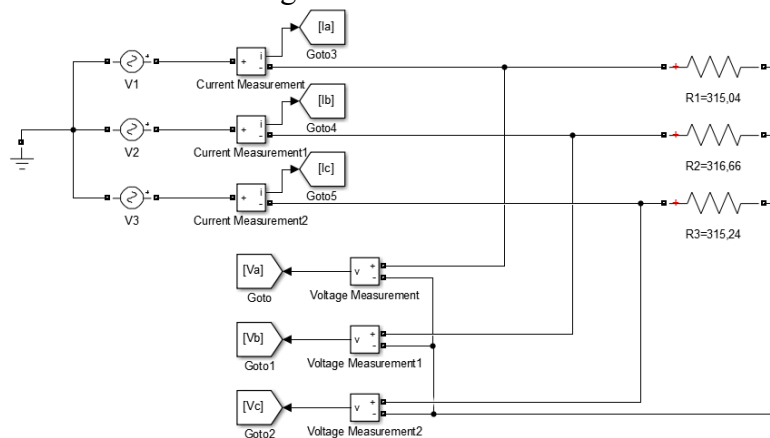
Fonte: Helmo Paredes, tese de doutorado, 2011.

Os resultados são apresentados nas seções 3.1, 3.2 e 3.3.

3.1 Carga resistiva

A Figura 2 ilustra o circuito base para análise no caso da carga resistiva. A carga utilizada é balanceada, sendo: $R_1=315,04\Omega$, $R_2=316,66\Omega$ e $R_3=315,24\Omega$. Com cada carga sendo de aproximadamente 315Ω , pode-se considerar a mesma equilibrada.

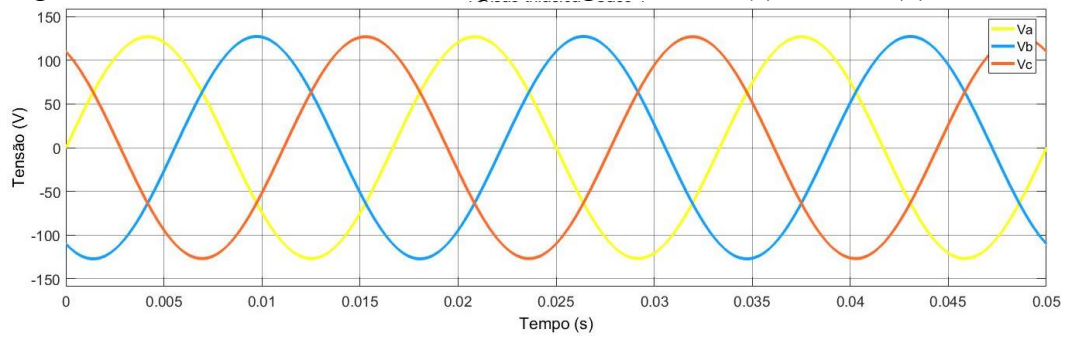
Figura 2 – Circuito de carga resistiva



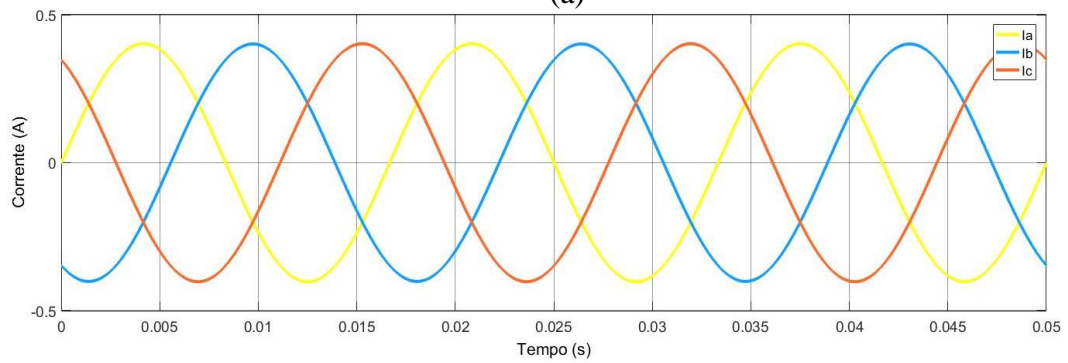
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

As Figuras 3, 4, 5 e 6 ilustram os resultados de simulações computacionais para os casos 1, 2, 3 e 4 respectivamente, da carga resistiva.

Figura 3 – Caso 1: Valores trifásicos para carga resistiva, (a) Tensão; (b) Corrente.



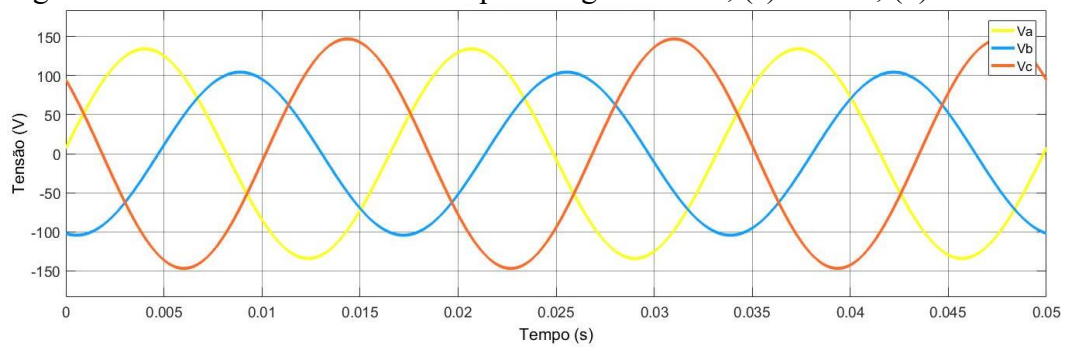
(a)



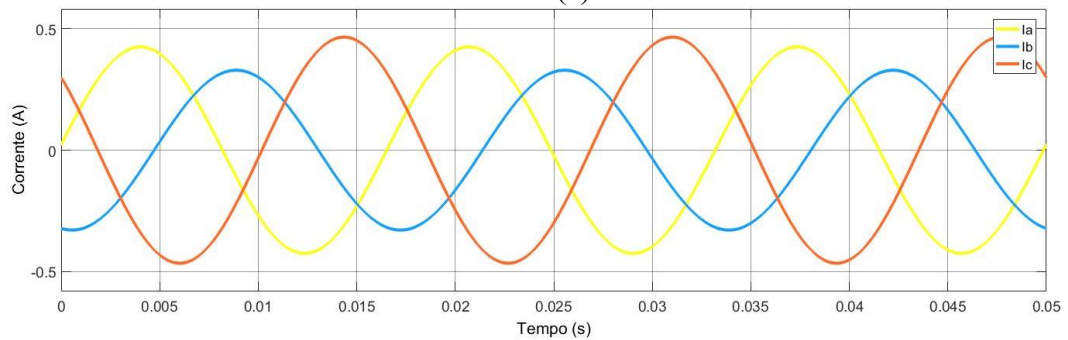
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 4 – Caso 2: Valores trifásicos para carga resistiva, (a) Tensão; (b) Corrente.



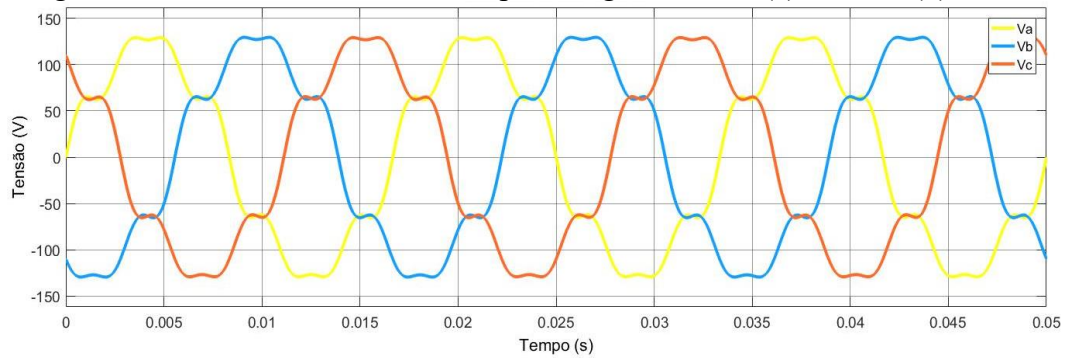
(a)



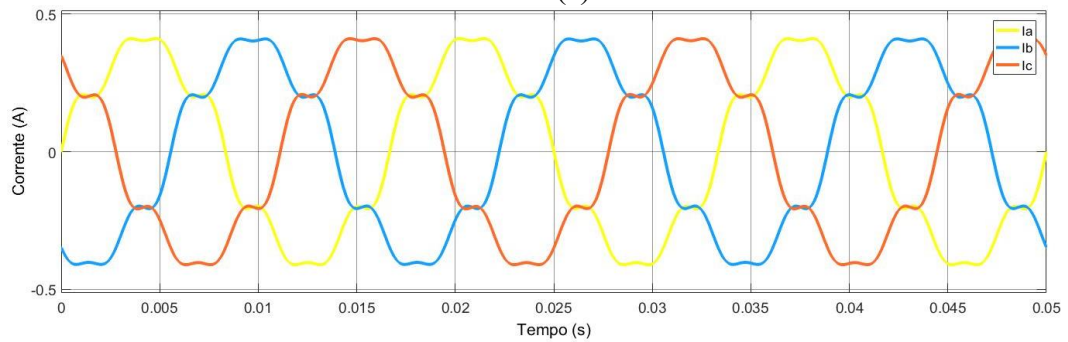
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 5 – Caso 3: Valores trifásicos para carga resistiva, (a) Tensão; (b) Corrente.



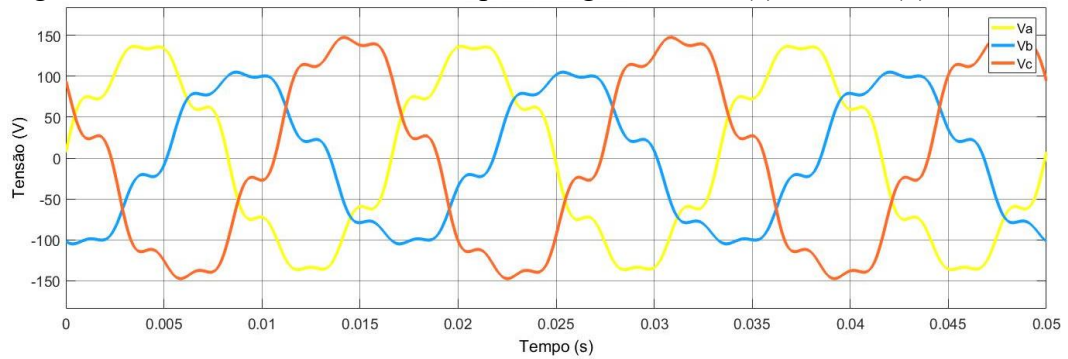
(a)



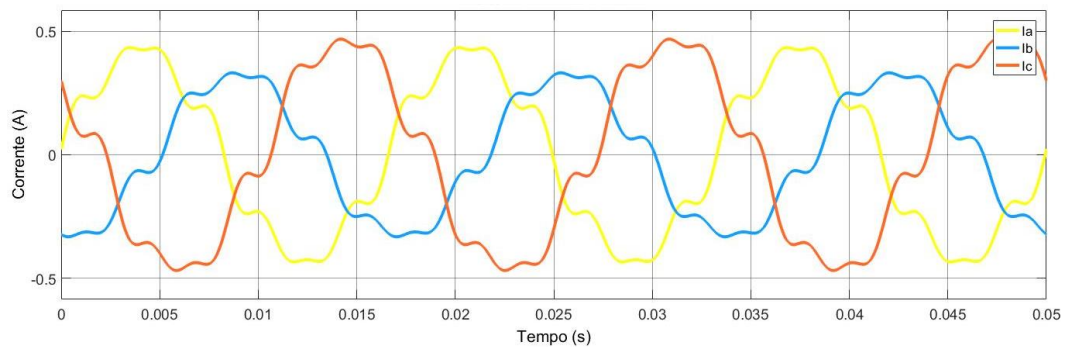
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 6 – Caso 4: Valores trifásicos para carga resistiva, (a) Tensão; (b) Corrente



(a)



(b)

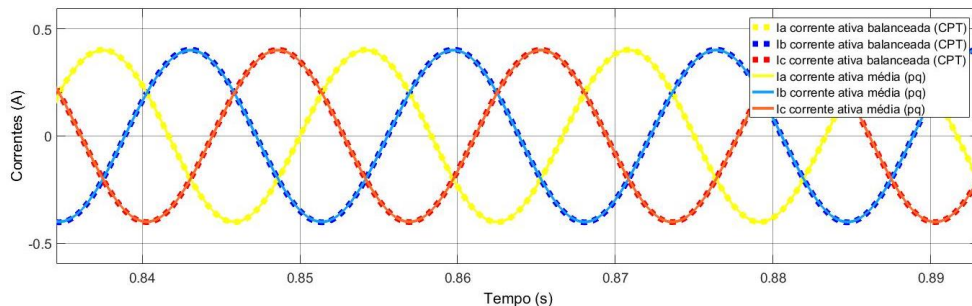
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Percebe-se pelas figuras 3 e 4 que as mesmas apresentam característica senoidal, enquanto as figuras 5 e 6 apresentam características não senoidais devido a presença de harmônicas.

Pode-se então realizar o comparativo das decomposições de correntes segundo a tabela 1. As Figuras 7, 8, 9 e 10 apresentam o comparativo gráfico das formas de onda da corrente ativa média ($i_{\bar{p}\mu}$) da Teoria pq e da corrente ativa balanceada ($i_{a\mu}^b$) Teoria CPT.

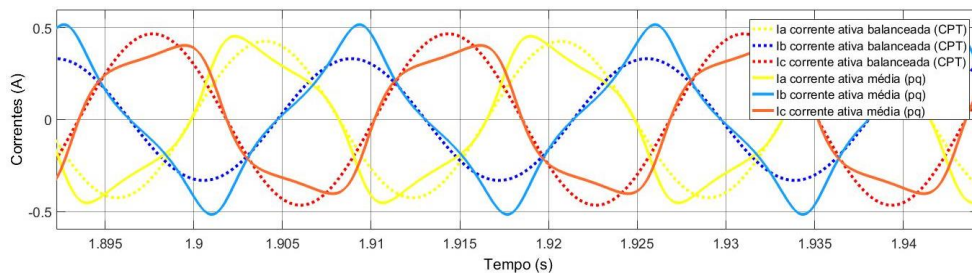
Pelas figuras 7 e 9, as parcelas de correntes para as duas teorias são iguais em magnitude e fase, mesmo na figura 8 onde há distorções harmônicas. Nas figuras 8 e 10, não há equivalência entre as correntes devido ao desequilíbrio presente nas tensões.

Figura 7 – Caso 1: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva



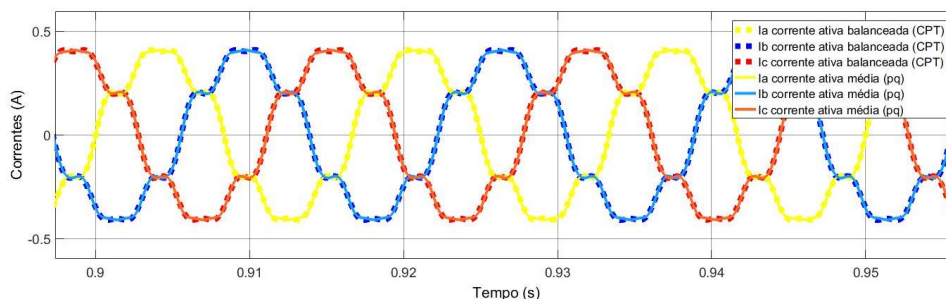
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 8 – Caso 2: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva



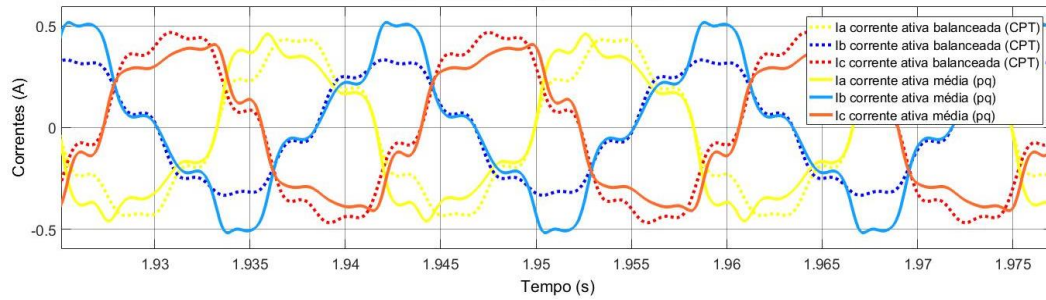
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 9 – Caso 3: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 10 – Caso 4: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Nos casos em que não há equivalência de magnitude entre as correntes, pode-se fazer uma análise das equações que as envolvem, que no caso são as equações (2.37) da Teoria pq e (2.79) da Teoria CPT.

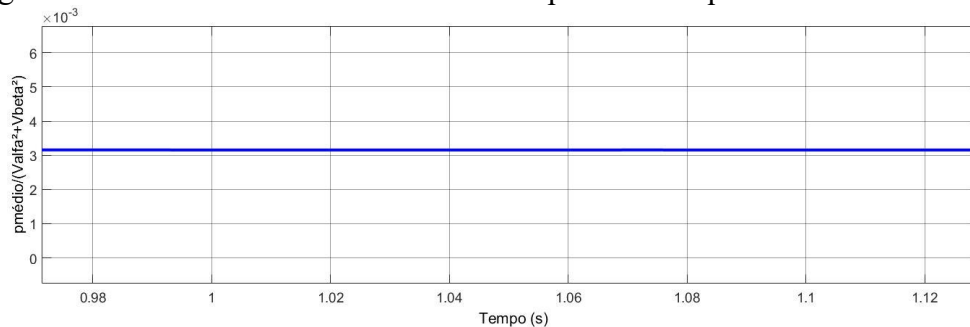
$$i_{\alpha\bar{p}} = \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \bar{p}, \quad (2.37)$$

$$\underline{i}_a^b = \frac{P}{V^2} \underline{v}. \quad (2.79)$$

Percebe-se que na Teoria pq na equação (2.37), que os termos utilizados para o cálculo da corrente ativa média no denominador são uma norma quadrática média de valores instantâneos. Dessa forma, o resultado da divisão de \bar{p} (que é uma constante) por esse termo não é constante em casos de tensão desequilibrada. Já para o caso da Teoria CPT, o denominador representa a norma quadrática do valor eficaz da tensão. Consequentemente, resulta em um valor constante quando realizada a divisão pela potência P , mesmo em casos de tensão desequilibrada.

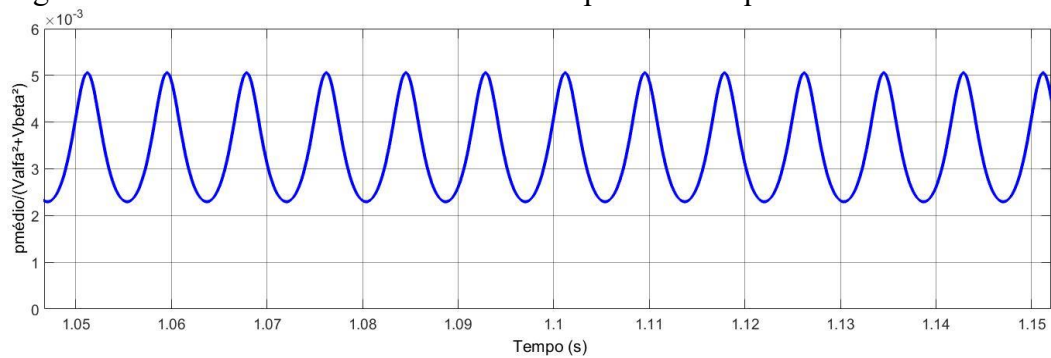
Nas Figuras 11, 12, 13 e 14, é demonstrada a divisão da potência pela norma quadrática das tensões. Nas figuras 11 e 13, respectivamente casos 1 e 3, a razão é praticamente constante, sendo que no caso 3 há uma oscilação mínima. Já nas figuras 12 e 14, respectivamente casos 2 e 4 a oscilação é relevante para o resultado final da corrente.

Figura 11 – Caso 1: Potência média dividida pela norma quadrática



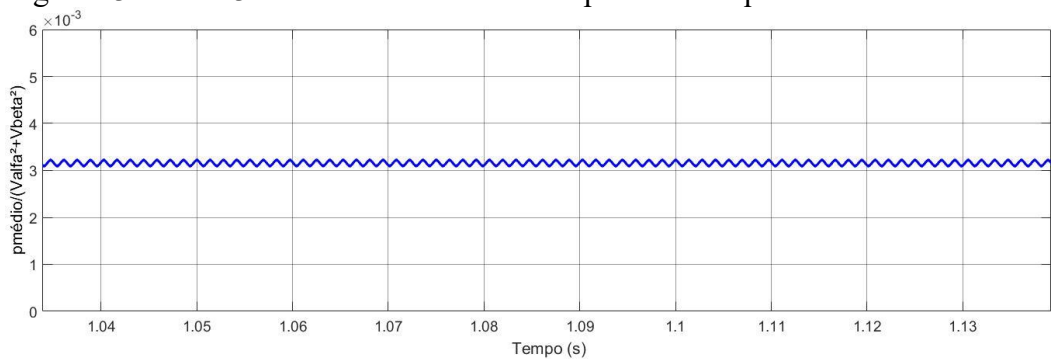
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 12 – Caso 2: Potência média dividida pela norma quadrática



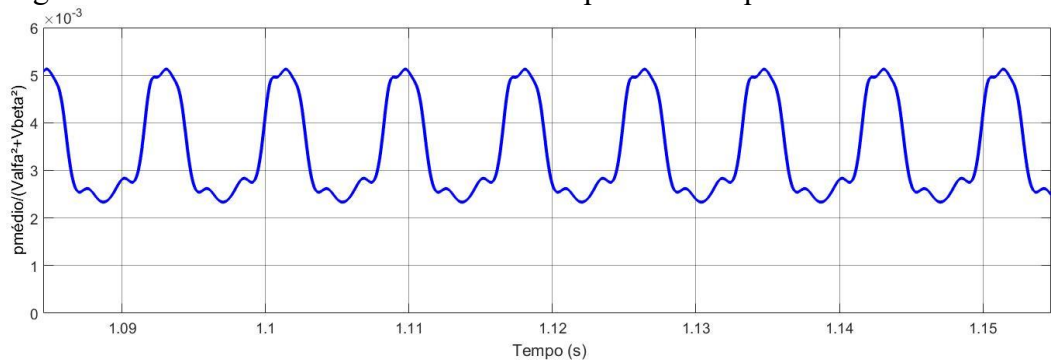
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 13 – Caso 3: Potência média dividida pela norma quadrática



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 14 – Caso 4: Potência média dividida pela norma quadrática



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Nas figuras 15, 16, 17 e 18, são ilustradas as parcelas de correntes oscilantes da teoria pq e as correntes de desbalanço e residual da teoria CPT. No caso da teoria pq, as parcelas de corrente utilizadas foram as correntes resultantes de parcelas oscilantes ativas e reativas ($i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu}$), enquanto que na teoria CPT foram utilizadas correntes de desbalanço e residual ($\underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u + \underline{i}_v$).

Analisando a teoria pq para o circuito resistivo, sabe-se que as potências oscilantes são originadas pelos desequilíbrios de tensões da fonte, não sendo possível segundo a teoria, a separação das mesmas, como é visto pela equação (2.37).

$$i_{\alpha\tilde{p}} = \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \tilde{p} \quad (2.37)$$

Já a teoria CPT faz a separação entre as correntes de desbalanço ($\underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u$) e de correntes residuais (\underline{i}_v). As correntes de desbalanço representam a carga, que podem ser demonstradas através de (2.81) e (2.86).

$$\{i_{a\mu}^u\}_{\mu=1}^m = (G_{\mu} - G^b)v_{\mu} \quad (2.81)$$

$$\{i_{r\mu}^u\}_{\mu=1}^m = (B_{\mu} - B^b)v_{\mu} \quad (2.86)$$

Pelas equações (2.81) e (2.86), a corrente ativa desbalanceada depende da condutância da carga, enquanto que a corrente reativa desbalanceada depende da susceptância.

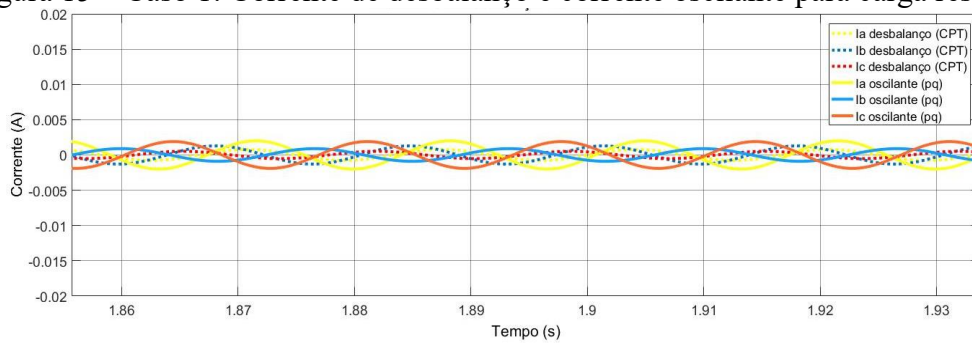
Já a corrente residual é resultante da subtração das correntes ativa e reativa da corrente total, o que demonstra que a mesma representa a corrente resultante de cargas não lineares (presença de harmônicas no sistema por parte da carga) e cargas lineares (exceto resistiva) com tensões distorcidas, segundo a equação (2.87).

$$\underline{i}_v = \underline{i} - \underline{i}_a - \underline{i}_r \quad (2.87)$$

Na Figura 15, percebe-se que as correntes são praticamente nulas, da ordem de 2 mA de amplitude, podendo ser considerada então uma equivalência entre as duas teorias.

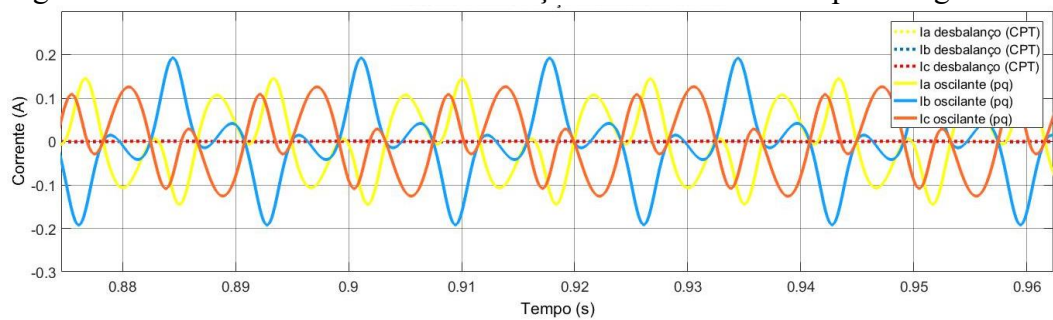
Nas figuras 16, 17 e 18 não há equivalência entre as duas teorias. Há considerável presença de corrente pela teoria pq por a mesma representar qualquer tipo de desbalanço do sistema, sendo mais evidentes os casos 3 e 4 onde há desequilíbrio de tensões. Já para a teoria CPT, para a carga resistiva não há considerável presença de corrente, pois para esse caso a mesma não representa cargas não lineares. Além disso, também não representa cargas lineares com tensões distorcidas, com exceção da resistiva que é o caso.

Figura 15 – Caso 1: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva



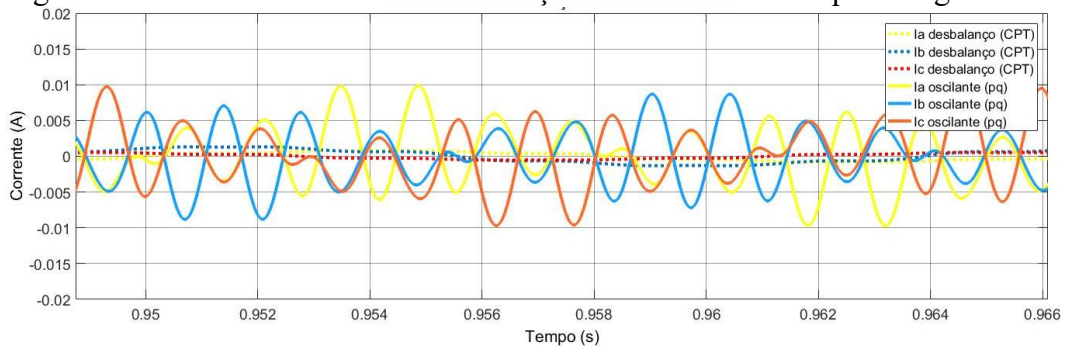
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 16 – Caso 2: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva



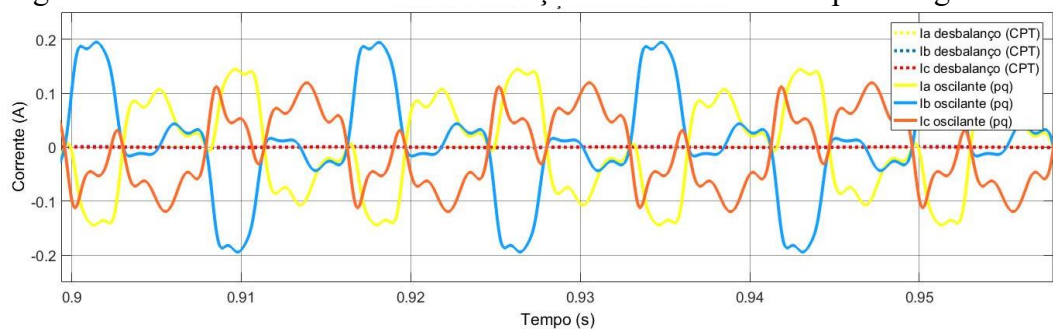
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 17 – Caso 3: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 18 – Caso 4: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Apresentando a tabela 4, tem-se os dados correspondentes a teoria pq, com correntes, potências, fator de potência e taxa de distorção harmônica.

As correntes I_a , I_b e I_c são resultantes da soma das componentes de correntes decompostas inicialmente. Assim, percebe-se que para os casos 1 e 3, as correntes ativas médias são iguais as correntes medidas, assim como a corrente reativa e potência reativa em todos os casos são iguais a zero pois a carga é resistiva e balanceada. Isso é perceptível também ao se analisar as potências, pois a potência aparente $S_{\alpha\beta 0}$ é igual a potência ativa $P_{\alpha\beta}$.

Percebe-se também que nos casos 1 e 3 aparecem potências de distorção H , mas que para o sistema são irrelevantes, representando menos de 2% da potência total.

Para os casos 2 e 4, as correntes já resultam diferentes, devido ao desequilíbrio das tensões impostas. Também há a presença mais significativa da potência de distorção, por a mesma representar todos os distúrbios presentes no sistema, sejam de desequilíbrio ou presença de harmônicas.

Tabela 4 – Dados da Teoria pq para carga resistiva

Dados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
I_a (A)	0,284	0,301	0,287	0,304
I_b (A)	0,284	0,233	0,287	0,235
I_c (A)	0,284	0,329	0,287	0,332
$I_{\tilde{p}a}$ (A)	0,284	0,300	0,286	0,306
$I_{\tilde{p}b}$ (A)	0,284	0,300	0,286	0,310
$I_{\tilde{p}c}$ (A)	0,284	0,300	0,286	0,296
$I_{\tilde{q}a}$ (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
$I_{\tilde{q}b}$ (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
$I_{\tilde{q}c}$ (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
$I_{\tilde{p}a} + I_{\tilde{q}a}$ (A)	0,001	0,080	0,004	0,087
$I_{\tilde{p}b} + I_{\tilde{q}b}$ (A)	0,001	0,087	0,004	0,099
$I_{\tilde{p}c} + I_{\tilde{q}c}$ (A)	0,001	0,076	0,004	0,069
$S_{\alpha\beta 0}$ (VA)	76,32	79,44	77,85	81,03
$P_{\alpha\beta}$ (W)	76,32	79,44	77,85	81,03
$Q_{\alpha\beta}$ (Var)	0,000	0,020	0,000	0,021
H (VA)	0,362	21,25	1,145	21,71
$FP_{\alpha\beta 0}$	1,000	1,000	1,000	1,000
DHT_{Ia} (%)	0,100	0,100	14,14	14,14
DHT_{Ib} (%)	0,100	0,100	14,14	14,14
DHT_{Ic} (%)	0,100	0,100	14,14	14,14

Fonte: elaborado pelo autor.

Já para a tabela 5, tem-se os dados correspondentes a correntes, potências, fator de potência e taxa de distorção harmônica referentes a teoria CPT.

Similarmente aos dados da teoria pq mostrados na tabela 4, percebe-se que as correntes medidas dos casos 1 e 3 são iguais as correntes ativas balanceadas, assim como as potências ativa e aparente, representando assim uma carga resistiva balanceada. Da mesma forma, não há presença de corrente reativa no sistema em nenhum dos casos.

Tem-se também que em todos os casos não há corrente de desbalanço ($\underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u + \underline{i}_v$), demonstrando assim que esses termos não representam desbalanços de tensão ou presença de harmônicas impostas pela fonte de tensão.

Assim, por não haver corrente de desbalanço, conseqüentemente há pouca presença de potência de desbalanço (U) e residual (D).

Tabela 5 – Dados da Teoria CPT para carga resistiva

Dados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
I_a (A)	0,284	0,301	0,285	0,301
I_b (A)	0,284	0,233	0,284	0,233
I_c (A)	0,284	0,329	0,285	0,329
I_{aa}^b (A)	0,284	0,300	0,284	0,300
I_{ab}^b (A)	0,284	0,234	0,285	0,234
I_{ac}^b (A)	0,284	0,329	0,284	0,329
I_{ra}^b (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
I_{rb}^b (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
I_{rc}^b (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
$I_{aa}^u + I_{ra}^u + I_{va}$ (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
$I_{ab}^u + I_{rb}^u + I_{vb}$ (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
$I_{ac}^u + I_{rc}^u + I_{vc}$ (A)	0,000	0,000	0,000	0,000
A (VA)	76,65	79,78	76,65	79,78
P (W)	76,65	79,78	76,65	79,78
Q (Var)	0,000	0,000	0,000	0,001
D (VA)	0,003	0,002	0,003	0,003
U (VA)	0,166	0,131	0,166	0,131
λ	1,000	1,000	1,000	1,000
DHT_{Ia} (%)	0,000	0,000	14,18	14,18
DHT_{Ib} (%)	0,000	0,000	14,20	14,19
DHT_{Ic} (%)	0,000	0,000	14,17	14,16

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Comparando as tabelas 4 e 5, tem-se equivalência para as correntes de entrada (I_μ) e para as correntes reativas médias e balanceadas ($I_{\bar{q}\mu}$ e $I_{r\mu}^b$).

Percebe-se também que não há equivalência para as correntes ativas médias ($I_{\bar{p}\mu}$) e correntes ativas balanceadas ($I_{a\mu}^b$) nos casos 3 e 4. Isso porque na teoria pq nesses três casos, existir a presença de correntes oscilantes, enquanto na teoria CPT não há qualquer presença de corrente de desbalanço.

Outro ponto importante é notado ao se observar as potências ativas nos casos 3 e 4, que no caso da teoria pq apresenta potência ativa maior do que na teoria CPT. Isso se deve ao fato de a teoria pq englobar até mesmo a potência gerada por harmônicos, como é observado pela equação (2.50), em que as potências $p_{\alpha\beta}$ e p_0 serem parcelas médias e oscilantes. Enquanto isso, para o cálculo de potência ativa da teoria CPT, é utilizada a corrente ativa balanceada, que não representa qualquer tipo de desbalanço.

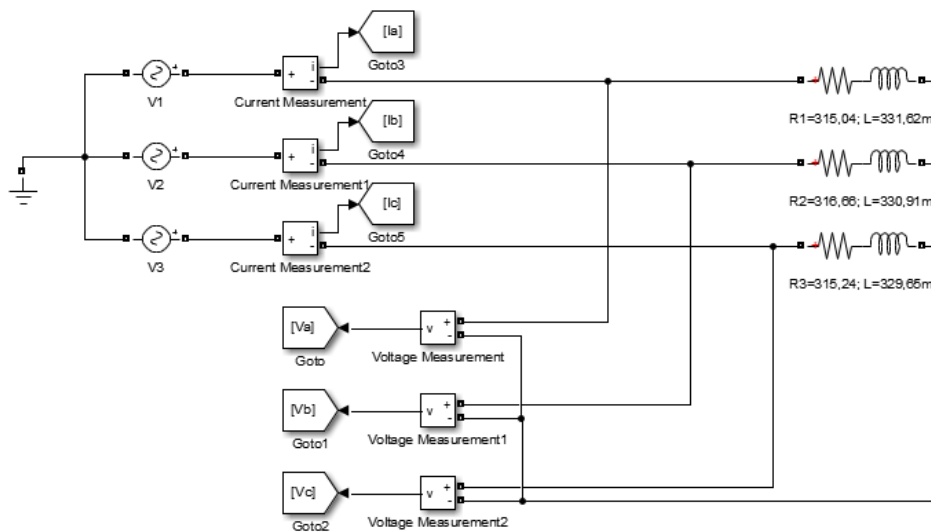
$$p_{3\phi} = p_{\alpha\beta} + p_0 \quad (2.50)$$

$$P = VI_a^b \quad (2.90)$$

3.2 Carga resistiva-indutiva

A Figura 19 apresenta o circuito base para análise no caso da carga resistiva indutiva. A carga utilizada é balanceada, sendo: $R_1=315,04\Omega$, $R_2=316,66\Omega$, $R_3=315,24\Omega$, $L_1=331,62\text{mH}$, $L_2=330,91\text{mH}$ e $L_3=329,65\text{mH}$. Com cada carga resistiva sendo de aproximadamente 315Ω e cada carga indutiva sendo aproximadamente 330mH , pode-se considerar a mesma equilibrada.

Figura 19 – Circuito de carga resistiva-indutiva

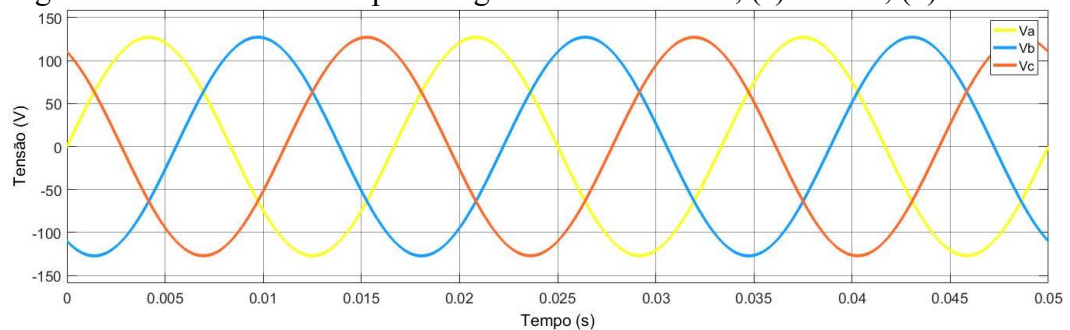


Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

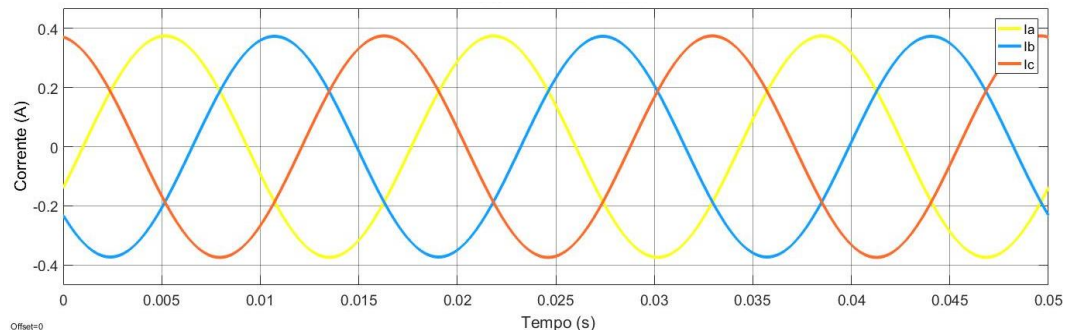
Assim, as correntes e tensões apresentadas nas Figuras 20, 21, 22 e 23 representam as medições realizadas nos pontos apresentados na figura 19.

Nas figuras 20 e 21 é possível perceber que se trata de uma carga indutiva devido ao atraso na corrente em relação a tensão dentro do mesmo intervalo de tempo. Nas figuras 22 e 23, tem-se uma diferença das formas de onda entre a tensão e a corrente, sendo que a corrente apresenta uma forma de onda mais próxima da senoidal. Isso se deve ao fato de os indutores (assim como capacitores) poderem agir como filtros passivos, auxiliando na mitigação de correntes harmônicas, que são os casos apresentados (LIMONGI, 2006).

Figura 20 – Caso 1: Valores para carga resistiva-indutiva, (a) Tensão; (b) Corrente



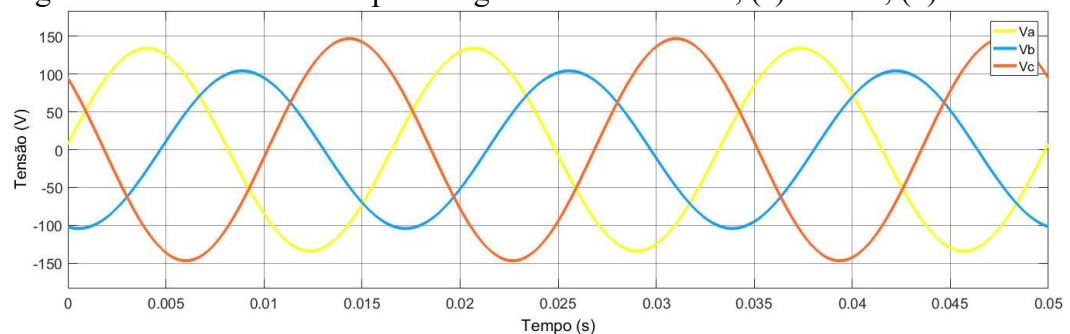
(a)



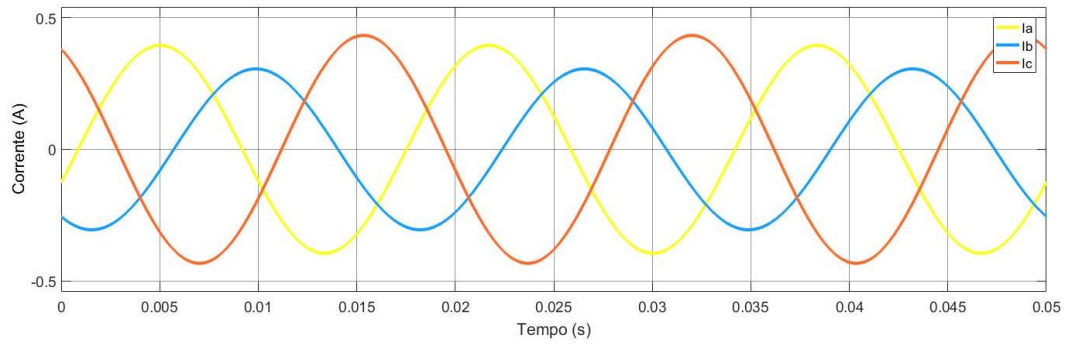
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 21 – Caso 2: Valores para carga resistiva-indutiva, (a) Tensão; (b) Corrente



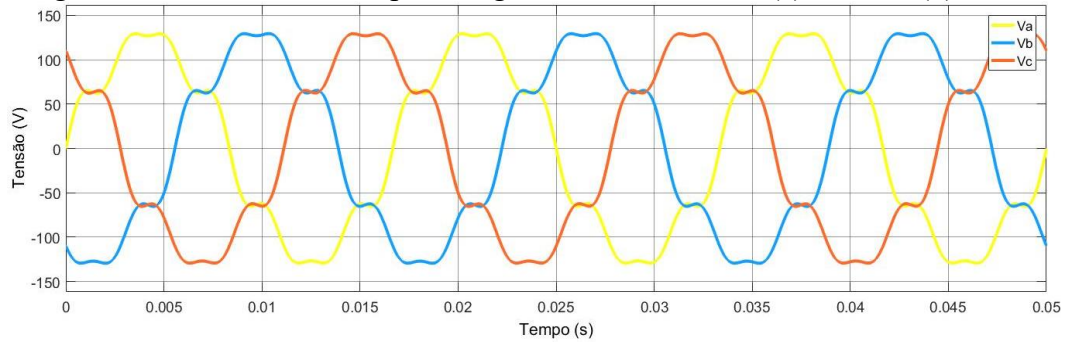
(a)



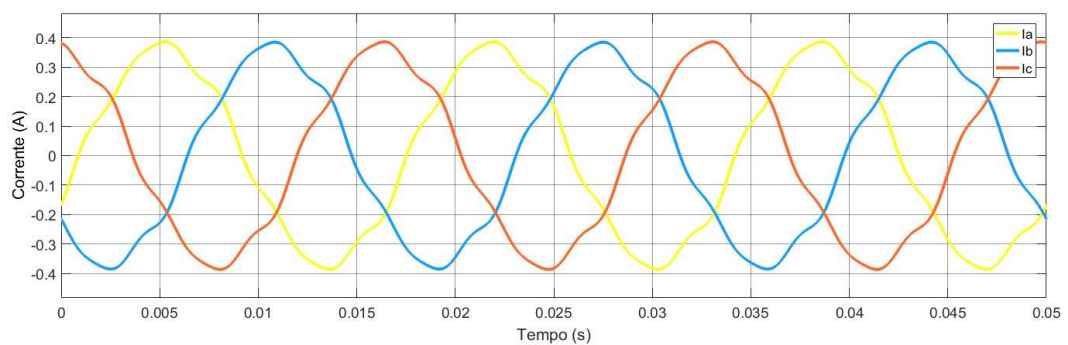
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 22 – Caso 3: Valores para carga resistiva-indutiva, (a) Tensão; (b) Corrente



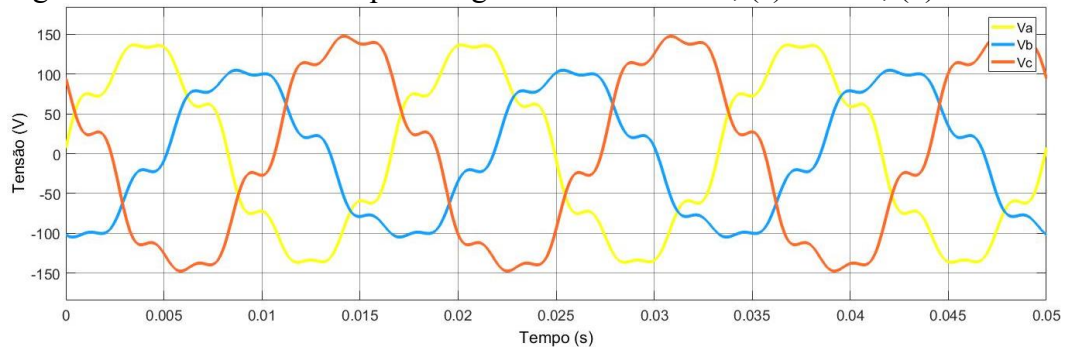
(a)



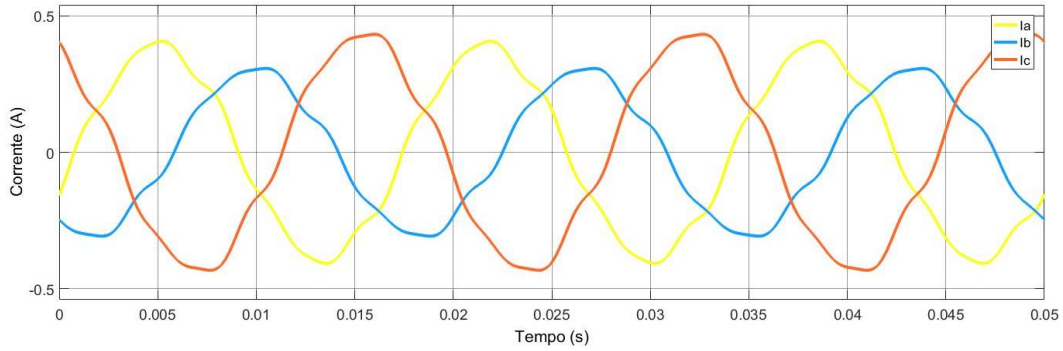
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 23 – Caso 4: Valores para carga resistiva-indutiva, (a) Tensão; (b) Corrente



(a)



(b)

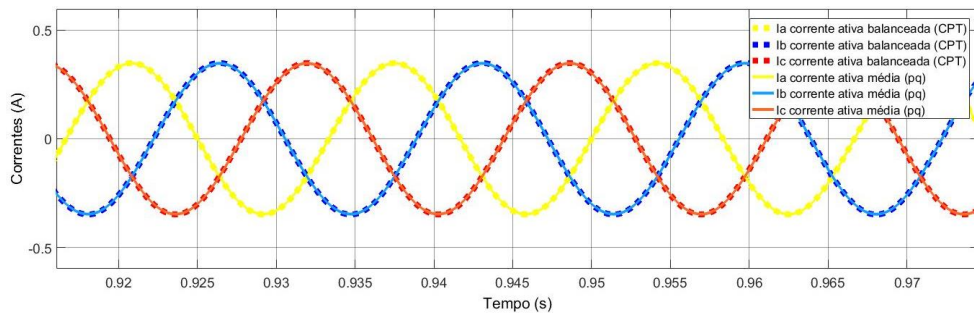
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Pode-se realizar o comparativo das decomposições de correntes segundo a tabela 1.

Nas figuras 24, 25, 26 e 27, tem-se o comparativo das formas de onda da corrente ativa média ($i_{p\mu}$) da Teoria pq e da corrente ativa balanceada ($i_{a\mu}^b$) da Teoria CPT.

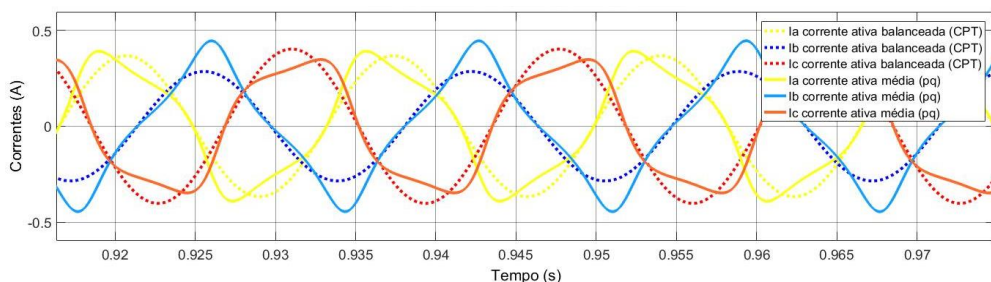
Comparando as duas teorias para o caso de carga resistiva-indutiva, o comportamento das correntes é semelhante ao da carga resistiva, sendo que para tensões equilibradas das Figuras 24 e 26 as correntes apresentam proximidades, enquanto que para tensões desequilibradas das Figuras 25 e 27, as correntes apresentam diferenças. A mesma análise para o caso da carga resistiva vale para carga resistiva-indutiva, como demonstrado na seção 3.1

Figura 24 – Caso 1: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-indutiva



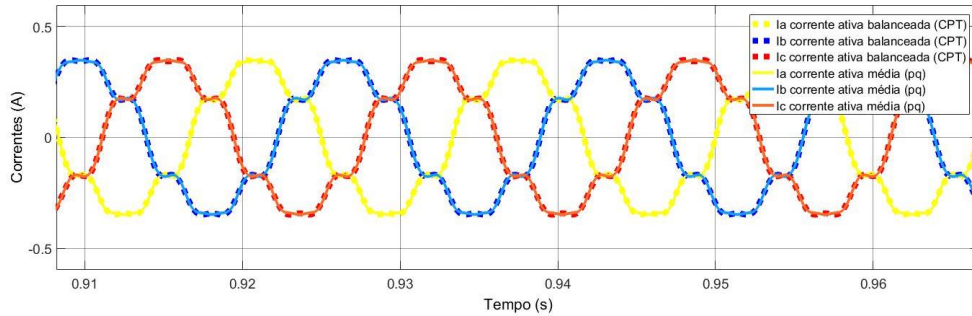
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 25 – Caso 2: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-indutiva



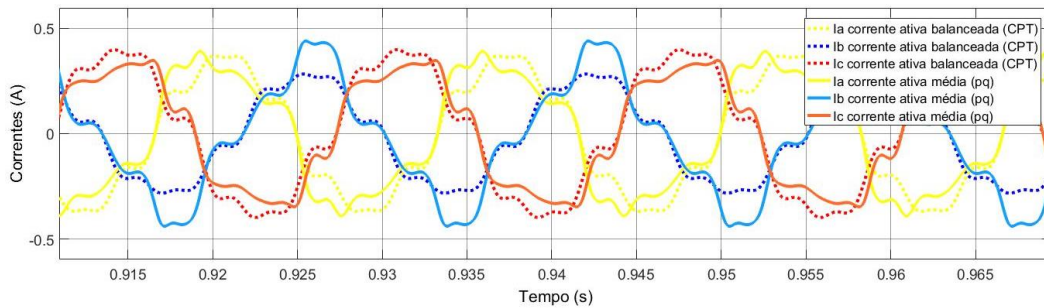
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 26 – Caso 3: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-indutiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 27 – Caso 4: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-indutiva

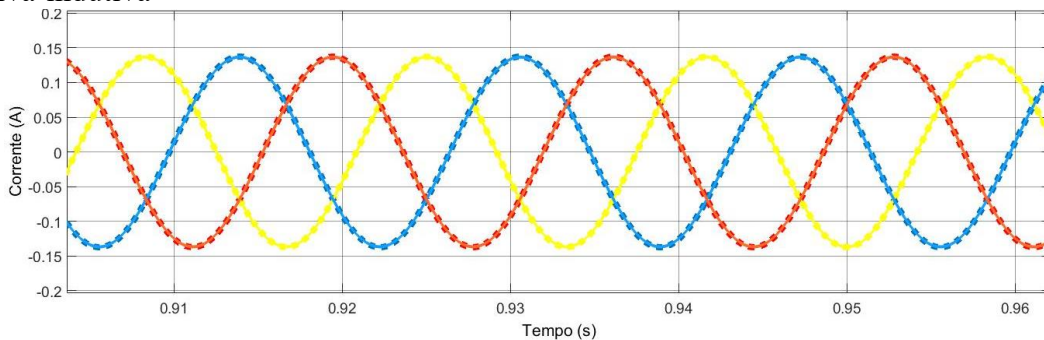


Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Nas figuras 28, 29, 30 e 31, tem-se o comparativo das formas de onda da corrente reativa média ($i_{\bar{q}\mu}$) da Teoria pq e da corrente reativa balanceada ($i_{r\mu}^b$) da Teoria CPT.

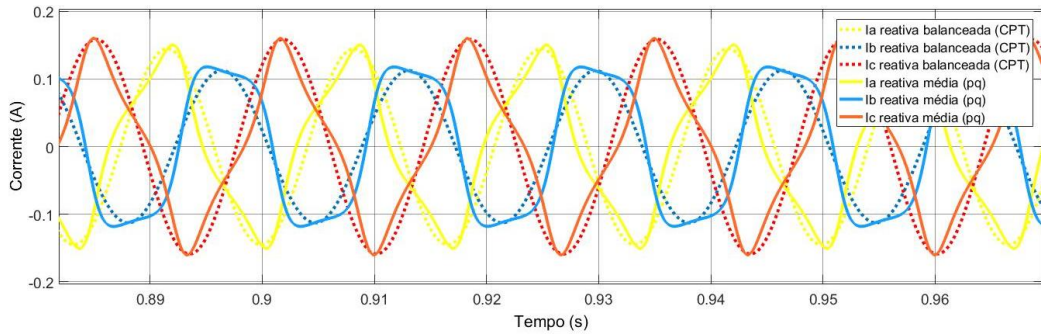
Na figura 28 no caso 1 as correntes reativas são equivalentes, porém apresentam diferenças nos casos seguintes das figuras 29, 30 e 31.

Figura 28 – Caso 1: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-indutiva



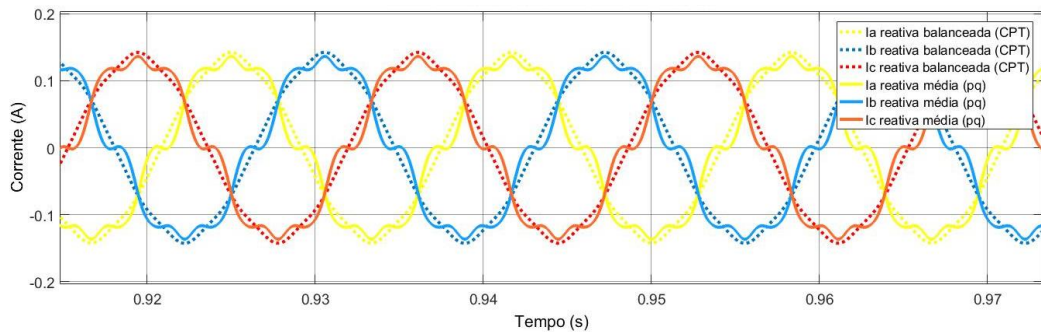
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 29 – Caso 2: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-indutiva



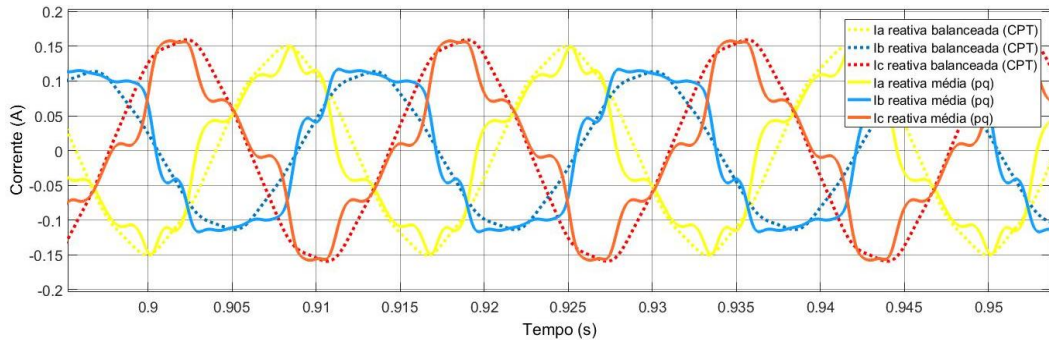
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 30 – Caso 3: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-indutiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 31 – Caso 4: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-indutiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Nas figuras 29, 30 e 31, é possível fazer uma análise das equações que compõem essas correntes reativas. No caso da teoria pq, assim como no caso resistivo, há divisão da potência reativa média pela norma quadrática das tensões $\alpha\beta$, como apresentadas nas equações (2.38) e (2.47). Já no caso da teoria CPT, a mesma depende da reatividade balanceada da carga, de acordo com a equação (2.84).

$$i_{\alpha\bar{q}} = \left(\frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{q}, \quad (2.38)$$

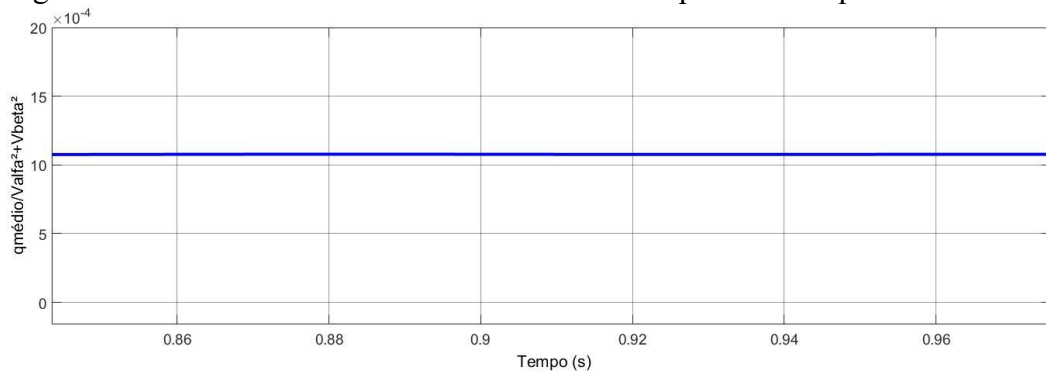
$$i_{\beta\bar{q}} = \left(\frac{-v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{q}, \quad (2.47)$$

$$\underline{i}_r^b = \frac{\langle \hat{v}, i \rangle}{\|\hat{v}\|^2} \hat{v} = \frac{W}{\hat{v}^2} \hat{v} = B^b \hat{v}. \quad (2.84)$$

Pelas equações (2.38) e (2.39) as correntes reativas médias da teoria pq dependem do valor instantâneo da potência reativa média, enquanto as correntes reativas balanceadas, segundo a equação (2.81) da teoria CPT dependem da reatividade balanceada da carga (B^b).

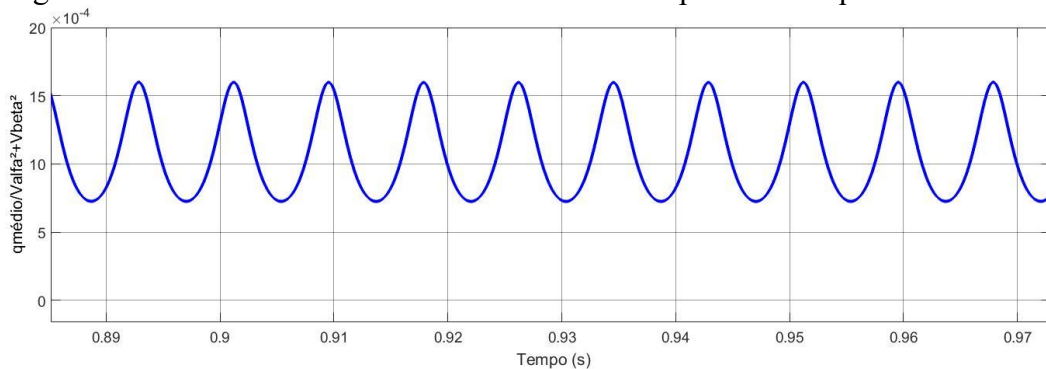
Nas figuras 32, 33, 34 e 35, tem-se a divisão da potência reativa média pela norma quadrática das tensões $\alpha\beta$. Para o caso 1 na Figura 32 há uma constante, o que justifica as correntes reativas da teoria CPT e pq serem iguais. No caso 3 na Figura 34, a equivalência é muito próxima devido a divisão da potência pela norma quadrática ter baixa oscilação. Já nos casos 2 e 4, nas Figuras 33 e 35 respectivamente, devido à alta oscilação, resulta em não equivalência de correntes reativas.

Figura 32 – Caso 1: Potência reativa média dividida pela norma quadrática



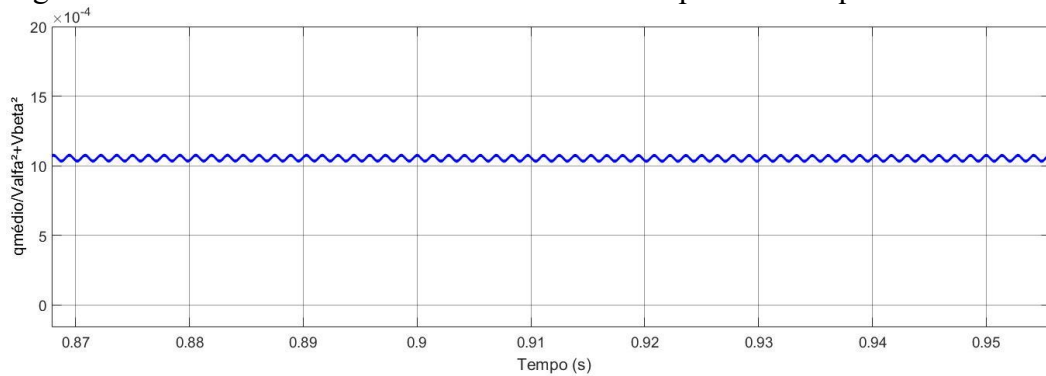
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 33 – Caso 2: Potência reativa média dividida pela norma quadrática



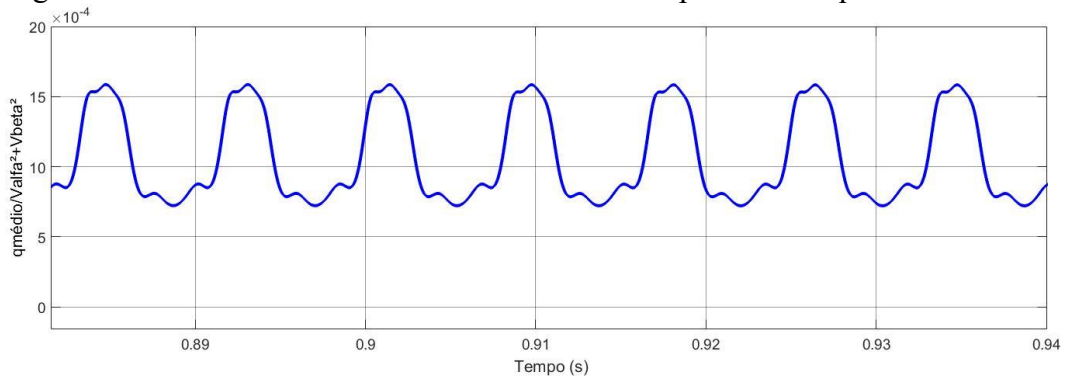
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 34 – Caso 3: Potência reativa média dividida pela norma quadrática



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 35 – Caso 4: Potência reativa média dividida pela norma quadrática



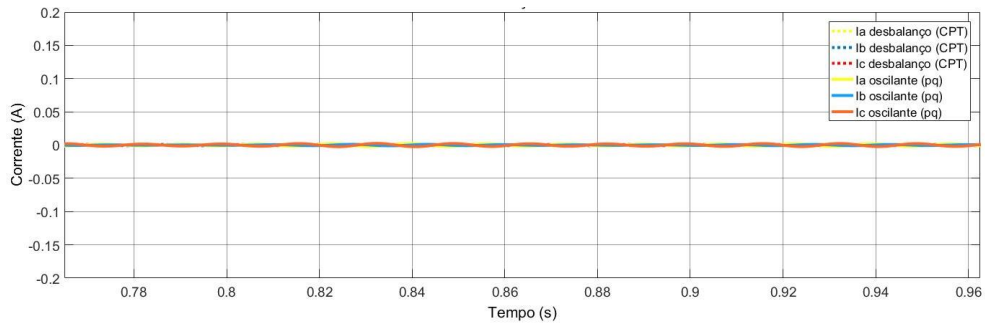
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Nas figuras 36, 37, 38 e 39, tem-se as correntes que representam os desequilíbrios do sistema para as duas teorias. No caso 1 da Figura 36, não há qualquer tipo de oscilação devido ao regime senoidal equilibrado ao qual a carga está submetida.

No caso 2 da Figura 37, há corrente de oscilação para a teoria pq mas não há para a teoria CPT. Isso é devido a teoria pq representar qualquer tipo de desequilíbrio presente no sistema, enquanto a CPT representa cargas não lineares e tensões não senoidais, como analisado também para a carga resistiva.

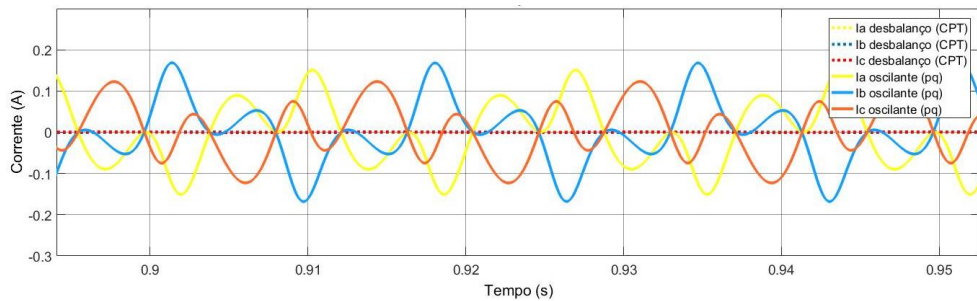
Já nos casos 3 e 4 nas Figuras 38 e 39 respectivamente, há corrente de desbalanço da teoria CPT, devido a mesma representar tensões não senoidais para um caso de carga que não é apenas resistiva. Para esses casos ainda que haja presença de cargas de desequilíbrio pelas duas teorias, as mesmas não são equivalentes.

Figura 36 – Caso 1: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-indutiva



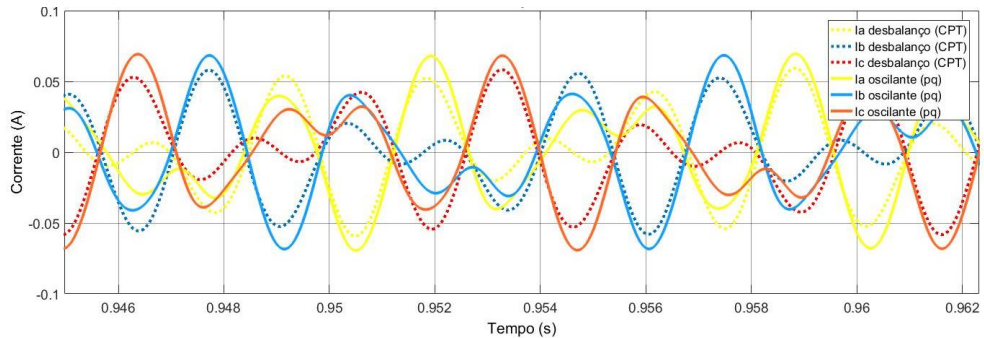
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 37 – Caso 2: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-indutiva



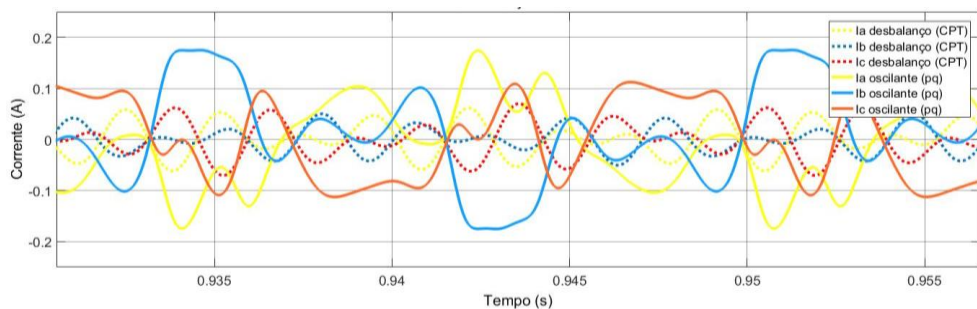
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 38 – Caso 3: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-indutiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 39 – Caso 4: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-indutiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Na tabela 6 tem-se os valores eficazes de correntes totais, correntes ativas médias e correntes reativas médias, além de valores de potência, fator de potência e taxa de distorção harmônica. Analisando a tabela 6, devido a presença de carga reativa no sistema as correntes totais não são mais iguais as correntes ativas médias, sendo uma parcela dessa corrente total presente na corrente reativa média.

Nos casos 2, 3 e 4, tem-se parcelas de corrente oscilante, o que resulta em presença de potência harmônica (H). Por existir potência de harmônica inclusive no caso 2, pode-se concluir que a teoria pq engloba todos os tipos de desequilíbrio existentes no circuito, inclusive desequilíbrio de tensão.

Analisando o fator de potência, é visto que em todos os casos é menor que 1, o que representa a característica de uma carga indutiva. Porém para a teoria pq, a presença de harmônicas não influencia no cálculo do fator de potência, como é visto a partir da equação (2.51).

$$FP_{\alpha\beta 0} = \frac{P_{\alpha\beta} + P_0}{S_{\alpha\beta 0}} \quad (2.54)$$

Também há a presença da taxa de distorção harmônica nos casos 3 e 4, porém não com tanta significância quanto no caso resistivo, devido as propriedades da indutância agindo como filtro passivo.

Tabela 6 – Dados da Teoria pq para carga resistiva-indutiva

Dados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
I_a (A)	0,265	0,279	0,265	0,280
I_b (A)	0,264	0,216	0,264	0,217
I_c (A)	0,265	0,306	0,265	0,307
$I_{\bar{p}a}$ (A)	0,245	0,260	0,243	0,261
$I_{\bar{p}b}$ (A)	0,245	0,260	0,243	0,264
$I_{\bar{p}c}$ (A)	0,245	0,260	0,243	0,252
$I_{\bar{q}a}$ (A)	0,097	0,095	0,095	0,093
$I_{\bar{q}b}$ (A)	0,097	0,095	0,095	0,092
$I_{\bar{q}c}$ (A)	0,097	0,095	0,095	0,096
$I_{\bar{p}a} + I_{\bar{q}a}$ (A)	0,001	0,079	0,034	0,084
$I_{\bar{p}b} + I_{\bar{q}b}$ (A)	0,001	0,078	0,035	0,095
$I_{\bar{p}c} + I_{\bar{q}c}$ (A)	0,001	0,069	0,035	0,076
$S_{\alpha\beta 0}$ (VA)	70,94	73,13	71,15	73,35
$P_{\alpha\beta}$ (W)	65,98	68,68	66,23	68,93
$Q_{\alpha\beta}$ (Var)	26,04	25,12	25,98	25,05
H (VA)	0,350	19,79	9,525	22,98
$FP_{\alpha\beta 0}$	0,930	0,940	0,931	0,940
DHT_{Ia} (%)	0,100	0,100	6,000	6,000
DHT_{Ib} (%)	0,100	0,100	6,100	6,100
DHT_{Ic} (%)	0,100	0,100	6,000	6,000

Fonte: elaborado pelo autor.

Na tabela 7 tem-se os valores eficazes de correntes totais, correntes ativas balanceadas e correntes reativas balanceadas, além de valores de potência, fator de potência e taxa de distorção harmônica para a teoria CPT.

Analisando as correntes da tabela 7, as correntes totais são diferentes das correntes ativas balanceadas, devido a presença da corrente reativa balanceada do sistema.

Há maior presença de correntes de desbalanço nos casos 3 e 4 devido a presença de harmônicas no sistema. Das correntes $I_{a\mu}^u + I_{r\mu}^u + I_{v\mu}$, a corrente de maior presença é a corrente residual $I_{v\mu}$, pois dentre as potências de desbalanço (U) e residual (D), a residual é a que se mostra com maior magnitude.

Nesses casos 3 e 4, a presença de harmônicas influencia no cálculo do fator de potência, como pode ser observado na equação (2.98).

$$\lambda = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}, \quad (2.98)$$

devido ao cálculo depender também da potência residual.

Tabela 7 – Dados da Teoria CPT para carga resistiva-indutiva

Dados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
I_a (A)	0,263	0,278	0,263	0,278
I_b (A)	0,262	0,215	0,262	0,215
I_c (A)	0,263	0,304	0,263	0,304
I_{aa}^b (A)	0,245	0,258	0,241	0,254
I_{ab}^b (A)	0,245	0,201	0,241	0,198
I_{ac}^b (A)	0,245	0,283	0,241	0,279
I_{ra}^b (A)	0,095	0,100	0,095	0,101
I_{rb}^b (A)	0,095	0,078	0,095	0,078
I_{rc}^b (A)	0,095	0,110	0,095	0,110
$I_{aa}^u + I_{ra}^u + I_{va}^u$ (A)	0,002	0,002	0,005	0,006
$I_{ab}^u + I_{rb}^u + I_{vb}^u$ (A)	0,001	0,001	0,005	0,004
$I_{ac}^u + I_{rc}^u + I_{vc}^u$ (A)	0,002	0,002	0,006	0,007
A (VA)	70,75	73,64	69,84	72,70
P (W)	65,95	68,64	64,93	67,59
Q (Var)	25,61	26,66	25,68	26,74
D (VA)	0,542	0,564	1,509	1,570
U (VA)	0,198	0,173	0,196	0,172
λ	0,932	0,932	0,930	0,930
DHT_{Ia} (%)	0,000	0,000	14,15	14,21
DHT_{Ib} (%)	0,000	0,000	14,15	14,20
DHT_{Ic} (%)	0,000	0,000	14,15	14,14

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Comparando as tabelas 6 e 7, percebe-se diferenças entre as correntes ativas médias ($I_{p\mu}$) e as correntes ativas balanceadas ($I_{a\mu}^b$), além de correntes reativas médias ($I_{q\mu}$) e corrente reativa balanceada ($I_{r\mu}^b$) para os casos 2 e 4, que são os casos que apresentam desequilíbrio de tensão. Isso se deve ao fato de na teoria pq a potência média trifásica ser levada em consideração para o cálculo da corrente média, ou seja, quaisquer correntes que se referem ao desequilíbrio de tensão estão presentes nas correntes oscilantes ($I_{p\mu} + I_{q\mu}$), enquanto que na teoria CPT as correntes balanceadas não identificam desequilíbrios de tensão. A mesma análise vale para as correntes reativas médias ($I_{q\mu}$) e correntes reativas balanceadas ($I_{r\mu}^b$).

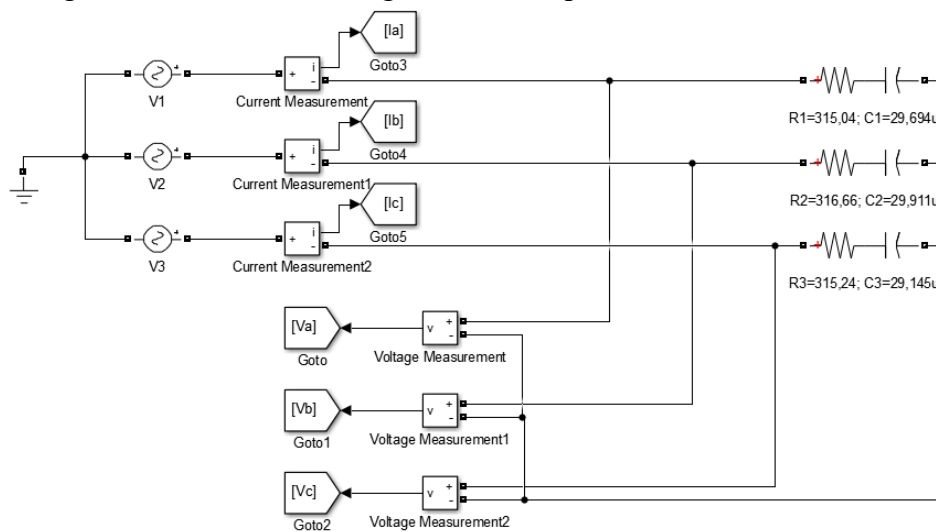
Também a potência harmônica se faz mais presente do que a potência de distorção e desbalanço com maior magnitude, mostrando que a teoria pq representa qualquer tipo de desequilíbrio do sistema.

Da mesma forma que no caso resistivo, a potência ativa e reativa são maiores nos casos 3 e 4 da teoria pq, sendo válida a mesma análise apresentada na seção 3.1.

3.3 Carga resistiva-capacitiva

Na figura 40 tem-se o circuito base para análise no caso da carga resistiva-capacitiva. A carga utilizada é balanceada, sendo: $R_1=315,04\Omega$, $R_2=316,66\Omega$, $R_3=315,24\Omega$, $C_1=29,694\mu\text{F}$, $C_2=29,911\mu\text{F}$ e $C_3=29,145\mu\text{F}$. Com cada carga resistiva sendo de aproximadamente 315Ω e cada carga capacitiva sendo aproximadamente $30\mu\text{F}$, pode-se considerar a mesma equilibrada.

Figura 40 – Circuito de carga resistiva-capacitiva

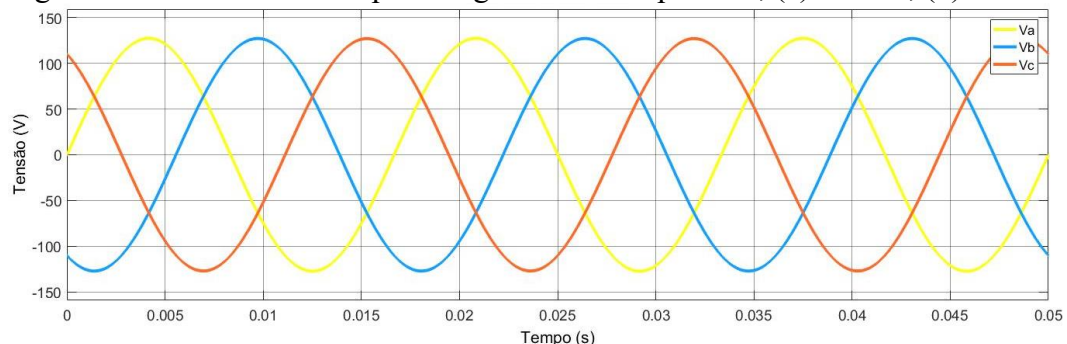


Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

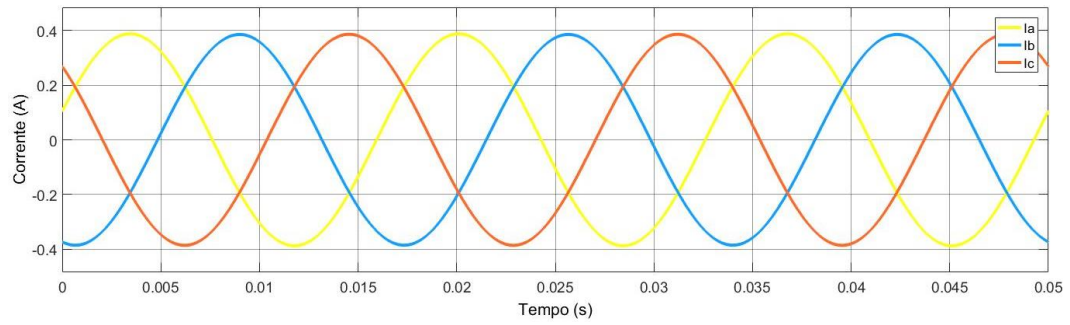
As correntes e tensões apresentadas nas Figuras 41, 42, 43 e 44 representam as medições realizadas nos pontos apresentados na figura 31.

Nas figuras 41 e 43 já é possível perceber que se trata de uma carga capacitiva devido ao adiantamento na corrente em relação a tensão dentro do mesmo intervalo de tempo. É perceptível também na figura 44 a diferença entre a tensão e a corrente, pois assim como os indutores, capacitores também podem agir com filtros passivos de energia.

Figura 41 – Caso 1: Valores para carga resistiva-capacitiva, (a) Tensão; (b) Corrente.



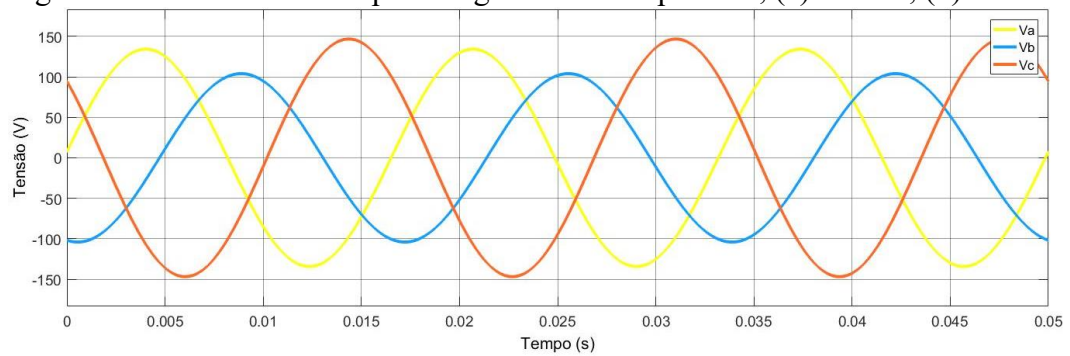
(a)



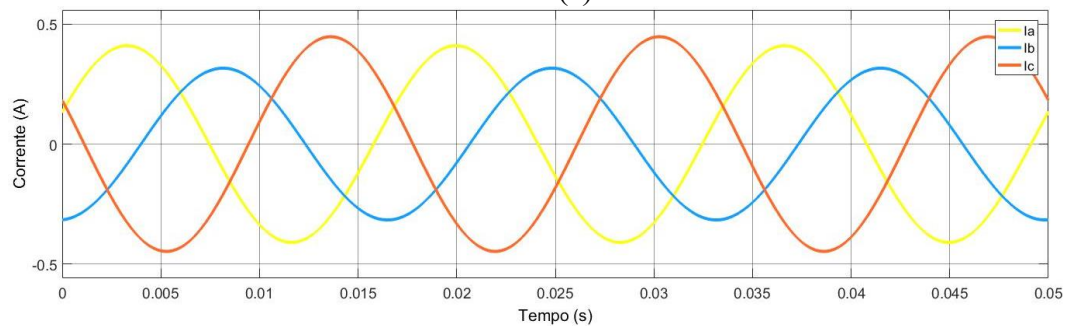
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 42 – Caso 2: Valores para carga resistiva-capacitiva, (a) Tensão; (b) Corrente.



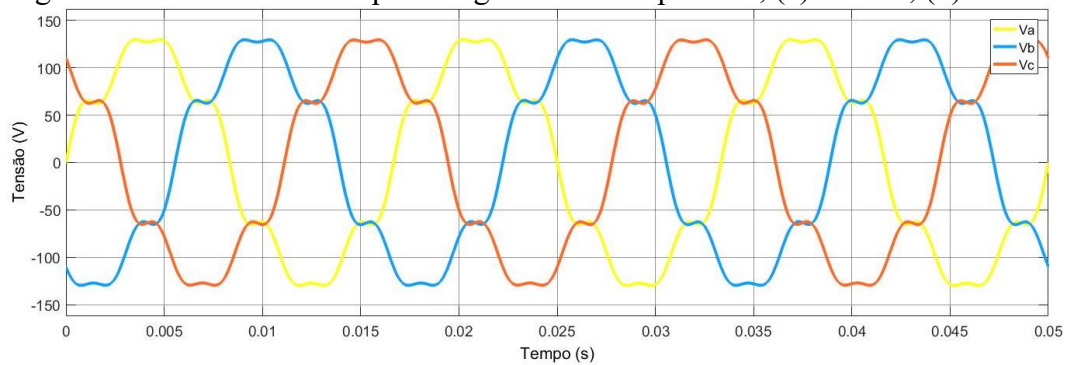
(a)



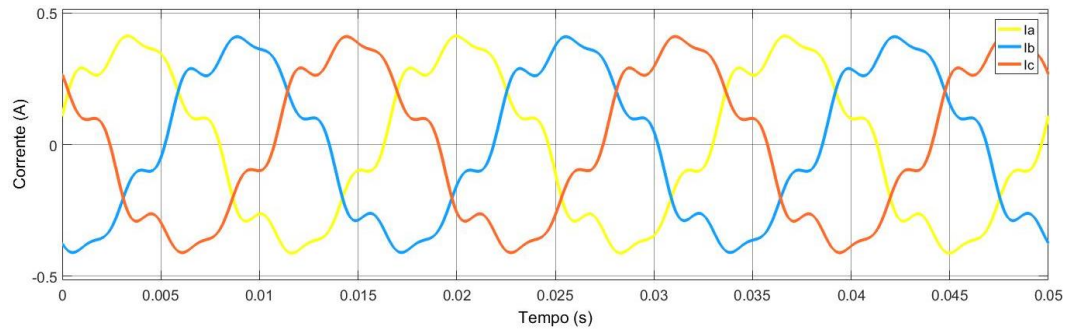
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 43 – Caso 3: Valores para carga resistiva-capacitiva, (a) Tensão; (b) Corrente.



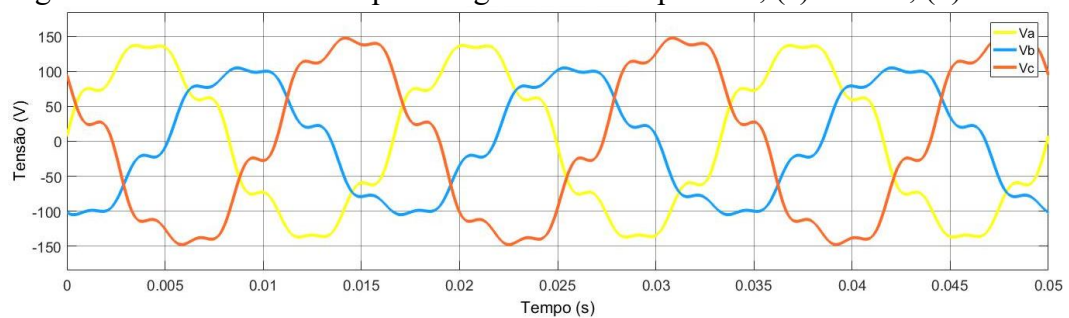
(a)



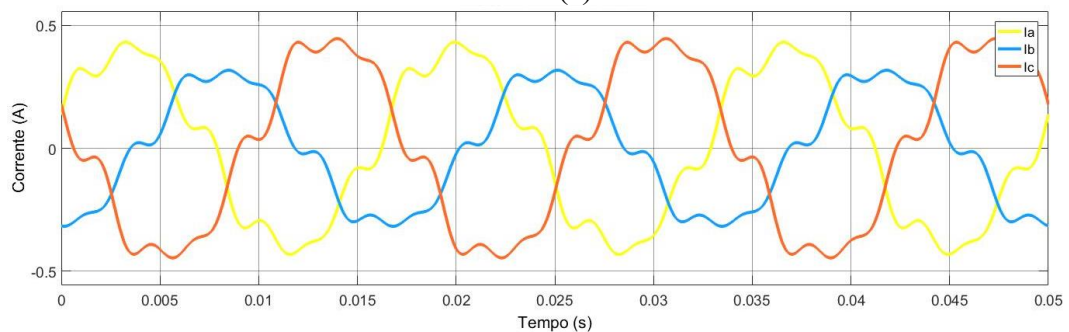
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 44 – Caso 4: Valores para carga resistiva-capacitiva, (a) Tensão; (b) Corrente.



(a)



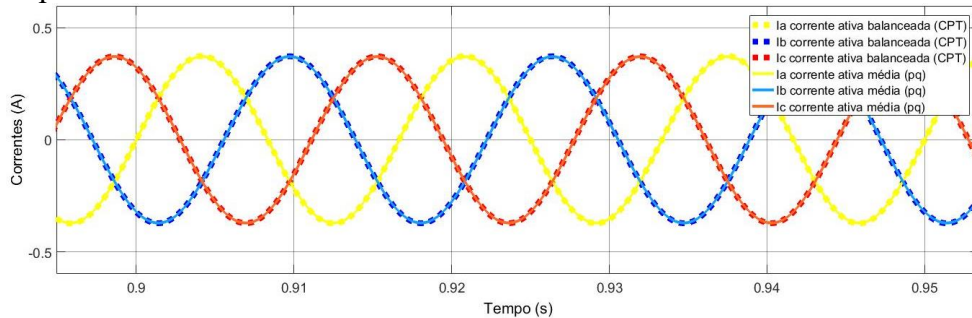
(b)

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Pode-se então realizar o comparativo das decomposições de correntes segundo a tabela 1. Nas figuras 45, 46, 47 e 48 tem-se o comparativo das formas de ondas da corrente ativa média ($i_{\bar{p}\mu}$) da teoria pq e da corrente ativa balanceada ($i_{a\mu}^b$) teoria CPT.

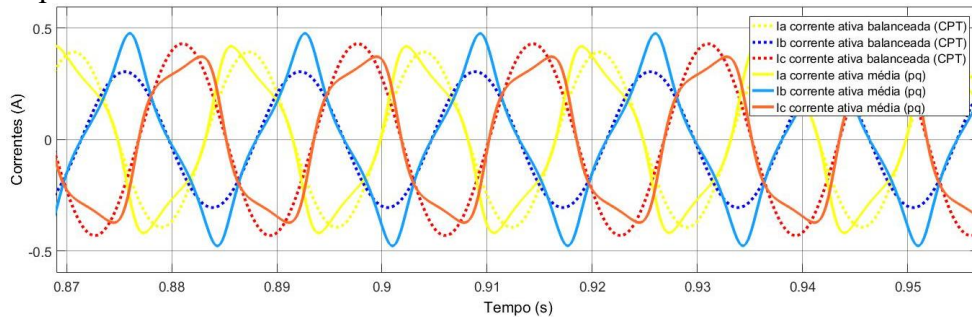
Em todos os casos, as cargas resistiva, resistiva-indutiva e resistiva-capacitiva apresentam o mesmo comportamento nos casos de tensões equilibradas nas Figuras 45 e 47 apresentando semelhança nas teorias, enquanto para os casos de tensões desequilibradas nas Figuras 46 e 48 apresentam diferenças nas teorias.

Figura 45 – Caso 1: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-capacitiva



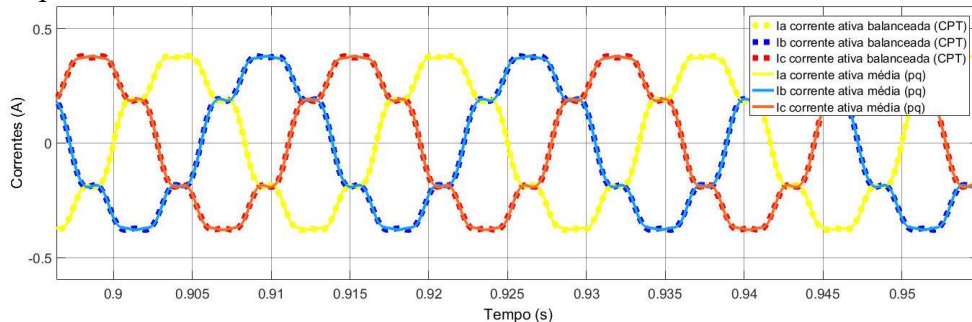
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 46 – Caso 2: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-capacitiva



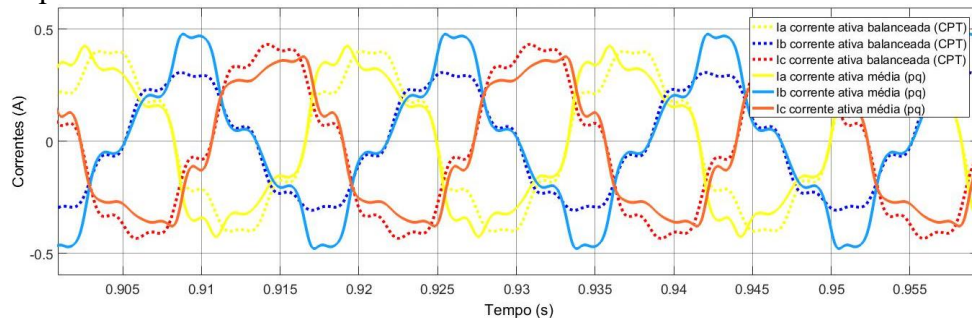
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 47 – Caso 3: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-capacitiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 48 – Caso 4: Corrente ativa média e corrente ativa balanceada trifásicas para carga resistiva-capacitiva

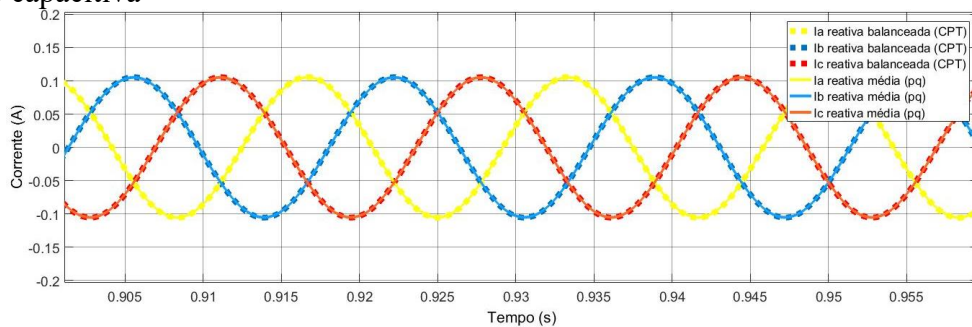


Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Nas Figuras 49, 50, 51 e 52, tem-se o comparativo das formas de ondas da corrente reativa média ($i_{\bar{q}\mu}$) da teoria pq e da corrente reativa balanceada ($i_{r\mu}^b$) da teoria CPT.

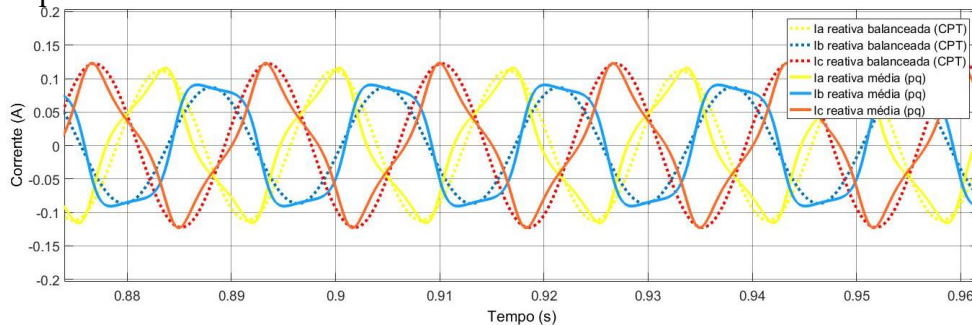
Para a carga resistiva-capacitiva observa-se mesmo comportamento da carga resistiva-indutiva, pois esses dois tipos de carga apresentam a característica de serem armazenadores de energia. Logo a análise pode ser a mesma para os dois casos como observado na seção 2.3, ou seja, para a teoria pq a corrente média é baseada na divisão da potência média pela norma quadrática das tensões $\alpha\beta$, enquanto para a teoria CPT é baseada na susceptância da carga.

Figura 49 – Caso 1: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-capacitiva



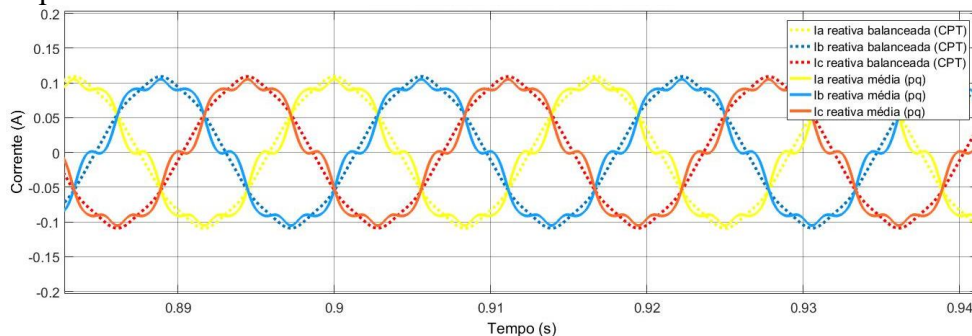
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 50 – Caso 2: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-capacitiva



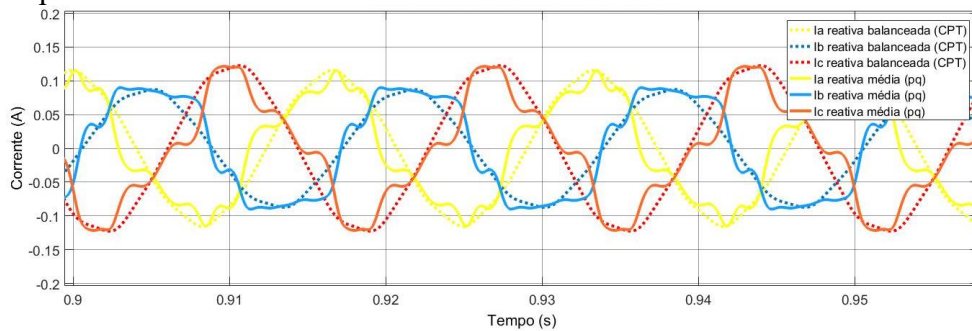
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 51 – Caso 3: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-capacitiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 52 – Caso 4: Corrente reativa balanceada e corrente reativa média para carga resistiva-capacitiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

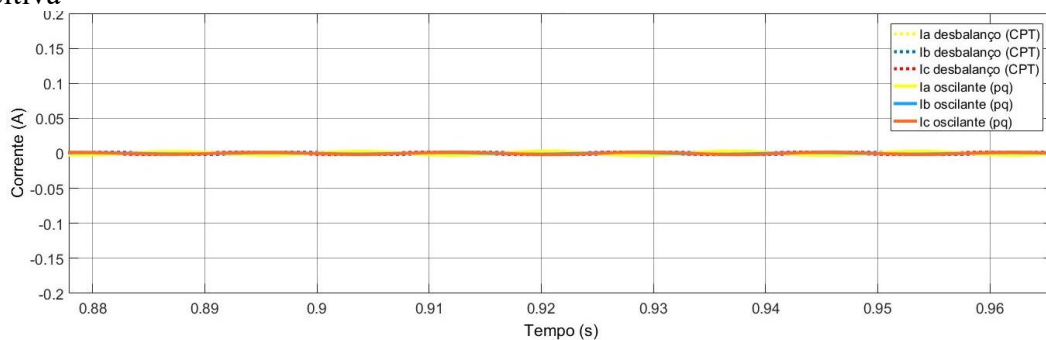
Nas figuras 53, 54, 55 e 56, são as correntes que representam os desequilíbrios do sistema para as duas teorias. As mesmas apresentam o mesmo comportamento do caso resistivo-indutivo.

No caso 1 da Figura 53, há ausência de correntes de desbalanço ou oscilantes devido a regime senoidal equilibrado ao qual a carga está submetida.

No caso 2 da Figura 54, tem-se correntes oscilantes da teoria pq, mas não há correntes de desbalanço da teoria CPT. Isso é devido a teoria pq representar qualquer tipo de desequilíbrio do sistema, no caso o desequilíbrio de tensão, enquanto que a teoria CPT representa cargas não lineares e tensões não senoidais, como analisado para cargas resistivas e resistiva-indutiva.

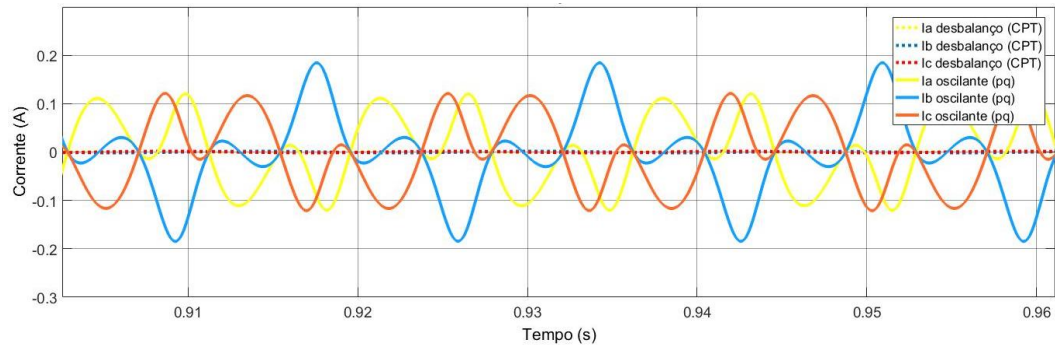
Para os casos 3 e 4 das Figuras 55 e 56 respectivamente, percebe-se que embora haja presença de correntes de desbalanço e correntes oscilantes, as mesmas não são equivalentes. Para a teoria CPT, há a presença de correntes de desbalanço devido a presença de harmônicos na fonte de tensão.

Figura 53 – Caso 1: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-capacitiva



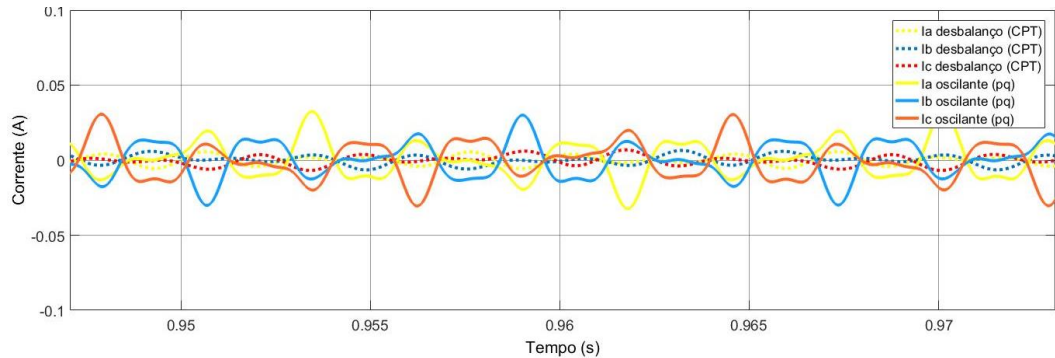
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 54 – Caso 2: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-capacitiva



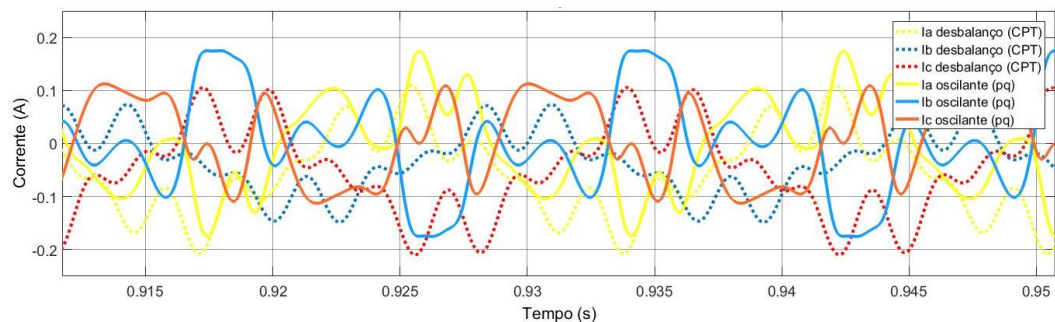
Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 55 – Caso 3: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-capacitiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Figura 56 – Caso 4: Corrente de desbalanço e corrente oscilante para carga resistiva-capacitiva



Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

Na tabela 8 tem-se os resultados de valores eficazes de corrente, além de potências, fator de potência e taxa de distorção harmônica da corrente.

Para todos os casos há a presença de corrente reativa média ($I_{\bar{q}\mu}$) devido a presença do elemento capacitivo na carga assim como tem a potência reativa ($Q_{\alpha\beta}$).

Também, nos casos 2, 3 e 4, percebe-se a presença de correntes oscilantes ($I_{\bar{p}\mu} + I_{\bar{q}\mu}$), assim como potência harmônica (H). Como há esses elementos inclusive no caso 2, onde há apenas o desequilíbrio das tensões, tem-se que as correntes oscilantes representam qualquer tipo de desequilíbrio do sistema, seja de tensão ou presença de harmônicos.

Tabela 8 – Dados da Teoria pq para carga resistiva-capacitiva

Dados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
I_a (A)	0,274	0,289	0,277	0,293
I_b (A)	0,273	0,223	0,276	0,226
I_c (A)	0,273	0,316	0,276	0,319
$I_{\bar{p}a}$ (A)	0,262	0,278	0,265	0,284
$I_{\bar{p}b}$ (A)	0,262	0,278	0,265	0,287
$I_{\bar{p}c}$ (A)	0,262	0,278	0,265	0,275
$I_{\bar{q}a}$ (A)	0,074	0,073	0,073	0,072
$I_{\bar{q}b}$ (A)	0,074	0,073	0,073	0,071
$I_{\bar{q}c}$ (A)	0,074	0,073	0,073	0,074
$I_{\bar{p}a} + I_{\bar{q}a}$ (A)	0,001	0,073	0,012	0,085
$I_{\bar{p}b} + I_{\bar{q}b}$ (A)	0,000	0,084	0,012	0,090
$I_{\bar{p}c} + I_{\bar{q}c}$ (A)	0,001	0,077	0,012	0,070
$S_{\alpha\beta 0}$ (VA)	73,78	75,93	74,84	77,46
$P_{\alpha\beta}$ (W)	70,59	73,44	72,11	75,09
$Q_{\alpha\beta}$ (Var)	20,04	19,30	20,03	19,30
H (VA)	0,415	20,44	3,292	21,14
$FP_{\alpha\beta 0}$	0,962	0,967	0,963	0,968
DHT_{Ia} (%)	0,100	0,100	14,65	14,65
DHT_{Ib} (%)	0,100	0,100	14,70	14,71
DHT_{Ic} (%)	0,100	0,100	14,71	14,70

Fonte: elaborado pelo autor.

Na tabela 9 tem-se os valores eficazes de correntes totais, correntes ativas balanceadas e correntes reativas balanceadas, além de valores de potência, fator de potência e taxa de distorção harmônica.

Assim como na carga resistiva-indutiva, as correntes totais são diferentes das correntes ativas balanceadas, devido a presença da corrente reativa balanceada do sistema.

Também é menor a presença das correntes de desbalanço ($I_{a\mu}^u + I_{r\mu}^u + I_{v\mu}$), porém mesmo em menor presença, a corrente de maior presença é a corrente residual $I_{v\mu}$, pois dentre as potências de desbalanço (U) e residual (D), a residual é a que se mostra com maior magnitude, principalmente nos casos 3 e 4.

A presença de harmônicas nesse caso não influenciou no cálculo do fator de potência, devido à baixa presença de potência residual.

Tabela 9 – Dados da Teoria CPT para carga resistiva-capacitiva

Dados	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
I_a (A)	0,273	0,288	0,273	0,288
I_b (A)	0,272	0,222	0,272	0,222
I_c (A)	0,272	0,315	0,272	0,315
I_{aa}^b (A)	0,262	0,277	0,263	0,277
I_{ab}^b (A)	0,262	0,214	0,262	0,215
I_{ac}^b (A)	0,262	0,302	0,262	0,303
I_{ra}^b (A)	0,073	0,078	0,073	0,078
I_{rb}^b (A)	0,073	0,060	0,073	0,060
I_{rc}^b (A)	0,073	0,085	0,073	0,085
$I_{aa}^u + I_{ra}^u + I_{va}$ (A)	0,001	0,001	0,001	0,001
$I_{ab}^u + I_{rb}^u + I_{vb}$ (A)	0,002	0,001	0,002	0,002
$I_{ac}^u + I_{rc}^u + I_{vc}$ (A)	0,002	0,002	0,003	0,003
A (VA)	73,32	76,30	73,42	76,41
P (W)	70,60	73,46	70,71	73,57
Q (Var)	19,76	20,62	19,76	20,62
D (VA)	0,422	0,440	0,519	0,542
U (VA)	0,304	0,320	0,304	0,319
λ	0,963	0,963	0,963	0,963
DHT_{Ia} (%)	0,000	0,000	14,15	14,16
DHT_{Ib} (%)	0,000	0,000	14,26	14,23
DHT_{Ic} (%)	0,000	0,000	14,17	14,16

Fonte: elaborado pelo autor no *software* Simulink.

4 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Este trabalho realizou um estudo comparativo entre as teorias de potência instantânea e conservativa, para cargas balanceadas resistiva, resistiva-indutiva e resistiva-capacitiva.

As correntes se mostram equivalentes em magnitude e fase para o caso de tensão equilibrada e diferentes em magnitude para tensão desequilibrada, para a carga resistiva, ao analisar as correntes ativa média ($i_{\bar{p}\mu}$) da teoria pq e corrente ativa balanceada ($i_{a\mu}^b$) da teoria CPT. Na teoria pq isso é devido a utilização da divisão da norma quadrática das tensões $\alpha\beta$, como demonstrado no tópico 3.1. Já para a teoria CPT, é utilizada a divisão pelo valor eficaz da tensão que é uma constante, resultando em um valor constante. Dessa forma, é perceptível conforme os resultados que as formas de onda das correntes da teoria CPT apresentam forma de onda senoidal, enquanto a teoria pq apresenta forma mais distorcida.

Também foi possível visualizar a forma como as duas teorias tratam as oscilações de corrente. As parcelas de corrente oscilantes teoria pq ($i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$) somam todas as não linearidades e desbalanços do circuito, não sendo possível a separação dessas parcelas. Já a teoria CPT separa as correntes em desbalanço de carga ($i_a^u + i_r^u$) e a corrente residual (i_v), sendo possível ter uma melhor compreensão dos fenômenos físicos que envolvem o circuito. Para a teoria CPT, é apresentada a corrente residual apenas para os casos em que há tensão não senoidal, com exceção de carga resistiva. Dessa forma, as correntes de desbalanço e residuais dessa teoria foram nulas para todos os casos de carga resistiva.

Em relação a potência, foi possível observar a influência de harmônicas para o cálculo de potência ativa. A potência ativa da teoria pq é resultante da somatória da potência trifásica do circuito, incluindo potência harmônica. Já a teoria CPT tem a potência ativa calculada a partir da corrente ativa balanceada ($I_{a\mu}^b$), retirando todas as oscilações de tensão ou desbalanços de carga. Logo, para os casos em que existia harmônica no sistema, a teoria pq apresentava potência ativa maior do que na teoria CPT.

Para a carga resistiva-indutiva e resistiva-capacitiva, as análises relacionadas a corrente ativa média e corrente balanceada são as mesmas para a carga puramente resistiva.

Analisando a corrente reativa média ($i_{\bar{q}\mu}$) da teoria pq e a corrente reativa balanceada ($i_{r\mu}^b$) da teoria CPT, visualizou-se equivalência apenas para o caso 1. Isso é devido a forma como as duas são calculadas, pois a teoria pq tem a corrente reativa média calculada a partir da

norma quadrática de tensões $\alpha\beta$. Já a teoria CPT depende da susceptância do circuito. Dessa forma é até perceptível pelos resultados que as formas de ondas da teoria CPT apresentam forma senoidal, enquanto a teoria pq apresenta forma mais distorcida.

Quanto as correntes que representam desequilíbrios do sistema, houve equivalência apenas para o caso 1. A carga resistiva-indutiva e resistiva-capacitiva apresentaram corrente residual da teoria CPT nos casos 3 e 4. Essa corrente apenas se faz presente em casos que a carga não é resistiva. A teoria CPT faz uma melhor caracterização dos fenômenos físicos do que a teoria pq. Essa caracterização também pôde ser analisada através das potências de desbalanço (U) e potência residual (D), calculadas a partir das correntes de desbalanço e corrente residual. Por terem essas diferenças, as teorias apresentaram divergências quando comparadas.

Analisando o fator de potência para as duas teorias, foi percebido que a teoria pq não leva em consideração as potências harmônicas, enquanto a teoria CPT leva isso em consideração no cálculo. Isso pode ser visto nos resultados, onde o fator de potência dos casos 2 e 4 da teoria pq eram maiores do que os da teoria CPT.

4.1 Trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros, pode-se realizar o mesmo estudo comparativo também para cargas desequilibradas, a fim de se verificar se as mesmas proposições se aplicam para o caso de cargas balanceadas.

Também, realizar uma análise experimental dos circuitos, aplicando também o estudo comparativo para as teorias de potência, para verificar se a teoria se comporta de forma igual experimentalmente.

Realizar o estudo voltado para outros tipos de cargas, como exemplo retificador trifásico, e comparação das teorias para esse caso.

REFERÊNCIAS

BOGILA, Alessandro. **Teorias de potência conservativa e instantânea: análise comparativa**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2014.

BUZZO FRAISSAT, Fernando. **Estudo da análise de teoria conservativa para análise de sistemas elétricos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2011.

CZARNECKI, L.S, "**What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion powers and why it should be abandoned**", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement Vol. IM-36, p.834-837.

DECKMANN, Sigmar Maurer. **Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Campinas: [s. n.], 2017. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>. Acesso em: 23 maio 2019.

DE LIMA, Ezequiel Junio. **Reflexões sobre as teorias de potência elétrica em regime não senoidal**. 2014. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "**Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits**". International Power Electronic Conference (IPEC.), Tokyo, Japan, 1983.

H. WATANABE, Edson; AREDES, Maurício. Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações - filtros ativos e FACTS. **Laboratório de Eletrônica de Potência**, Rio de Janeiro, ca. 2000.

IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, "**IEEE Tutorial Course on Nonsinusoidal Situations: Effects on Performance of Meters**", 90EH0327-7-PWR, 1990

JETSEMA, Dimitri. Budeanu's Concept of Reactive and Distortion Power Revisited. **Przegląd Elektrotechniczny**, [S. l.], p. 68-73, 17 abr. 2016.

LIMONGI, Leonardo Rodrigues. **Filtros ativos de potência para compensação de harmônicos de corrente e potência reativa**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

PAOLO. Tenti, PAOLO. Mattavelli, H. K. MORALES. Paredes. **“Conservative Power Theory, Sequence Components and Accountability in Smart Grids”**. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 86, no. 6, pp.30-37, 2010.

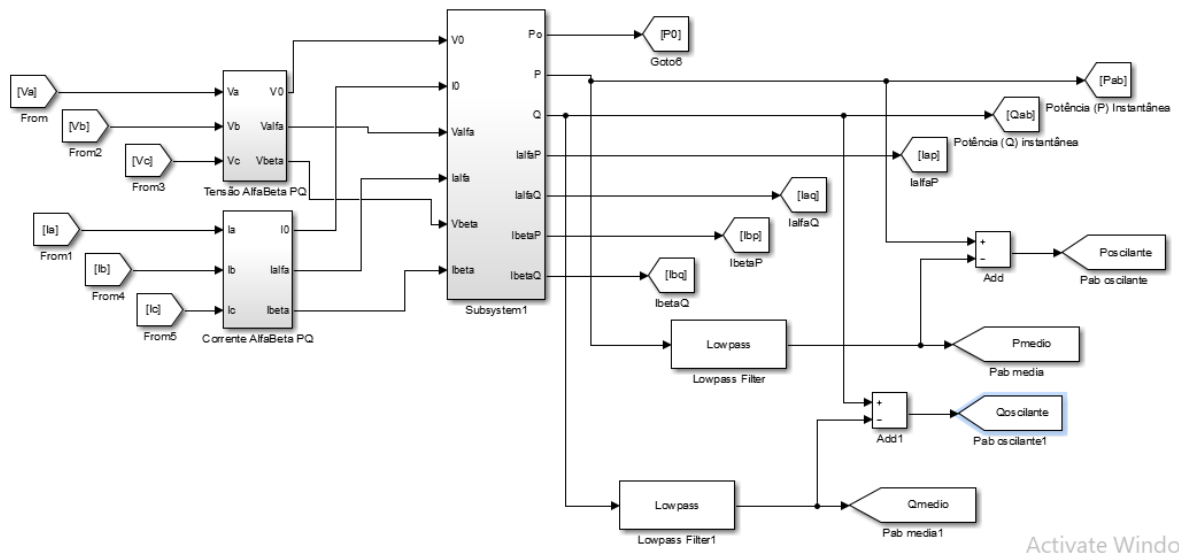
PAREDES, Helmo Kelis Morales. **Teoria de potência conservativa: Uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades**. 2011. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

PAREDES, Helmo Kelis Moralis. Tópicos em Teorias de Potência em Condições Não Ideais de Operação. *In: POMILIO, José Antenor; PAREDES, Helmo Kelis Moralis; DECKMANN, Sigmar Maurer. Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica*. Campinas: [s. n.], 2017. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/it744/cap7.pdf>. Acesso em: 23 maio 2019.

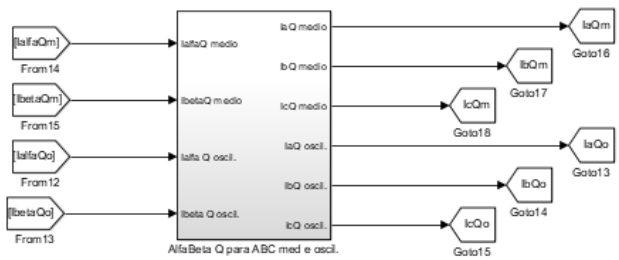
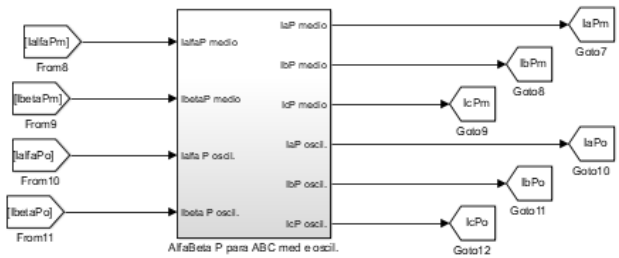
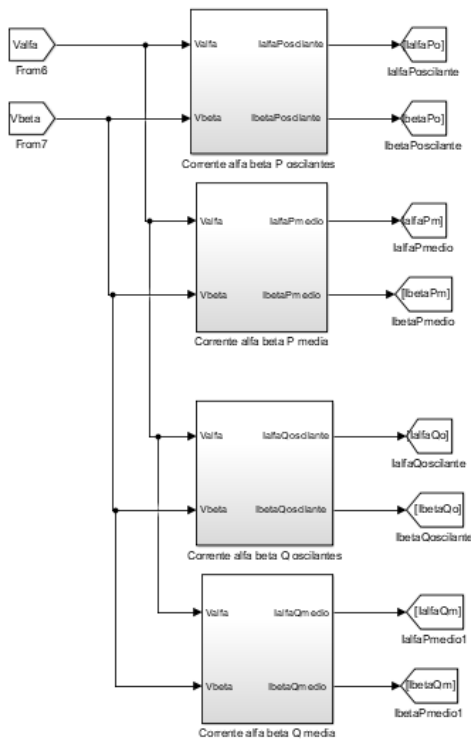
POMILIO, José Antenor; DECKMANN, Sigmar Maurer. **Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas**. *In: POMILIO, José Antenor; PAREDES, Helmo Kelis Moralis;*

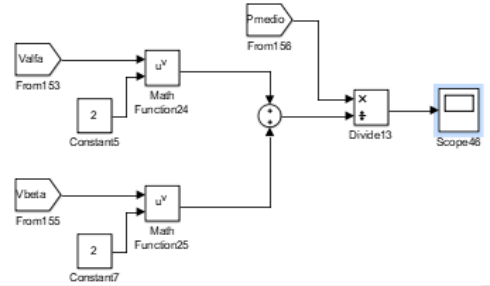
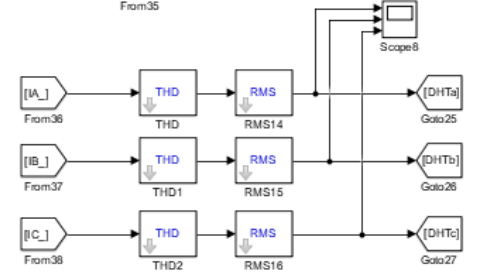
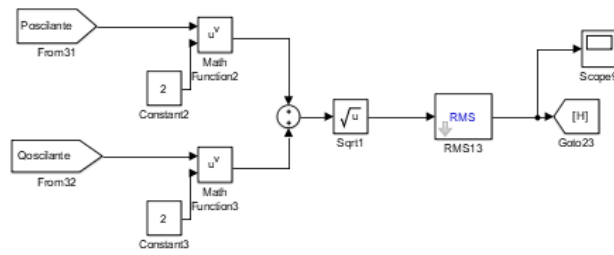
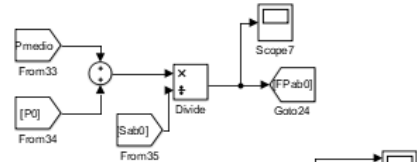
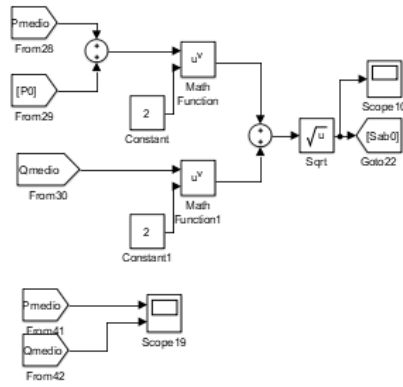
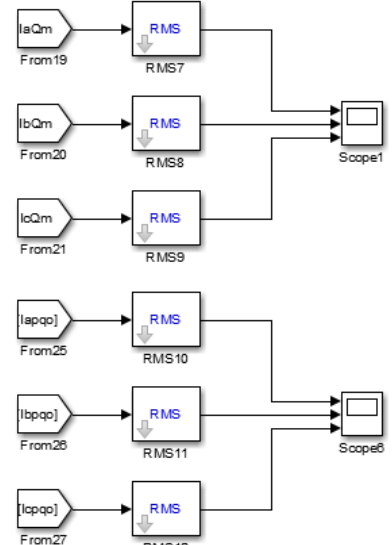
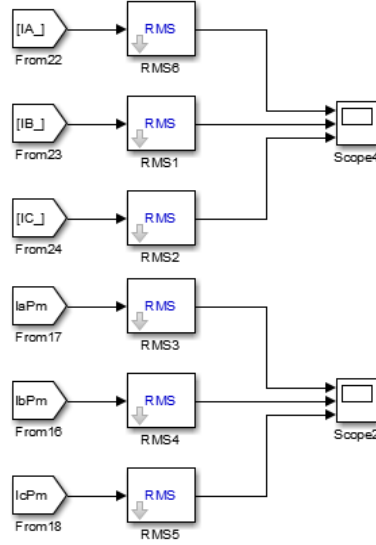
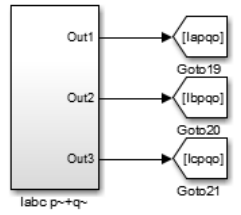
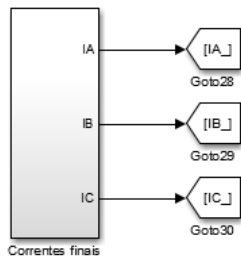
MARAFÃO, F. P. et al. **Three- phase four-wire circuits interpretation by means of different power theories**. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, v. 87, n. 1, p.1197-1203, January 2011

ANEXO A – SIMULAÇÃO DA TEORIA PQ



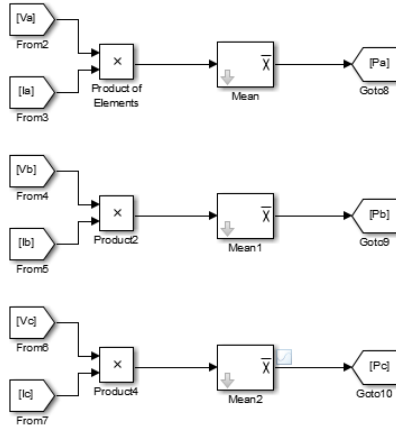
Activate Window



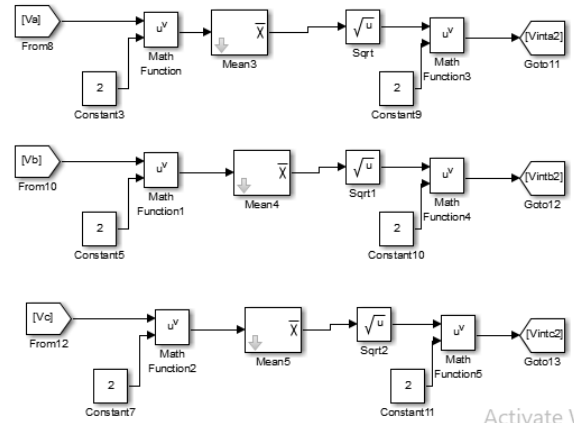


ANEXO B – SIMULAÇÃO DA TEORIA CPT

Potência coletivas média de cada fase Pu

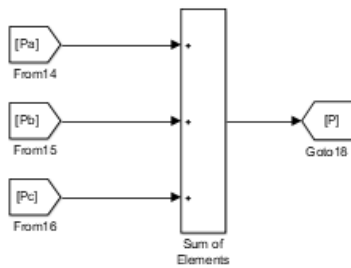


valor eficaz da integral parcial de tensão ao quadrado $||v||^2$

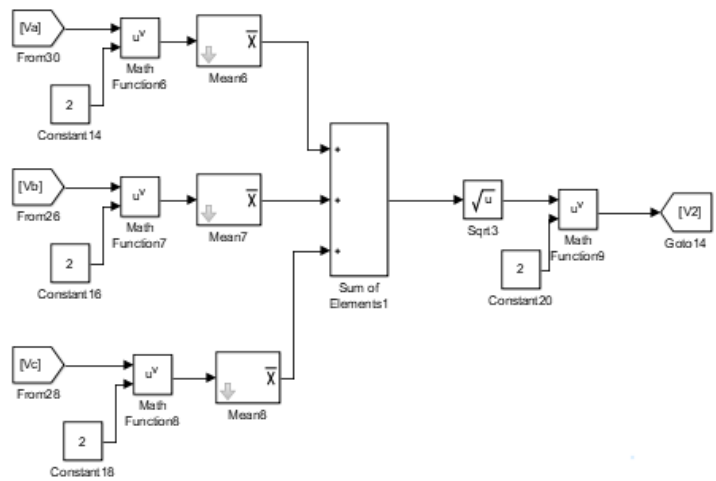


Activate Win

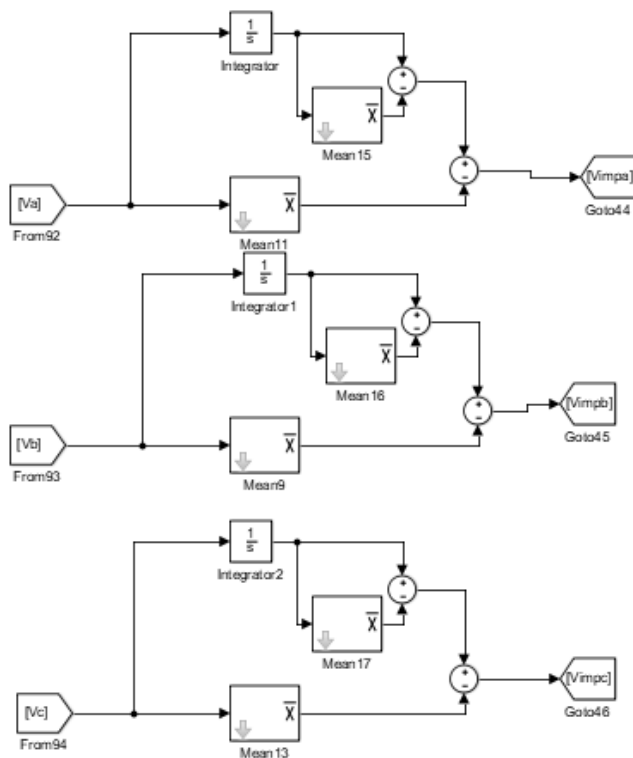
Potência trifásica



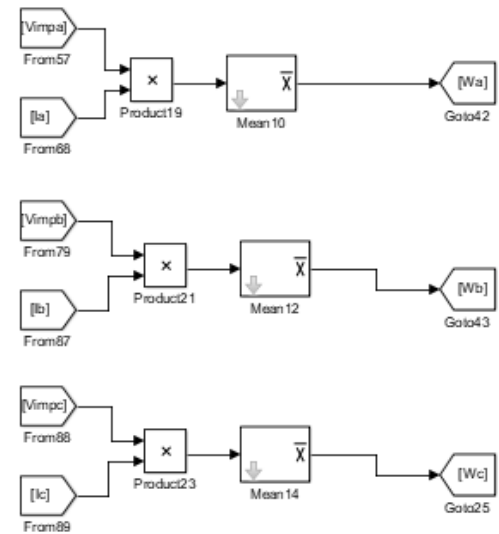
Tensão eficaz V²



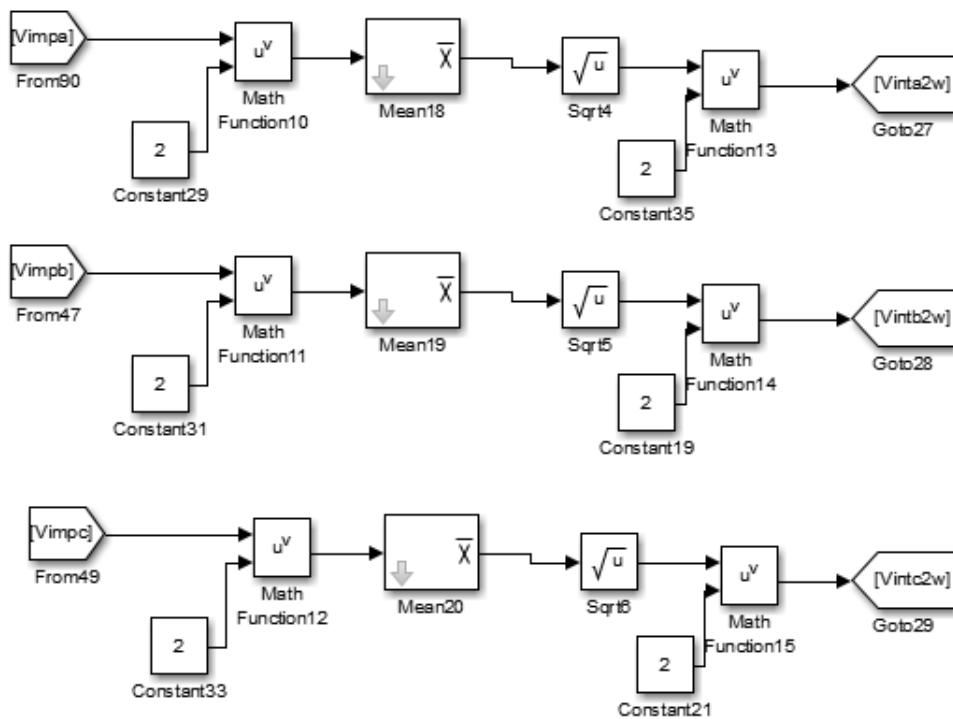
Integral imparcial da tensão V^u no período da simulação



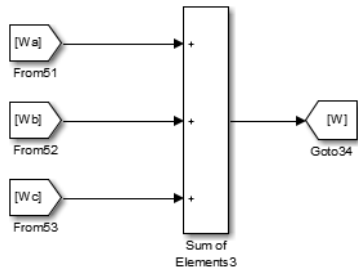
Potência coletivas de cada fase Wu



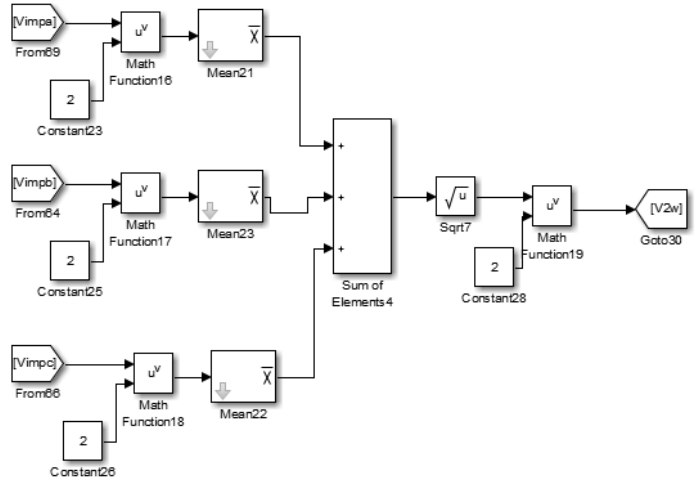
valor eficaz da integral parcial de tensão ao quadrado $\|V^u\|^2$



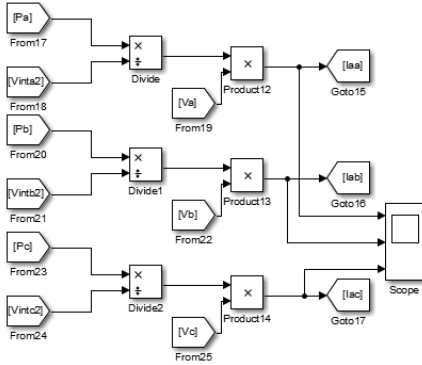
Potência trifásica W3



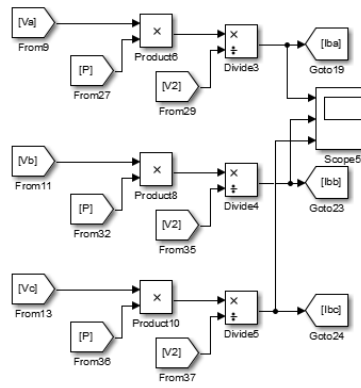
Tensão eficaz V^{A2}



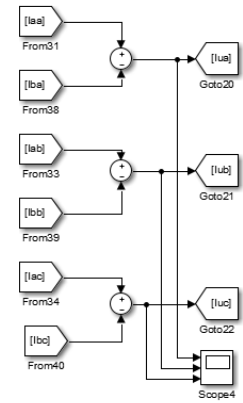
Correntes ativas I_a



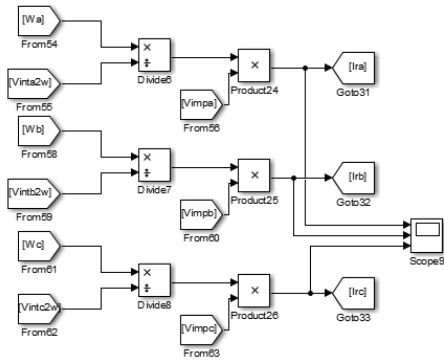
Corrente balanceada I_{ab}



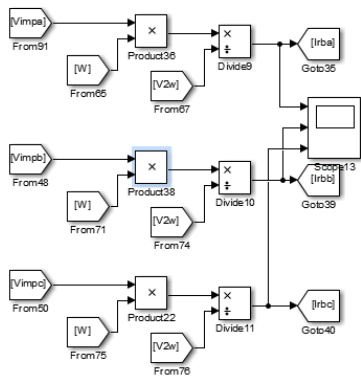
Corrente desbalanceada I_{au}



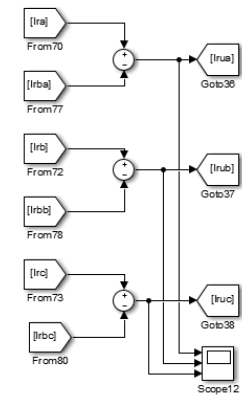
Correntes reativas I_r



Corrente reativa balanceada I_{rb}



Corrente reativa desbalanceada I_{ru}



Ivu

