



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
Faculdade de Engenharia Campus Bauru**



**PROGRAMA DE MESTRADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Alessandro Bogila**

**Teorias de Potência Conservativa e Instantânea:  
Análise Comparativa**

Bauru - SP  
2014



**Alessandro Bogila**

**Teorias de Potência Conservativa e Instantânea:  
Análise Comparativa**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia de Bauru – UNESP para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão  
Coorientador: Prof. Dr. Helmo Kelis Morales Paredes

Bauru - SP  
2014

Bogila, Alessandro.  
Teorias de Potência Conservativa e Instantânea:  
Análise Comparativa / Alessandro Bogila, 2014  
198 f. : il.

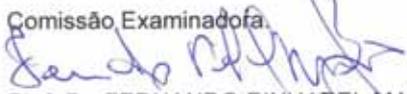
Orientador: Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2014

1. Compensação de distúrbios. 2. Condicionamento  
de energia. 3. Teoria de potência conservativa. 4.  
Teoria de potências instantâneas. I. Universidade  
Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II.  
Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ALESSANDRO BOGILA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.**

Aos 05 dias do mês de agosto do ano de 2014, às 10:00 horas, no(a) CÂMPUS EXPERIMENTAL DE SOROCABA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Unidade de Sorocaba, Prof. Dr. PAULO JOSE AMARAL SERNI do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Unidade de Sorocaba, Prof. Dr. CLAUDIONOR FRANCISCO DO NASCIMENTO do(a) Departamento de Engenharia Elétrica/Universidade Federal de São Carlos, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de ALESSANDRO BOGILA, intitulado "ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A TEORIA DE POTÊNCIA INSTANTÂNEA (PQ) E A TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA (CPT)". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

  
Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO

  
Prof. Dr. PAULO JOSE AMARAL SERNI

  
Prof. Dr. CLAUDIONOR FRANCISCO DO NASCIMENTO



**PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO**

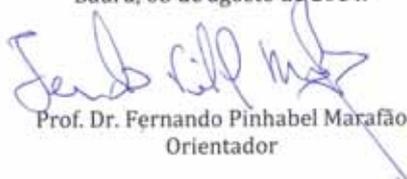
A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DO ALUNO:  
**ALESSANDRO BOGILA**

DE: "ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A TEORIA DE POTÊNCIA INSTANTÂNEA (PQ) E A  
TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA (CPT)"

PARA:

Teorias de Potência Conservativa e Instantânea:  
Análise Comparativa

Bauru, 05 de agosto de 2014.

  
Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão  
Orientador



*Dedico a JESUS CRISTO, minha família e minha noiva Andréia.*



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por tudo o que ELE tem feito em minha vida. Depois quero agradecer ao meu orientador, o Prof. Fernando P. Marafão, por todo o apoio, dedicação e ensinamentos que levarei pra minha vida. Agradeço também todo o auxílio do meu coorientador, o Prof. Helmo K. Morales Paredes.

Agradeço aos amigos que tiveram tanta importância no desenvolvimento deste trabalho, especialmente: Rafael Rodrigues da Paz, Luiz Fernando Vieira, Hildo Guillard Junior, Gustavo H. Alves, Eduardo Verri Liberado, Wesley Angelino de Souza, Danilo Iglesias Brandão, Luciano Cardozo Morais e todos os companheiros de turma.

Agradeço aos Professores da Pós-Graduação pela dedicação, paciência e ensinamentos durante as disciplinas ministradas.

Agradeço aos Professores Paulo José Amaral Serni e Flávio Alessandro Serrão Gonçalves pelas contribuições no exame de qualificação.

Agradeço a toda equipe da Pós-Graduação de Bauru pelo apoio durante os eventos do programa.

Agradeço ao Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI) pelo espaço concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

Faço um agradecimento especial à Facens – Faculdade de Engenharia de Sorocaba por todo o apoio no desenvolvimento deste trabalho. Agradecimento especial ao Prof. Joel Rocha Pinto e ao Prof. Arlindo Garcia pelas oportunidades, confiança, apoio, companheirismo e ensinamentos. Agradeço também a todos os amigos e companheiros do Laboratório de Elétrica da Facens pelo apoio e compreensão.

Gostaria também de agradecer ao Professor Claudionor Francisco do Nascimento pela participação na banca de defesa deste trabalho e, novamente ao Professor Paulo José Amaral Serni, pelas importantes contribuições e participação na banca de defesa deste trabalho, bem como pelos incentivos, cuidados e ensinamentos.



*Dê aos outros mais do que esperam de você e faça isso de bom gosto, sempre.*  
*Autor desconhecido*



## RESUMO

Esta dissertação de mestrado apresenta um estudo comparativo entre a Teoria de Potências Instantâneas (Teoria pq) e a Teoria de Potência Conservativa (CPT), das quais serão mostrados resultados de análises para circuitos trifásicos com três e quatro condutores (3F e 3F-N), com tensões senoidais e não senoidais, equilibradas e desequilibradas, com e sem impedância de linha e para diferentes tipos de cargas (lineares e não lineares). A CPT decompõe as correntes de fase em parcelas ativas, reativas e residuais, sendo que em circuitos trifásicos estas podem ainda ser separadas em parcelas balanceadas e desbalanceadas, de forma a representar os desbalanços da carga. As não linearidades da carga são representadas pela CPT através das correntes residuais. No caso da Teoria pq, as correntes de fase são decompostas em correntes ativas, reativas e de sequência zero, sendo ainda que tais parcelas podem ser decompostas em parcelas médias e oscilantes. As parcelas oscilantes representam os desbalanços e as não linearidades do circuito. Ou seja, a Teoria pq não separa tais distúrbios (desbalanços e não linearidades) em parcelas distintas de correntes. Apesar das teorias serem bastante distintas em suas formulações, a ideia central é realizar um estudo comparativo entre as parcelas de correntes e suas respectivas parcelas de potência, a fim de mostrar as similaridades e divergências na caracterização dos fenômenos físicos dos circuitos, bem como na compensação de correntes que não contribuem para a transferência de energia útil entre fontes e cargas, as quais podem ser eliminadas ou minimizadas através de condicionadores eletrônicos em paralelo com as cargas. Neste trabalho, a avaliação das teorias para compensação de distúrbios de corrente será feita levando-se em consideração fontes de corrente ideais, operando como filtros ativos de potência, o que elimina o efeito de eventuais imperfeições de controle na análise da eficiência dos compensadores para cada estratégia de compensação. Os resultados das análises e simulações indicam que as teorias podem ser consideradas equivalentes para análise ou compensação em diversos tipos de circuitos, desde que as tensões de fornecimento não apresentem índices significativos de distorções e desequilíbrios.

**Palavras-chaves:** Compensação de distúrbios, Condicionamento de Energia, Fator de Potência, Harmônicos, Teoria de Potência Conservativa, Teoria de Potências Instantâneas.



## ABSTRACT

This dissertation shows a comparative study between the Conservative Power Theory (CPT) and the Instantaneous Power Theory (pq Theory). Different configurations of linear and non-linear loads and different voltage conditions will be considered, assuming three-phase circuits with 3 and 4 wires, with or without line impedance. The CPT separates the phase currents into active, reactive and void portions, and in case of three-phase circuits, the active and reactive currents can also be split into balanced and unbalanced portions to represent the load unbalances. The circuit nonlinearities are represented by CPT through the void current term. In pq theory, the phase currents are separated into active, reactive and zero sequence currents and these portions can also be divided into constant and oscillating portions. The oscillating portions represent imbalances and harmonics on the system. In other words, the pq theory does not separate the imbalances and harmonics in individual current portions. Although these theories are quite distinct in their formulations, the central idea is to make a comparative study between the current portions and their respective portions of power, in order to show the similarities and divergences between them in terms of characterization of the physical phenomena and in terms of disturbing current compensation. In case of current compensation, ideal current sources will be applied in order to evaluate the compensation results using different current references from CPT and pq theories. This should minimize the influences of control limitations on the analysis of the compensation efficiency under each compensation strategy. The simulation results indicate that both theories can be considered equivalents for circuit analysis or current compensation, as long as the supply voltages are not significantly distorted and/or asymmetrical.

**Keywords:** Conservative Power Theory, Current Compensation, Harmonics, Instantaneous Power Theory, Power Conditioning, Power Factor.



## LISTA DE SIGLAS E DEFINIÇÕES

<i>abc</i>	Sistema de coordenadas <i>a</i> , <i>b</i> e <i>c</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CPT	<i>Conservative Power Theory</i> (Teoria da Potência Conservativa)
DHT	Distorção Harmônica Total
FAP	Filtro ativo de potência
GASI	Grupo de Automação e Sistemas Integráveis
IEEJ	The institute of Electrical Engineers of Japan
PAC	Ponto de acoplamento comum (rede elétrica)
PSIM	Software de simulação de circuitos elétricos
Teoria pq	Teoria de potências instantâneas
Desequilíbrio	Refere-se às amplitudes relativas dos sinais de tensão ou corrente
Assimetria	Refere-se às fases relativas dos sinais de tensão ou corrente
Desbalanço	Refere-se às cargas elétricas
Harmônicos	Sinais com frequências múltiplas inteiras da fundamental
Carga mista	Refere-se ao conjunto de cargas lineares e não lineares ligadas em paralelo no PAC



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	Potência aparente da CPT
$D$	Potência residual
$f$	Frequência do sistema elétrico
$FP_{\alpha\beta 0}$	Fator de potência da Teoria pq
$G_n$	Condutância equivalente por fase
$G_b$	Condutância equivalente balanceada
$H$	Valor médio da potência harmônica da Teoria pq
$i$	Corrente instantânea
$\underline{i}$	Vetor das correntes instantâneas das fases
$i_a$	Corrente instantânea da fase $a$
$i_b$	Corrente instantânea da fase $b$
$i_c$	Corrente instantânea da fase $c$
$i_{aa}^b$	Corrente ativa balanceada instantânea da fase $a$
$i_{ab}^b$	Corrente ativa balanceada instantânea da fase $b$
$i_{ac}^b$	Corrente ativa balanceada instantânea da fase $c$
$i_{aa}^u$	Corrente ativa desbalanceada instantânea da fase $a$
$i_{ab}^u$	Corrente ativa desbalanceada instantânea da fase $b$
$i_{ac}^u$	Corrente ativa desbalanceada instantânea da fase $c$
$i_{ra}^b$	Corrente reativa balanceada instantânea da fase $a$
$i_{rb}^b$	Corrente reativa balanceada instantânea da fase $b$
$i_{rc}^b$	Corrente reativa balanceada instantânea da fase $c$
$i_{ra}^u$	Corrente reativa desbalanceada instantânea da fase $a$
$i_{rb}^u$	Corrente reativa desbalanceada instantânea da fase $b$
$i_{rc}^u$	Corrente reativa desbalanceada instantânea da fase $c$
$i_{va}$	Corrente residual instantânea da fase $a$

$i_{vb}$	Corrente residual instantânea da fase $b$
$i_{vc}$	Corrente residual instantânea da fase $c$
$i_{ua}$	Corrente desbalanceada instantânea da fase $a$
$i_{ub}$	Corrente desbalanceada instantânea da fase $b$
$i_{uc}$	Corrente desbalanceada instantânea da fase $c$
$i_{\alpha}$	Corrente no eixo $\alpha$
$i_{\beta}$	Corrente no eixo $\beta$
$i_{a\bar{p}}$	Corrente ativa média da fase $a$
$i_{b\bar{p}}$	Corrente ativa média da fase $b$
$i_{c\bar{p}}$	Corrente ativa média da fase $c$
$i_{a\tilde{p}}$	Corrente ativa oscilante da fase $a$
$i_{b\tilde{p}}$	Corrente ativa oscilante da fase $b$
$i_{c\tilde{p}}$	Corrente ativa oscilante da fase $c$
$i_{a\bar{q}}$	Corrente reativa média da fase $a$
$i_{b\bar{q}}$	Corrente reativa média da fase $b$
$i_{c\bar{q}}$	Corrente reativa média da fase $c$
$i_{a\tilde{q}}$	Corrente reativa oscilante da fase $a$
$i_{b\tilde{q}}$	Corrente reativa oscilante da fase $b$
$i_{c\tilde{q}}$	Corrente reativa oscilante da fase $c$
$i_0$	Corrente de sequência zero
$I_a$	Corrente eficaz da fase $a$
$I_b$	Corrente eficaz da fase $b$
$I_c$	Corrente eficaz da fase $c$
$I_{aa}^b$	Corrente ativa balanceada eficaz da fase $a$
$I_{ab}^b$	Corrente ativa balanceada eficaz da fase $b$
$I_{ac}^b$	Corrente ativa balanceada eficaz da fase $c$

$I_{ra}^b$	Corrente reativa balanceada eficaz da fase $a$
$I_{rb}^b$	Corrente reativa balanceada eficaz da fase $b$
$I_{rc}^b$	Corrente reativa balanceada eficaz da fase $c$
$I_{ua}$	Corrente desbalanceada eficaz da fase $a$
$I_{ub}$	Corrente desbalanceada eficaz da fase $b$
$I_{uc}$	Corrente desbalanceada eficaz da fase $c$
$I_{va}$	Corrente residual eficaz da fase $a$
$I_{vb}$	Corrente residual eficaz da fase $b$
$I_{vc}$	Corrente residual eficaz da fase $c$
$i_{naa}^{CPT}$	Corrente não ativa instantânea da fase $a$ , com a CPT
$i_{nab}^{CPT}$	Corrente não ativa instantânea da fase $b$ , com a CPT
$i_{nac}^{CPT}$	Corrente não ativa instantânea da fase $c$ , com a CPT
$i_{naa}^{pq}$	Corrente não ativa instantânea da fase $a$ , com a Teoria pq
$i_{nab}^{pq}$	Corrente não ativa instantânea da fase $b$ , com a Teoria pq
$i_{nac}^{pq}$	Corrente não ativa instantânea da fase $c$ , com a Teoria pq
$k$	Número inteiro positivo (representa as ordens harmônicas)
$p$	Potência ativa instantânea
$p(t)$	Potência ativa instantânea
$P$	Potência ativa média
$Q$	Potência reativa média
$S_{\alpha\beta o}$	Potência aparente média da Teoria pq (Proposta gasi)
$P_{\alpha\beta}$	Potência real média da Teoria pq
$Q_{\alpha\beta}$	Potência imaginária média da Teoria pq
$t$	Tempo
$T$	Tempo de ciclo (inverso da frequência)
$U$	Potência de desbalanço média

$v$	Tensão instantânea
$\underline{v}$	Vetor das tensões instantâneas das fases
$\bar{v}$	Vetor médio do vetor das tensões
$v_a$	Tensão instantânea da fase $a$
$v_b$	Tensão instantânea da fase $b$
$v_c$	Tensão instantânea da fase $c$
$\hat{v}$	Integral imparcial instantânea das tensões
$\underline{\hat{v}}$	Vetor da integral imparcial das tensões
$v_f$	Integral da tensão no tempo
$\bar{v}_f$	Valor médio da integral da tensão no tempo
$w$	Energia reativa instantânea
$w(t)$	Energia reativa instantânea
$W$	Energia reativa média
$\lambda$	Fator de potência (CPT)
$\omega$	Frequência angular ( $2\pi f$ )
$\varphi$	Defasagem entre as formas de onda das tensões e correntes
$\alpha\beta o$	Sistema de coordenadas $\alpha$ , $\beta$ e $0$ (usado na Teoria pq)

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>29</b>
1.1. Objetivos do trabalho.....	31
1.2. Estrutura do trabalho.....	31
<b>2. TEORIA PQ E A TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA .....</b>	<b>33</b>
2.1. Teoria de potências instantâneas.....	33
2.1.1. Referência de medição de tensão .....	34
2.1.2. Tensões e correntes nas coordenadas $abc$ .....	35
2.1.3. Mudança de coordenadas $abc$ para $\alpha\beta 0$ .....	36
2.1.4. Definição das potências instantâneas .....	42
2.1.5. Decomposição das correntes $\alpha\beta$ em função das potências instantâneas .....	43
2.1.6. Definição das potências nos eixos $\alpha\beta$ .....	44
2.1.6. Fator de potência .....	45
2.2. Teoria de potência conservativa .....	46
2.2.1. Definições para circuitos polifásicos.....	47
2.2.2. Potência ativa instantânea coletiva e energia reativa instantânea coletiva.....	48
2.2.3. Parcelas de corrente em circuitos trifásicos .....	49
2.2.3.1. Corrente ativa.....	49
2.2.3.2. Corrente reativa.....	50
2.2.3.3. Corrente residual.....	50
2.2.3.4. Corrente total em circuitos polifásicos .....	51
2.2.4. Potências médias em circuitos polifásicos .....	51
2.2.4.1. Potência ativa (P) .....	51
2.2.4.2. Potência reativa (Q).....	52
2.2.4.3. Potência ativa de desbalanço ( $U_a$ ) .....	53
2.2.4.4. Potência reativa de desbalanço ( $U_r$ ) .....	53
2.2.4.5. Potência residual (D) .....	53
2.2.4.6. Potência aparente (A) .....	53
2.2.4.7. Fator de potência ( $\lambda$ ) .....	54
<b>3. CIRCUITOS TRIFÁSICOS (3F e 3F-N) .....</b>	<b>55</b>
3.1. Circuitos trifásicos com três condutores (3F).....	55
3.1.1. Carga resistiva (R).....	57

3.1.2. Carga resistiva-indutiva (RL).....	70
3.1.3. Carga não linear balanceada e carga mista .....	81
3.1.4. Carga capacitiva (C).....	91
3.2. Circuitos trifásicos com quatro condutores (3F-N) .....	100
3.2.1. Carga resistiva desbalanceada com tensões não senoidais desequilibradas.....	101
3.2.2. Carga RL desbalanceada com tensões senoidais desequilibradas.....	105
3.2.3. Carga capacitiva desbalanceada com tensões não senoidais equilibradas .....	109
3.2.4. Carga não linear desbalanceada com tensões senoidais desequilibradas .....	113
<b>4. CIRCUITOS TRIFÁSICOS COM IMPEDÂNCIA DE LINHA .....</b>	<b>119</b>
4.1. Carga resistiva desbalanceada com tensões não senoidais equilibradas.....	120
4.2. Carga RL desbalanceada e tensões não senoidais equilibradas a quatro condutores .	124
4.3. Carga capacitiva com tensões senoidais equilibradas a quatro condutores .....	128
4.4. Carga não linear balanceada com tensões senoidais equilibradas a três condutores ..	132
4.5. Carga não linear com tensões senoidais equilibradas a quatro condutores .....	136
<b>5. COMPENSAÇÃO DE CORRENTES NÃO ATIVAS.....</b>	<b>141</b>
5.1. Carga resistiva desbalanceada – a.....	144
5.2. Carga resistiva-indutiva desbalanceada – b .....	147
5.2.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – b.....	148
5.2.2. Compensação das correntes reativas – b .....	149
5.2.3. Compensação das correntes desbalanceadas e oscilantes – b .....	151
5.2.4. Compensação das correntes não ativas – b .....	152
5.3. Carga não linear balanceada – c .....	153
5.3.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – c.....	154
5.3.2. Compensação das correntes reativas – c .....	155
5.3.3. Compensação das correntes residuais e oscilantes – c.....	158
5.3.4. Compensação das correntes não ativas – c.....	159
5.4. Carga não linear desbalanceada – d.....	160
5.4.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – d.....	161
5.4.2. Compensação das correntes reativas – d.....	162
5.4.3. Compensação das correntes oscilantes, desbalanceadas e residuais – d.....	163
5.4.4. Compensação das correntes não ativas – d .....	164
5.5. Carga não linear desbalanceada com impedância de linha – e .....	166
5.5.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – e.....	167

5.5.2. Compensação das correntes reativas – e .....	169
5.5.3. Compensação das correntes oscilantes, desbalanceadas e residuais – e .....	171
5.5.4. Compensação das correntes não ativas – e.....	173
5.6. Carga não linear desbalanceada e tensões senoidais desequilibradas – f .....	175
5.6.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – f .....	176
5.6.2. Compensação das correntes reativas – f.....	178
5.6.3. Compensação das correntes oscilantes, desbalanceadas e residuais – f.....	181
5.5.4. Compensação das correntes não ativas – f .....	182
5.6. Complexidade computacional.....	185
<b>6. CONCLUSÕES FINAIS .....</b>	<b>188</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>195</b>



## 1. INTRODUÇÃO

É consenso entre os estudiosos que sistemas elétricos polifásicos podem ter baixo fator de potência em virtude não apenas do consumo de reativos, mas também devido à presença de cargas não lineares, assimetrias e desequilíbrios [1], [2], [3], [4], [5], [6], sendo que tais condições indesejadas podem ser ainda mais prejudiciais aos sistemas elétricos do futuro, com grande penetração de geração distribuída, especialmente redes de baixa potência e baixo nível de curto-circuito [7]. Com isso surge a necessidade de novas metodologias, que permitam a análise, monitoramento, tarifação, compensação de distúrbios e gerenciamento de responsabilidades dos sistemas elétricos modernos [1], [2].

Considerando-se o futuro das redes de energia, para que os chamados medidores inteligentes funcionem e proporcionem dados confiáveis de consumo e ou geração de energia, é necessário que se baseiem em uma teoria de potência precisa o suficiente, de maneira que sejam levados em consideração todos os fenômenos ocorridos nas formas de onda das tensões e das correntes de acordo com o tipo de carga e condições de fornecimento de tensão [2], [8]. É importante que se possa medir o fator de potência real das instalações, de forma a atribuir responsabilidades aos agentes geradores de distúrbios (consumidores ou fornecedores), os quais, em geral apenas contribuem para a redução da eficiência das redes e equipamentos.

No caso da compensação de distúrbios de corrente, tal objetivo pode ser atingido através do uso de filtros ativos paralelos [9], [10] ou ainda, através do controle adequado dos conversores eletrônicos associados aos geradores distribuídos de energia [11]. No entanto, qualquer que seja a configuração do condicionador de energia adotado, este deve ser controlado de forma a injetar uma corrente adequada à minimização dos distúrbios da rede. Tais referências de corrente são usualmente definidas através de decomposições propostas em diferentes técnicas de análise de circuitos elétricos, especialmente aquelas no domínio do tempo.

Neste sentido, o estudo das chamadas *teorias de potência* se torna interessante, pois estas podem ser utilizadas nos novos modelos de redes de energia, seja na medição das variáveis de interesse, tarifação, atribuição de responsabilidades ou no gerenciamento do sistema de geração distribuída. Além disto, tais teorias podem ser utilizadas na geração de referências para a compensação de correntes que não contribuem para a transferência de energia útil da fonte para a carga (correntes não ativas).

Assim, considera-se que um dos grandes desafios das últimas décadas na engenharia elétrica tem sido a dificuldade em desenvolver uma teoria de potência que de maneira geral,

interprete os fenômenos físicos existentes nas formas de onda de tensão e corrente, devido às características de diferentes tipos de cargas e topologias de circuitos, independentemente do domínio de análise (tempo ou frequência) [1].

Dentre as diversas propostas apresentadas nas últimas décadas, existem ainda muitas divergências, inclusive na questão de padronização das nomenclaturas e simbologia. Porém, as teorias de potência foram evoluindo ao longo dos anos, desde propostas que só abordavam circuitos elétricos monofásicos, até teorias mais sofisticadas que abordam circuitos elétricos polifásicos [3]. Em se tratando de circuitos polifásicos, o referencial de tensão também tem sido assunto de muitas discussões [12], [13]. Sua escolha, assim como a metodologia de medição das grandezas elétricas, deve ser feita de forma criteriosa para que todos os fenômenos sejam considerados, independentemente se o objetivo for a análise, tarifação, condicionamento ou monitoramento da energia elétrica.

Dentre as diversas propostas de teoria de potência, uma das que mais se destacou ao longo destes anos foi a Teoria de Potências Instantâneas (Teoria pq), que é formulada no domínio do tempo e cujos autores foram Akagi, Kanazawa e Nabae [14]. Inicialmente, esta tratava apenas de circuitos elétricos a três condutores (3F) e diversas publicações de outros autores ajudaram no aperfeiçoamento da Teoria pq [4]. Assim como as contribuições de Watanabe, Stephan, Aredes [15], as publicações com contribuições de Ogasawara e Kim trouxeram a formulação para circuitos com quatro condutores (3F-N) [16]. A aplicação que mais se destaca no âmbito da Teoria pq é sua utilização em compensação de correntes não ativas [9].

Outra recente e promissora proposta é a chamada Teoria de Potência Conservativa (CPT). Assim como a Teoria pq, a CPT é descrita no domínio do tempo e foi inicialmente publicada em 2003 por P. Tenti e P. Matavelli [17]. Na primeira versão, a teoria foi proposta com o pressuposto de frequência constante de operação. Em 2007 [18] publicação na análise de técnicas de compensação. Em 2011, a teoria foi reformulada de maneira a serem considerados todos os fenômenos presentes nas formas de onda das tensões e correntes provocados pelos efeitos de desbalanço da carga, assimetria, não linearidades e variações de frequência. Dentre as possíveis aplicações da CPT, destacam-se: a medição de energia, compensação, controle cooperativo de geradores distribuídos, atribuição de responsabilidades e tarifação [2].

Assim, devido às vantagens que se vislumbra sobre a utilização da CPT [2] e a grande aceitação e utilização da Teoria  $pq$ <sup>1</sup> [16], este trabalho traz um estudo minucioso das duas teorias, onde são pontuadas as principais características de cada uma (vantagens e desvantagens), principalmente em circuitos com cargas não lineares desbalanceadas<sup>2</sup>, assim como em condições de assimetrias<sup>3</sup>, desequilíbrios<sup>4</sup> e distorções<sup>5</sup> das tensões da fonte.

### 1.1. Objetivos do trabalho

O principal objetivo deste trabalho é elaborar um estudo comparativo entre a Teoria  $pq$  [16] e a CPT [2]. Assim, buscar-se-á associar as características de operação de diferentes tipos de circuitos (cargas, topologias e tensões de alimentação), com as parcelas de corrente e potência decompostas através das duas teorias estudadas.

Após a comparação das teorias para a interpretação de diferentes tipos de circuitos elétricos, também será discutido como cada uma pode ser aplicada para a compensação seletiva de distúrbios de corrente, através das parcelas de correntes não ativas decompostas. Por fim, uma análise comparativa dos resultados de compensação através das duas teorias será apresentada, explorando-se as principais semelhanças, diferenças, vantagens e desvantagens.

Como a CPT ainda é bastante recente na literatura internacional, espera-se que este trabalho possa auxiliar em sua avaliação e divulgação, através da comparação com uma teoria de potência consagrada na literatura, tal como a Teoria  $pq$ .

### 1.2. Estrutura do trabalho

Após esta breve contextualização do trabalho e apresentação dos objetivos, o conteúdo dos próximos capítulos segue a estrutura apresentada a seguir:

O Capítulo 2 apresenta as formulações das duas teorias em estudo, com os equacionamentos da CPT e da Teoria  $pq$ , para então apresentar os resultados obtidos através de simulações de vários casos de carga (lineares e não lineares) e de fonte de tensão.

O Capítulo 3 apresenta um estudo comparativo entre as teorias de potência, a fim de mostrar as similaridades e divergências entre as teorias para circuitos elétricos trifásicos a três

---

<sup>1</sup> Ainda que reconhecendo que a Teoria  $pq$  foi elaborada para compensação e não para interpretação dos circuitos.

<sup>2</sup> Refere-se aos valores distintos da carga em cada fase.

<sup>3</sup> Refere-se às fases relativas dos sinais de tensão ou corrente.

<sup>4</sup> Refere-se às amplitudes relativas dos sinais de tensão ou corrente.

<sup>5</sup> Sinais com frequências múltiplas inteiras da fundamental.

e quatro condutores (3F e 3F-N), sem impedância de linha, com várias configurações de cargas lineares e não lineares.

O Capítulo 4 apresenta um estudo comparativo entre as teorias de potência, a fim de mostrar as similaridades e divergências entre as teorias para circuitos elétricos trifásicos a três e quatro condutores (3F e 3F-N), com impedância de linha, para algumas configurações de cargas lineares e não lineares. Os casos analisados neste capítulo ressaltam a influência das correntes da carga nas tensões do ponto de acoplamento comum (PAC), devido à interação através das impedâncias de linha.

O Capítulo 5 apresenta um estudo comparativo entre as teorias de potência, a fim de mostrar as similaridades e divergências entre as teorias para circuitos elétricos trifásicos com três condutores (3F), com e sem impedâncias de linha, em compensação de correntes que não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga (correntes não ativas). Nas simulações foram utilizadas configurações de cargas lineares e não lineares. Por fim, as conclusões finais são apresentadas.

Todas as comparações e discussões são feitas através da análise de resultados (domínio do tempo) de simulações no software PSIM, sendo implementados os equacionamentos das duas Teorias (CPT e Teoria pq) em linguagem C, com frequência de amostragem de 12 kHz (média móvel com 200 posições) para discretização do sinal.

## 2. TEORIA PQ E A TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA

Nesta seção são mostradas as principais formulações da Teoria de Potências Instantâneas e da Teoria de Potência Conservativa, ambas descritas no domínio do tempo.

A Teoria pq, provavelmente, é a teoria de maior aceitação e utilização na literatura internacional, principalmente em aplicações de filtros ativos de potência. Divulgada em congressos internacionais em 1983, tratava somente de circuitos trifásicos a três condutores (3F), posteriormente sendo reformulada para utilização também em circuitos trifásicos a quatro condutores (3F-N) [9].

A CPT foi inicialmente proposta em 2003 [17] e reformulada em 2010 [2] com o pressuposto de frequência de operação variável, de forma a ser aplicada para sistemas de geração distribuída e em redes inteligentes de baixa tensão, pode ser uma alternativa interessante para novas aplicações. Esta leva em consideração os vários fenômenos causados por diferentes tipos de cargas (lineares ou não, balanceadas ou não) e condições de fornecimento (tensões senoidais ou distorcidas, equilibradas ou não).

Ressalta-se que este trabalho não trata das definições consideradas como “a teoria convencional” de circuitos elétricos, as quais podem ser encontradas em [19].

### 2.1. Teoria de potências instantâneas

A teoria de potências instantâneas, denominada como Teoria pq, em sua primeira versão foi publicada em língua japonesa, em uma conferência local do Japão em 1982, tendo como autores Akagi, Kanazawa e Nabae. No mesmo ano, a Teoria foi publicada em um Journal Transactions of the IEEJ. Em 1983 esta teoria foi publicada em conferências internacionais [14]. Em 1984 a Teoria pq foi proposta para compensação de reativos [20]. Em 1993 novos conceitos foram inseridos por Watanabe, Stephan e Aredes. [15]. Posteriormente, a Teoria pq foi reformulada por Akagi, Ogasawara e Kim, quando foram incorporados sistemas trifásicos a quatro condutores [16]. O que diferencia as formulações a três e quatro condutores é o acréscimo das componentes de sequência zero ou homopolares ( $i_0$ ) e ( $v_0$ ), o que resulta no surgimento da potência de sequência zero ( $p_0$ ) ou potência homopolar, a qual representa o fluxo bidirecional de energia entre fontes e cargas, através dos condutores de fase e de retorno [21].

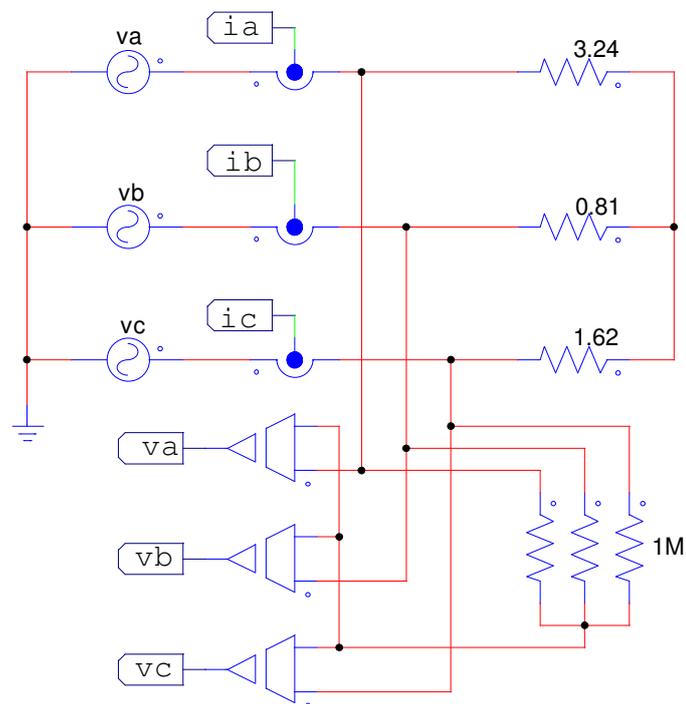
Outras publicações apresentam aplicações baseadas em compensação de sistemas não senoidais [9], [21], [22], bem como em microrredes de energia [23], [24], [25].

A Teoria  $pq$  é descrita no domínio do tempo e tem como base a transformação de Clarke [26], da qual as coordenadas  $abc$  são transpostas em coordenadas  $\alpha\beta 0$ . As tensões  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  são transpostas em tensões  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$  e  $v_0$ . Assim como correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são transpostas em correntes  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  e  $i_0$ . Através das tensões e correntes nas coordenadas  $\alpha\beta 0$ , são descritas três componentes de potências instantâneas, conhecidas como: potência real ( $p$ ), potência imaginária ( $q$ ) e potência de sequência zero ( $p_0$ ). Estas componentes de potência ainda são decompostas em partes médias e oscilantes [21].

### 2.1.1. Referência de medição de tensão

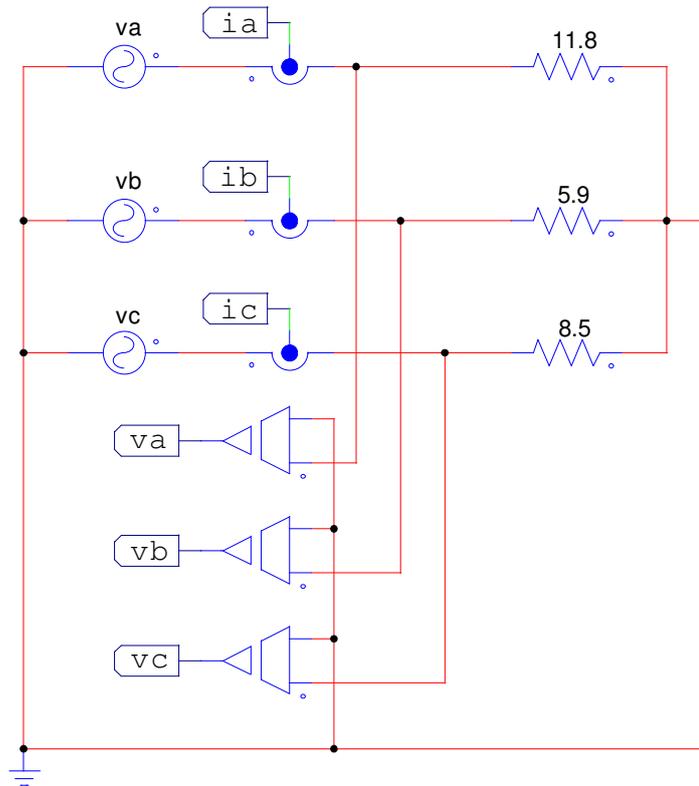
Para sistemas trifásicos a três condutores, as tensões  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  devem ser medidas com referência para o ponto estrela virtual e em sistemas trifásicos a quatro condutores em relação ao condutor de retorno, como mostram as Figuras 2.1 e 2.2 [13].

Figura 2.1 – Medição de tensão com referência no ponto estrela virtual.



Fonte: Próprio autor.

Figura 2.2 – Medição de tensão com referência no neutro.



Fonte: Próprio autor.

### 2.1.2. Tensões e correntes nas coordenadas $abc$

Neste texto, todas as formulações abordadas sobre a Teoria pq usam como referência as publicações de Akagi et al. em [14] e [16]. Caso contrário, as referências apropriadas serão citadas oportunamente.

Nas coordenadas  $abc$ , as tensões  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ , são definidas em (2.1), (2.2) e (2.3) respectivamente, para sequência positiva em regime permanente.

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

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

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

As correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são definidas em (2.4), (2.5) e (2.6) respectivamente, para sequência positiva em regime permanente.

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

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

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

sendo  $\varphi$  a defasagem entre as formas de onda das tensões e correntes.

### 2.1.3. Mudança de coordenadas $abc$ para $\alpha\beta 0$

Através da transformação de Clarke [26], baseado nas definições de vetores instantâneos, de acordo com Akagi et al. As tensões e correntes trifásicas dadas nas coordenadas  $abc$ , defasadas de  $120^\circ$  entre si, podem ser transpostas para as coordenadas  $\alpha\beta 0$ , como será demonstrado algebricamente em (2.7) e (2.8), respectivamente. Sendo  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $0$  ortogonais entre si.

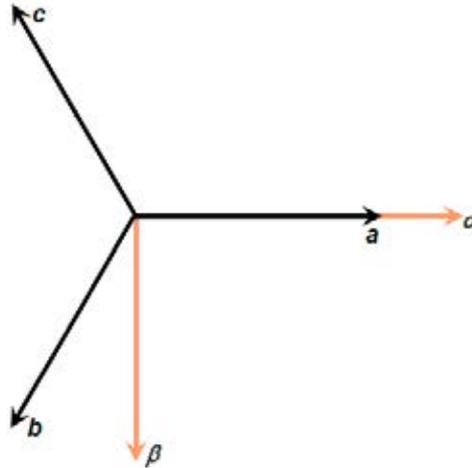
$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix},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

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

O termo  $\sqrt{2/3}$  é chamado de constante para invariância de potência, isso significa que fazendo a transformada das coordenadas, não haverá variação de potência.

A primeira linha de (2.7) ou (2.8) é a que representa o eixo  $0$  das coordenadas  $\alpha\beta 0$ , que só existe para circuitos trifásicos a quatro condutores, ainda podendo ser eliminada para as condições onde  $v_0$  ou  $i_0$  são nulos. Então, a matriz poderia ainda ser simplificada de  $3 \times 3$  para  $2 \times 3$ .

A segunda e a terceira linha em (2.7) ou (2.8) resultam na transformação de coordenadas  $abc$  para as coordenadas  $\alpha\beta$ . A Figura 2.3 permite uma melhor visualização.

Figura 2.3 – Coordenadas  $abc$  para  $\alpha\beta$ .

Fonte: Próprio autor.

O vetor das tensões ou das correntes é obtido através da projeção de cada uma das fases das coordenadas  $abc$  nas fases fictícias  $\alpha\beta$ .

A segunda linha em (2.7) é a linha para a transposição das fases  $abc$  para o eixo  $\alpha$ . Projeta as fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  em  $\alpha$ , mantendo  $\alpha$  fixo, considerando o valor positivo para a projeção na direção de  $\alpha$  e o valor negativo para a projeção na direção contrária de  $\alpha$ .

Projetando-se a fase  $a$  no eixo  $\alpha$ , tem-se um ângulo de defasagem de  $0^\circ$  na direção do eixo  $\alpha$ . Através das leis de triângulo retângulo, a fase  $a$  é projetada como sendo  $a * \cos(0)$ .

Projetando-se a fase  $b$  no eixo  $\alpha$ , tem-se um ângulo de defasagem de  $60^\circ$  na direção contrária de  $\alpha$ . Logo, o valor da projeção será negativo. A fase  $b$  é projetada como sendo  $-b * \cos(60)$ .

Por fim, projetando-se a fase  $c$  no eixo  $\alpha$ , tem-se um ângulo de defasagem também de  $60^\circ$  no sentido contrário de  $\alpha$ . Logo, valor projetado será negativo e calculado como sendo  $-c * \cos(60)$ . A definição completa das coordenadas  $abc$  para o eixo  $\alpha$  é mostrada em (2.9) e (2.10).

$$\alpha = a * \cos(0) - b * \cos(60) - c * \cos(60), \quad (2.9)$$

$$\alpha = a - \frac{1}{2}b - \frac{1}{2}c. \quad (2.10)$$

Fazendo a decomposição das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  para o eixo  $\beta$ , como feito para o eixo  $\alpha$ , obtém-se a definição da transformação para o eixo  $\beta$ .

Projetando-se a fase  $a$  no eixo  $\beta$ , tem-se um ângulo de defasagem de  $90^\circ$ , na mesma direção de  $\beta$ . Portanto, a projeção da fase  $a$  é definida como sendo  $a * \cos(90)$ .

Projetando-se a fase  $b$  no eixo  $\beta$ , tem-se um ângulo de defasagem de  $30^\circ$  na mesma direção de  $\beta$ , logo, a projeção terá valor positivo, então a fase  $b$  é projetada como sendo  $b * \cos(30)$ .

Por fim, projetando-se a fase  $c$  no eixo  $\beta$ , tem-se um ângulo de defasagem de  $30^\circ$ , na direção contrária de  $\beta$ , logo, o valor da projeção será negativo. Assim, a fase  $c$  é projetada como  $-b * \cos(30)$ . A definição completa das coordenadas  $abc$  para o eixo  $\beta$  é mostrada em (2.11) e (2.12).

$$\beta = a * \cos(90) + b * \cos(30) - c * \cos(30), \quad (2.11)$$

$$\beta = 0 + \frac{\sqrt{3}}{2}b - \frac{\sqrt{3}}{2}c. \quad (2.12)$$

Para encontrar a constante de invariância de potência e os fatores da coordenada 0, é preciso definir a corrente de sequência 0, como em (2.13).

$$i_0 = k \cdot k_0(i_a + i_b + i_c). \quad (2.13)$$

A matriz completa é dada em (2.14).

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} k_0 & k_0 & k_0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Para que a potência seja invariante é preciso satisfazer a condição mostrada em (2.15) ou (2.16) ou ainda (2.17) [27].

$$\left( \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}^{-1} \right)^{-1} = \left( \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}^t \right)^{-1}, \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}^t, \quad (2.16)$$

$$I = \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}^{-1} \cdot \left( \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}^{-1} \right)^t. \quad (2.17)$$

Sendo que  $-1$  representa a matriz inversa,  $t$  a matriz transposta e  $I$  a matriz identidade. Considerando (2.17), tem-se:

$$k \begin{bmatrix} k_0 & k_0 & k_0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot k \begin{bmatrix} k_0 & 1 & 0 \\ k_0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ k_0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

$$k^2 \begin{bmatrix} k_0 & k_0 & k_0 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} k_0 & 1 & 0 \\ k_0 & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ k_0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.19)$$

Resolvendo (2.19), tem-se:

$$3k^2k_0^2 = 1, \quad (2.20)$$

$$(k^2) \left(1 + \frac{1}{4} + \frac{1}{4}\right) = 1. \quad (2.21)$$

Isolando  $k$  em (2.21) tem-se a constante de invariância de potência, como é mostrado em (2.22).

$$k = \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (2.22)$$

Substituindo (2.22) em (2.20) obtém-se a fator de sequência zero, conforme (2.23).

$$k_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}. \quad (2.23)$$

As matrizes completas com os vetores instantâneos das correntes e das tensões estão, respectivamente, em (2.7) e (2.8).

As tensões nas coordenadas  $\alpha\beta 0$ , são dadas por (2.24), (2.25) e (2.26), respectivamente. Tais condições são válidas tanto para o regime permanente quanto para o regime transitório.

$$v_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} v_a + \frac{1}{\sqrt{2}} v_b + \frac{1}{\sqrt{2}} v_c \right), \quad (2.24)$$

$$v_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( v_a - \frac{1}{2} v_b - \frac{1}{2} v_c \right), \quad (2.25)$$

$$v_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} v_b - \frac{\sqrt{3}}{2} v_c \right). \quad (2.26)$$

Sendo que  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  são as tensões mostradas em (2.1), (2.2) e (2.3), respectivamente.

Assim, como as tensões, as correntes também podem ser transpostas para as coordenadas  $\alpha\beta 0$ , como mostram (2.27), (2.28) e (2.29), sendo válidas tanto para regime permanente quanto para regime transitório.

$$i_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} i_a + \frac{1}{\sqrt{2}} i_b + \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \right), \quad (2.27)$$

$$i_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( i_a - \frac{1}{2} i_b - \frac{1}{2} i_c \right), \quad (2.28)$$

$$i_\beta = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} i_b - \frac{\sqrt{3}}{2} i_c \right). \quad (2.29)$$

Sendo  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  as correntes mostradas em (2.4), (2.5) e (2.6), respectivamente.

Uma vantagem de se utilizar a transformação  $\alpha\beta 0$  é que em circuitos trifásicos a 3 condutores não existem tensões e correntes de sequência zero, podendo estes termos serem eliminados. Em circuitos trifásicos a quatro condutores, na ausência de tensões e correntes de sequência zero, estes termos também podem ser eliminados, como em (2.30) e (2.31), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (2.30)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (2.31)$$

Para transpor as coordenadas  $\alpha\beta 0$  em  $abc$  é preciso usar a matriz transposta dos vetores instantâneos, tanto para as tensões quanto para as correntes, como em (2.32).

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

Resolvendo (2.32) obtêm-se as tensões nas coordenadas  $abc$ , como em (2.33), (2.34) e (2.35).

$$v_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} v_0 + v_\alpha \right), \quad (2.33)$$

$$v_b = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} v_0 - \frac{1}{2} v_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta \right), \quad (2.34)$$

$$v_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} v_0 - \frac{1}{2} v_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} v_\beta \right). \quad (2.35)$$

Resolvendo (2.36) também é possível obter as correntes nas coordenadas  $abc$ .

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

Á partir de (2.36), obtêm-se as correntes nas coordenadas  $abc$ , mostradas (2.37), (2.38) e (2.39).

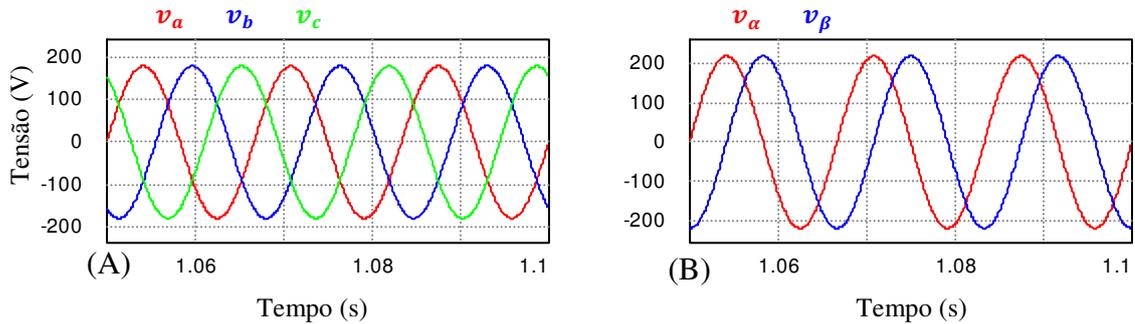
$$i_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} i_0 + i_\alpha \right), \quad (2.37)$$

$$i_b = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} i_0 - \frac{1}{2} i_\alpha + \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \right), \quad (2.38)$$

$$i_c = \sqrt{\frac{2}{3}} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} i_0 - \frac{1}{2} i_\alpha - \frac{\sqrt{3}}{2} i_\beta \right). \quad (2.39)$$

A Figura 2.3 mostra a forma de onda das tensões nas coordenadas  $abc$  (A) e as tensões nas coordenadas  $\alpha\beta$  (B).

Figura 2.3 – Tensões nas coordenadas  $abc$  (A) e nas coordenadas  $\alpha\beta$  (B).



Fonte: Próprio autor.

A decomposição das correntes e tensões instantâneas nas coordenadas  $\alpha\beta 0$ , deve ser entendida como sendo uma mudança de variáveis no domínio do tempo e não deve ser relacionada com as componentes simétricas de Fortescue [28], as quais são descritas no domínio da frequência.

A Teoria pq é muito interessante para os casos em que as componentes de sequência zero são nulas, pois permite eliminar uma coordenada, fazendo com que um sistema de 3 variáveis se transforme em 2 variáveis.

#### 2.1.4. Definição das potências instantâneas

Com as tensões e correntes nas coordenadas  $\alpha\beta 0$ , Akagi et al. definiram as potências instantâneas real ( $p$ ), imaginária ( $q$ ) e de sequência zero ( $p_0$ ), através de (2.40) [21]. Com as definições das potências instantâneas é possível fazer a decomposição das correntes em um determinado ponto de acoplamento comum.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}. \quad (2.40)$$

A potência instantânea também pode ser definida como sendo a soma dos produtos das tensões e correntes em cada eixo, assim como na teoria convencional [19], dada em watts (W), como indicado em (2.41).

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = v_\alpha i_a + v_b i_b + v_c i_c. \quad (2.41)$$

Através de (2.40) obtêm-se as potências instantâneas: real, imaginária e de sequência zero, como mostra (2.42) a (2.44), respectivamente.

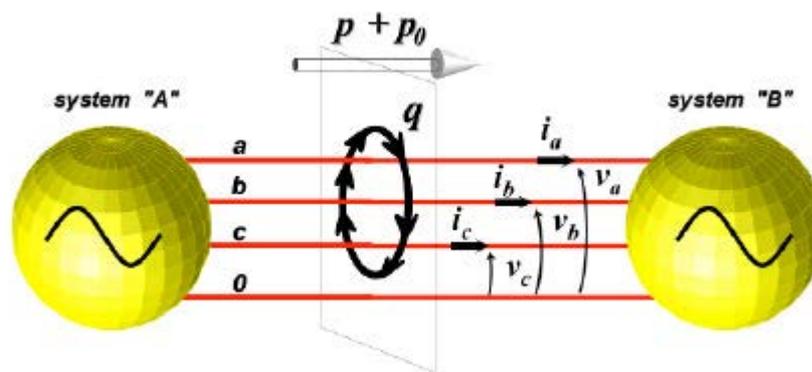
$$p_0 = v_0 i_0, \quad (2.42)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta, \quad (2.43)$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta. \quad (2.44)$$

A Figura 2.4 ilustra as potências instantâneas da Teoria pq [29], sendo que cada parcela de potência possui parcelas médias e oscilantes, mostradas em (2.45) a (2.47) [21].

Figura 2.4 – Potências instantâneas da Teoria pq.



Fonte: Watanabe et al., Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), 2010.

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, \quad (2.45)$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0, \quad (2.46)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}. \quad (2.47)$$

As parcelas oscilantes podem representar os desbalanços e harmônios gerados pela carga, assim como os desequilíbrios e distorções nas tensões da fonte.

### 2.1.5. Decomposição das correntes $\alpha\beta$ em função das potências instantâneas

Através das potências instantâneas é possível fazer a decomposição da corrente total em parcelas que representam os efeitos provocados pela carga, assim como os efeitos provocados pelas tensões da fonte. As correntes nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$  são ortogonais entre si e podem ser decompostas em correntes instantâneas ativas e reativas.

Com os vetores instantâneos através da transformada inversa de Clarke é possível obter as equações das correntes nas coordenadas  $\alpha\beta 0$ , através de (2.48).

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0(v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \begin{bmatrix} (v_\alpha^2 + v_\beta^2) & 0 & 0 \\ 0 & v_0 v_\alpha & v_0 v_\beta \\ 0 & v_0 v_\beta & -v_0 v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix}. \quad (2.48)$$

Através de (2.48) obtêm-se as equações das correntes instantâneas ativas e reativas nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$ , mostradas em (2.49) a (2.51).

$$i_0 = \frac{1}{v_0} p_0 = -\frac{1}{\sqrt{3}} (i_\alpha + i_\beta + i_c) = -\frac{1}{\sqrt{3}} i_{neutro}, \quad (2.49)$$

$$i_\alpha = i_{\alpha p} + i_{\alpha q} = \left( \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \right) p + \left( \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \right) q, \quad (2.50)$$

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

Cada parcela de corrente nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$  ainda pode ser decomposta em parcelas médias e oscilantes, mostradas em (2.52) a (2.55).

$$i_{\alpha p} = i_{\alpha \bar{p}} + i_{\alpha \tilde{p}}, \quad (2.52)$$

$$i_{\beta p} = i_{\beta \bar{p}} + i_{\beta \tilde{p}}, \quad (2.53)$$

$$i_{\alpha q} = i_{\alpha \bar{q}} + i_{\alpha \tilde{q}}, \quad (2.54)$$

$$i_{\beta q} = i_{\beta \bar{q}} + i_{\beta \tilde{q}}. \quad (2.55)$$

As correntes de sequência zero também podem ser decompostas em parcelas médias e oscilantes, porém, não dependem dos eixos  $\alpha$  e  $\beta$ , dependem somente da existência de condutor de retorno (3F-N).

### 2.1.6. Definição das potências nos eixos $\alpha\beta$

Através das definições das correntes nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$  é possível definir as potências instantâneas, médias e oscilantes nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$ , mostradas em (2.56) a (2.59).

$$p_{\alpha p} = v_\alpha i_{\alpha p} = \left( \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \right) p = \left( \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \right) \bar{p} + \left( \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \right) \tilde{p}, \quad (2.56)$$

$$p_{\beta p} = v_\beta i_{\beta p} = \left( \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \right) p = \left( \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \right) \bar{p} + \left( \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \right) \tilde{p}, \quad (2.57)$$

$$p_{\alpha q} = v_{\alpha} i_{\alpha q} = \left( \frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) q = \left( \frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{q} + \left( \frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \tilde{q}, \quad (2.58)$$

$$p_{\beta q} = v_{\beta} i_{\beta q} = \left( \frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) q = \left( \frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{q} + \left( \frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \tilde{q}. \quad (2.59)$$

De (2.56) a (2.59) mostra-se em (2.60) que a potência real é obtida através das parcelas de correntes ativas ( $i_{\alpha p}$ ) e ( $i_{\beta p}$ ) nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$ .

$$p_{\alpha p} = \left( \frac{v_{\alpha}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) p + \left( \frac{v_{\beta}^2}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) p. \quad (2.60)$$

As parcelas de potências dependentes das correntes reativas nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$  ( $i_{\alpha q}$ ) e ( $i_{\beta q}$ ) não contribuem com a transferência de potência útil (real), sendo a soma instantânea nula, mostradas em (2.61).

$$p_{\alpha q} + p_{\beta q} = \left( \frac{-v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) q + \left( \frac{v_{\alpha} v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) q = 0. \quad (2.61)$$

### 2.1.6. Fator de potência

Akagi et al. não definiram em suas formulações o fator de potência ( $FP_{\alpha\beta 0}$ ) ou a potência aparente ( $S_{\alpha\beta 0}$ ). No entanto, para efeito de comparações entre as teorias pq e CPT, foi proposto o cálculo do fator de potência e potência aparente [30]. Watanabe e Stephan também definiram potência harmônica ( $H$ ), as quais representam as não linearidades e desbalanços da carga. Porém, tal definição só é válida para tensões senoidais equilibradas [31].

$$S_{\alpha\beta 0} = \sqrt{(P_{\alpha\beta} + P_0)^2 + Q_{\alpha\beta}^2}, \quad (2.62)$$

$$H = \sqrt{\tilde{P}_{\alpha\beta}^2 + \tilde{Q}_{\alpha\beta}^2}, \quad (2.63)$$

$$FP_{\alpha\beta 0} = \frac{P_{\alpha\beta} + P_0}{S_{\alpha\beta 0}}. \quad (2.64)$$

As potências  $S_{\alpha\beta 0}$ ,  $P_{\alpha\beta}$  (real),  $P_0$  (de sequência zero) e  $Q_{\alpha\beta}$  (imaginária) são obtidas através de valores médios das tensões e correntes. No entanto, as parcelas de potências oscilatórias  $\tilde{P}_{\alpha\beta}$  e  $\tilde{Q}_{\alpha\beta}$  são obtidas através de valores eficazes.

## 2.2. Teoria de potência conservativa

A proposta inicial da CPT [17] trazia pressuposto de frequência de operação constante. Porém, em 2010 [2] a CPT foi reformulada de maneira a considerar os efeitos de desbalanço da carga, assimetria da tensão e variação da frequência. O principal objetivo dos autores nesta nova formulação foi consolidar a teoria para ser utilizada em sistemas elétricos em condições gerais de operação, incluindo-se microrredes de energia.

Todos os equacionamentos da CPT neste trabalho se referem a tese de doutorado de Paredes [2]. Publicações sobre suas possíveis aplicações serão referenciadas oportunamente.

Assume-se como hipótese que a operação é periódica de período  $T$ , de frequência fundamental  $f = 1/T$  e frequência da linha  $\omega = 2\pi f$ . Assim, para os cálculos de valores médios podem ser usados um ou mais ciclos do período da frequência fundamental. Os sinais de tensão e corrente podem ser senoidais ou não, desde que sejam periódicos.

### *Definições básicas*

Os valores da norma Euclidiana, ou seja, os valores eficazes das correntes e das tensões são definidos por (2.65) e (2.66).

$$I = \|i\| = \sqrt{\langle i, i \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt}, \quad (2.65)$$

$$V = \|v\| = \sqrt{\langle v, v \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}. \quad (2.66)$$

$i$  e  $v$  são vetores multidimensionais de corrente e tensão, respectivamente.

O produto interno entre as duas grandezas periódicas  $v(t)$  e  $i(t)$  é definido em (2.67).

$$\langle v, i \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt. \quad (2.67)$$

No caso do produto interno resultar em zero, é dito que tais grandezas são ortogonais. Dois vetores são ditos ortogonais, se e somente se, a média do produto escalar entre os dois vetores for nula em um determinado intervalo de tempo.

A CPT introduz a definição de integral imparcial para o cálculo da energia reativa instantânea. Em (2.68) mostra-se a integral imparcial da tensão. Nota-se que esta depende da integral da tensão instantânea, subtraída de seu valor médio em um período.

$$\hat{v}(t) = v_f(t) - \bar{v}_f. \quad (2.68)$$

A integral no tempo das tensões é definida em (2.69).

$$v_f = \frac{1}{T} \int_0^t v(t) dt. \quad (2.69)$$

Em condições normais de operação, o valor médio da integral da tensão é nulo, como mostra em (2.70).

$$\bar{v}_f = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = 0. \quad (2.70)$$

Para o cálculo dos valores médios das correntes e das tensões são definidos em (2.71) e (2.72), respectivamente.

$$\bar{i} = \frac{1}{T} \int_0^T i(t) dt, \quad (2.71)$$

$$\bar{v} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt, \quad (2.72)$$

### 2.2.1. Definições para circuitos polifásicos

A CPT foi formulada para ser utilizada tanto para circuitos monofásicos quanto para circuitos polifásicos. Porém, a Teoria pq é formulada somente para ser utilizada em circuitos polifásicos. Portanto, não serão apresentadas as formulações da CPT para circuitos monofásicos, podendo ser encontradas em [2].

A CPT inseriu um novo conceito de energia reativa ( $w$ ) para representar o armazenamento de energia do sistema. Porém, utiliza a potência ativa tradicional ( $p$ ) para representar a energia útil da rede. Estes termos são ditos termos conservativos porque satisfazem as leis de Kirchhoff e não dependem das formas de onda das tensões e correntes.

Diferentemente de circuito monofásicos, os circuitos polifásicos com ou sem condutor de retorno precisam de uma atenção especial com o ponto de referência de medição de tensão. Tem-se usado o ponto estrela virtual para a medição da tensão em circuitos trifásicos a três condutores (3F), como mostrado na Figura 2.1 e o condutor de retorno para circuitos trifásicos a quatro condutores (3F-N), como mostrado na Figura 2.2. Porém, este ainda é um ponto de muitas discussões [13].

### 2.2.2. Potência ativa instantânea coletiva e energia reativa instantânea coletiva

A CPT propõe a decomposição da corrente total em parcelas que relacionam a potência ativa instantânea coletiva e a energia reativa instantânea coletiva. Assim, como seus valores médios.

A potência ativa instantânea coletiva trifásica em um determinado ponto de acoplamento comum pode ser definida como sendo o produto dos vetores instantâneos da tensão e da corrente, ou ainda, através da somatória das potências instantâneas em cada fase do circuito, como mostra em (2.73).

$$p(t) = \underline{v}(t)\underline{i}(t) = \sum_{\mu=a}^m v_{\mu}(t)i_{\mu}(t). \quad (2.73)$$

$\mu$  representa as fases e  $m$  os condutores do circuito,  $\underline{v}$  e  $\underline{i}$  representam os vetores instantâneos da tensão e da corrente.

A potência ativa coletiva média ( $P$ ) pode ser definida como sendo o produto interno dos valores médios dos vetores das tensões e das correntes, ou ainda, através da somatória das potências médias em cada fase do circuito, como mostra em (2.74).

$$P = \langle \underline{v}, \underline{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{v} \underline{i} dt = \frac{1}{T} \sum_{\mu=a}^m \int_0^T v_{\mu}(t) i_{\mu}(t) dt = \sum_{\mu=a}^m P_{\mu}. \quad (2.74)$$

Sendo que  $P_{\mu}$  é o valor da potência ativa média de cada fase.

Entretanto, a potência ativa não é suficiente para caracterizar o funcionamento de uma rede elétrica, mesmo considerando somente cargas lineares. Para representar os elementos armazenadores de energia e as cargas não lineares foi introduzido um novo termo chamado energia reativa instantânea coletiva ( $w$ ), que é definida como sendo o produto dos vetores instantâneos da integral imparcial da tensão com a corrente, ou ainda, a somatória das energias reativas instantâneas em cada fase do circuito, como mostrado em (2.75).

$$w(t) = \underline{\hat{v}}(t)\underline{i}(t) = \sum_{\mu=a}^m \hat{v}_{\mu}(t)i_{\mu}(t). \quad (2.75)$$

Sendo  $\underline{\hat{v}}$  a representação do vetor instantâneo da integral imparcial da tensão. A energia reativa representa os reativos da rede.

A energia reativa coletiva média pode ser definida como sendo o produto interno entre os valores médios dos vetores da integral imparcial da tensão com a corrente, ou ainda, a somatória das energias reativas médias em cada fase, como mostra em (2.76).

$$W = \langle \underline{\hat{v}}, \underline{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{\hat{v}} \underline{i} dt = \frac{1}{T} \sum_{\mu=1}^m \hat{v}_{\mu}(t) i_{\mu}(t) dt = \sum_{\mu=1}^m W_{\mu}. \quad (2.76)$$

A potência reativa  $Q$  [Var] como é tradicionalmente conhecida, nesta teoria é definida como mostrado em (2.77). Porém, sua definição só é precisa para condições de tensões senoidais.

$$Q = \omega W = VI \text{sen}(\varphi). \quad (2.77)$$

Os termos conservativos são a potência ativa instantânea coletiva ( $p$ ), potência ativa média ( $P$ ), energia reativa instantânea coletiva ( $w$ ) e energia reativa média ( $W$ ), pois não dependem das formas de onda das tensões e das correntes, nem tão pouco depende da referência de medição da tensão. Note que a potência reativa em (2.77) não é conservativa, pois varia com a frequência da linha.

### 2.2.3. Parcelas de corrente em circuitos trifásicos

As componentes das correntes em circuitos trifásicos são decompostas em parcelas ativas ( $i_{a\mu}$ ), reativas ( $i_{r\mu}$ ) e residuais ( $i_{v\mu}$ ). Em circuitos trifásicos, as correntes ativas e reativas ainda podem ser decompostas em parcelas balanceadas e desbalanceadas, ou seja, a corrente ativa é dada por ( $i_a = i_a^b + i_a^u$ ) e a corrente reativa é dada por ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u$ ). A letra b representa a parte balanceada da corrente e o  $u$  representa a parte desbalanceada.

#### 2.2.3.1. Corrente ativa

As correntes ativas podem ser separadas em parcelas balanceadas e desbalanceadas. Sendo que as parcelas balanceadas são responsáveis por todo fluxo de potência ativa da fonte para a carga e as parcelas desbalanceadas representam a parte ativa do desbalanço de carga.

Em (2.78) mostra-se a corrente ativa, em (2.79) a corrente ativa balanceada e em (2.80) a corrente ativa desbalanceada.

$$\underline{i}_a = \{i_{a\mu}\}_{\mu=a}^m \rightarrow i_{a\mu} = \frac{\langle v_{\mu}, i_{\mu} \rangle}{\|v_{\mu}\|^2} v_{\mu} = \frac{P_{\mu}}{V_{\mu}^2} v_{\mu} = G_{\mu} v_{\mu}, \quad (2.78)$$

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

$$\underline{i}_a^u = \underline{i}_a - \underline{i}_a^b = \{i_{a\mu}^u\}_{\mu=a}^m = \{(G_\mu - G^b)v_\mu\}_{\mu=a}^m. \quad (2.80)$$

Sendo  $\underline{i}_a$  o vetor da corrente ativa,  $i_{a\mu}$  a corrente ativa de cada fase,  $\|v_\mu\| = V_\mu$  o valor eficaz da tensão fase,  $P_\mu$  o valor da potência ativa eficaz por fase,  $G_\mu$  condutância equivalente de fase e  $G^b$  a condutância balanceada.

### 2.2.3.2. Corrente reativa

Assim como a corrente ativa, as correntes reativas também podem ser separadas em parcelas balanceadas e desbalanceadas. As parcelas balanceadas representam o deslocamento (defasagem) entre as tensões e correntes pela presença de elementos armazenadores de energia (indutores e capacitores) e circuitos defasadores de correntes (cargas chaveadas). As parcelas desbalanceadas representam a parte reativa de desbalanço da carga. As correntes reativas não transportam potência útil.

Em (2.81) mostra-se a corrente reativa, em (2.82) a corrente reativa balanceada e em (2.83) a corrente reativa desbalanceada.

$$\underline{i}_r = \{i_{r\mu}\}_{\mu=a}^m \rightarrow i_{r\mu} = \frac{\langle \hat{v}_\mu, i_\mu \rangle}{\|\hat{v}_\mu\|^2} \hat{v}_\mu = \frac{W_\mu}{\hat{V}_\mu^2} \hat{v}_\mu = \mathcal{B}_\mu \hat{v}_\mu. \quad (2.81)$$

$$\underline{i}_r^b = \frac{\langle \underline{\hat{v}}, \underline{i} \rangle}{\|\underline{\hat{v}}\|^2} \underline{\hat{v}} = \frac{W}{\hat{V}^2} \underline{\hat{v}} = \mathcal{B}^b \underline{\hat{v}}. \quad (2.82)$$

$$\underline{i}_r^u = \underline{i}_r - \underline{i}_r^b = \{i_{r\mu}^u\}_{\mu=a}^m = \{(\mathcal{B}_\mu - \mathcal{B}^b)\hat{v}_\mu\}_{\mu=a}^m. \quad (2.83)$$

Sendo que  $\mathcal{B}_\mu$  é a reatividade equivalente por fase,  $\|\hat{v}_\mu\| = \hat{V}_\mu$  é o valor eficaz da integral imparcial da tensão por fase,  $\mathcal{B}^b$  é a reatividade balanceada.

### 2.2.3.3. Corrente residual

A corrente residual não transporta nem energia reativa e nem potência ativa. Esta surge devido a presença de cargas não lineares, cargas lineares (exceto carga resistiva) com tensões distorcidas. Para cargas lineares com tensões senoidais estas parcelas são nulas ( $i_{v\mu} = 0$ ). A corrente residual é definida como sendo a corrente total menos as parcelas ativas e reativas, como mostra em (2.84).

$$\underline{i}_v = \underline{i} - \underline{i}_a - \underline{i}_r. \quad (2.84)$$

#### 2.2.3.4. Corrente total em circuitos polifásicos

A corrente por fase em circuitos polifásicos pode ser determinada através de (2.85).

$$\underline{i} = \underline{i}_a^b + \underline{i}_r^b + \underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u + \underline{i}_v. \quad (2.85)$$

Todos os termos de correntes são ortogonais entre si e, portanto a corrente total coletiva eficaz por fase ( $I$ ) pode ser calculada através de (2.86).

$$I^2 = I_a^{b^2} + I_r^{b^2} + I_a^{u^2} + I_r^{u^2} + I_v^2, \quad (2.86)$$

sendo  $I = \|\underline{i}\|$ ,  $I_a = \|\underline{i}_a\|$  e assim por diante.

A corrente coletiva trifásica ( $I_{3\phi}$ ) pode ser obtida através de (2.87).

$$I_{3\phi} = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}. \quad (2.87)$$

Sendo  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  são os valores coletivos eficazes das correntes nas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ .

O significado físico de cada parcela de corrente são os mesmos independente das configurações da fonte ou da carga [32], [33].

#### 2.2.4. Potências médias em circuitos polifásicos

Cada parcela de corrente decomposta é responsável por transportar pela rede uma parcela de potência. Os valores eficazes das tensões e correntes são mostrados em (2.65) e (2.66).

##### 2.2.4.1. Potência ativa (P)

A potência ativa é a única parcela de potência que gera trabalho. A corrente ativa balanceada é a corrente responsável por todo o fluxo de potência útil transferida da fonte para a carga, como é mostrado em (2.88).

$$P = VI_a^b [W]. \quad (2.88)$$

### 2.2.4.2. Potência reativa (Q)

A potência reativa é a parcela de potência representada pelas correntes reativas balanceadas, a qual é responsável por transportar todo o fluxo de potência reativa. Esta representa o deslocamento entre as tensões e correntes no PAC, definida em (2.89).

$$Q = VI_r^b = V \frac{W}{\hat{V}} [VA]. \quad (2.89)$$

Sendo que,  $W$  a energia reativa total do sistema,  $\hat{V}$  é o valor eficaz da integral imparcial da tensão. Os valores eficazes de  $V$  e  $\hat{V}$  são divididos em valores fundamentais e harmônicos, como mostra em (2.90) e (2.91).

$$V = \sqrt{V_f^2 + V_h^2} = V_f \sqrt{1 + (DHT_V)^2}, \quad (2.90)$$

$$\hat{V} = \sqrt{\hat{V}_f^2 + \hat{V}_h^2} = \hat{V}_f \sqrt{1 + (DHT_{\hat{V}})^2}. \quad (2.91)$$

Sendo que, “ $f$ ” e “ $h$ ” são referentes aos termos de frequência fundamental e frequências harmônicas, respectivamente.  $DHT_V$  é a distorção harmônica total da tensão, que pode ser calculada em (2.92) e  $DHT_{\hat{V}}$  representa a distorção harmônica total da integral imparcial da tensão que é definida em (2.93).

$$DHT_V = \frac{V^2 - V_f^2}{V_f^2}, \quad (2.92)$$

$$DHT_{\hat{V}} = \frac{\hat{V}^2 - \hat{V}_f^2}{\hat{V}_f^2}. \quad (2.93)$$

Fazendo  $\omega = V/\hat{V}$  e substituindo em (2.89), obtém-se a potência reativa, como mostra (2.94).

$$Q = \omega W_r \frac{\sqrt{1 + (DHT_V)^2}}{\sqrt{1 + (DHT_{\hat{V}})^2}} (VA). \quad (2.94)$$

A potência reativa depende da frequência de linha e das distorções das tensões, por esse motivo  $Q$  não é uma grandeza conservativa.

### 2.2.4.3. Potência ativa de desbalanço ( $U_a$ )

A potência ativa de desbalanço representa a parte ativa de desbalanço da carga, como definida em (2.95). Na ausência de carga desbalanceada esta parcela de potência será nula.

$$U_a = VI_a^u = \sqrt{V^2 \sum_{\mu=a}^m \frac{P_\mu^2}{V_\mu^2} - P^2} (VA). \quad (2.95)$$

### 2.2.4.4. Potência reativa de desbalanço ( $U_r$ )

A potência reativa de desbalanço representa a parte reativa de desbalanço da carga, seja pela presença de elementos armazenadores de energia ou cargas não lineares, é definida em (2.96).

$$U_r = VI_r^u = \frac{V}{\hat{V}} \hat{V} I_r^u = \omega \frac{\sqrt{(1 + (DHT_V)^2)}}{\sqrt{(1 + (DHT_{\hat{V}})^2)}} \sqrt{\hat{V}^2 \sum_{\mu=a}^m \frac{W_{r\mu}^2}{\hat{V}_\mu^2} - W_r^2} \cdot (VA) \quad (2.96)$$

Na ausência de correntes de desbalanço esta parcela de potência será nula ( $U_r = 0$ ). A soma das potências ativas e reativas de desbalanço representa os desbalanços da carga ( $U = U_a + U_r$ ).

### 2.2.4.5. Potência residual ( $D$ )

A potência residual é a potência que representa as não linearidades da carga, é definida em (2.97).

$$D = VI_v(VA). \quad (2.97)$$

### 2.2.4.6. Potência aparente ( $A$ )

A potência aparente representa a potência total do sistema, sendo obtida através do produto dos valores eficazes coletivos da corrente e da tensão, como mostrado em (2.98).

$$A = \|\underline{v}\| \|\underline{i}\| (VA). \quad (2.98)$$

Também pode ser obtida através da soma quadrática de todas as parcelas de potências, como mostrado em (2.99) e (2.100).

$$A^2 = \underbrace{V^2 I_a^2 b^2}_{P^2} + \underbrace{V^2 I_r^2 b^2}_{Q^2} + \underbrace{V^2 I_a^2 u^2}_{U_a^2} + \underbrace{V^2 I_r^2 u^2}_{U_r^2} + \underbrace{V^2 I_v^2}_{D_v^2}, \quad (2.99)$$

$$A^2 = P^2 + Q^2 + U^2 + D^2 \rightarrow A = \sqrt{P^2 + Q^2 + U^2 + D^2}. \quad (2.100)$$

#### 2.2.4.7. Fator de potência ( $\lambda$ )

O fator de potência é definido através da relação entre a potência ativa com a potência aparente, como mostrado em (2.101).

$$\lambda = \frac{P}{A} = \frac{\|i_a^b\|}{\|i\|}. \quad (2.101)$$

Além do fator de potência, a CPT define os fatores de não linearidade ( $\lambda_D$ ), de assimetria ( $\lambda_U$ ) e de reatividade ( $\lambda_Q$ ), os quais representam, o quanto cada parcela de potência contribui com a redução do fator de potência [2].

### 3. CIRCUITOS TRIFÁSICOS (3F e 3F-N)

Este capítulo apresenta a análise comparativa entre a Teoria de Potências Instantâneas e a Teoria de Potência Conservativa, através das parcelas de correntes e potências decompostas, para circuitos trifásicos a três e quatro condutores (3F e 3F-N).

#### 3.1. Circuitos trifásicos com três condutores (3F)

Nesta seção são apresentadas as simulações para circuitos trifásicos com três condutores (3F), sem impedância de linha. A referência de medição de tensão é feita através do ponto estrela virtual (maiores detalhes em [12] e [13]).

A ideia central desta seção é comparar as parcelas de correntes que têm o mesmo significado físico, de maneira a mostrar os efeitos provocados pela carga [34]. Foram feitas as comparações das correntes ativas balanceadas da CPT com as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{a\mu}^b \leftrightarrow i_{p\mu}$ ), estas parcelas são responsáveis pela transferência de energia útil da fonte para a carga. Também são feitas comparações das correntes reativas balanceadas da CPT, com as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{r\mu}^b \leftrightarrow i_{q\mu}$ ), assim como comparações das parcelas de correntes que representam os desbalanços e as não linearidades do circuito ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu} \leftrightarrow i_{p\mu} + i_{q\mu}$ ). Por fim, são feitas as comparações com as correntes não ativas ( $i_{r\mu}^b + i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu} \leftrightarrow i_{q\mu} + i_{p\mu} + i_{q\mu}$ ).

Além das comparações das parcelas de corrente, as parcelas de potência também são contrastadas, de forma que a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) é comparada com a potência real instantânea da Teoria pq ( $p$ ) e, a energia reativa da CPT ( $\omega w$ ) comparada com a potência imaginária da Teoria pq ( $q$ ).

Indicam-se abaixo as oito configurações de fonte de tensão e de carga avaliadas:

- A - Tensões senoidais equilibradas e carga balanceada;
- B - Tensões senoidais equilibradas e carga desbalanceada;
- C - Tensões senoidais desequilibradas e carga balanceada;
- D - Tensões senoidais desequilibradas e carga desbalanceada;
- E - Tensões não senoidais equilibradas com carga balanceada;
- F - Tensões não senoidais equilibradas com carga desbalanceada;
- G - Tensões não senoidais desequilibradas com carga balanceada;
- H - Tensões não senoidais desequilibradas com carga desbalanceada.

A Tabela 3.1 mostra os dados das tensões utilizadas nas simulações para todos os casos. Para as tensões não senoidais foram utilizados 10% da amplitude da tensão da frequência fundamental para as frequências de 5ª e 7ª harmônicas. No caso de tensões não senoidais equilibradas são utilizadas amplitudes de 12,7V para as frequências de 300 e 420 Hz. No caso de tensões não senoidais desequilibradas serão utilizadas amplitudes de 12,7V, 11,3V e 14,7V também para as frequências de 300 e 420 Hz, para as respectivas fases *a*, *b* e *c*.

Tabela 3.1 – Dados de tensão para os oito casos a serem simulados.

<b>Casos A e B</b>	<b>Casos C e D</b>	<b>Casos E e F</b>	<b>Casos G e H</b>
127∠0°	127∠0°	127∠0°, com 5ª e 7ª	127∠0°, com 5ª e 7ª
127∠-120°	113∠-104,4°	127∠-120°, com 5ª e 7ª	113∠-104,4°, com 5ª e 7ª
127∠120°	147,49∠144°	127∠120°, com 5ª e 7ª	147,49∠144°, com 5ª e 7ª

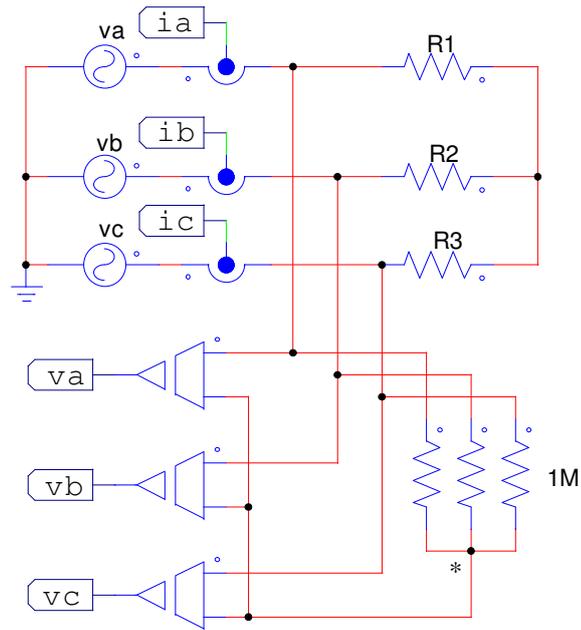
Fonte: Paredes, tese de doutorado, 2011.

O que diferencia os casos A e B é a carga ser balanceada no caso A e desbalanceada no caso B, para os outros casos pode ser mantido a mesma lógica.

### 3.1.1. Carga resistiva (R)

A Figura 3.1 mostra o circuito trifásico a três condutores com carga puramente resistiva (carga resistiva). Para a carga balanceada considerou-se  $R_1=R_2=R_3=8,5\Omega$  e, para carga desbalanceada  $R_1=11,8\Omega$ ,  $R_2=5,9\Omega$  e  $R_3=8,5\Omega$  [2].

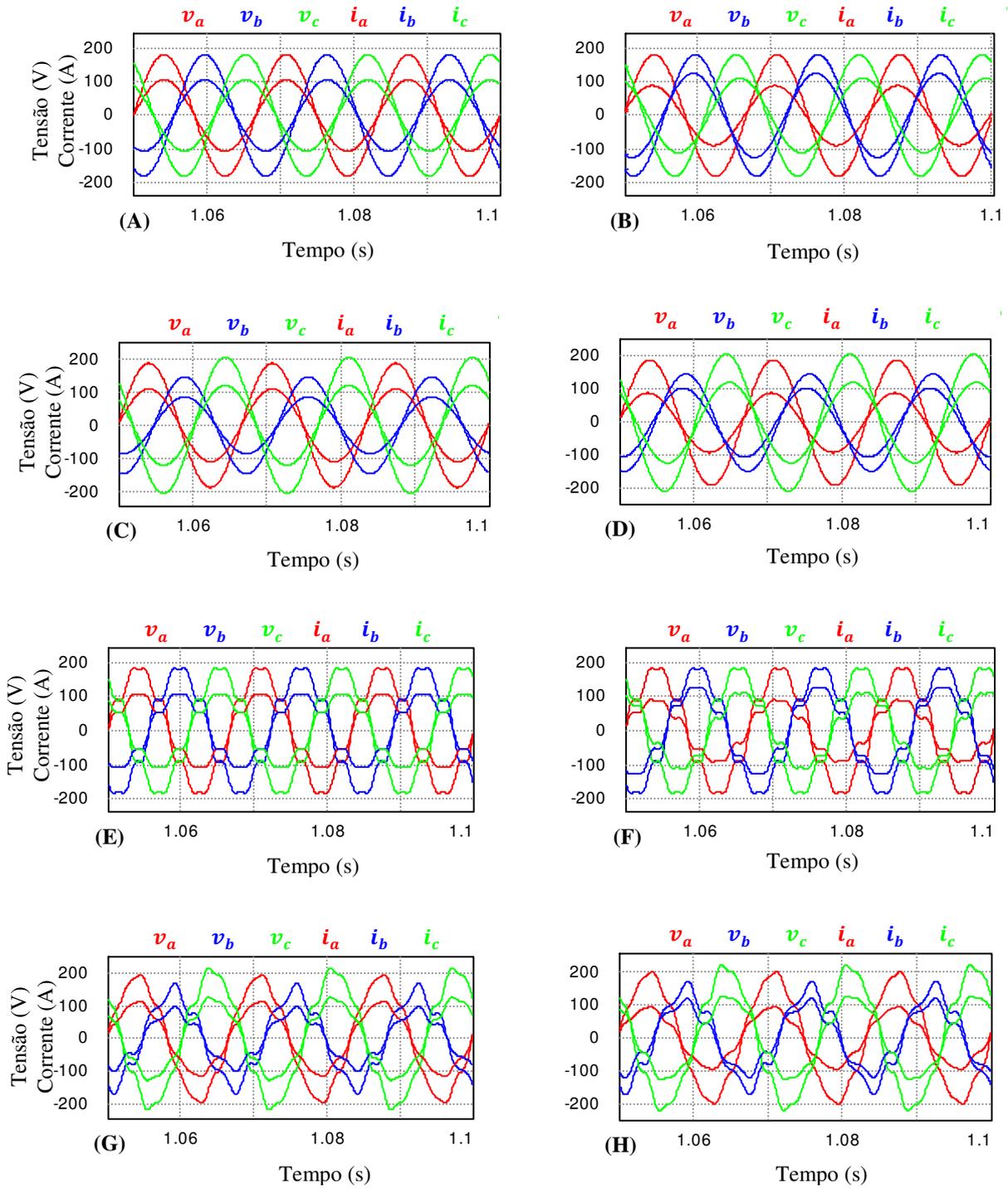
Figura 3.1 – Circuito trifásico a três condutores (3F) com carga resistiva.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.2 mostra as tensões e correntes no Ponto de Acoplamento Comum (PAC) para todos os casos simulados com carga resistiva. Nota-se que as tensões e correntes no PAC são senoidais para os casos (A), (B), (C) e (D). No entanto, as tensões e correntes no PAC são distorcidas para os casos (E), (F), (G) e (H). Sendo que as distorções das correntes são impostas pelas tensões, pelo fato da carga ser puramente resistiva.

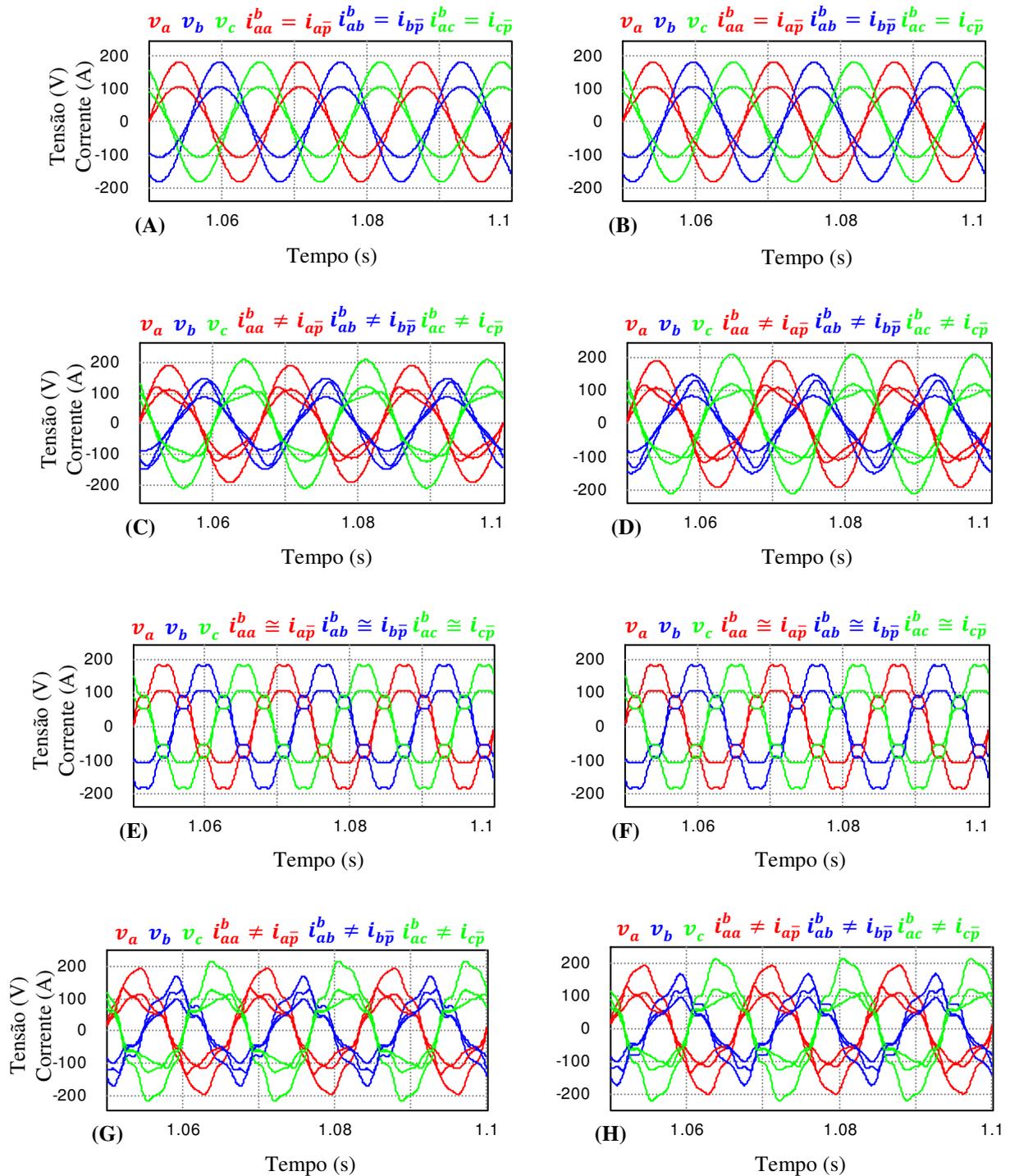
Figura 3.2 – Tensões e correntes (5x) no PAC para carga resistiva.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.3 mostra as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu}$ ), para todos os casos simulados com carga resistiva.

Figura 3.3 – Corrente ativa balanceada, corrente ativa média e tensão no PAC para carga R.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.3 (A) e (B) mostra que estas parcelas de correntes são equivalentes e estão perfeitamente em fase com as respectivas tensões, pelo fato das tensões serem equilibradas. Para os casos em (E) e (F) estas parcelas são aproximadamente iguais, dentro de determinadas condições, como será discutido mais adiante.

A Figura 3.3 (C), (D), (G) e (H) mostra que não há equivalência entre essas parcelas de corrente, pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Porém, com muito mais influência do desequilíbrio do que das distorções. Para analisar a diferença entre estas parcelas, é importante analisar a equação (3.1), esta mostra o cálculo da corrente ativa média da Teoria pq e (3.2) mostra a corrente ativa balanceada da CPT.

$$i_{\bar{p}} = \left( \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{p} + \left( \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \right) \bar{p}. \quad (3.1)$$

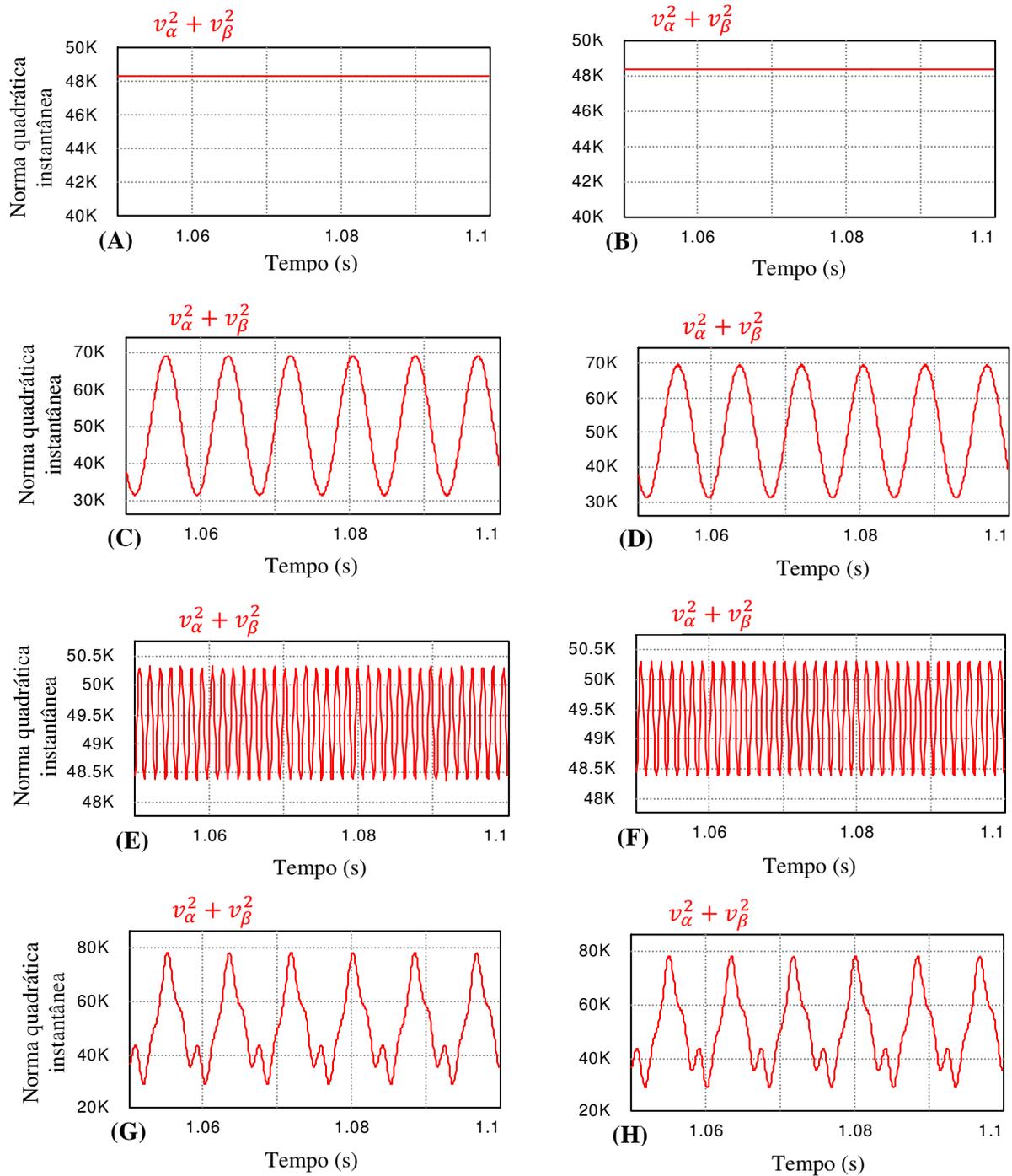
$$i_a^b = \frac{P}{V^2} v. \quad (3.2)$$

A Teoria pq usa a norma quadrática instantânea das tensões no denominador das equações para o cálculo dos valores médios das correntes, enquanto que a CPT usa a norma quadrática do valor eficaz (rms). Em (3.2) a corrente ativa balanceada da CPT depende tanto da potência ativa média ( $P$ ) quanto da tensão eficaz, sendo as duas parcelas constantes. Logo, a razão também o será ( $P/V^2 = cte$ ), independentemente do tipo de tensão da fonte. Em (3.1) mostra-se que a Teoria pq usa a potência real média ( $\bar{p}$ ) no numerador, que é constante. Porém, usa a norma quadrática instantânea das tensões no denominador ( $v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$ ). Assim, em condições de tensões desequilibradas e/ou assimétricas, a razão entre estas parcelas não resulta constante ( $\bar{p}/(v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2) \neq cte$ ).

Para tensões senoidais equilibradas, as normas são equivalentes, portanto, as parcelas balanceadas e médias também o serão.

A Figura 3.4 mostra o fator representado pela norma quadrática das tensões nos denominadores ( $v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$ ) em (3.1) da Teoria pq, para todos os casos. Para os casos em (A) e (B) mostra-se que para tensões senoidais equilibradas, este fator é constante. Porém, para todos os outros casos, este fator é oscilatório, seja pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. No entanto, nota-se que para tensões não senoidais equilibradas, nos casos em (E) e (F) estas oscilações tem amplitudes pequenas (ou desprezíveis - menor que 1%), as quais têm menor influência na diferença entre as parcelas de correntes ativas. Sendo assim as correntes ativas médias da Teoria pq podem ser consideradas iguais as correntes ativas balanceadas da CPT.

Figura 3.4 – Norma quadrática instantânea das tensões da Teoria pq.



Fonte: Próprio autor.

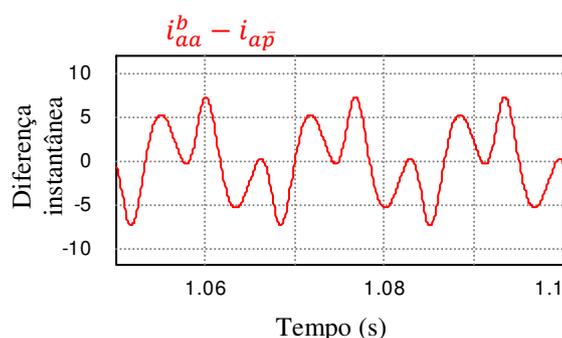
A Figura 3.4 mostra que as correntes ativas médias e balanceadas só serão exatamente iguais para os casos com tensões senoidais equilibradas. Porém, para os casos de tensões não senoidais equilibradas também podem ser consideradas iguais pelo fato de existir pequenas oscilações no denominador em (3.1). Estas pequenas oscilações (menor que 1%) podem ser

consideradas desprezíveis. No entanto, para tensões desequilibradas não haverá equivalência entre as parcelas de correntes.

As oscilações que aparecem na norma quadrática instantânea das tensões da Teoria pq não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões, mas surgem no processo de decomposição das correntes em parcelas médias e oscilantes.

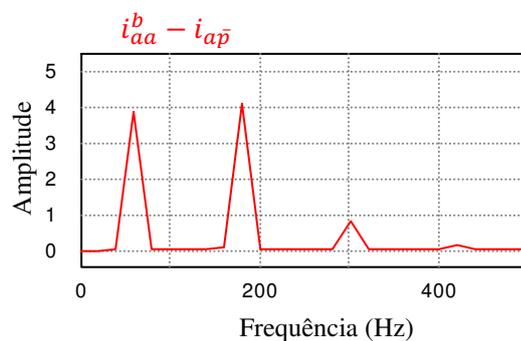
A Figura 3.5 mostra a diferença instantânea, somente para o caso D da Figura 3.3, que aparece entre as correntes ativas balanceadas da CPT e as correntes ativas médias da Teoria pq (para a fase *a*). Neste caso, a CPT foi usada como referência para o cálculo, o que não significa necessariamente que as correntes da CPT estão corretas e as correntes da Teoria pq estejam erradas. A Figura 3.6 apresenta o espectro de frequências desta diferença instantânea das correntes ativas médias e balanceadas para o caso (D).

Figura 3.5 – Diferença instantânea entre as correntes ativas balanceadas e médias entre as teorias.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.6 – Espectro de frequências da diferença instantânea para o caso (D).



Fonte: Próprio autor.

No caso de não haver equivalência entre as outras parcelas de correntes das duas teorias também será pelo fato da Teoria pq usar a norma quadrática instantânea das tensões no

cálculo das parcelas de correntes ativas e reativas oscilantes e que em condições de tensões desequilibradas, a norma não resultará constante.

Como esperado, para todos os casos com carga puramente resistiva, não haverá corrente reativa balanceada da CPT e nem a corrente reativa média da Teoria pq, ou seja, estas parcelas de correntes são equivalentes e nulas ( $i_{r\mu}^b = i_{\bar{q}\mu} = 0$ ). Isso ocorre pelo fato de que a carga é linear e não há armazenadores de energia no circuito (indutores e capacitores).

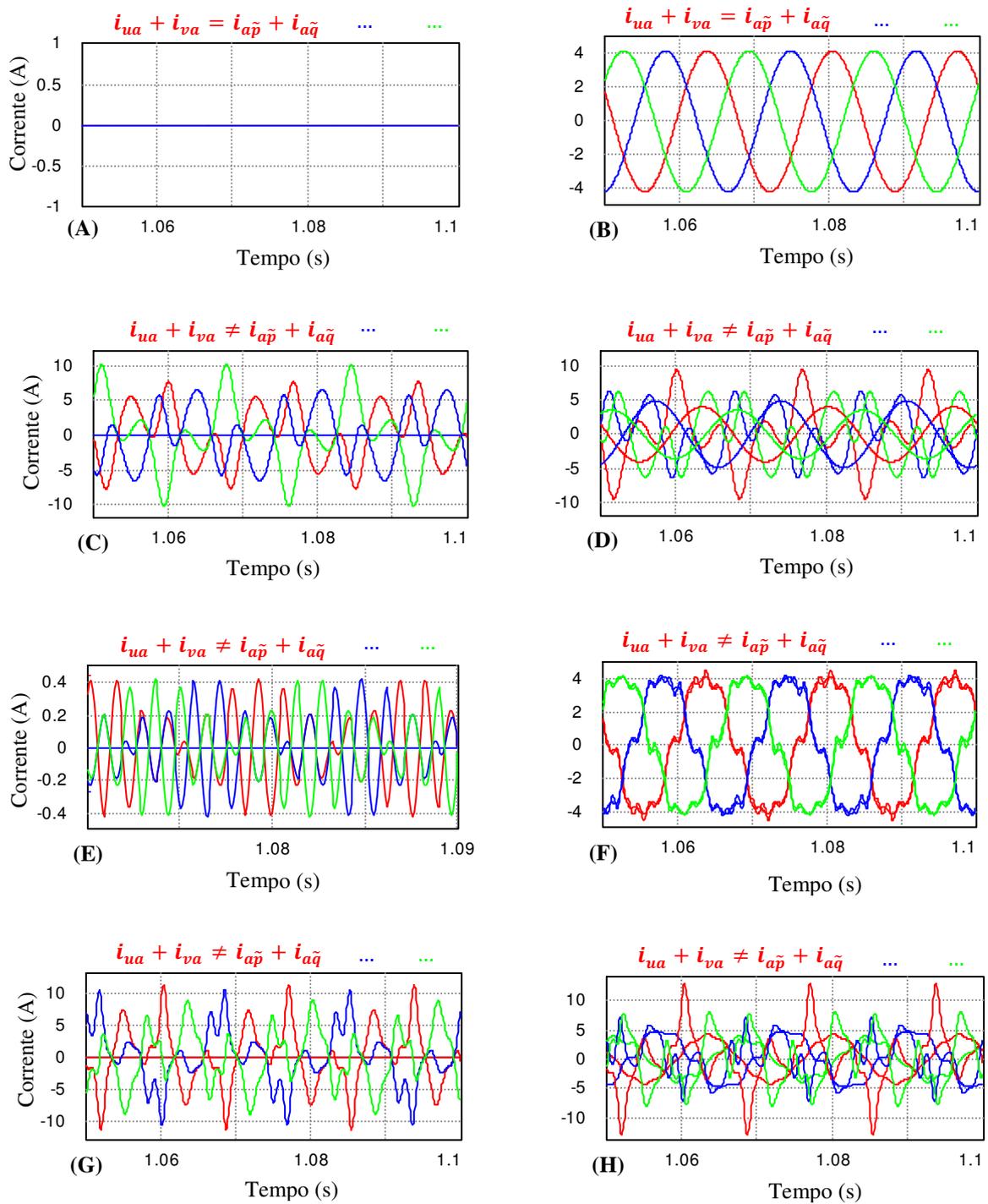
A Figura 3.7 mostra as parcelas das correntes que representam as não linearidades e os desbalanços do circuito. Como visto no Capítulo 2, a CPT separa estes distúrbios através de parcelas de correntes, ou seja, os harmônicos (provocados por não linearidades) são representados pelas correntes residuais ( $i_{v\mu}$ ) e os desbalanços são representados pelas correntes ativas e reativas de desbalanço ( $i_{u\mu} = i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u$ ). Já a Teoria pq trata em suas formulações tanto não linearidades quanto desbalanços em conjunto nas parcelas ativas e reativas oscilantes ( $i_{\bar{p}\mu} \leftrightarrow i_{\bar{q}\mu}$ ). Portanto, por questões de comparações não serão mostrados as parcelas separadas, ou seja, a Figura 3.5 mostra as comparações de todos os casos com as correntes desbalanceadas e residuais ( $i_{u\mu} + i_{v\mu}$ ) da CPT e as correntes oscilantes ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ) da Teoria pq. De mesma forma será feito para os outros tipos de cargas.

A Figura 3.7 (A) mostra que as correntes são equivalentes e nulas pelo fato da carga ser linear e as tensões serem senoidais equilibradas. No caso (B) mostra-se que as correntes são equivalentes pelo fato da carga ser linear e as tensões senoidais equilibradas. Portanto, as não linearidades são nulas, sendo assim, estas correntes representam exclusivamente o desbalanço da carga.

A Figura 3.7 (D), (F) e (H) mostra que as correntes não são equivalentes pelo fato das tensões serem desequilibradas, como no caso das correntes ativas médias mostradas anteriormente, surgem frequências harmônicas nas correntes oscilantes da Teoria pq que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões. Isso não ocorre com a CPT, pois nestes casos só existem correntes de desbalanço e as correntes residuais são nulas ( $i_{v\mu} = 0$ ).

A Figura 3.7 (C), (E) e (G) mostra que não há equivalência entre as parcelas de correntes pelo fato da carga ser resistiva balanceada ( $i_{u\mu} + i_{v\mu} = 0$ ). Estas divergências ocorrem pelo fato de que a CPT não representa os distúrbios das tensões nas correntes desbalanceadas e residuais, ou seja, a CPT não mistura efeitos provocados pela carga com os distúrbios das tensões. Já a Teoria pq mistura desbalanço e não linearidades geradas pela carga nas parcelas oscilantes, além das oscilações que surgem nas correntes com tensões desequilibradas e/ou distorcidas ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} \neq 0$ ).

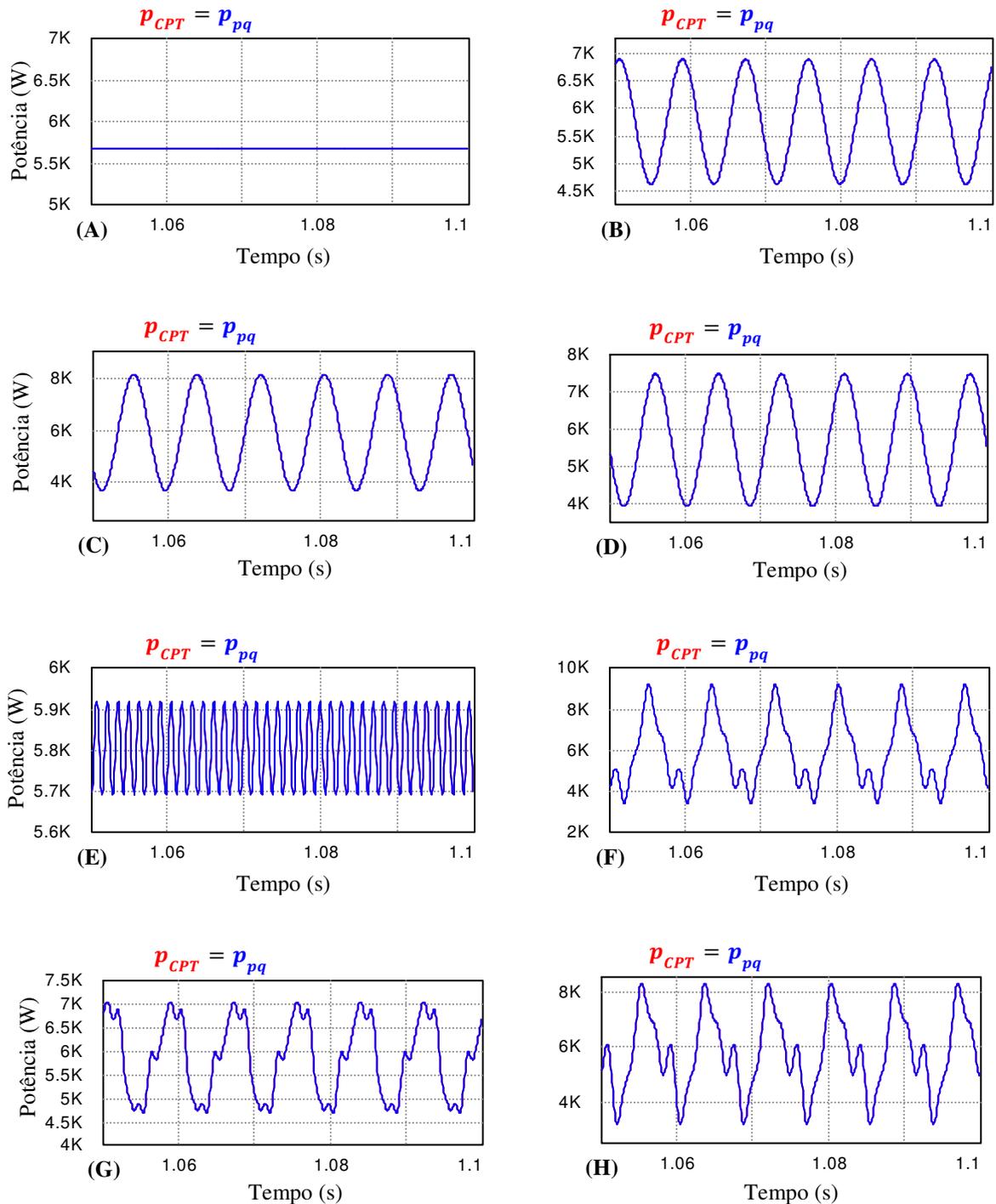
Figura 3.7 – Correntes desbalanceadas e residuais da CPT e correntes oscilantes da Teoria pq para carga resistiva.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.8 mostra a potência ativa instantânea da CPT e a potência real da Teoria pq, as quais são equivalentes em todos os casos, independentemente da carga e das tensões da fonte, isso ocorre pelo fato de serem calculadas através dos valores instantâneos das tensões e das correntes (2.41).

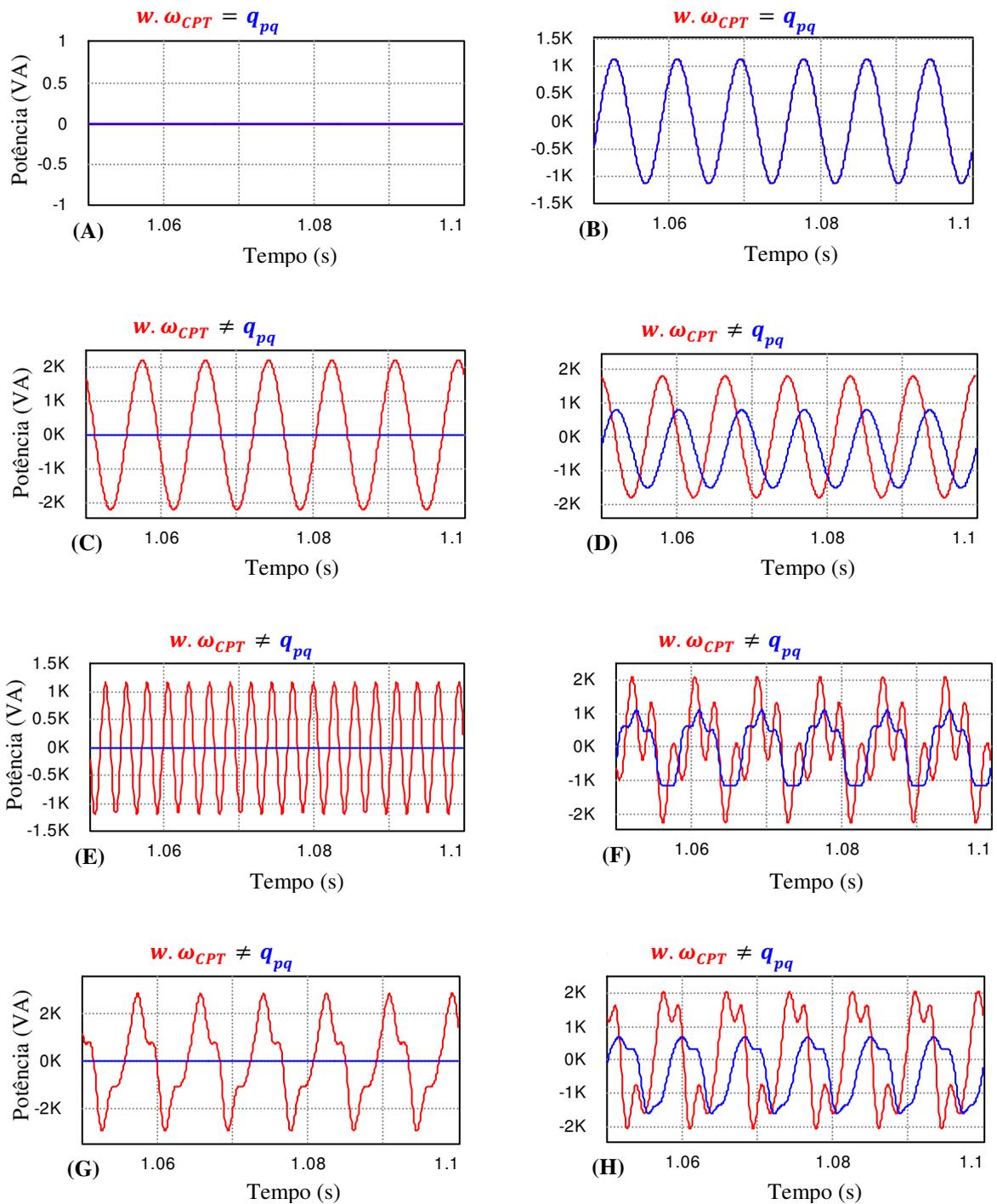
Figura 3.8 – Potência ativa instantânea e potência real instantânea para carga resistiva.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.9 mostra a comparação entre os valores instantâneos da energia reativa da CPT com a potência imaginária da Teoria pq.

Figura 3.9 – Energia reativa instantânea e potência imaginária instantânea para carga resistiva.



Fonte: Próprio autor.

Para que seja possível comparar as parcelas de potência reativa instantânea, é preciso comparar a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ) com o produto da energia reativa ( $w$ ) da CPT com a frequência da linha ( $\omega$ ).

A Figura 3.9 (A) e (B) mostra que tais parcelas de potência são equivalentes pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. Para todos os outros casos não há equivalência pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou não senoidais.

A Figura 3.9 (C), (E) e (G) mostra que a energia reativa da CPT é oscilante em torno da origem, isso faz com que a energia reativa possua valor médio nulo, não contribuindo assim com os reativos da rede. No caso de carga desbalanceada, a energia reativa e a potência imaginária irão contribuir somente com as correntes reativas desbalanceadas da CPT e com as correntes reativas oscilantes de Teoria pq, como mostrado para os casos em (D), (F) e (H).

Tabela 3.2 mostra os valores eficazes das correntes de fase, suas respectivas parcelas de potência, fator de potência e distorções harmônicas das correntes, com a CPT, para todos os casos com carga resistiva. A Tabela 3.3 mostra tais valores através da Teoria pq.

Tabela 3.2 – Dados de todos os casos para carga resistiva com a CPT.

CASOS	A	B	C	D	E	F	G	H
$I_a(A)$	14,935	12,543	15,781	12,748	15,102	12,667	15,821	12,788
$I_b(A)$	14,935	17,640	12,234	14,773	15,084	17,816	12,394	14,965
$I_c(A)$	14,935	15,592	17,273	17,234	15,084	15,748	17,349	17,335
$I_{aa}^b(A)$	14,935	15,132	15,781	15,266	15,102	15,283	15,821	14,420
$I_{ab}^b(A)$	14,935	15,113	12,234	11,834	15,084	15,264	12,394	12,808
$I_{ac}^b(A)$	14,935	15,113	17,273	16,709	15,084	15,264	17,349	16,742
$I_{ra}^b(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{rb}^b(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{rc}^b(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{va} + I_{ua}(A)$	<b>0,000</b>	2,957	<b>0,000</b>	2,834	<b>0,000</b>	2,986	<b>0,000</b>	2,878
$I_{vb} + I_{ub}(A)$	<b>0,000</b>	2,953	<b>0,000</b>	3,416	<b>0,000</b>	2,982	<b>0,000</b>	3,597
$I_{vc} + I_{uc}(A)$	<b>0,000</b>	2,956	<b>0,000</b>	2,484	<b>0,000</b>	2,986	<b>0,000</b>	3,849
$A (kVA)$	5,692	5,869	5,922	5,842	5,806	5,987	5,988	5,962
$P (kW)$	<b>5,692</b>	<b>5,760</b>	<b>5,922</b>	<b>5,729</b>	<b>5,806</b>	<b>5,876</b>	<b>5,988</b>	<b>5,804</b>
$Q (kVA)$	<b>0,000</b>							
$D (kVA)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,118	<b>0,000</b>	0,541
$U (kVA)$	<b>0,000</b>	1,126	<b>0,000</b>	1,141	<b>0,000</b>	1,142	<b>0,000</b>	1,253
$\lambda$	1,000	0,981	1,000	0,981	1,000	0,981	1,000	0,973
$DHT_{Ia} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	14,027	14,027	6,957	7,793
$DHT_{Ib} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	14,027	14,027	16,104	15,977
$DHT_{Ic} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	14,027	14,027	9,098	10,578

Fonte: Próprio autor.

As correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  da Tabela 3.3 são as correntes no PAC, ou seja, representam a soma de todas as parcelas de correntes da CPT em cada fase. Nota-se que para os casos (A), (C), (E) e (G) da Tabela 3.3, as correntes ativas balanceadas são as próprias correntes no PAC, pelo da carga ser resistiva balanceada. Nestes casos, toda a potência da fonte é entregue a carga, veja que a potência aparente é a própria potência ativa ( $A = P$ ), com isso o fator de potência é unitário ( $\lambda = 1$ ). Isto garante que todas as outras parcelas de potência sejam nulas ( $Q = 0$ ,  $D = 0$ ,  $U = 0$ ).

Os casos (B), (D), (F) e (H) da Tabela 3.2 mostram que com a carga desbalanceada surgem correntes de desbalanço, indicadas na Tabela 3.2 por  $(i_{u\mu} + i_{v\mu})$ , nestes casos, apesar de não explicitas, as correntes residuais são nulas ( $i_{v\mu} = 0$ ), pelo fato da carga ser resistiva. Portanto, a potência residual (ou de distorção) também é nula ( $D = 0$ ), assim como a potência reativa ( $Q = 0$ ). Pois não existe corrente reativa balanceada no sistema ( $i_{r\mu}^b = 0$ ). Sendo assim, nem toda a potência da fonte é entregue a carga ( $A \neq P$ ), pois com o desbalanço da carga surge a potência de desbalanço ( $U \neq 0$ ). Com isso o fator de potência é menor do que a unidade, diferentemente do que seria esperado através da definição usual de fator de potência, o qual seria influenciado apenas pela circulação de reativos [2].

As distorções harmônicas das correntes no PAC (DHT) presentes nos casos (E), (F), (G) e (H) são impostas pelas tensões, ver Figura 3.2.

A Tabela 3.3 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, fator de potência e distorções harmônicas das correntes para a Teoria pq.

As correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  da Tabela 3.3 são as correntes no PAC que representam a soma de todas as parcelas de correntes decompostas, de cada fase com a Teoria pq.

Os casos (A) e (E) da Tabela 3.3 mostram que as correntes ativas médias são as próprias correntes no PAC ( $I_{\bar{p}\mu} = I_{\mu}$ ), isso ocorre pelo fato da carga ser resistiva balanceada. Portanto, toda a potência da fonte é entregue para a carga. Pois, a potência aparente é a própria potência ativa média ( $S_{\alpha\beta 0} = P$ ). Isso também garante que todas as outras parcelas de potência sejam nulas ( $Q_{\alpha\beta} = 0$ ,  $H = 0$ ).

Os casos (B), (C), (D), (F), (G) e (H) da Tabela 3.3 mostram que com desbalanço de carga, distorções e/ou desequilíbrios nas tensões provocam correntes oscilantes ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} \neq 0$ ), as quais são responsáveis por transportar potência harmônica ao sistema ( $H$ ). Portanto, nem toda a potência da fonte é entregue para a carga ( $S_{\alpha\beta 0} \neq P_{\alpha\beta}$ ). Nota-se que nos casos (D) e (H) surge potência imaginária ( $Q_{\alpha\beta} \neq 0$ ), o que não seria esperado, pois a carga é

puramente resistiva. Isso ocorre pela mistura do desequilíbrio da tensão e o desbalanço da carga. Essa combinação faz com que apareçam frequências harmônicas nas correntes que não foram impostas pelas tensões e nem geradas pela carga. Nos outros casos a potência reativa é nula ( $Q_{\alpha\beta} = 0$ ).

Nota-se que o fator de potência é unitário ( $FP_{\alpha\beta 0} = 1$ ) nos casos (A), (B), (C), (E) e (G) da Tabela 3.3. Isto mostra que a definição proposta de fator de potência em (2.64) não leva em consideração os desequilíbrios das tensões.

As distorções harmônicas presentes nas correntes no PAC (DHT) são impostas pelas tensões. Pois, não há geração de harmônicas por parte da carga (carga resistiva).

Tabela 3.3 – Dados com a Teoria pq para todos os casos com carga resistiva.

CASOS	A	B	C	D	E	F	G	H
$I_a(A)$	14,935	12,543	15,781	12,748	15,103	12,667	15,821	12,788
$I_b(A)$	14,935	17,640	12,234	14,773	15,084	17,816	12,394	14,965
$I_c(A)$	14,935	15,592	17,273	17,234	15,084	15,748	17,349	17,335
$I_{a\bar{p}}(A)$	14,935	15,132	15,843	15,327	15,103	15,284	16,189	15,690
$I_{b\bar{p}}(A)$	14,935	15,113	15,817	15,301	15,084	15,264	15,453	14,976
$I_{c\bar{p}}(A)$	14,935	15,113	15,821	15,305	15,084	15,264	16,145	15,647
$I_{a\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,939	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,919
$I_{b\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,941	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,962
$I_{c\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,941	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	0,922
$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	2,957	4,213	4,318	<b>0,000</b>	2,994	4,669	4,807
$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	2,953	4,632	3,733	<b>0,000</b>	2,991	4,170	3,546
$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	2,956	3,977	4,005	<b>0,000</b>	2,993	4,265	4,574
$S_{\alpha\beta 0} (kVA)$	5,692	5,760	5,922	5,740	5,806	5,875	5,988	5,814
$P_{\alpha\beta} (kW)$	<b>5,692</b>	<b>5,760</b>	<b>5,922</b>	<b>5,729</b>	<b>5,806</b>	<b>5,875</b>	<b>5,988</b>	<b>5,804</b>
$Q_{\alpha\beta} (kVA)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,352</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,351</b>
$H (kVA)$	<b>0,000</b>	1,126	1,572	1,492	0,080	1,151	1,671	1,630
$FP_{\alpha\beta 0}$	1,000	1,000	1,000	0,998	1,000	0,993	1,000	0,998
$DHT_{Ia} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	14,027	14,027	6,957	7,793
$DHT_{Ib} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	14,027	14,027	16,104	15,977
$DHT_{Ic} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	14,027	14,027	9,098	10,578

Fonte: Próprio autor.

A análise comparativa entre as Tabelas 3.2 e 3.3 mostra que para carga resistiva, independente das tensões, as correntes no PAC são equivalentes entre as teorias, assim como as potências ativa e real.

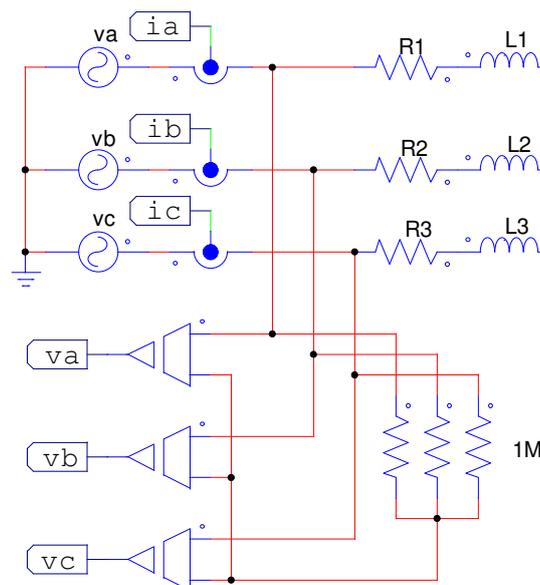
É importante destacar que as teorias são equivalentes em suas respectivas parcelas de correntes e potências para tensões equilibradas. Porém, divergem para tensões desequilibradas.

As Tabelas 3.2 e 3.3 mostram que existe uma pequena divergência entre as teorias no cálculo do fator de potência. Principalmente pelo que na proposta de cálculo do fator de potência da Teoria pq, em (2.64), não estão sendo considerados os desequilíbrios das tensões. O mesmo não ocorre com a CPT que apresenta fator de potência menor do que a unidade para estes casos (B, D, F e H).

### 3.1.2. Carga resistiva-indutiva (RL)

A Figura 3.10 mostra o circuito para a simulação dos casos com carga RL. Para a carga balanceada  $R1=R2=R3=8,5\Omega$  e  $L1=L2=L3=15\text{mH}$ . Para a carga desbalanceada  $R1=11,8\Omega$  e  $L1=20\text{mH}$ ,  $R2=5,9\Omega$  e  $L2=10\text{mH}$ ,  $R3=8,5\Omega$  e  $L3=15\text{mH}$ . Tais parâmetros foram escolhidos de forma empírica, de forma a destacar os fenômenos de interesse.

Figura 3.10 – Circuito trifásico a três condutores com carga RL.

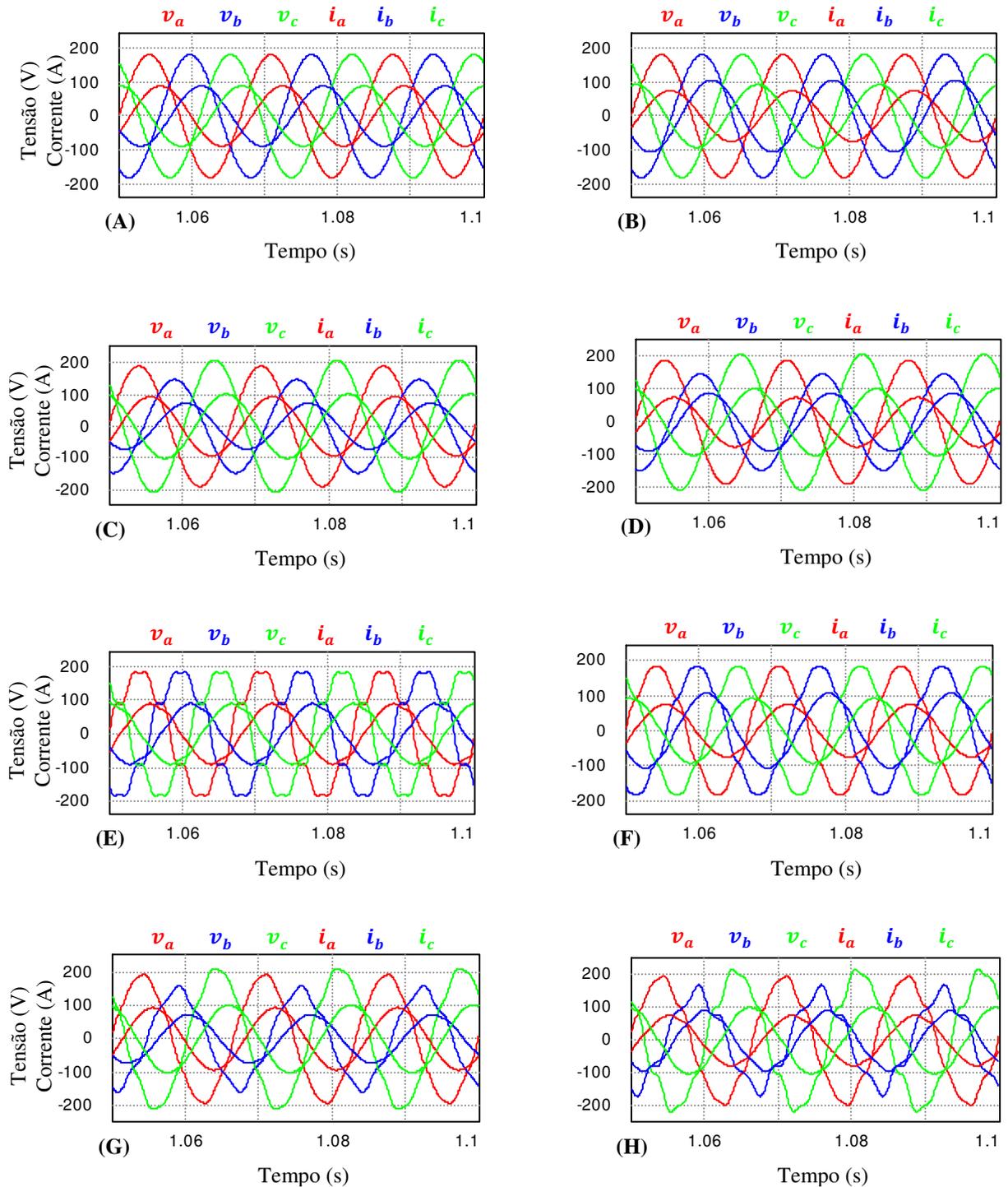


Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.11 mostra as tensões e correntes no PAC para todos os casos simulados com carga RL. Para melhor visualização dos resultados, as correntes no PAC foram multiplicadas por 5. Porém, nas tabelas são mostrados os valores reais.

Nota-se que as tensões e correntes no PAC são senoidais para os casos (A), (B), (C) e (D) da Figura 3.11, pelo fato da carga ser linear (RL) e as tensões serem senoidais. Já nos casos (E), (F), (G) e (H), as correntes são distorcidas em função das condições impostas pelas tensões.

Figura 3.11 – Tensões e correntes (5x) no PAC para carga RL.



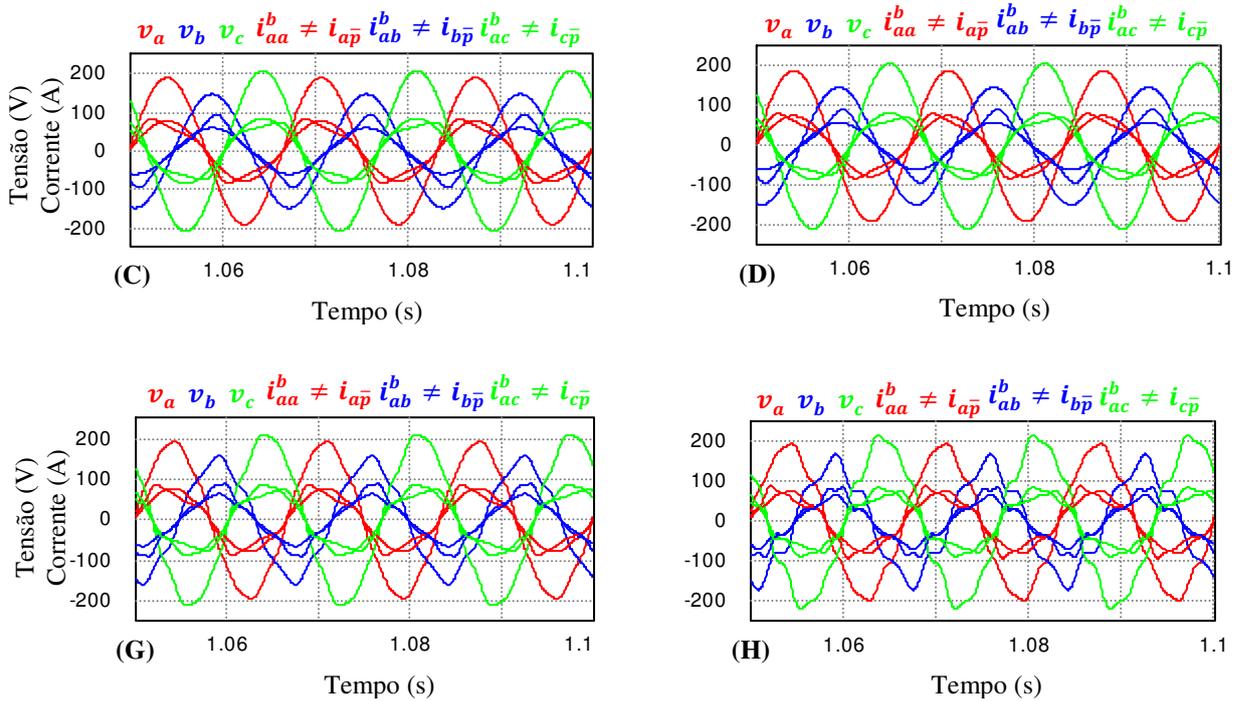
Fonte: Próprio autor.

Tensões e correntes no PAC não estão em fase em nenhum dos casos pelo fato da carga ser indutiva, como esperado. Pois, a presença de indutores no circuito faz com que as correntes fiquem atrasadas em relação as suas respectivas tensões de fase.

A Figura 3.12 mostra as correntes ativas balanceadas da CPT e as correntes ativas médias da Teoria pq. Apesar de não explicitas, os casos (A) e (B) mostram que estas parcelas são equivalentes (diferença menor do que 1%), pelo fato das tensões serem equilibradas. Para os casos (E) e (F), estas parcelas de correntes são praticamente iguais (diferença menor do que 1%).

A Figura 3.12 (C), (D), (G) e (H) mostra que não existe equivalência entre estas parcelas de correntes, pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Pois, no caso da Teoria pq, os desequilíbrios nas tensões faz surgir oscilações que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões. Estas oscilações aparecem no processo de decomposição das correntes em parcelas ativas e reativas. Em outras palavras, as diferenças entre estas parcelas de correntes ocorrem pelo fato das formas de ondas das correntes não terem as mesmas características das tensões.

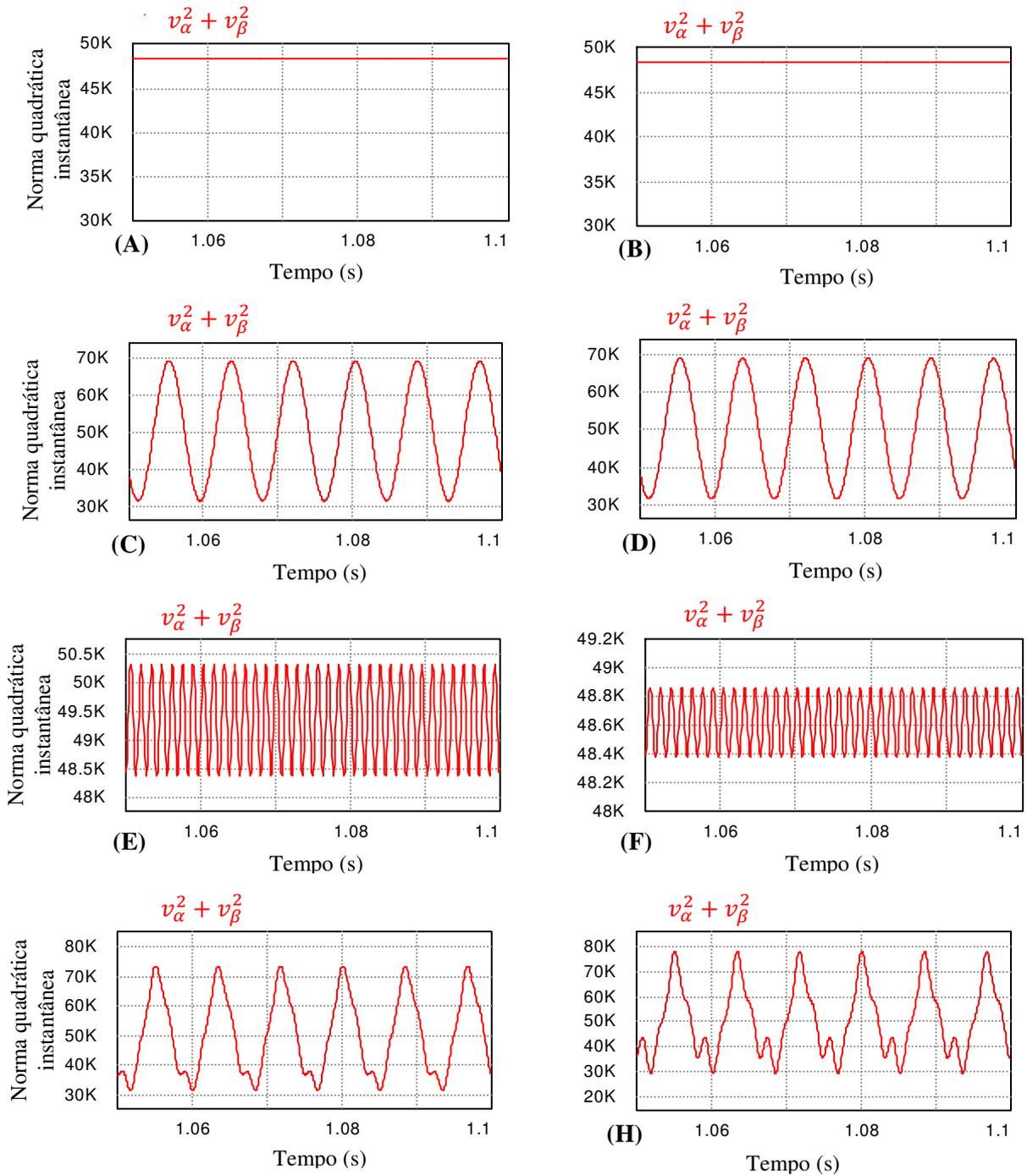
Figura 3.12 – Corrente ativa balanceada, corrente ativa média e tensão no PAC para carga RL.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.13 mostra o fator representado pela soma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) da Teoria pq, para todos os casos com carga RL. Os mesmos comentários sobre as equações em (3.1) e (3.2) para carga resistiva podem ser considerados para carga RL.

Figura 3.13 – Norma quadrática instantânea das tensões para carga RL.



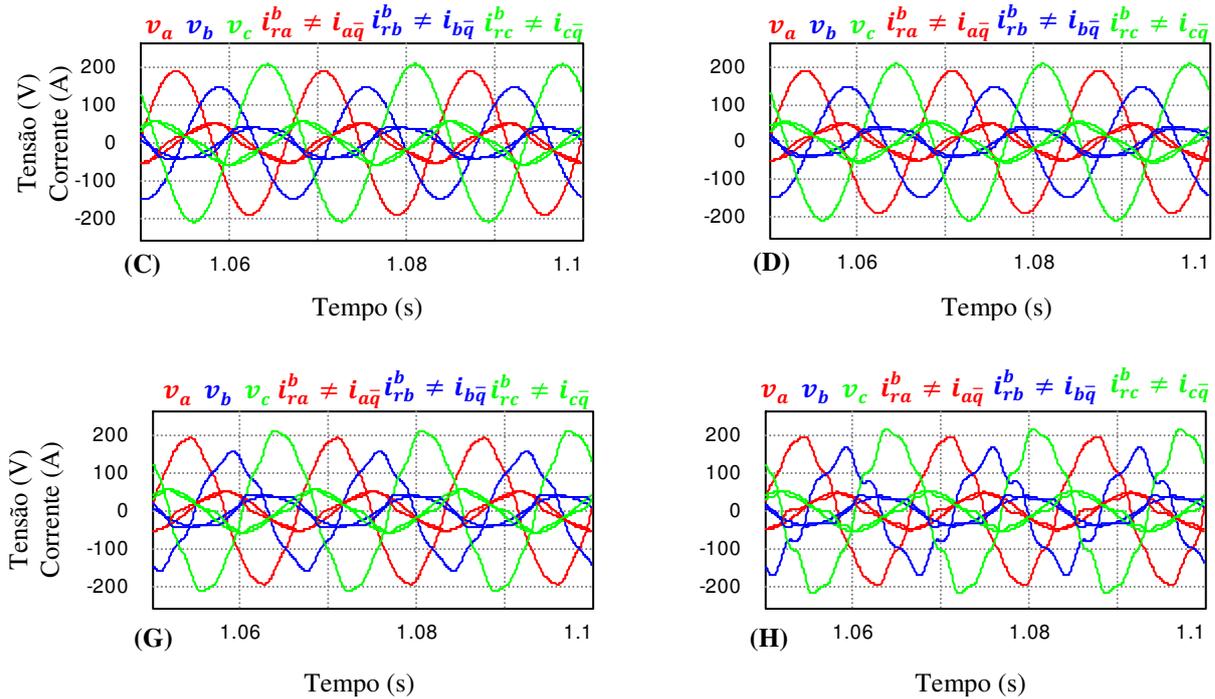
Fonte: Próprio autor.

Figura 3.13 (A) e (B) mostra que a norma é constante, o que garante que as parcelas ativas balanceadas e médias sejam iguais. Os casos (E) e (F) mostram que existe uma pequena oscilação (menor do que 1%) fazendo com que estas parcelas de corrente sejam praticamente iguais. Isto mostra que as distorções das tensões equilibradas têm pouca influência na norma.

A Figura 3.13 (C), (D), (G) e (H) mostra que os desequilíbrios têm grande influência na norma, devido as oscilações de alta amplitude, o que faz surgem as diferenças entre estas parcelas de correntes.

A Figura 3.14 mostra as correntes reativas balanceadas da CPT e as correntes reativas médias da Teoria pq.

Figura 3.14 – Correntes reativas balanceadas, correntes reativas médias e tensões para carga RL.



Fonte: Próprio autor.

Os casos (A) e (B), apesar de não estarem explícitos, estas parcelas de corrente são equivalentes, pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. Para os casos (E) e (F), estas parcelas de corrente são praticamente iguais, devido às oscilações da norma quadrática instantânea das tensões da Teoria pq ser desprezíveis.

A Figura 3.14 (C), (D), (G) e (H) mostra que não há equivalência entre estas parcelas de corrente pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas.

Da mesma forma como as correntes ativas médias, as correntes reativas médias da Teoria pq dependem da norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ), ver em (2.50) e (2.51), o que geram os mesmos efeitos oscilatórios. Os comentários similares aos das parcelas ativas médias da Figura 3.13 podem ser considerados para as correntes reativas médias.

A Figura 3.15 mostra as correntes desbalanceadas e residuais da CPT, assim como as correntes ativas e reativas oscilantes da Teoria pq.

Nota-se que existem equivalência entre estas parcelas de corrente somente para os casos (A) e (B), pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. O caso (A) mostra que estas parcelas são nulas, pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas e a carga balanceada ( $i_v + i_u = i_{\bar{p}} + i_{\bar{q}} = 0$ ).

Figura 3.15 (C) mostra que as parcelas de correntes residuais e desbalanceadas da CPT são nulas ( $i_{v\mu} + i_{u\mu} = 0$ ), pelo fato da carga ser linear balanceada. No entanto, o mesmo não ocorre com a Teoria pq, que além de misturar desbalanço e não linearidades nas parcelas ativas e reativas oscilantes. Também mistura os desequilíbrios das tensões, sendo assim, estas parcelas de correntes da Teoria pq não são nulas ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} \neq 0$ ), fazendo com que tenha divergência entre estas parcelas de correntes ( $i_{v\mu} + i_{u\mu} \neq i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ).

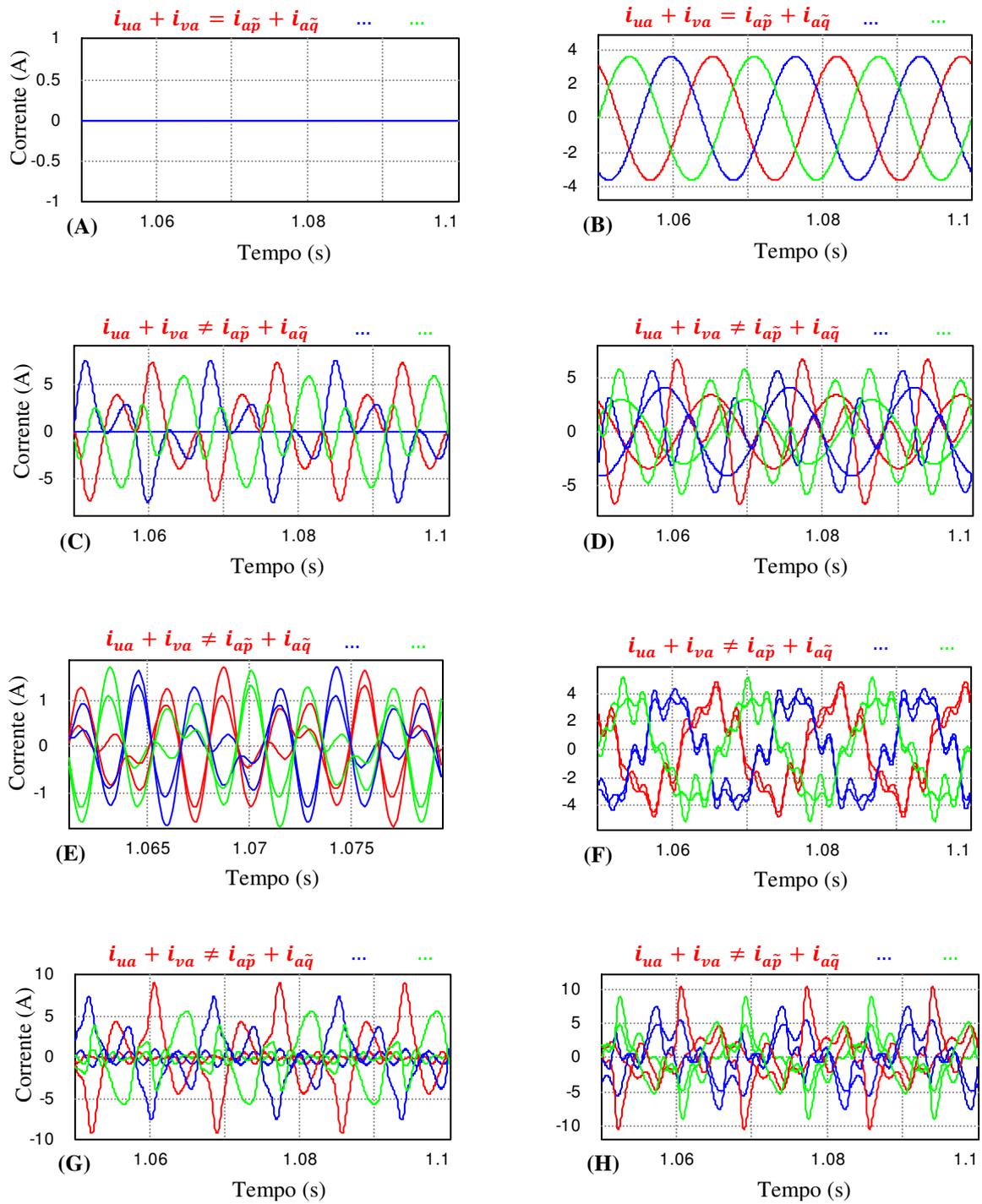
A Figura 3.15 (D), (E), (F), (G) e (H) mostra que não existe equivalência entre estas parcelas de correntes, pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Estas divergências ocorrem pelo fato de que as correntes oscilantes também dependem da norma quadrática instantânea das tensões ( $v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$ ), ver em (2.49) a (2.55), que em casos de tensões desequilibradas e/ou distorcidas surgem oscilações nestas parcelas de correntes.

A Figura 3.15 (E) e (G) mostra através da CPT que diferentemente da carga resistiva, estas parcelas não são nulas, pois existe uma pequena parcela de corrente residual ( $i_{v\mu} \neq 0$ ), devido a presença de indutores no circuito com tensões não senoidais. Em outras palavras, estas pequenas parcelas de correntes residuais surgem pelo fato das correntes não terem as mesmas características das tensões. As correntes desbalanceadas continuam nulas ( $i_{u\mu} = 0$ ), pelo fato da carga ser balanceada.

A Figura 3.16 mostra a energia reativa instantânea da CPT ( $w\omega$ ) e a potência imaginária instantânea ( $q$ ) da Teoria pq.  $\omega$  é a frequência angular fundamental.

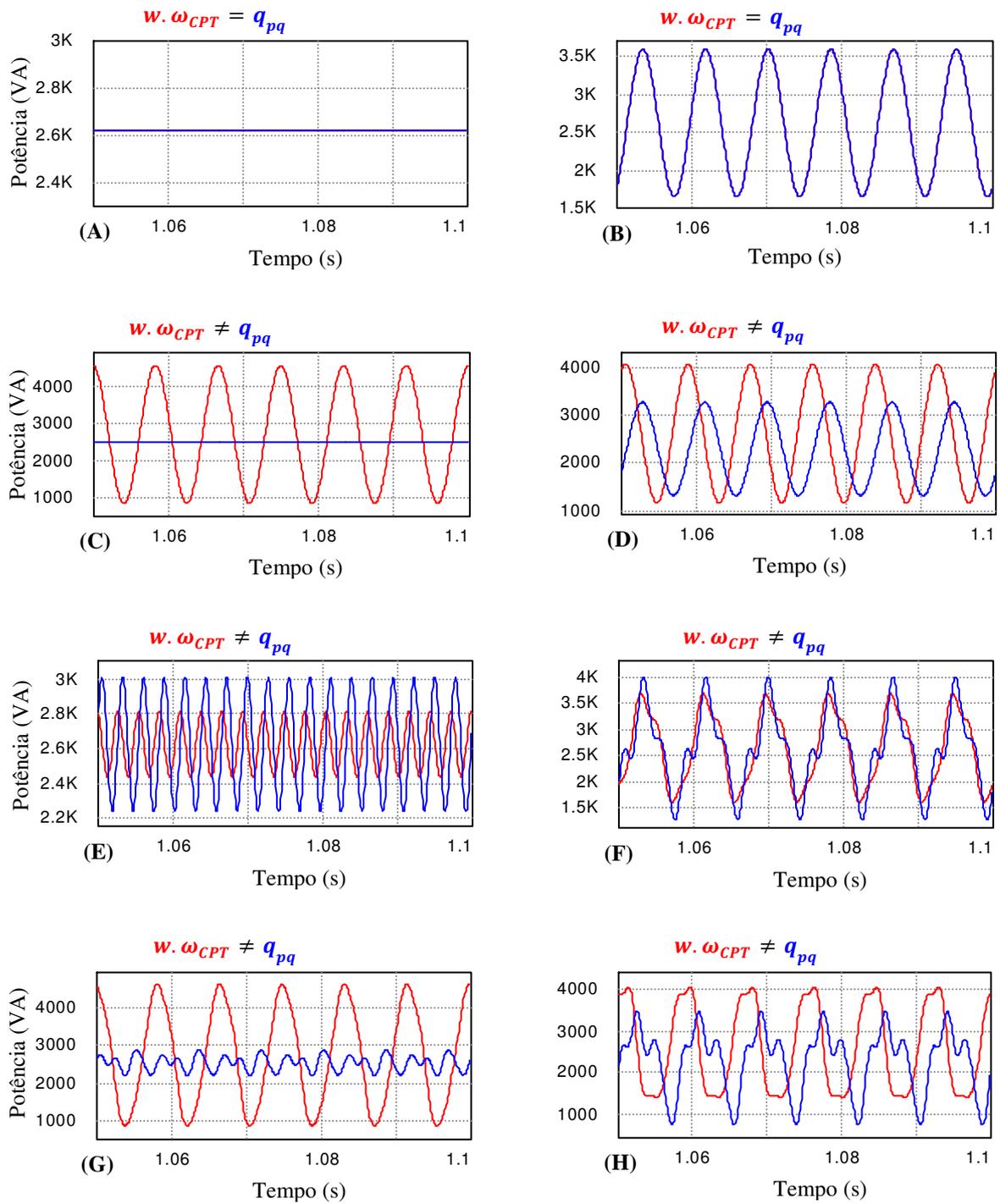
A Figura 3.16 (A) e (B) mostra que estas parcelas de potência são equivalentes pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. Para todos os outros casos não há equivalência entre estas parcelas, seja pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Isso ocorre pelo fato que estas parcelas de potência dependem das correntes reativas balanceadas e médias, as quais divergem para tensões desequilibradas e/ou distorcidas. Então, também haverá divergências entre estas parcelas de potência.

Figura 3.15 – Correntes de desbalanço e residuais da CPT e oscilantes da Teoria pq para carga RL.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.16 – Energia reativa instantânea e potência instantânea imaginária para carga RL.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.4 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, fator de potência e distorções harmônicas das correntes para a CPT, para todos os casos com carga RL.

Tabela 3.4 – Dados da carga RL para todos os casos com a CPT.

CASOS	A	B	C	D	E	F	G	H
$I_a(A)$	<b>12,443</b>	<b>10,504</b>	<b>13,123</b>	<b>10,666</b>	<b>12,445</b>	<b>10,506</b>	<b>13,133</b>	<b>10,667</b>
$I_b(A)$	<b>12,445</b>	<b>14,902</b>	<b>10,193</b>	<b>12,489</b>	<b>12,449</b>	<b>14,906</b>	<b>10,198</b>	<b>12,510</b>
$I_c(A)$	<b>12,429</b>	<b>13,030</b>	<b>14,369</b>	<b>14,393</b>	<b>12,431</b>	<b>13,033</b>	<b>14,370</b>	<b>14,402</b>
$I_{aa}^b(A)$	<b>10,365</b>	10,653	<b>10,938</b>	10,726	10,344	10,631	10,918	10,650
$I_{ab}^b(A)$	<b>10,352</b>	10,639	<b>8,480</b>	8,315	10,331	10,618	8,487	8,343
$I_{ac}^b(A)$	<b>10,352</b>	10,639	<b>11,973</b>	11,740	10,331	10,618	11,957	11,678
$I_{ra}^b(A)$	<b>6,885</b>	6,896	<b>7,266</b>	6,966	6,887	6,898	7,267	6,973
$I_{rb}^b(A)$	<b>6,893</b>	6,904	<b>5,650</b>	5,417	6,896	6,907	5,652	5,426
$I_{rc}^b(A)$	<b>6,893</b>	6,904	<b>7,964</b>	7,635	6,896	6,907	7,966	7,644
$I_{va} + I_{ua} (A)$	<b>0,000</b>	2,543	<b>0,000</b>	2,431	0,686	2,619	0,366	2,492
$I_{vb} + I_{ub} (A)$	<b>0,000</b>	2,543	<b>0,000</b>	2,934	0,687	2,686	0,633	3,259
$I_{vc} + I_{uc} (A)$	<b>0,000</b>	2,546	<b>0,000</b>	2,136	0,687	2,650	0,520	2,314
$A (kVA)$	4,739	4,929	4,931	4,901	4,752	4,943	4,938	4,932
$P (kW)$	<b>3,946</b>	<b>4,055</b>	<b>4,105</b>	<b>4,025</b>	<b>3,947</b>	<b>4,057</b>	<b>4,106</b>	<b>4,031</b>
$Q (kVA)$	<b>2,625</b>	<b>2,629</b>	<b>2,731</b>	<b>2,619</b>	<b>2,633</b>	<b>2,637</b>	<b>2,736</b>	<b>2,636</b>
$D (kVA)$	0,000	0,000	0,000	0,000	0,262	0,274	0,201	0,456
$U (kVA)$	0,000	0,969	0,000	0,980	0,000	0,970	0,000	0,960
$\lambda$	<b>0,832</b>	<b>0,823</b>	<b>0,832</b>	<b>0,821</b>	<b>0,831</b>	<b>0,821</b>	<b>0,832</b>	<b>0,817</b>
$DHT_{Ia} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>1,439</b>	<b>1,534</b>	<b>0,000</b>	<b>2,150</b>
$DHT_{Ib} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>1,439</b>	<b>1,476</b>	<b>2,272</b>	<b>5,281</b>
$DHT_{Ic} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>1,439</b>	<b>1,464</b>	<b>0,000</b>	<b>2,964</b>

Fonte: Próprio autor.

Os casos (A) e (C) da Tabela 3.4 mostram que as correntes no PAC são representadas somente pelas parcelas ativas e reativas balanceadas ( $I_{a\mu} = I_{a\mu}^b + I_{r\mu}^b$ ), pois a tensão é senoidal e a carga é linear balanceada ( $I_{u\mu} + I_{v\mu} = 0$ ). Portanto, a potência de desbalanço e a potência residual são nulas ( $U = 0, D = 0$ ). Com isso a potência total do sistema (A) é dividida em potência útil (P) e potência reativa (Q). Nos casos (B) e (D) surge a potência de desbalanço ( $U \neq 0$ ), pelo fato da carga ser desbalanceada.

Os casos (A), (B), (C) e (D) da Tabela 3.4 mostram que a potência residual (ou de distorção) é nula, o que significa que a corrente que aparece em (B) e (D) é somente a parcela de corrente de desbalanço ( $I_{v\mu} = 0$ ), a qual é responsável pela potência de desbalanço e que neste caso é diferente de zero ( $U \neq 0$ ).

Os casos (E), (F), (G) e (H) da Tabela 3.4 mostram que a potência residual não é nula ( $D \neq 0$ ), indicando que a relação entre as correntes e tensões no PAC não são lineares. Nos casos (E) e (G), a potência de desbalanço também é nula, pelo fato da carga ser balanceada.

Nos casos (F) e (H), a potência de desbalanço é diferente de zero ( $U \neq 0$ ), o que significa que existe tanto corrente de desbalanço, quanto corrente residual.

Em todos os casos da Tabela 3.4, a potência reativa é diferente de zero ( $Q \neq 0$ ), pelo fato que existem indutores no circuito.

O fator de potência ficou abaixo da unidade em todos os casos da Tabela 3.4 ( $\lambda < 1$ ). Pois, a presença de indutores no sistema faz com que a corrente fique atrasada em relação à tensão.

As distorções harmônicas das correntes no PAC ( $I_a, I_b, I_c$ ) são nulas ( $DHT = 0$ ) para os casos (A), (B), (C) e (D) da Tabela 3.4, pelo fato das tensões serem senoidais. No entanto não são nulas ( $DHT \neq 0$ ) para os casos em (E), (F), (G) e (H), pelo fato das tensões serem distorcidas.

A Tabela 3.5 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, fator de potência de distorções harmônicas das correntes para a Teoria pq, para todos os casos com carga RL.

Tabela 3.5 – Dados da Carga RL para todos os casos com a Teoria pq.

CASOS	A	B	C	D	E	F	G	H
$I_a(A)$	<b>12,443</b>	<b>10,504</b>	<b>13,123</b>	<b>10,666</b>	<b>12,445</b>	<b>10,506</b>	<b>13,133</b>	<b>10,667</b>
$I_b(A)$	<b>12,445</b>	<b>14,902</b>	<b>10,193</b>	<b>12,489</b>	<b>12,449</b>	<b>14,906</b>	<b>10,198</b>	<b>12,510</b>
$I_c(A)$	<b>12,429</b>	<b>13,030</b>	<b>14,369</b>	<b>14,393</b>	<b>12,431</b>	<b>13,033</b>	<b>14,370</b>	<b>14,402</b>
$I_{a\bar{p}}(A)$	<b>10,365</b>	10,653	10,982	10,768	10,344	10,631	11,047	10,897
$I_{b\bar{p}}(A)$	<b>10,352</b>	10,639	10,964	10,750	10,331	10,617	10,774	10,402
$I_{c\bar{p}}(A)$	<b>10,352</b>	10,639	11,966	10,753	10,331	10,617	11,014	10,868
$I_{a\bar{q}}(A)$	<b>6,885</b>	6,896	6,758	6,135	6,865	6,876	6,685	6,013
$I_{b\bar{q}}(A)$	<b>6,893</b>	6,904	6,769	6,144	6,873	6,884	6,852	6,291
$I_{c\bar{q}}(A)$	<b>6,893</b>	6,904	6,768	6,143	6,873	6,884	6,705	6,030
$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	2,542	3,790	3,250	0,882	2,619	4,075	3,989
$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	2,542	3,548	3,048	0,882	2,686	3,433	3,221
$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	2,546	3,223	3,537	0,882	2,650	3,198	3,883
$S_{\alpha\beta}(kVA)$	4,739	4,832	4,823	4,635	4,740	4,834	4,824	4,640
$P_{\alpha\beta}(kW)$	<b>3,946</b>	<b>4,055</b>	<b>4,105</b>	<b>4,025</b>	<b>3,947</b>	<b>4,057</b>	<b>4,106</b>	<b>4,031</b>
$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	2,625	2,629	2,531	2,298	2,624	2,628	2,531	2,297
$H(kVA)$	0,000	0,969	1,309	1,244	0,337	1,030	1,334	1,351
$FP_{\alpha\beta}$	<b>0,833</b>	<b>0,839</b>	<b>0,851</b>	<b>0,868</b>	<b>0,833</b>	<b>0,839</b>	<b>0,851</b>	<b>0,869</b>
$DHT_{Ia}(\%)$	0,000	0,000	0,000	0,000	<b>1,439</b>	<b>1,534</b>	<b>0,000</b>	<b>2,150</b>
$DHT_{Ib}(\%)$	0,000	0,000	0,000	0,000	<b>1,439</b>	<b>1,476</b>	<b>2,272</b>	<b>5,281</b>
$DHT_{Ic}(\%)$	0,000	0,000	0,000	0,000	<b>1,439</b>	<b>1,464</b>	<b>0,000</b>	<b>2,964</b>

Fonte: Próprio autor.

O caso (A) da Tabela 3.5 é o único caso que as correntes no PAC são compostas somente por parcelas médias, sendo as parcelas oscilantes nulas ( $i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu} = 0$ ), as quais tornam a potência harmônica nula ( $H = 0$ ).

Em todos os outros casos existem as correntes ativas e reativas oscilantes, pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Portanto, além da potência real ( $P_{\alpha\beta}$ ) e a potência imaginária ( $Q_{\alpha\beta}$ ), também existe a potência harmônica ( $H$ ) que surge com a presença das parcelas oscilantes.

Da mesma forma com a CPT, o fator de potência da Teoria pq ficou abaixo da unidade para todos os casos ( $FP_{\alpha\beta 0} < 1$ ), devido a presença dos indutores no circuito.

As distorções harmônicas das correntes no PAC são diferentes de zero ( $DHT \neq 0$ ) para os casos (E), (F), (G) e (H) da Tabela 3.5, pelo fato das tensões serem distorcidas.

Comparando as Tabelas 3.4 e 3.5 é possível notar que para carga RL as correntes no PAC são equivalentes e com mesmas distorções harmônicas.

O caso (C), da Tabela 3.4 com a CPT, mostra que as parcelas de correntes que representam as não linearidades e os desbalanços da carga são nulas ( $I_{u\mu} + I_{v\mu} = 0$ ). Porém, o mesmo não ocorre para o mesmo caso da Teoria pq (caso C da Tabela 3.5). Isto mostra que, além da Teoria pq misturar desbalanços e não linearidade da carga nas parcelas oscilantes, também representa os desequilíbrios das tensões.

Para todos os casos com carga RL existem equivalência entre a potência ativa e a potência real, independente das características das tensões e da carga (2.41).

A potência aparente da Teoria pq ( $S_{\alpha\beta 0}$ ) é maior do que a potência aparente da CPT para todos os casos, com exceção do caso (A), que é o caso de tensão senoidal equilibrada e carga balanceada. Isso mostra que a proposta de cálculo da potência aparente da Teoria pq não considera desequilíbrios e distorções, ver em (2.62).

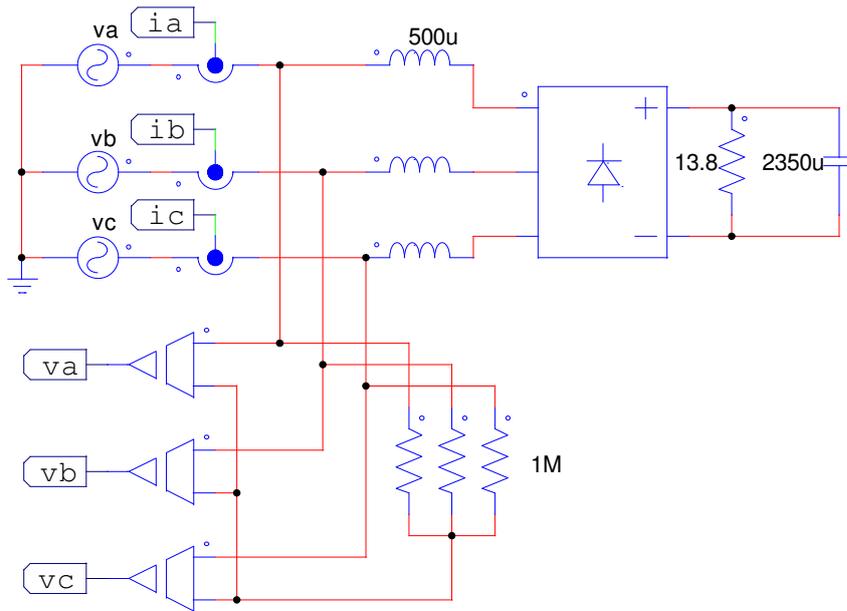
Os casos (A), (B), (C) e (D) da Tabela 3.5 mostram que a potência residual é nula ( $D = 0$ ), pelo fato de que para estes casos, as tensões são senoidais e a carga é linear. No entanto, a potência harmônica ( $H$ ) da Teoria pq só é nula ( $H = 0$ ) para o caso (A). Isto mostra que os desequilíbrios das tensões também são representados nas correntes oscilantes.

As teorias também divergem em relação ao fator de potência, principalmente pelo fato de que a potência harmônica (2.63), que é a potência que representa as não linearidades da carga, através de suas parcelas ativas e reativas oscilantes, não está sendo representada na proposta de cálculo do fator de potência, mostrada em (2.64).

### 3.1.3. Carga não linear balanceada e carga mista

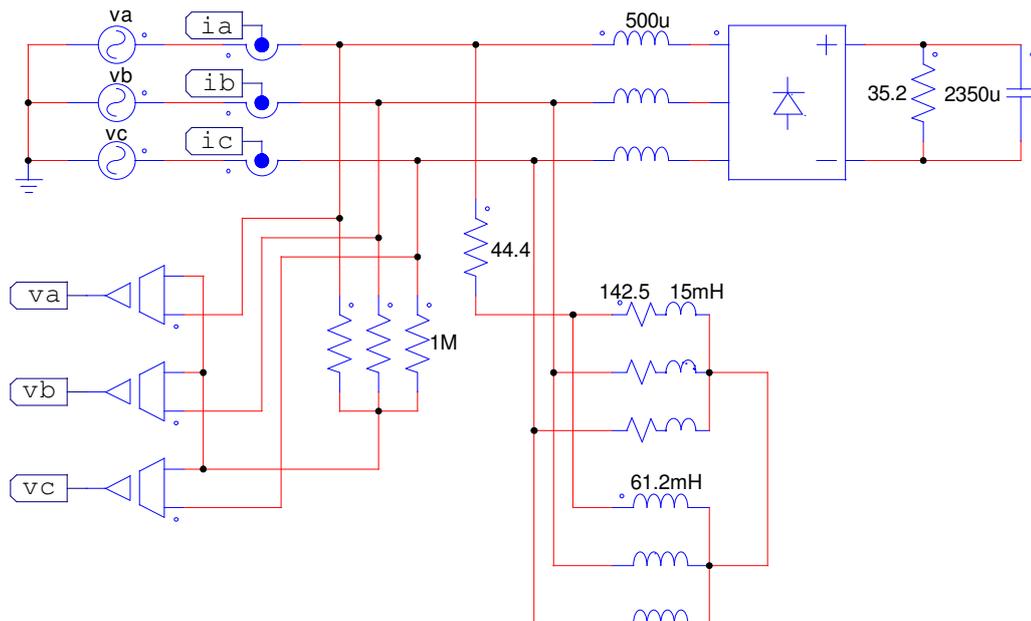
A Figura 3.17 mostra o circuito para a simulação de carga não linear balanceada e a Figura 3.18 para a simulação de carga mista<sup>6</sup> desbalanceada.

Figura 3.17 – Circuito trifásico com três condutores (3F), com carga não linear balanceada.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.18 – Circuito trifásico a três condutores (3F) com carga mista.

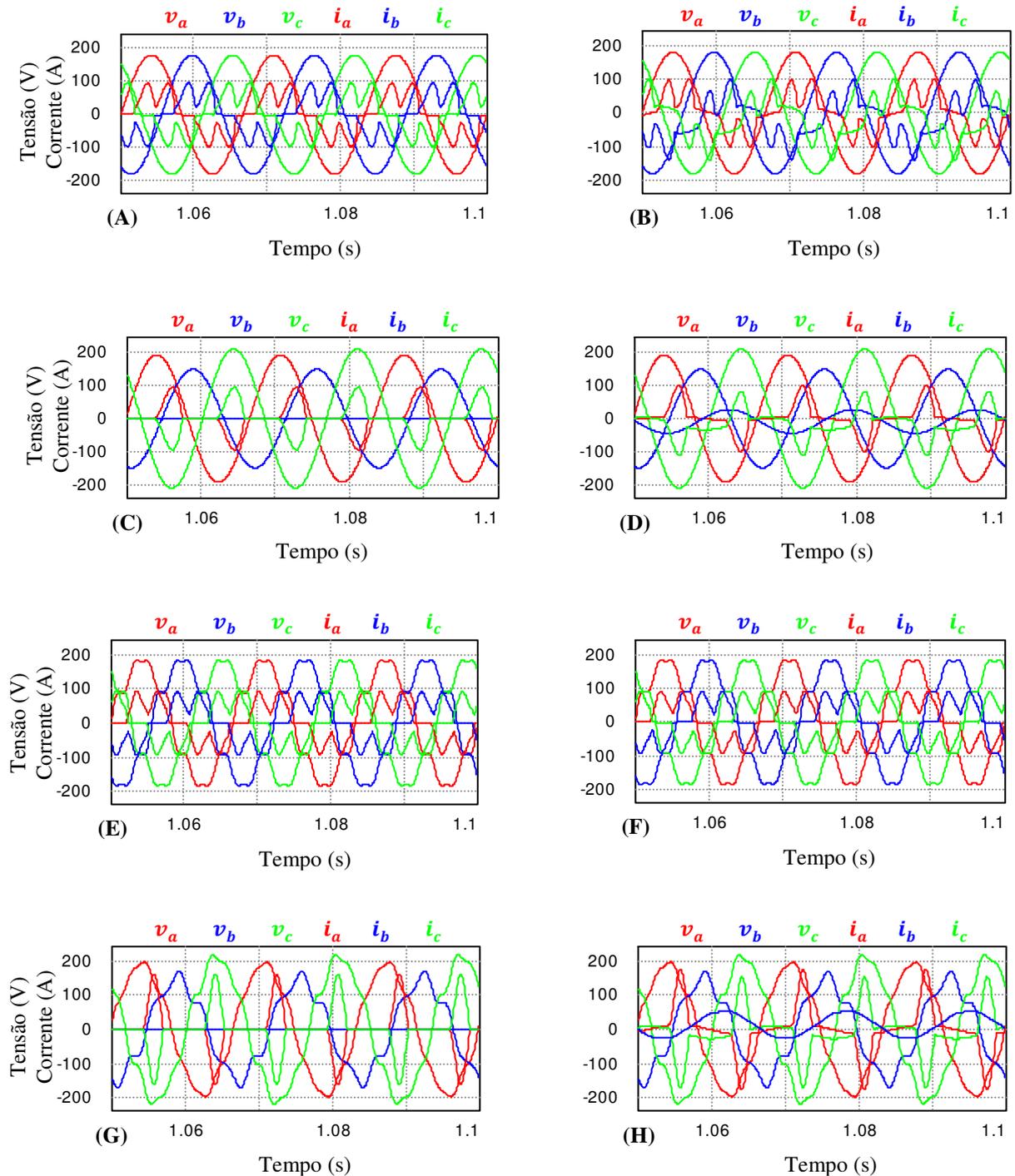


Fonte: Próprio autor.

<sup>6</sup> Refere-se ao conjunto de cargas lineares e não lineares ligadas em paralelo no PAC.

A Figura 3.19 mostra as tensões e correntes no PAC para todos os casos de simulação com a carga das Figuras 3.17 e 3.18. Para melhor visualização, as correntes de fase foram multiplicadas por três de seus valores reais. As Tabelas 3.6 e 3.7 apresentam os valores reais das correntes, sem o fator multiplicativo.

Figura 3.19 – Tensões e correntes (3x) no PAC para carga não linear balanceada e mista.



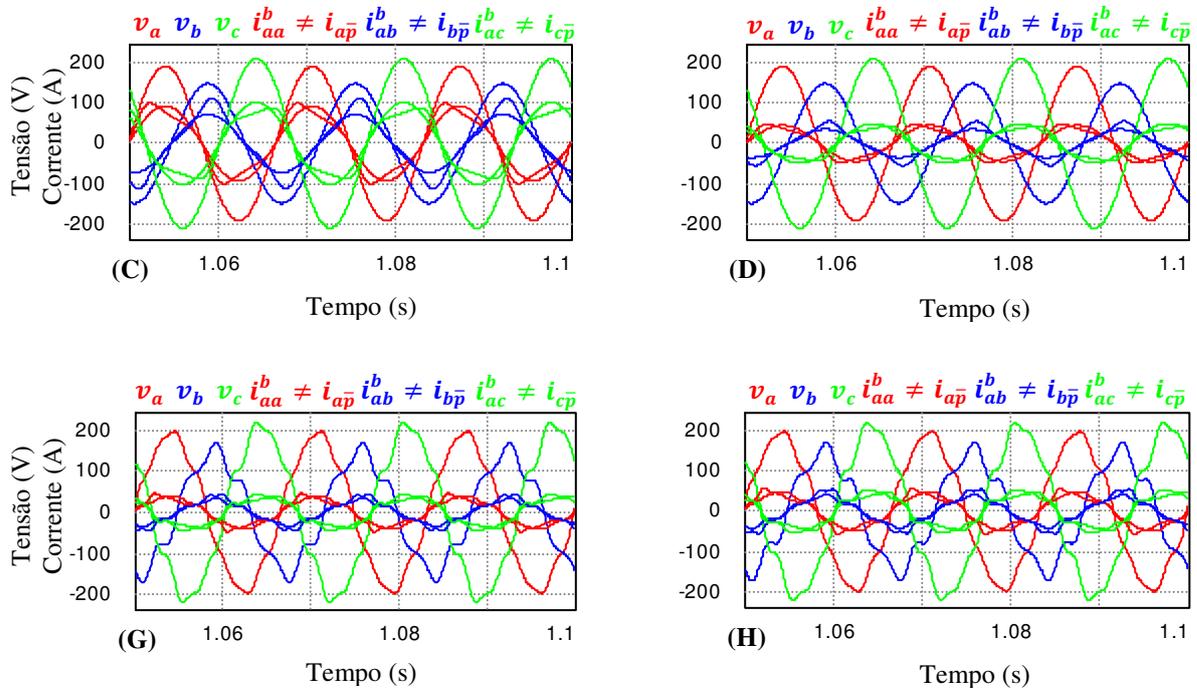
Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.19 mostra que as tensões e correntes no PAC são defasadas em todos os casos, devido a presença de elementos indutivos. Os indutores de  $500\mu\text{H}$  na entrada da carga não linear atuam como filtro para minimizar as distorções das correntes. As distorções das correntes são geradas pela carga não linear.

A Figura 3.20 mostra as correntes ativas balanceadas da CPT e as correntes ativas médias da Teoria pq para os casos com tensões desequilibradas. Os casos (A) e (B), apesar de não estarem explícitas, estas parcelas de correntes são equivalentes, pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. Já para os casos (E) e (F), as correntes são praticamente iguais pelo fato das tensões serem equilibradas, apesar de serem distorcidas.

A Figura 3.20 (C), (D), (G) e (H) mostra que não há equivalência entre estas parcelas de corrente pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas, as divergências ocorrem por causa das oscilações que aparecem nas correntes ativas médias da Teoria pq. Os comentários similares das cargas lineares são válidos para as cargas não lineares balanceadas e cargas mistas, em relação à norma quadrática instantânea das tensões  $(v_\alpha^2 + v_\beta^2)$  e as equações em (3.1) e (3.2).

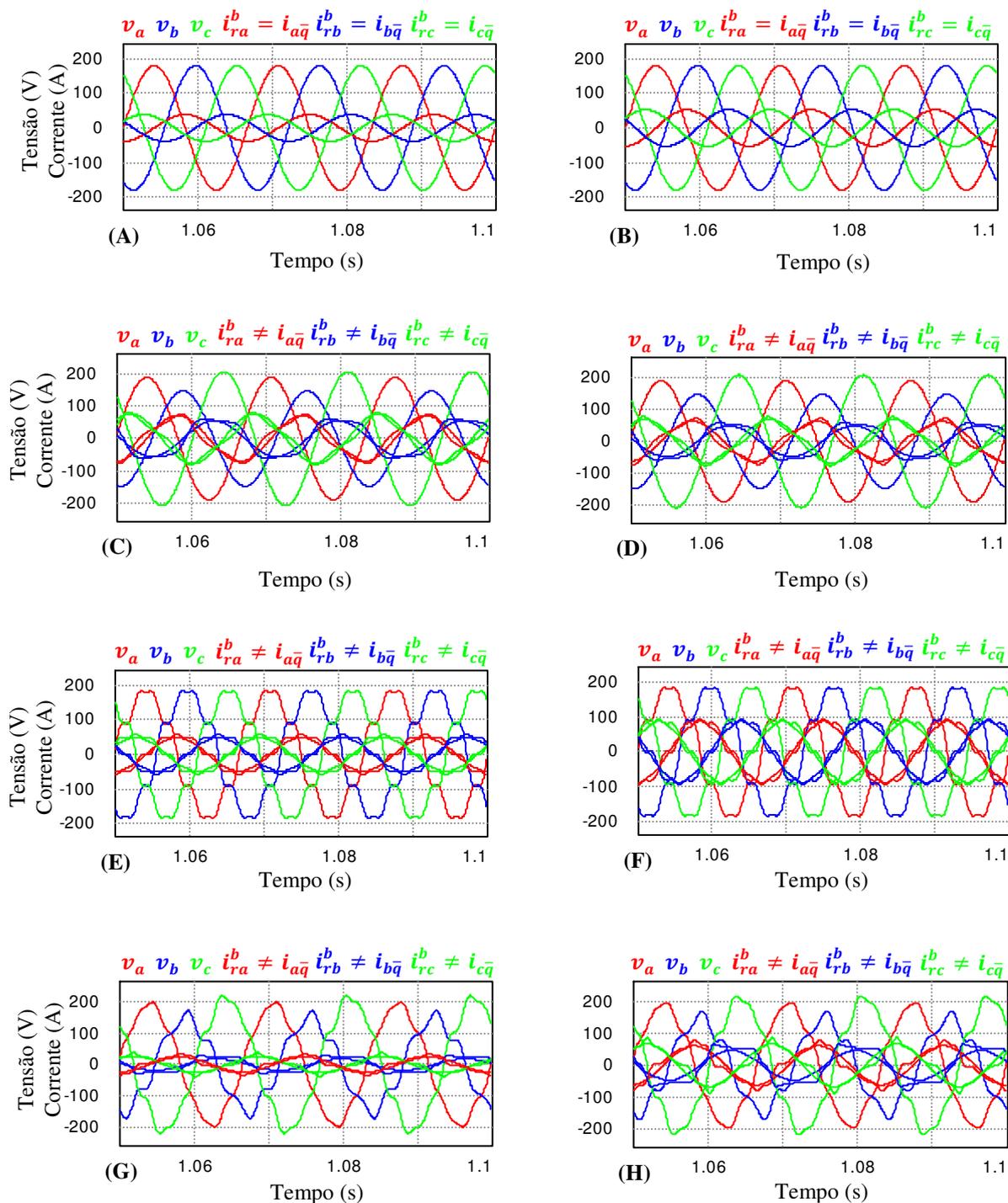
Figura 3.20 – Correntes ativas balanceadas, correntes ativas médias e tensões para carga não linear balanceada e carga mista.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.21 mostra as correntes reativas balanceadas da CPT e as correntes reativas médias da Teoria pq para todos os casos simulados com carga não linear balanceada e carga mista.

Figura 3.21 – Correntes reativas balanceadas da CPT, correntes reativas médias da Teoria pq e tensões de fase para carga não linear e mista.



A Figura 3.21 mostra que só existe equivalência entre estas parcelas de corrente para os casos (A) e (B), pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. Nos outros casos não há equivalência, pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Comentários similares aos das cargas lineares, sobre a norma quadrática instantânea das tensões  $(v_\alpha^2 + v_\beta^2)$ , são válidos para carga não linear balanceada e carga mista. No entanto, os casos (E) e (F) da Figura 3.21 mostra que a diferença entre as parcelas de corrente não são desprezíveis, de forma que tais correntes não poderiam ser consideradas iguais, como foram consideradas nas cargas R e RL.

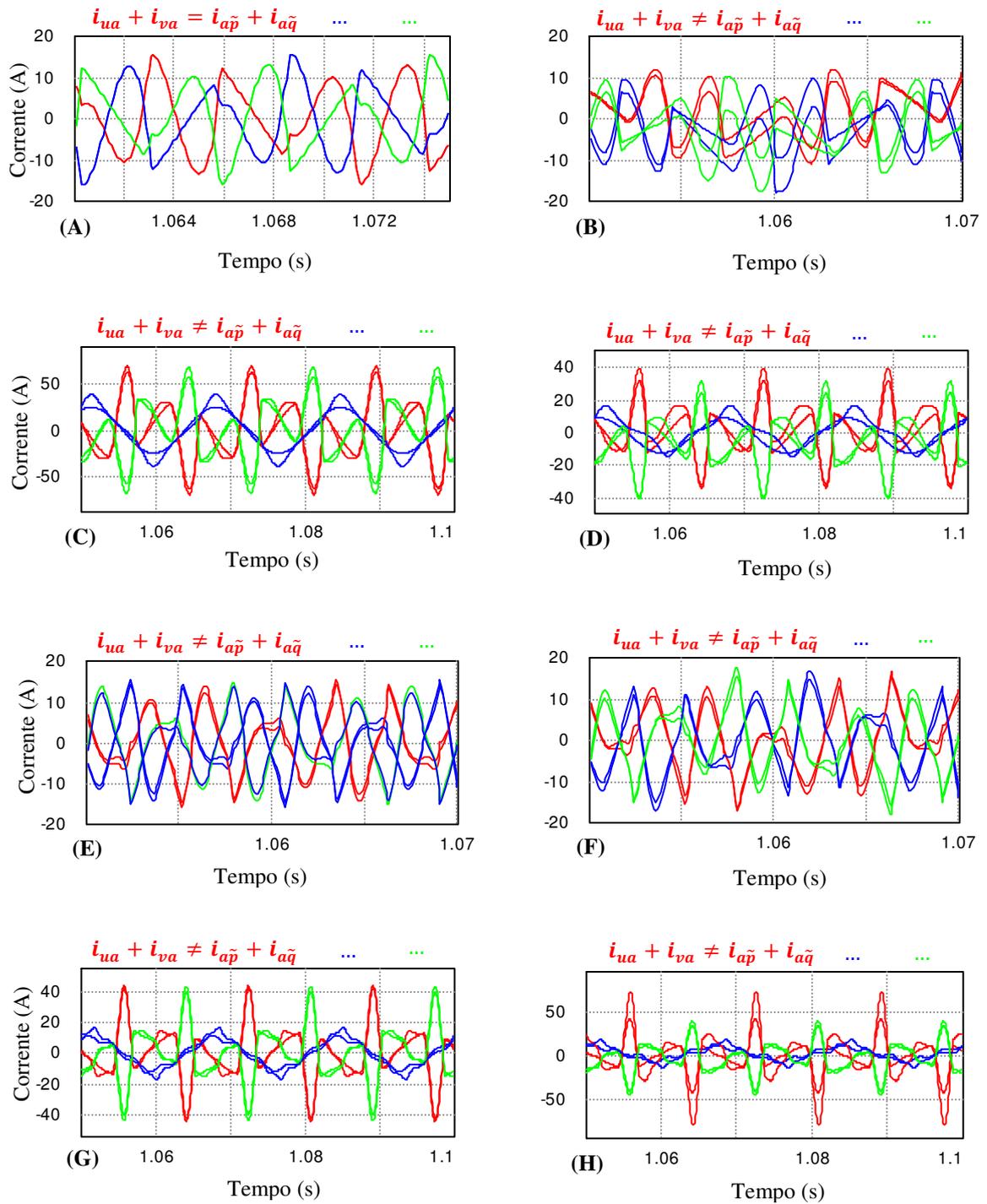
A Figura 3.22 mostra as correntes desbalanceadas e residuais da CPT e as correntes oscilantes da Teoria pq, para todos os casos com carga não linear balanceada e carga mista.

Figura 3.22 mostra que existe equivalência somente para o caso (A), isso ocorre pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas e a carga balanceada. Para todos os outros casos não há equivalência, pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Estas divergências ocorrem pelo fato destas parcelas de corrente da Teoria pq serem equacionadas através da norma quadrática instantânea das tensões  $(v_\alpha^2 + v_\beta^2)$ .

A Figura 3.23 mostra a energia reativa instantânea ( $w\omega$ ) da CPT e a potência imaginária instantânea da Teoria pq, para todos os casos simulados com carga não linear balanceada e carga mista. Os casos (A) e (B) mostram que estas parcelas de potência são equivalentes pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. Os casos (C), (D), (E), (F), (G) e (H) mostram que não existe equivalência entre estas parcelas de potência, pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Em outras palavras, estas divergências ocorrem pelo fato de que a relação entre as tensões e correntes no PAC não são lineares.

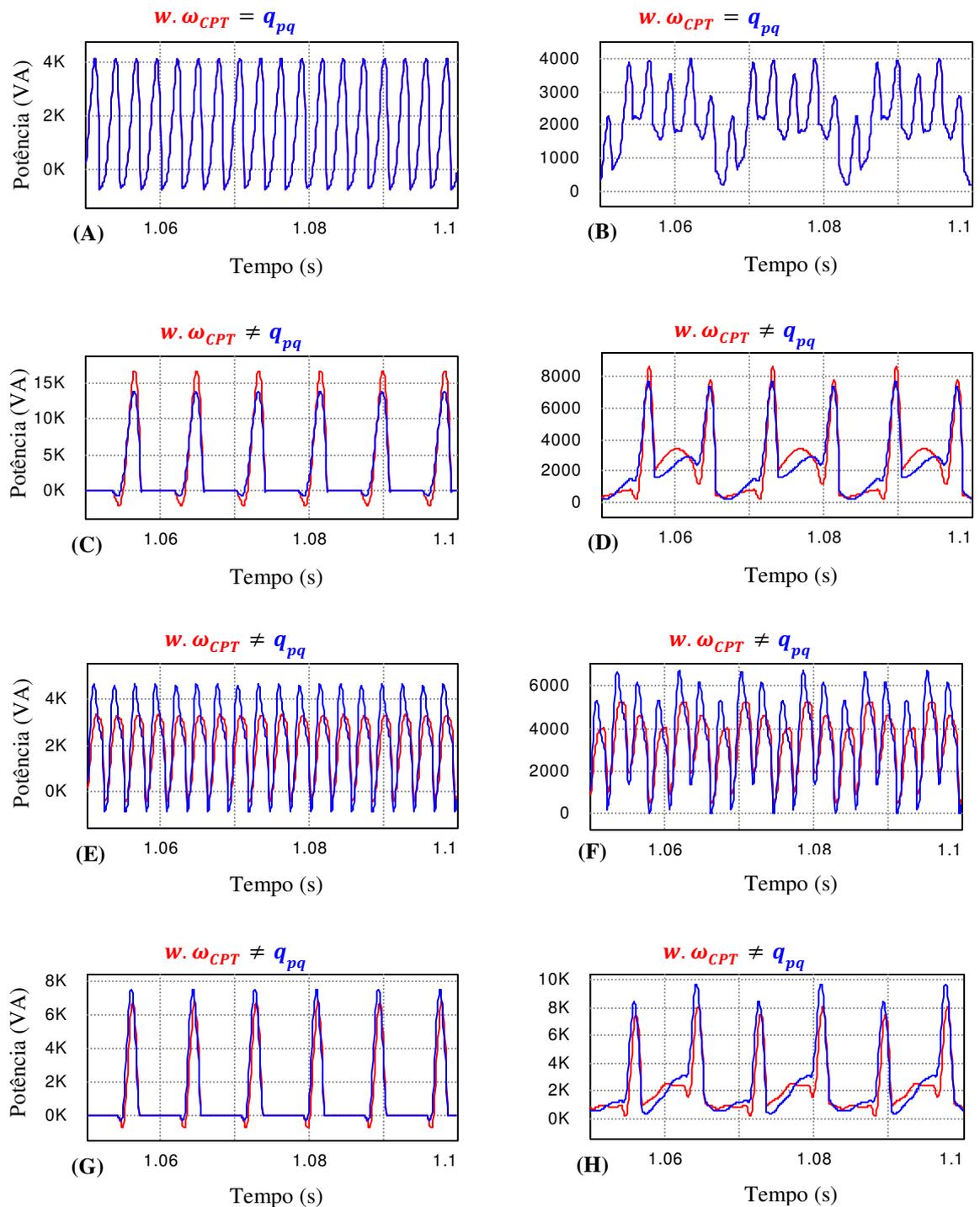
Apesar de não estarem explícitas, a potência ativa instantânea da CPT e a potência real instantânea da Teoria pq são equivalente para todos os casos, independente das características das tensões e da carga (2.41). Sendo mostrados seus valores nas Tabelas 3.6 e 3.7, respectivamente.

Figura 3.22 – Correntes desbalanceadas e residuais da CPT e correntes oscilantes da Teoria pq para carga não linear balanceada e carga mista.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.23 – Energia reativa instantânea e potência imaginária instantânea para carga não linear balanceada e carga mista.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.6 mostra os valores eficazes das correntes de fase, as potências médias, o fator de potência e as distorções harmônicas das correntes através da CPT, para todos os casos de carga não linear balanceada e carga mista.

Tabela 3.6 – Dados de todos os casos para carga não linear balanceada e mista com a CPT.

CASOS	A	B	C	D	E	F	G	H
$I_a(A)$	<b>18,544</b>	<b>10,593</b>	<b>41,660</b>	<b>21,210</b>	<b>17,805</b>	<b>20,631</b>	<b>20,156</b>	<b>22,553</b>
$I_b(A)$	<b>18,566</b>	<b>12,277</b>	<b>0,186</b>	<b>6,358</b>	<b>17,820</b>	<b>22,346</b>	<b>0,000</b>	<b>6,305</b>
$I_c(A)$	<b>18,607</b>	<b>12,299</b>	<b>41,664</b>	<b>19,357</b>	<b>17,873</b>	<b>19,038</b>	<b>20,156</b>	<b>20,738</b>
$I_{aa}^b(A)$	16,363	7,925	21,744	10,964	15,289	17,054	9,112	11,032
$I_{ab}^b(A)$	16,343	7,915	16,857	8,500	15,271	17,034	7,138	8,642
$I_{ac}^b(A)$	16,343	7,915	23,801	12,002	15,271	17,034	9,991	12,097
$I_{ra}^b(A)$	3,876	5,670	7,181	6,279	4,920	8,575	2,391	6,107
$I_{rb}^b(A)$	3,881	5,677	5,585	4,883	4,927	8,587	1,860	4,752
$I_{rc}^b(A)$	3,881	5,677	7,871	6,882	4,927	8,587	2,621	6,694
$I_{va} + I_{ua}(A)$	7,902	6,151	29,464	13,703	7,754	8,072	16,305	15,896
$I_{vb} + I_{ub}(A)$	7,911	6,753	17,737	6,271	7,760	8,131	7,378	6,371
$I_{vc} + I_{uc}(A)$	7,917	6,768	28,534	13,802	7,773	7,946	15,548	15,379
$A(kVA)$	<b>7,074</b>	<b>4,349</b>	<b>13,209</b>	<b>6,593</b>	<b>6,860</b>	<b>7,968</b>	<b>6,426</b>	<b>7,051</b>
$P(kW)$	<b>6,229</b>	<b>3,185</b>	<b>8,161</b>	<b>4,115</b>	<b>5,878</b>	<b>6,557</b>	<b>3,449</b>	<b>4,176</b>
$Q(kVA)$	1,478	2,019	2,700	2,360	1,895	3,302	0,904	2,301
$D(kVA)$	3,012	2,018	8,083	4,185	2,985	2,997	4,725	4,817
$U(kVA)$	0,023	0,789	5,921	1,875	0,161	0,782	2,500	1,935
$\lambda$	0,880	0,674	0,618	0,624	0,857	0,823	0,537	0,848
$DHT_{Ia}(\%)$	<b>46,968</b>	<b>57,643</b>	<b>76,62</b>	<b>75,851</b>	<b>43,889</b>	<b>36,563</b>	<b>106,294</b>	<b>85,492</b>
$DHT_{Ib}(\%)$	<b>46,891</b>	<b>63,179</b>	<b>465,012</b>	<b>49,296</b>	<b>43,840</b>	<b>33,313</b>	<b>17,303</b>	<b>47,135</b>
$DHT_{Ic}(\%)$	<b>46,811</b>	<b>63,228</b>	<b>76,44</b>	<b>92,231</b>	<b>43,734</b>	<b>39,964</b>	<b>106,294</b>	<b>104,209</b>

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.6 mostra que existe a presença de todas as parcelas de correntes em todos os casos, inclusive as correntes residuais (não linearidades da carga), que até em então eram nulas pelo fato das cargas serem lineares. Portanto, em todos os casos existem as potências que não geram trabalho, as quais são: a potência residual ( $D$ ), a potência de desbalanço ( $U$ ) e potência reativa ( $Q$ ).

O fator de potência ficou abaixo da unidade para todos os casos, pois a presença de cargas não lineares aumentam as distorções fazendo com que diminua o fator de potência.

Houve aumento excessivo das distorções harmônicas nas correntes do PAC em todos os casos, devido as não linearidades da carga, se comparado com as cargas lineares. Pois, em cargas R e RL, as distorções das correntes no PAC eram somente impostas pelas tensões. Neste caso, também estão presentes as distorções impostas pelas tensões. Os casos mais

críticos presentes na da Tabela 3.6 são os casos com tensões desequilibradas e/ou distorcidas (C, D, G e H).

Da mesma forma com as cargas lineares, os valores médios da potência ativa e da potência real são iguais (2.41).

A Tabela 3.7 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, fator de potência e as distorções harmônicas com a Teoria pq, para todos os casos de carga não linear balanceada e carga mista.

Tabela 3.7 – Dados com carga não linear balanceada e mista para todos os casos com a Teoria pq.

CASOS	A	B	C	D	E	F	G	H
$I_a(A)$	<b>18,544</b>	<b>10,593</b>	<b>41,660</b>	<b>21,210</b>	<b>17,805</b>	<b>20,631</b>	<b>20,156</b>	<b>22,553</b>
$I_b(A)$	<b>18,566</b>	<b>12,277</b>	<b>0,186</b>	<b>6,358</b>	<b>17,820</b>	<b>22,346</b>	<b>0,000</b>	<b>6,305</b>
$I_c(A)$	<b>18,607</b>	<b>12,299</b>	<b>41,664</b>	<b>19,357</b>	<b>17,873</b>	<b>19,038</b>	<b>20,156</b>	<b>20,738</b>
$I_{a\bar{p}}(A)$	16,363	8,368	21,831	11,008	15,290	17,056	9,324	11,288
$I_{b\bar{p}}(A)$	16,342	8,357	21,795	10,990	15,271	17,034	8,900	10,775
$I_{c\bar{p}}(A)$	16,342	8,357	21,800	10,993	15,271	17,034	9,298	11,258
$I_{a\bar{q}}(A)$	3,877	5,295	6,903	6,511	5,834	9,449	2,980	6,827
$I_{b\bar{q}}(A)$	3,881	5,302	6,914	6,521	5,842	9,461	3,118	7,143
$I_{c\bar{q}}(A)$	3,881	5,302	6,912	6,520	5,842	9,461	2,988	6,846
$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	7,902	5,688	33,681	15,762	7,098	7,249	17,709	17,798
$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	7,910	5,690	22,860	8,578	7,114	6,929	9,439	8,553
$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	7,916	5,687	33,391	15,988	7,117	6,875	17,457	17,384
$S_{\alpha\beta0}(kVA)$	<b>6,402</b>	<b>3,771</b>	<b>8,560</b>	<b>4,783</b>	<b>6,293</b>	<b>7,499</b>	<b>3,632</b>	<b>4,924</b>
$P_{\alpha\beta}(kW)$	<b>6,229</b>	<b>3,185</b>	<b>8,161</b>	<b>4,115</b>	<b>5,878</b>	<b>6,557</b>	<b>3,449</b>	<b>4,176</b>
$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	1,478	2,019	2,586	2,439	2,247	3,639	1,138	2,608
$H(kVA)$	3,011	2,166	12,370	5,770	2,742	2,707	6,556	6,463
$FP_{\alpha\beta0}$	0,973	0,845	0,953	0,860	0,934	0,874	0,950	0,848
$DHT_{Ia}(\%)$	<b>46,968</b>	<b>57,643</b>	<b>76,62</b>	<b>75,851</b>	<b>43,889</b>	<b>36,563</b>	<b>106,294</b>	<b>85,492</b>
$DHT_{Ib}(\%)$	<b>46,891</b>	<b>63,179</b>	<b>465,012</b>	<b>49,296</b>	<b>43,840</b>	<b>33,313</b>	<b>111,472</b>	<b>47,135</b>
$DHT_{Ic}(\%)$	<b>46,811</b>	<b>63,228</b>	<b>76,44</b>	<b>92,231</b>	<b>43,734</b>	<b>39,964</b>	<b>106,294</b>	<b>104,209</b>

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.7 mostra que existe todas as parcelas de correntes e potências, inclusive com um aumento significativo das parcelas oscilantes, em função da presença da carga não linear (o que é esperado).

Nota-se nos casos que existe desequilíbrio de tensão (C), (D), (G) e (H) da Tabela 3.7, que a potência harmônica ( $H$ ) é maior do que a potência real ( $P$ ), pelo fato do aumento excessivo das distorções harmônicas geradas pela carga.

Analisando as Tabelas 3.6 e 3.7 é possível verificar que as correntes no PAC são equivalentes, assim como a potência ativa média da CPT e a potência real média da Teoria pq,

a equivalência irá ocorrer independente das características das tensões, pois são calculadas através dos valores instantâneos das tensões e correntes em cada fase (2.41).

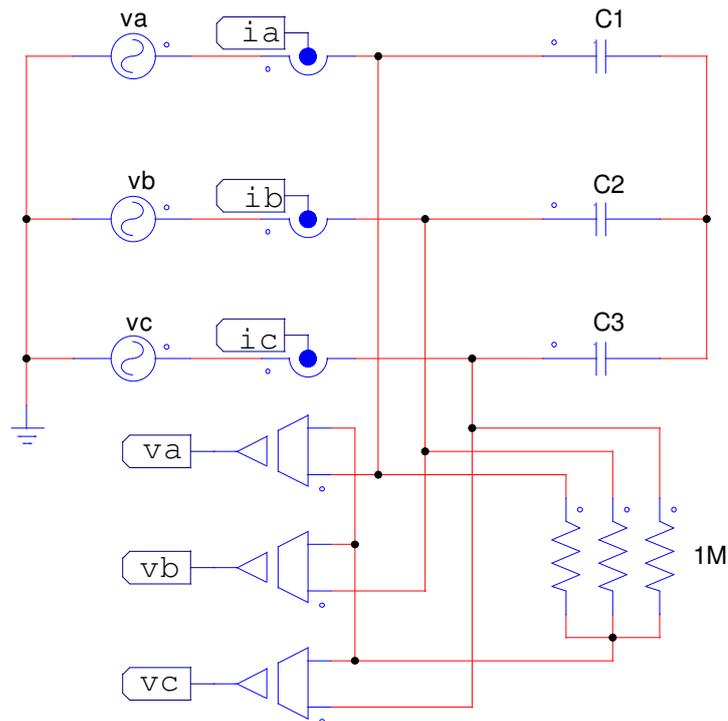
O fator de potência das duas teorias diverge pelo fato de que na proposta de cálculo do fator de potência da Teoria pq não são considerados os desequilíbrios e as distorções geradas pela carga, como mostra em (2.62), (2.63) e (2.64). Nota-se que o fator de potência da Teoria pq tem valores mais elevados do que da potência da CPT.

A potência aparente da Teoria pq ( $S_{\alpha\beta o}$ ) é maior do que a potência aparente da CPT ( $A$ ), em todos os casos analisados. Isso ocorre pelo de que na proposta de cálculo da potência aparente da Teoria pq não são considerados os desequilíbrios e distorções, que são representados na potência harmônica ( $H$ ), conforme indicado em (2.62) e (2.63).

### 3.1.4. Carga capacitiva (C)

A Figura 3.24 mostra o circuito para a simulação de carga capacitiva. Para carga balanceada  $C1=C2=C3=220\mu\text{F}$  e desbalanceada  $C1= 470\mu\text{F}$ ,  $C2= 330\mu\text{F}$  e  $C3= 100\mu\text{F}$ .

Figura 3.24 – Circuito trifásico a três condutores com carga capacitiva.



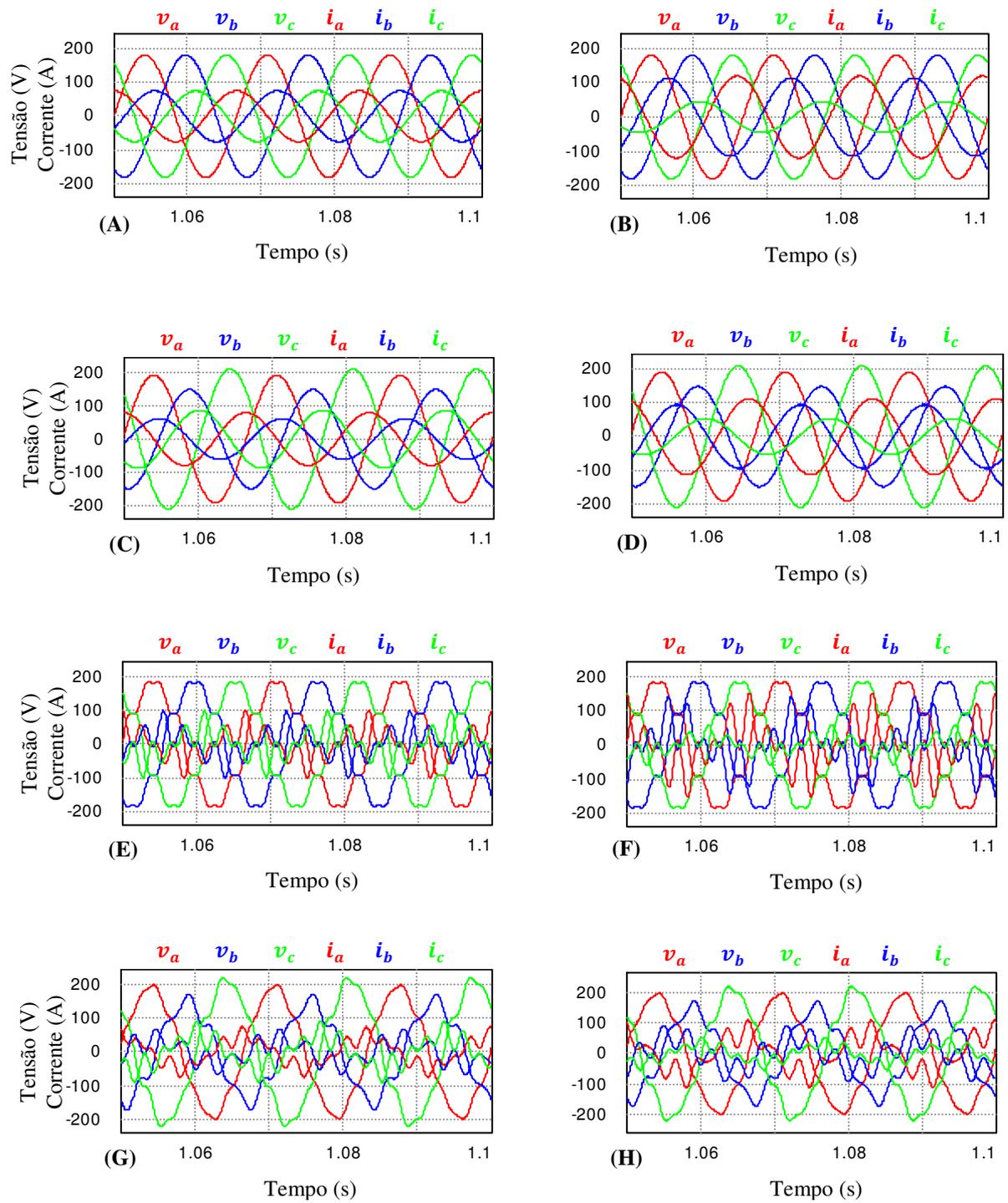
Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.25 mostra as tensões e correntes no PAC com carga capacitiva para todos os casos simulados.

A Figura 3.25 (A), (B), (C) e (D) mostra que as tensões e correntes no PAC são senoidais. Porém, os casos (E), (F), (G) e (H) mostram que estas são distorcidas, sendo que as distorções das correntes são impostas pelas tensões da fonte.

Nota-se em todos os casos que as tensões e correntes não estão em fase pelo fato da carga ser puramente capacitiva.

Figura 3.25 – Tensões e correntes (5x) no PAC para carga capacitiva.



Fonte: Próprio autor.

Apesar de não estarem explícitas, as correntes ativas balanceadas da CPT e as correntes ativas médias da Teoria pq são nulas para todos os casos simulados, isso ocorre pelo fato de que não existe transferência de potência útil da fonte para a carga.

A Figura 3.26 mostra as correntes reativas balanceadas da CPT e as correntes reativas médias da Teoria pq para todos os casos simulados. Os casos (A) e (B) mostram que as correntes reativas são equivalentes e senoidais, pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. Os casos (C) e (D) mostram que as correntes reativas balanceadas da CPT são senoidais, enquanto que as correntes reativas médias da Teoria pq são distorcidas, pelo fato de que as tensões são desequilibradas. Pois, em carga capacitiva com a Teoria pq, tensões desequilibradas fazem com que a relação entre as tensões e correntes no PAC sejam não linear.

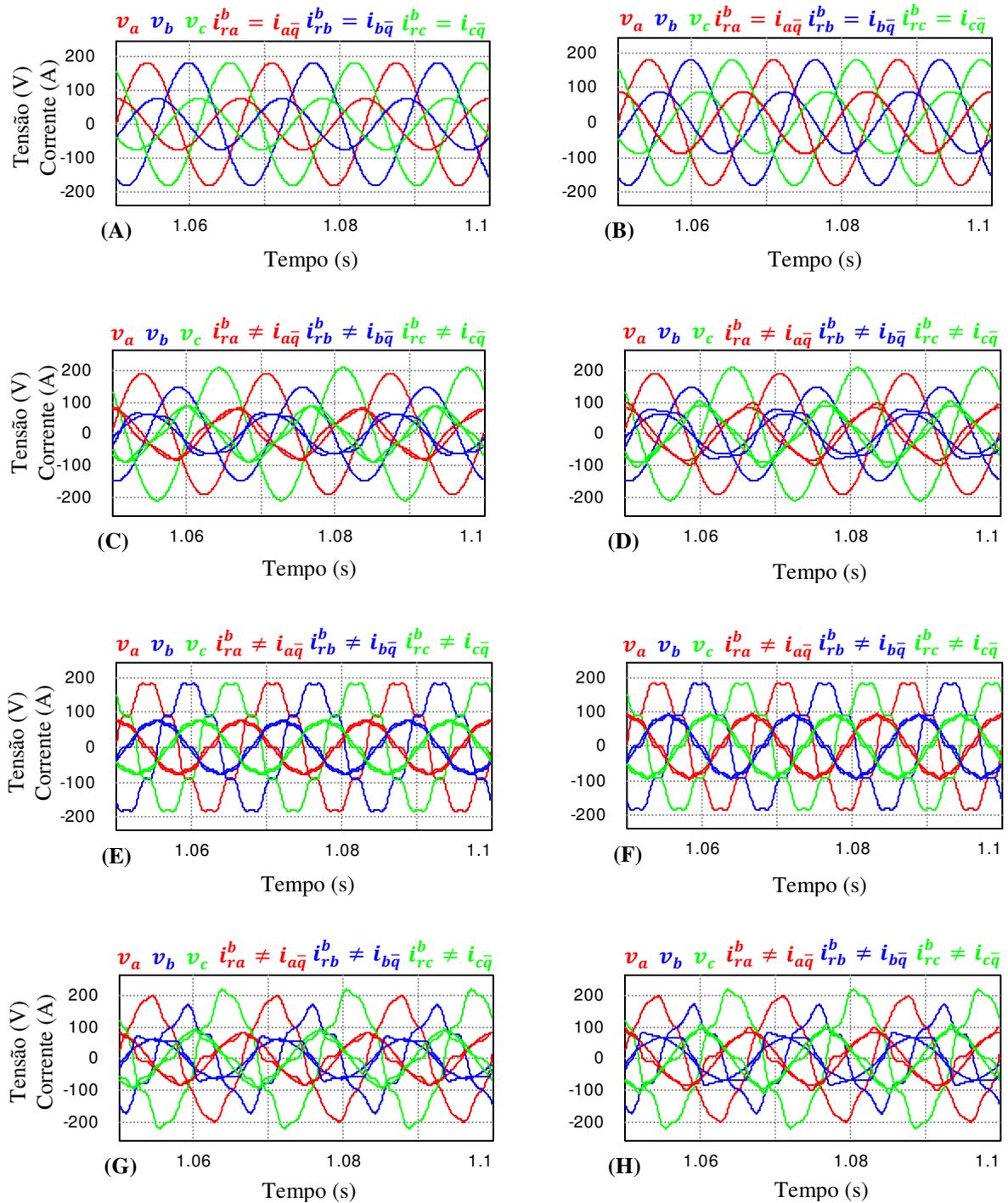
A Figura 3.26 (E), (F), (G) e (H) mostra que as correntes reativas não são equivalentes, pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. As divergências ocorrem entre estas parcelas pelo fato que a Teoria pq utilizar a norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) no cálculo das correntes reativas (2.50 a 2.55) e com isso, surgem oscilações que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões. Os comentários similares das cargas lineares podem ser considerados para carga não linear balanceada e carga mista.

A Figura 3.27 mostra as correntes residuais e desbalanceadas da CPT e as correntes ativas e reativas oscilantes da Teoria pq, para todos os casos simulados com carga capacitiva. Os casos (A) e (B) mostram que estas parcelas são equivalentes pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. No entanto não existe equivalência para os casos (C), (D), (E), (F), (G) e (H), pelo fato das tensões serem desequilibradas e/ou distorcidas. Como a carga é puramente capacitiva e não gera harmônicas, a presença de correntes residuais ocorre pelo fato de que em tensões distorcidas, a relação entre as tensões e correntes no PAC não são lineares, apesar da carga ser. Estas não linearidades são representadas nas parcelas oscilantes da Teoria pq, as quais aparecem tanto para tensões desequilibradas, quanto para tensões distorcidas.

Figura 3.27 (C) mostra que estas parcelas de correntes da CPT são nulas, pelo fato da carga ser puramente capacitiva balanceada ( $i_{v\mu} + i_{u\mu} = 0$ ), enquanto que estas parcelas de correntes da Teoria pq não são nulas ( $i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu} \neq 0$ ), pelo fato que em casos de tensões desequilibradas surgem oscilações nas correntes da Teoria pq com a utilização da norma quadrática instantânea das tensões nos cálculos das correntes oscilantes ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ), o qual é

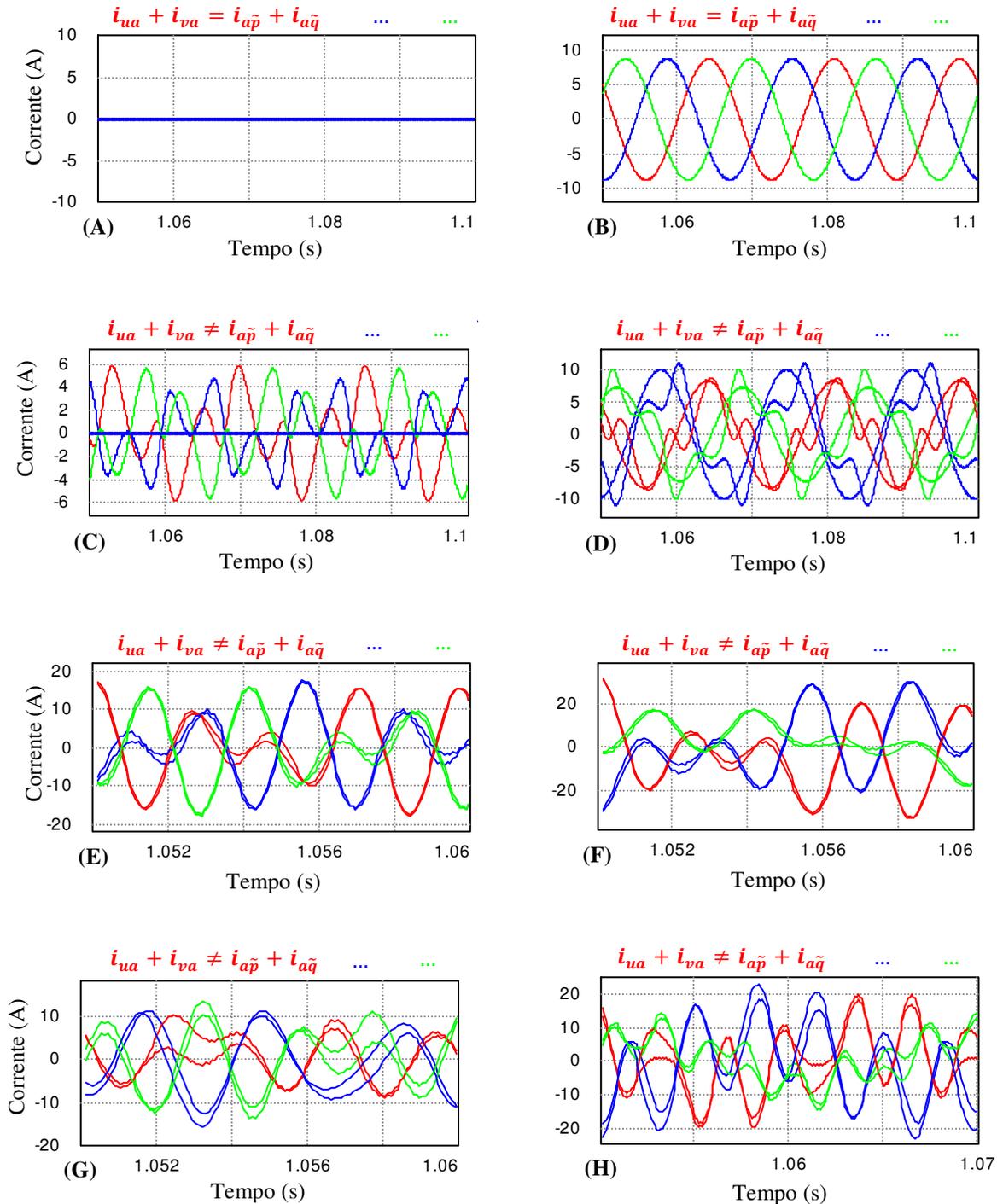
oscilatório para tensões desequilibradas e/ou distorcidas, fazendo com que estas parcelas de correntes sejam divergentes.

Figura 3.26 – Correntes reativas balanceadas, correntes reativas médias e tensões no PAC para carga capacitiva.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.27 – Correntes desbalanceadas e residuais da CPT e correntes oscilantes da Teoria pq para carga capacitiva.

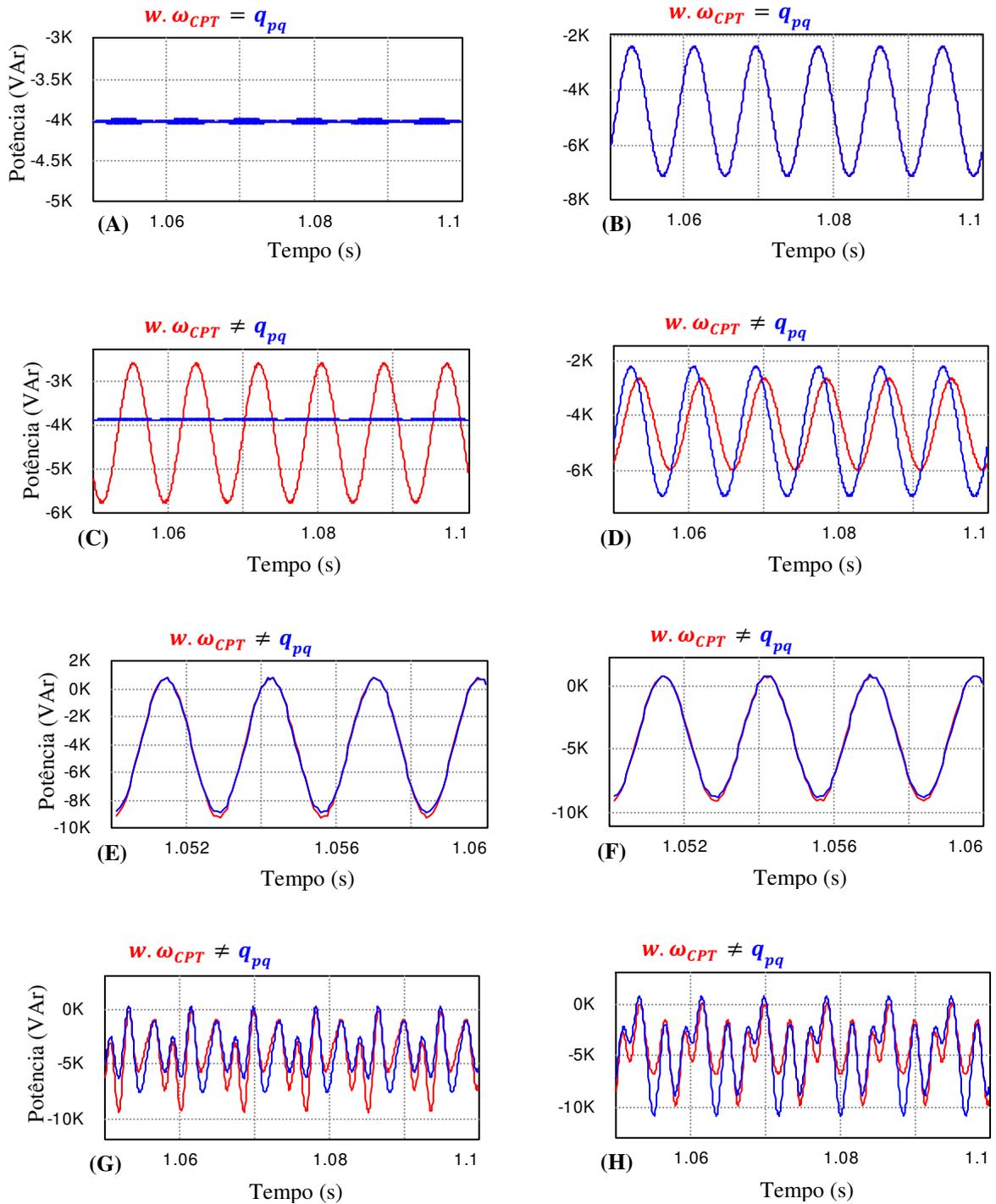


Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.28 mostra a energia reativa instantânea da CPT e a potência imaginária instantânea da Teoria pq para os casos com carga capacitiva. Os casos (A) e (B) mostram que estas parcelas são equivalentes, pelo fato das tensões serem senoidais equilibradas. Para todos os outros casos não há equivalência entre estas parcelas, pelo fato das tensões serem

desequilibradas e/ou distorcidas. Estas divergências ocorrem pelo fato de que tais potências dependem das correntes reativas balanceadas e médias, sendo que as parcelas médias se tornam oscilatórias com tensões desequilibradas e/ou distorcidas.

Figura 3.28 - Energia reativa instantânea e potência instantânea imaginária para carga capacitiva.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.8 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, o fator de potência e as distorções harmônicas das correntes no PAC através da CPT.

Tabela 3.8 – Dados com carga capacitiva para todos os casos com a CPT.

CASOS	A	B	C	D	E	F	G	H
$I_a(A)$	10,525	16,868	11,107	15,865	13,862	13,862	12,062	17,864
$I_b(A)$	10,539	16,028	8,639	13,200	13,914	13,914	11,223	16,242
$I_c(A)$	10,539	6,418	12,174	7,539	13,911	13,911	14,026	8,575
$I_{aa}^b(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{ab}^b(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{ac}^b(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{ra}^b(A)$	10,525	12,497	11,107	11,520	10,731	12,742	11,227	11,660
$I_{rb}^b(A)$	10,539	12,513	8,639	8,959	10,745	12,759	8,735	9,072
$I_{rc}^b(A)$	10,539	12,513	12,174	12,627	10,745	12,759	12,307	12,781
$I_{va} + I_{ua}(A)$	<b>0,000</b>	6,159	<b>0,000</b>	5,854	8,825	15,453	4,607	9,949
$I_{vb} + I_{ub}(A)$	<b>0,000</b>	6,153	<b>0,000</b>	7,060	8,851	14,822	6,895	11,561
$I_{vc} + I_{uc}(A)$	<b>0,000</b>	6,161	<b>0,000</b>	5,136	8,848	8,281	6,778	6,569
$A(kVA)$	4,013	5,311	4,176	4,932	5,355	7,086	4,884	5,790
$P(kW)$	<b>0,000</b>							
$Q(kVA)$	4,013	4,765	4,176	4,331	4,133	4,907	4,245	4,408
$D(kVA)$	0,000	0,003	0,003	0,003	3,404	4,511	2,416	2,907
$U(kVA)$	<b>0,000</b>	2,346	<b>0,000</b>	2,356	<b>0,000</b>	2,404	3,251	2,374
$\lambda$	<b>0,000</b>							
$DHT_{Ia}(\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	86,044	86,049	42,549	51,949
$DHT_{Ib}(\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	86,090	86,067	82,744	71,700
$DHT_{Ic}(\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	86,071	86,073	56,979	53,990

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.8 mostra os valores eficazes das correntes e os valores médios das potências com a CPT. As correntes  $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$  são as correntes de fase no PAC, são compostas pelas correntes reativas e residuais. Pois, as correntes ativas balanceadas são nulas para todos os casos, as quais não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga, apesar de existir potência ativa instantânea.

Os casos (A) e (C) da Tabela 3.8 mostram que as correntes no PAC são compostas somente pelas parcelas reativas balanceadas ( $I_a = I_{ra}^b$ ,  $I_b = I_{rb}^b$  e  $I_c = I_{rc}^b$ ). Isso significa que para estes casos só existe circulação de reativos na rede ( $A = Q$ ), todas as outras parcelas de potências são nulas. Nos outros casos existem correntes que representam os desbalanços e/ou as não linearidades do circuito. Portanto, além dos reativos ( $Q$ ), contém a potência de desbalanço ( $U$ ) e/ou a potência residual ( $D$ ).

A Tabela 3.8 mostra que as distorções harmônicas são nulas para os casos com tensões senoidais (A, B, C e D), como esperado, pois, a fonte é senoidal e a carga é linear. No entanto, não são nulas para os casos com tensões não senoidais (E, F, G e H), devido as não linearidades na relação entre as tensões e correntes no PAC.

O fator de potência é nulo para todos os casos, pelo fato de ser calculado através da potência ativa, que é nula ( $P = 0$ ) para todos os casos.

A Tabela 3.9 mostra os valores eficazes das correntes e os valores médios das potências através da Teoria pq.

Tabela 3.9 – Dados com carga capacitiva para todos os casos com a Teoria pq.

CASOS	A	B	C	D	E	F	G	H
$I_a(A)$	10,525	16,868	11,107	15,865	13,862	13,862	12,062	17,864
$I_b(A)$	10,539	16,028	8,639	13,200	13,914	13,914	11,223	16,242
$I_c(A)$	10,539	6,418	12,174	7,539	13,911	13,911	14,026	8,575
$I_{a\bar{p}}(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{b\bar{p}}(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{c\bar{p}}(A)$	<b>0,000</b>							
$I_{a\bar{q}}(A)$	10,525	12,497	10,332	12,268	10,632	12,624	10,110	12,004
$I_{b\bar{q}}(A)$	10,538	12,512	10,348	12,287	10,645	12,640	10,578	12,560
$I_{c\bar{q}}(A)$	10,538	12,512	10,346	12,284	10,645	12,640	10,138	12,038
$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	6,159	2,962	4,760	8,946	15,616	5,588	9,620
$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	6,153	2,622	6,193	8,973	14,965	7,826	11,572
$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	<b>0,000</b>	6,161	3112	5,392	8,970	8,286	7,247	6,248
$S_{\alpha\beta0} (kVA)$	<b>3,993</b>	<b>4,765</b>	<b>3,870</b>	<b>4,595</b>	<b>4,094</b>	<b>4,861</b>	<b>3,863</b>	<b>4,587</b>
$P (kW)$	<b>0,000</b>							
$Q (kVA)$	<b>3,993</b>	<b>4,765</b>	<b>3,870</b>	<b>4,595</b>	<b>4,094</b>	<b>4,861</b>	<b>3,863</b>	<b>4,587</b>
$H (kVA)$	0,000	2,346	1,109	2,040	3,434	5,136	2,706	3,701
$FP_{\alpha\beta0}$	<b>0,000</b>							
$DHT_{Ia} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	86,044	86,049	42,549	51,949
$DHT_{Ib} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	86,090	86,067	82,744	71,700
$DHT_{Ic} (\%)$	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	<b>0,000</b>	86,071	86,073	56,979	53,990

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.9 mostra que correntes ativas médias são nulas ( $I_{\bar{p}} = 0$ ) para todos os casos, isso faz com que a potência real média também seja nula ( $P_{\alpha\beta} = 0$ ), apesar de existir potência real instantânea.

O caso (A) da Tabela 3.9 mostra que as correntes no PAC são compostas somente pelas parcelas reativas médias ( $I_a = I_{a\bar{q}}$ ,  $I_b = I_{b\bar{q}}$  e  $I_c = I_{c\bar{q}}$ ). Isso significa que só existe circulação de reativos na rede ( $Q_{\alpha\beta} \neq 0$ ). Sendo as outras parcelas de potência nulas ( $H = 0$ ,  $P_{\alpha\beta} = 0$ ).

Os casos (B), (C), (D), (E), (F), (G) e (H) da Tabela 3.9 mostram que a potência harmônica é diferente de zero ( $H \neq 0$ ), pelo fato de existir desbalanços e/ou não linearidade. No entanto, a potência imaginária é igual a potência aparente ( $Q_{\alpha\beta} = S_{\alpha\beta 0}$ ), em todos estes casos. Isso ocorre pelo fato de que na proposta de cálculo da potência aparente não é considerada a potência harmônica, ver em (2.62) e (2.63).

Nota-se que o fator de potência é nulo ( $FP_{\alpha\beta 0} = 0$ ) para todos os casos da Tabela 3.9, pelo fato da potência real média ser nula ( $P_{\alpha\beta} = 0$ ).

A Tabela 3.9 mostra que as distorções harmônicas não são nulas para os casos com tensões distorcidas (E, F, G e H), pelo fato da relação entre as tensões e correntes no PAC não serem lineares.

A análise comparativa entre as Tabelas 3.8 e 3.9 mostra que existe equivalência entre as parcelas de correntes ativas balanceadas da CPT com as parcelas de correntes ativas médias, as quais são nulas, pelo fato da carga ser puramente capacitiva.

A potência ativa média da CPT e a potência real média da Teoria pq são equivalentes e nulas para todos os casos, também pelo fato da carga ser puramente capacitiva, como isso não existe transferência de energia útil da fonte para a carga.

As parcelas de potência que representam as não linearidades são bastante distintas, principalmente pelo fato que a CPT separa as não linearidades e desbalanço em parcelas de correntes distintas, sendo que a Teoria pq mistura tais distúrbios nas parcelas ativas e reativas oscilantes.

A equivalência para todos os termos de corrente e potência só existe para o caso (A), pelo fato das tensões serem senoidais e a carga balanceada.

Nota-se que há equivalência entre o fator de potência da CPT com o da Teoria pq e, que é nulo para todos os casos, pelo fato das potências ativa e real serem nulas.

### 3.2. Circuitos trifásicos com quatro condutores (3F-N)

Esta seção apresenta uma análise comparativa entre a Teoria de Potência Conservativa e a Teoria de Potências Instantâneas para circuitos trifásicos com quatro condutores (3F-N).

Com a presença do quarto condutor, pode surgir tensão ( $v_0$ ) e corrente ( $i_0$ ) de sequência zero. As parcelas de potências da CPT são as mesmas, independente se o circuito é com três ou quatro condutores (3F e 3F-N). Porém, a Teoria pq trata de maneira isolada a presença de corrente no neutro. Pois, pode surgir a potência de sequência zero ( $p_0 = v_0 i_0$ ), que até então não tinha sido discutida nos circuitos a três condutores (3F), devido a ausência do condutor de retorno ( $i_0 = 0$ ), o que faz com que a potência de sequência zero seja nula ( $p_0 = 0$ ), assim como em casos com tensões equilibradas no PAC ( $v_0 = 0$ ).

O objetivo desta seção é fazer a análise comparativa entre as teorias para verificar as correspondências e divergências para circuitos trifásicos a quatro condutores (3F-N).

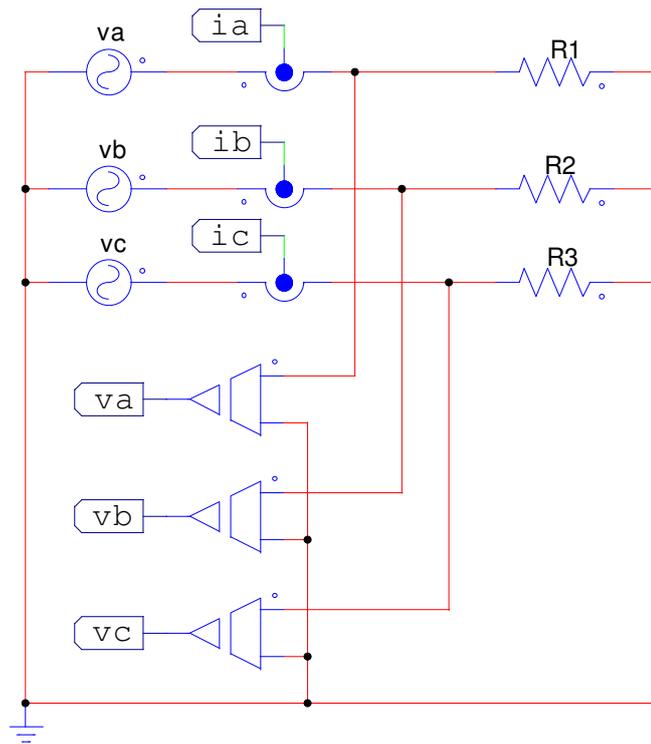
São estudados casos com carga resistiva, resistiva-indutiva, capacitiva e não linear. Com o objetivo de também avaliar os efeitos provocados pela presença do quarto condutor, que será usado como referência para a medição das tensões no PAC.

- Carga resistiva desbalanceada com tensões não senoidais desequilibradas;
- Carga RL desbalanceada com tensões senoidais desequilibradas;
- Carga capacitiva desbalanceada com tensões não senoidais equilibrada;
- Carga não linear desbalanceada com tensões senoidais desequilibradas.

### 3.2.1. Carga resistiva desbalanceada com tensões não senoidais desequilibradas

A Figura 3.30 mostra o circuito para carga resistiva desbalanceada, considerando que  $R_1=11,8\Omega$ ,  $R_2=5,9\Omega$  e  $R_3=8,5\Omega$  [2].

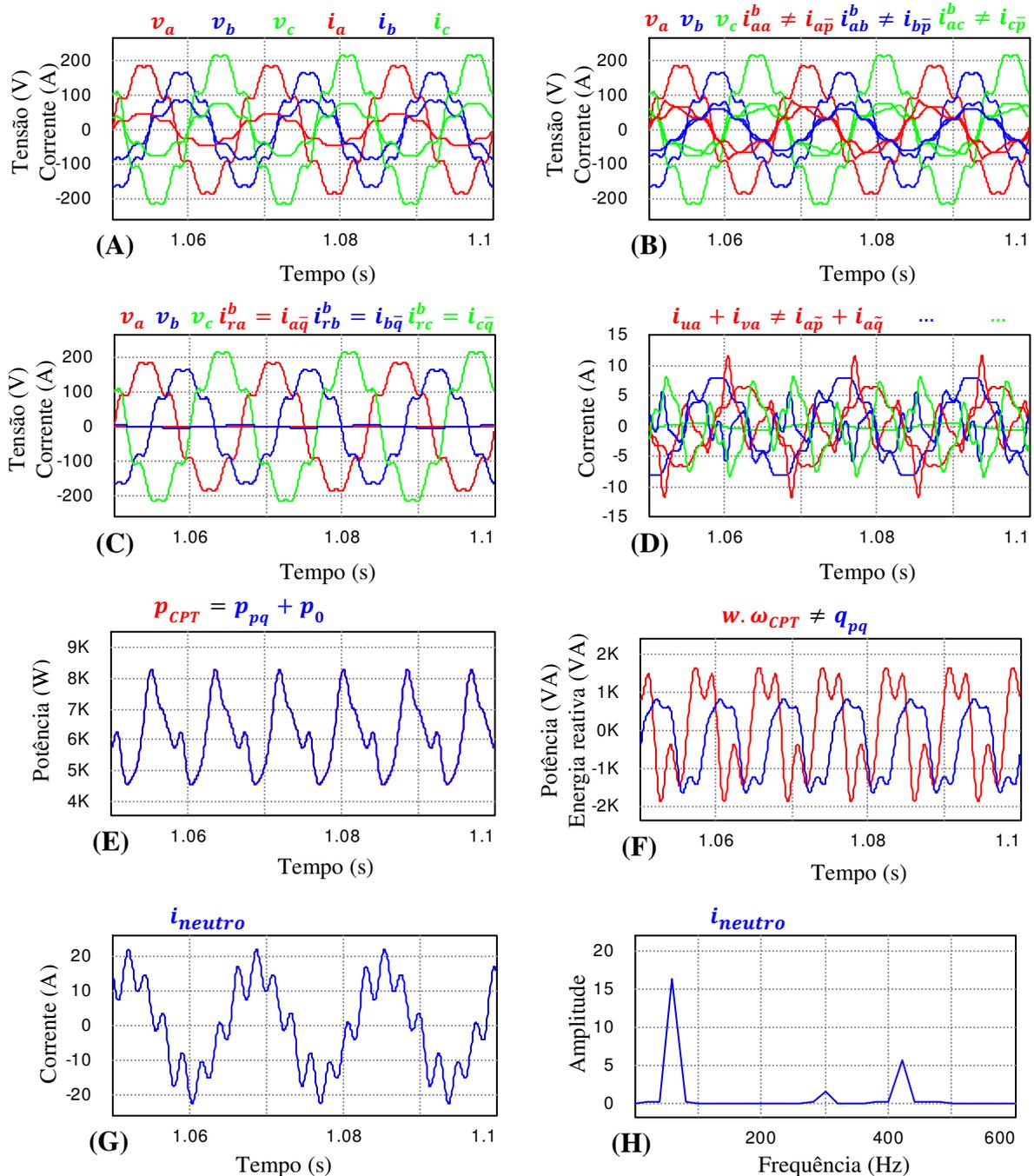
Figura 3.30 – Circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga resistiva.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.31 mostra as tensões e correntes no PAC. Assim como as parcelas de corrente e potência para as duas teorias. Também mostra a corrente no neutro ( $i_{neutro}$ ) e seu espectro de frequências.

Figura 3.31 – Valores instantâneos de correntes, potências e corrente no neutro para carga resistiva desbalanceada com tensões não senoidais desequilibradas.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.31 (A) mostra que as tensões ( $v_\mu$ ) e correntes ( $i_\mu$ ) no PAC são distorcidas e desequilibradas. As distorções das correntes são impostas pelas tensões não senoidais desequilibradas. Os desequilíbrios das correntes são impostos pelas tensões e pela carga.

A Figura 3.31 (B) mostra que as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu}$ ) não são equivalentes, pelo fato da relação entre as tensões e correntes no PAC serem não lineares. Assim como em circuitos a três condutores (3F), tensões desequilibradas e/ou distorcidas fazem surgir oscilações nas correntes ativas médias da Teoria pq que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões. Isso ocorre pelo fato da norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ), mostradas em (3.1), terem valores oscilatórios.

A Figura 3.31 (C) mostra que as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) são equivalentes e nulas pelo fato da carga ser puramente resistiva.

A Figura 3.31 (D) mostra as correntes desbalanceadas e residuais ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) da CPT e as correntes oscilantes ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ) da Teoria pq. Nota-se que não existe equivalência entre estas parcelas de correntes, pelo fato das tensões serem distorcidas e desequilibradas, as quais fazem surgir oscilações nas correntes da Teoria pq, que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões. As não linearidades da carga com a CPT são nulas ( $i_{v\mu} = 0$ ), pelo fato da carga não gerar distorções. No entanto existem as correntes desbalanceadas ( $i_{u\mu} \neq 0$ ). A Teoria pq além de misturar os desbalanços e as não linearidades da carga nas parcelas oscilantes, também mistura os distúrbios das tensões nestas mesmas parcelas, o que faz surgir às divergências entre estas parcelas de correntes.

A Figura 3.31 (E) mostra a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) e a potência real instantânea da Teoria pq ( $p$ ). Como o circuito é a quatro condutores (3F-N), existe circulação de corrente pelo neutro, pelo fato das tensões serem desequilibradas e a carga desbalanceada. Então, surge a corrente e a tensão de sequência zero e, por consequência surge a potência de sequência zero ( $p_0 = v_0 i_0$ ). Portanto, a potência instantânea é soma da potência real com a potência de sequência zero ( $p = p_{real} + p_0$ ), assumindo equivalência com a potência ativa da CPT. Na ausência de tensão e/ou corrente de sequência zero, a potência ativa e a potência real são equivalentes.

A Figura 3.31 (F) mostra que a energia reativa instantânea da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ) não são equivalentes pelo fato das tensões serem distorcidas e desequilibradas. Isso ocorre devido as não linearidades na relação entre as tensões e correntes no PAC.

A Figura 3.31 (G) mostra que existe circulação de corrente pelo neutro ( $i_{neutro}$ ) pelo fato das tensões serem desequilibradas e a carga ser desbalanceada. Em (H) mostra-se o espectro de frequência da corrente no neutro. Nota-se que são as mesmas frequências presentes nas tensões.

A Tabela 3.10 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, fator de potência e as distorções harmônicas das correntes para carga resistiva com quatro condutores (3F-N).

Tabela 3.10 – Dados para carga resistiva a quatro condutores (3F-N).

CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	10,878	$I_a(A)$	10,878
$I_b(A)$	19,326	$I_c(A)$	19,326
$I_c(A)$	17,534	$I_c(A)$	17,534
$I_{aa}^b(A)$	15,435	$I_{a\bar{p}}(A)$	16,339
$I_{ab}^b(A)$	13,710	$I_{b\bar{p}}(A)$	15,596
$I_{ac}^b(A)$	17,920	$I_{c\bar{p}}(A)$	16,295
$I_{ra}^b(A)$	0,000	$I_{a\bar{q}}(A)$	0,777
$I_{rb}^b(A)$	0,000	$I_{b\bar{q}}(A)$	0,777
$I_{rc}^b(A)$	0,000	$I_{c\bar{q}}(A)$	0,777
$I_{va} + i_{ua}(A)$	4,556	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	4,431
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	5,616	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	3,227
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	0,386	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	4,466
$I_{neutro}(A)$	12,320	$I_{neutro} A$	12,320
$A(kVA)$	6,427	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	6,219
$P(kW)$	6,212	$P_{\alpha\beta} + P_0(kW)$	6,212
$Q(kVA)$	0,000	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	0,295
$D(kVA)$	0,000	$H(kVA)$	1,537
$U(kVA)$	1,646	$P_0(kVA)$	0,168
$\lambda$	0,9667	$FP_{\alpha\beta 0}$	0,997
$THD_{Ia}(\%)$	14,026	$THD_{Ia}(\%)$	14,026
$THD_{Ib}(\%)$	14,026	$THD_{Ib}(\%)$	14,026
$THD_{Ic}(\%)$	14,026	$THD_{Ic}(\%)$	14,026

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.10 mostra que existem divergências entre as parcelas de corrente das teorias. O que mais chama a atenção é o fato das correntes reativas balanceadas da CPT serem nulas e as correntes reativas médias da Teoria pq não serem. Isso ocorre pelo fato das tensões serem não senoidais desequilibradas e a carga desbalanceada.

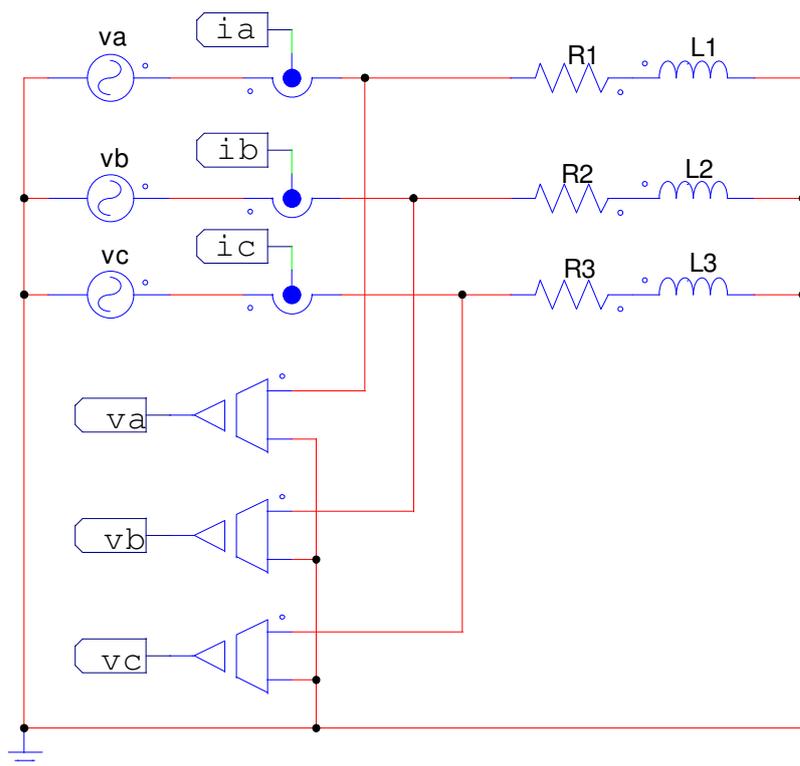
Nota-se na Tabela 3.10 que a potência útil da Teoria pq é dada pela soma das potências real e de sequência zero, as quais são iguais a potência ativa da CPT. Porém, não existe equivalência entre as outras parcelas de potência.

O fator de potência também é divergente entre as teorias, principalmente pelo fato que na proposta de cálculo com a Teoria pq não é considerado desequilíbrio das tensões e não linearidades do circuito.

### 3.2.2. Carga RL desbalanceada com tensões senoidais desequilibradas

A Figura 3.32 mostra o circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga resistiva-indutiva, sendo que  $R_1=11,8\Omega$  e  $L_1=20\text{mH}$ ,  $R_2=5,9\Omega$  e  $L_2=10\text{mH}$ ,  $R_3=8,5\Omega$  e  $L_3=15\text{mH}$  [2].

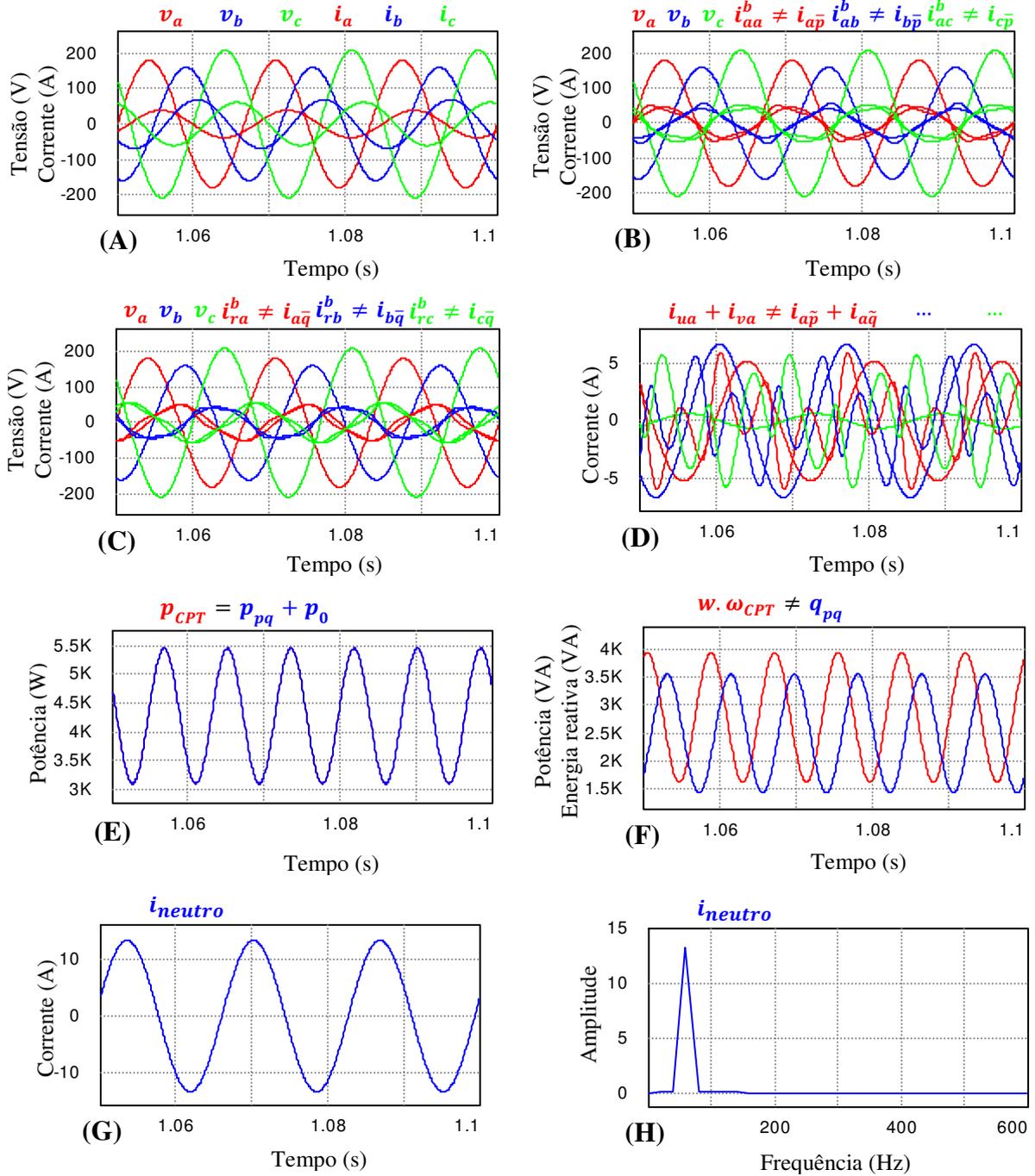
Figura 3.32 – Circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga RL.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.5 mostra as tensões, correntes, potências e corrente no neutro para carga resistiva-indutiva.

Figura 3.33 – Valores instantâneos de correntes, potências e corrente no neutro para carga RL desbalanceada com tensões senoidais desequilibradas.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.33 (A) mostra que as tensões ( $v_\mu$ ) e correntes ( $i_\mu$ ) no PAC são senoidais desequilibradas, bem como não estão em fase, pelo fato da carga ser indutiva.

A Figura 3.33 (B) mostra que as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{p\mu}$ ) não são equivalentes. As parcelas da CPT são senoidais e estão em fase com suas respectivas tensões de fase. Porém, as parcelas da Teoria pq são distorcidas e defasadas. Tais distorções aparecem devido às tensões serem desequilibradas. Pois, a Teoria pq usa a norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) no cálculo das correntes. Sendo esta norma oscilatória com a presença de tensões desequilibradas e/ou distorcidas. Na CPT a norma eficaz é constante independentemente das condições das tensões.

A Figura 3.33 (C) mostra que as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{q\mu}$ ) não são equivalentes, também pelo fato das tensões serem desequilibradas.

A Figura 3.33 (D) mostra as correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{p\mu} + i_{q\mu}$ ). Sendo as não linearidades são nulas com a CPT ( $i_{v\mu} = 0$ ). No entanto, estão presentes as parcelas desbalanceadas ( $i_{u\mu}$ ) e que são senoidais. O mesmo não ocorre com as parcelas da Teoria pq, estas parcelas são distorcidas e surgem pelo fato das tensões serem desequilibradas.

A Figura 3.33 (E) mostra a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) e a potência real e de sequência zero instantânea da Teoria pq ( $p + p_0$ ). Como o circuito é a quatro condutores (3F-N), existe circulação de corrente pelo neutro, pelo fato das tensões serem desequilibradas e a carga desbalanceada, o que gera tensão e corrente de sequência zero, dando origem a potência de sequência zero ( $p_0 = v_0 i_0$ ). Portanto, a potência instantânea da Teoria pq é a soma da potência real com a potência de sequência zero ( $p = p_{real} + p_0$ ), as quais são equivalentes com a potência ativa da CPT.

A Figura 3.33 (F) mostra a energia reativa instantânea da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ), as quais não são equivalentes pelo fato das tensões serem desequilibradas. Isto ocorre devido às parcelas de potência dependem das correntes reativas balanceadas e médias. Como existem divergências entre estas parcelas de correntes, também existem divergências entre estas parcelas de potência.

A Figura 3.33 (G) mostra que existe circulação de corrente pelo neutro ( $i_{neutro}$ ) e em (H), mostra o espectro de frequência. Nota-se que só existe a frequência fundamental, pelo fato das tensões serem senoidais e a carga linear.

A Tabela 3.11 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, corrente no neutro, o fator de potência e as distorções harmônicas das correntes no PAC para carga RL a quatro condutores (3F-N), para as duas teorias.

Tabela 3.11 – Dados para carga RL a quatro condutores (3F-N).

CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	9,072	$I_a(A)$	9,072
$I_b(A)$	16,139	$I_c(A)$	16,139
$I_c(A)$	14,438	$I_c(A)$	14,438
$I_{aa}^b(A)$	10,743	$I_{a\bar{p}}(A)$	11,238
$I_{ab}^b(A)$	9,544	$I_{b\bar{p}}(A)$	11,219
$I_{ac}^b(A)$	12,470	$I_{c\bar{p}}(A)$	11,222
$I_{ra}^b(A)$	6,970	$I_{a\bar{q}}(A)$	6,642
$I_{rb}^b(A)$	6,212	$I_{b\bar{q}}(A)$	6,642
$I_{rc}^b(A)$	8,101	$I_{c\bar{q}}(A)$	6,642
$I_{va} + i_{ua}(A)$	3,735	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	2,997
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	4,749	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	3,008
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	0,500	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	3,287
$I_{neutro}(A)$	9,487	$I_{neutro} A$	9,487
$A(kVA)$	5,285	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	4,952
$P(kW)$	4,281	$P_{\alpha\beta} + P_0(kW)$	4,281
$Q(kVA)$	2,782	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	2,488
$D(kVA)$	0,000	$H(kVA)$	1,176
$N(kVA)$	1,363	$P_0(kVA)$	0,080
$\lambda$	0,810	$FP_{\alpha\beta 0}$	0,865
$THD_{Ia}(\%)$	0,000	$THD_{Ia}(\%)$	0,000
$THD_{Ib}(\%)$	0,000	$THD_{Ib}(\%)$	0,000
$THD_{Ic}(\%)$	0,000	$THD_{Ic}(\%)$	0,000

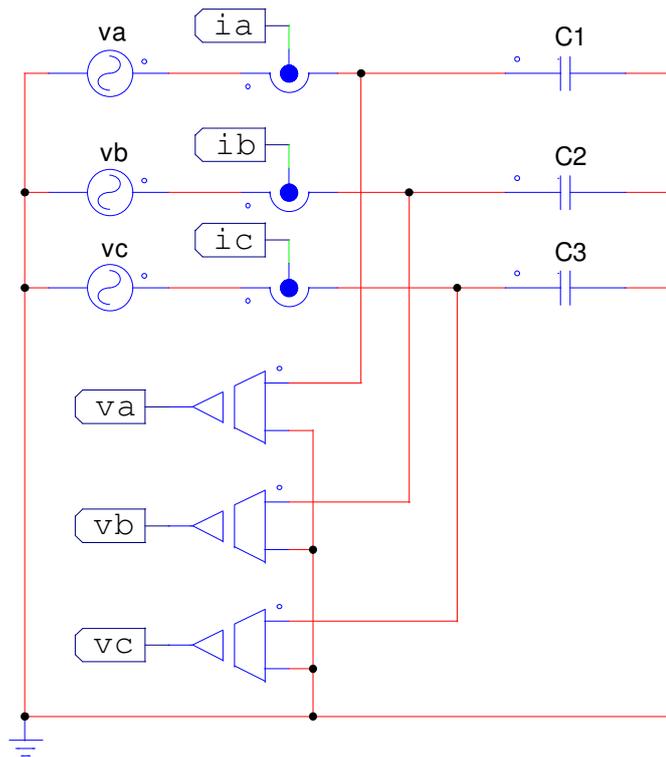
Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.11 mostra que existem divergências entre as parcelas de correntes entre as teorias e suas respectivas parcelas de potência, exceto com relação à comparação da potência ativa da CPT com a soma das potências real e de sequência zero da pq. Vale destacar a presença de potência de sequência zero, que não é nula ( $p_0 \neq 0$ ) em função da corrente e da tensão de sequência zero não serem nulas, pelo fato da carga ser desbalanceada e as tensões serem desequilibradas.

### 3.2.3. Carga capacitiva desbalanceada com tensões não senoidais equilibradas

A Figura 3.34 mostra o circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga capacitiva, sendo que  $C1=470\mu\text{F}$ ,  $C2=330\mu\text{F}$  e  $C3=100\mu\text{F}$ .

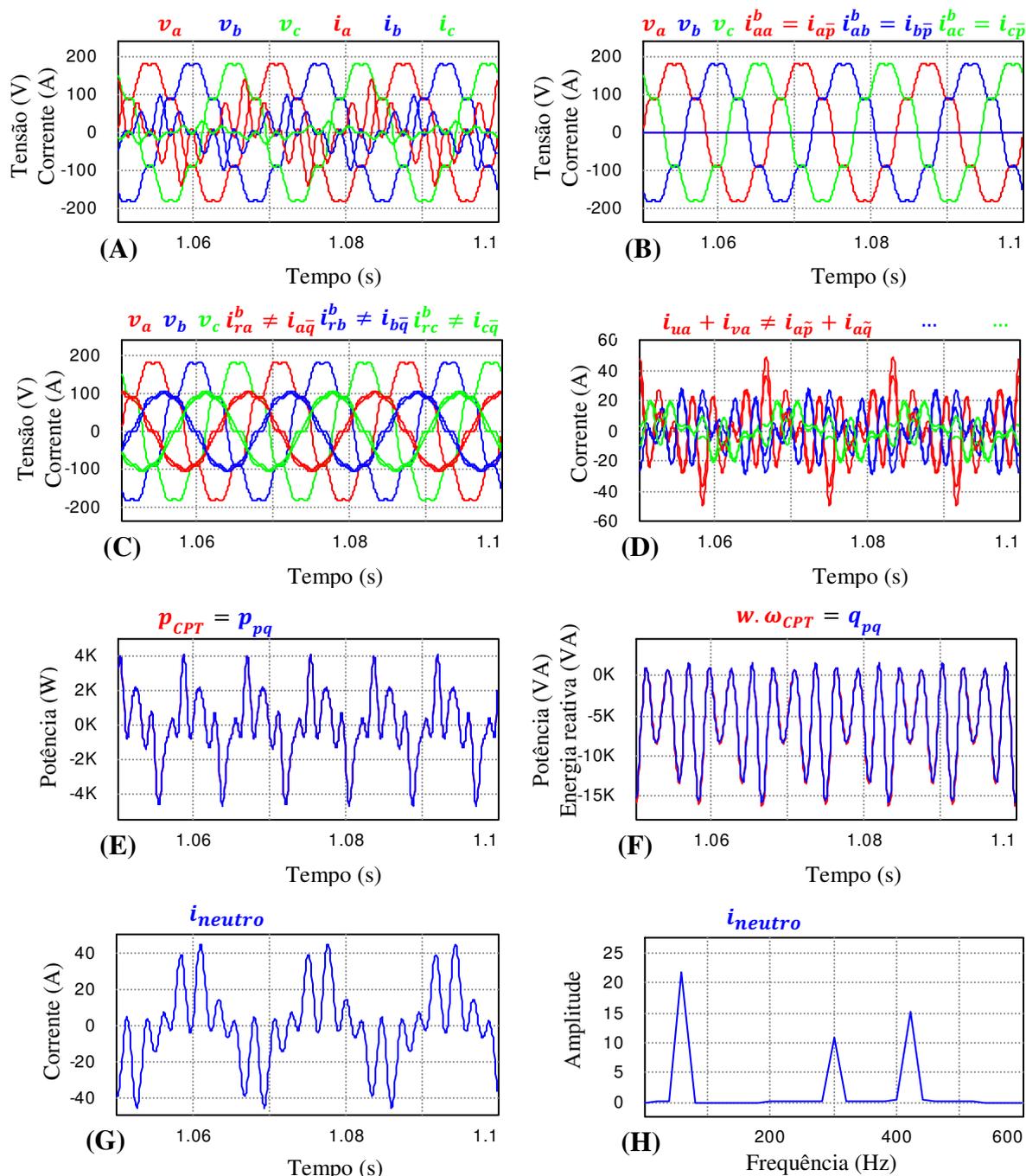
Figura 3.34 – Circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga capacitiva.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.35 mostra as tensões, correntes, potências e corrente no neutro para carga capacitiva desbalanceada.

Figura 3.35 – Valores instantâneos de tensões, correntes, potências e corrente no neutro para carga capacitiva desbalanceada com tensões não senoidais equilibradas a quatro condutores (3F-N).



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.35 (A) mostra que as tensões ( $v_\mu$ ) e correntes ( $i_\mu$ ) no PAC são distorcidas e defasadas, pelo fato da carga ser puramente capacitiva. As distorções das correntes são

impostas pelas tensões. Os desequilíbrios das correntes são imposições da carga. Pois, as tensões são equilibradas.

A Figura 3.35 (B) mostra que as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu}$ ) são equivalentes e nulas, pelo fato da carga ser puramente capacitiva, o que indica que não há transferência de potência útil ( $p$ ) da fonte para a carga.

A Figura 3.35 (C) mostra que as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) não são equivalentes pelo fato das tensões serem distorcidas. A relação de tensão e corrente na carga capacitiva é não linear, o que provoca divergências entre as teorias.

A Figura 3.35 (D) mostra que as correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ) não são equivalentes, pelo fato das tensões serem distorcidas. Os desbalanços são gerados pela carga e as não linearidades surgem pelo fato da relação de tensão e corrente da carga ser não linear. Além de que, a Teoria pq mistura desbalanço e não linearidades da carga com os distúrbios das tensões.

A Figura 3.35 (E) mostra que a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) e a potência real instantânea da Teoria pq ( $p$ ) são equivalentes pelo fato das tensões serem equilibradas ( $v_0 = 0$ ). Com isso a potência de sequência zero é nula ( $p_0 = v_0 i_0 = 0$ ). Porém, a Tabela 3.12 mostra que apesar de existir potência ativa instantânea, seus valores médios são nulos.

A Figura 3.35 (F) mostra que a energia reativa instantânea da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ) são equivalentes pelo fato das tensões serem equilibradas, apesar de edistorcidas.

A Figura 3.35 (G) mostra que existe circulação de corrente pelo neutro ( $i_{neutro}$ ). Como a carga é desbalanceada, existe circulação de corrente de sequência zero ( $i_0 \neq 0$ ). Porém, não existe potência de sequência zero, pelo fato das tensões serem equilibradas ( $v_0 = 0$ ).

A Figura 3.35 (H) mostra o espectro de frequência da corrente do neutro. Nota-se que as frequências existentes são as mesmas frequências presentes nas tensões (60Hz, 300Hz e 420Hz).

A Tabela 3.12 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, fator de potência e distorções harmônicas das correntes para carga capacitiva, para as duas teorias.

Tabela 3.12 – Dados para carga capacitiva desbalanceada a quatro condutores (3F-N).

CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	29,613	$I_a(A)$	29,613
$I_b(A)$	20,869	$I_c(A)$	20,869
$I_c(A)$	6,324	$I_c(A)$	6,324
$I_{aa}^b(A)$	0,000	$I_{a\bar{p}}(A)$	0,000
$I_{ab}^b(A)$	0,000	$I_{b\bar{p}}(A)$	0,000
$I_{ac}^b(A)$	0,000	$I_{c\bar{p}}(A)$	0,000
$I_{ra}^b(A)$	14,633	$I_{a\bar{q}}(A)$	14,498
$I_{rb}^b(A)$	14,653	$I_{b\bar{q}}(A)$	14,498
$I_{rc}^b(A)$	14,653	$I_{c\bar{q}}(A)$	14,498
$I_{va} + i_{ua}(A)$	16,705	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	16,705
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	14,502	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	14,502
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	9,820	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	9,820
$I_{neutro}(A)$	20,423	$I_{neutro} A$	20,423
$A(kVA)$	8,191	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	5,583
$P(kW)$	0,000	$P_{\alpha\beta}(kW)$	0,000
$Q(kVA)$	5,636	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	5,583
$D(kVA)$	5,207	$H(kVA)$	5,367
$N(VA)$	2,866	$P_0(kVA)$	0,000
$\lambda$	0,000	$FP_{\alpha\beta 0}$	0,000
$THD_{Ia}(\%)$	86,043	$THD_{Ia}(\%)$	86,043
$THD_{Ib}(\%)$	86,080	$THD_{Ib}(\%)$	86,080
$THD_{Ic}(\%)$	86,080	$THD_{Ic}(\%)$	86,080

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.12 apresenta as parcelas de correntes ativas balanceadas da CPT e as correntes ativas médias da Teoria pq são nulas, pelo fato da carga ser puramente capacitiva.

Nota-se que os valores eficazes das correntes reativas balanceadas da CPT são iguais as correntes reativas médias da Teoria pq, apesar de seus valores instantâneos não serem.

Assim como para os outros casos, a potência aparente da CPT ( $A$ ) e a potência aparente da Teoria pq ( $S_{\alpha\beta 0}$ ) continuam distintas. Nota-se que a potência imaginária é a própria potência aparente, isso ocorre pelo fato de como foi proposto o cálculo da potência aparente, a potência harmônica não é considerada, ver em (2.62) e (2.63).

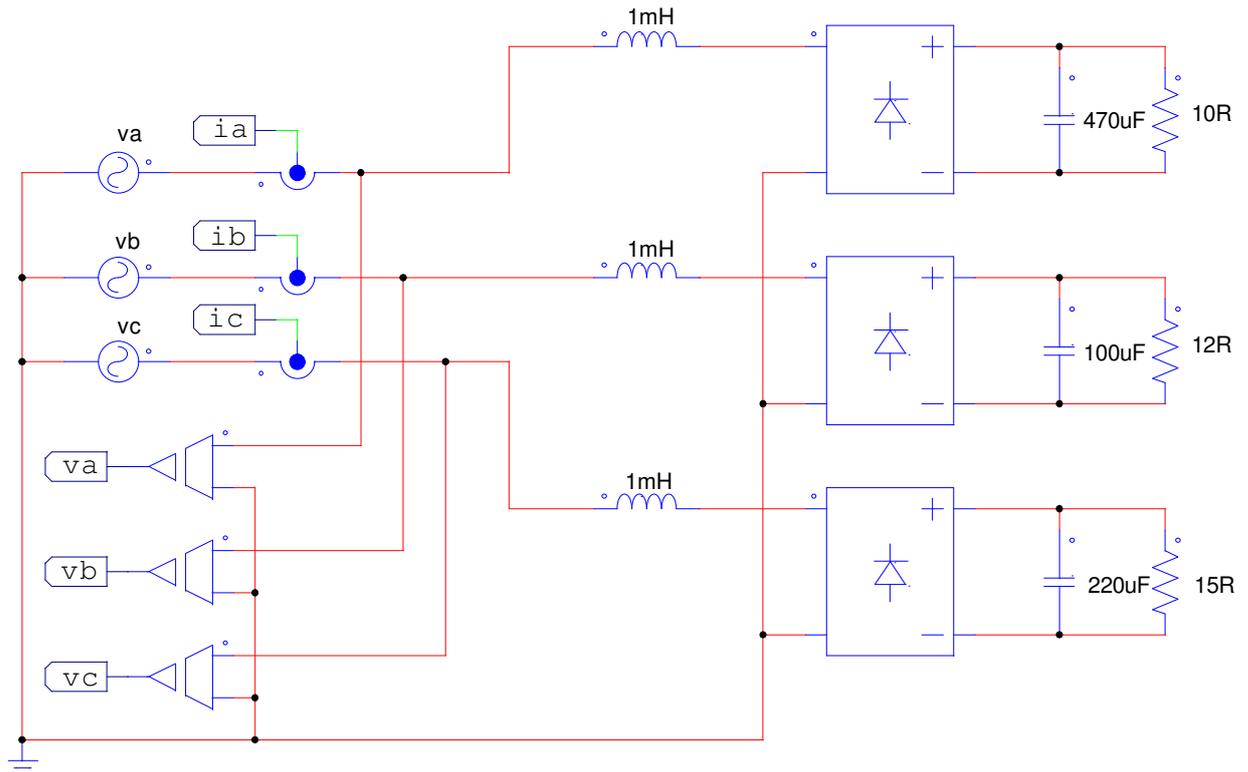
Nota-se que mesmo que haja corrente neutro, a potência de sequência zero é nula ( $P_0 = I_0 V_0 = 0$ ), pelo fato das tensões serem equilibradas ( $V_0 = 0$ ).

Nota-se que com circulação de corrente pelo neutro, as distorções harmônicas das correntes ficaram com valores bem elevados.

### 3.2.4. Carga não linear desbalanceada com tensões senoidais desequilibradas

A Figura 3.36 mostra o circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) a ser analisado para carga não linear desbalanceada. Os indutores na entrada dos retificadores tem função de filtro para minimizar as distorções das correntes.

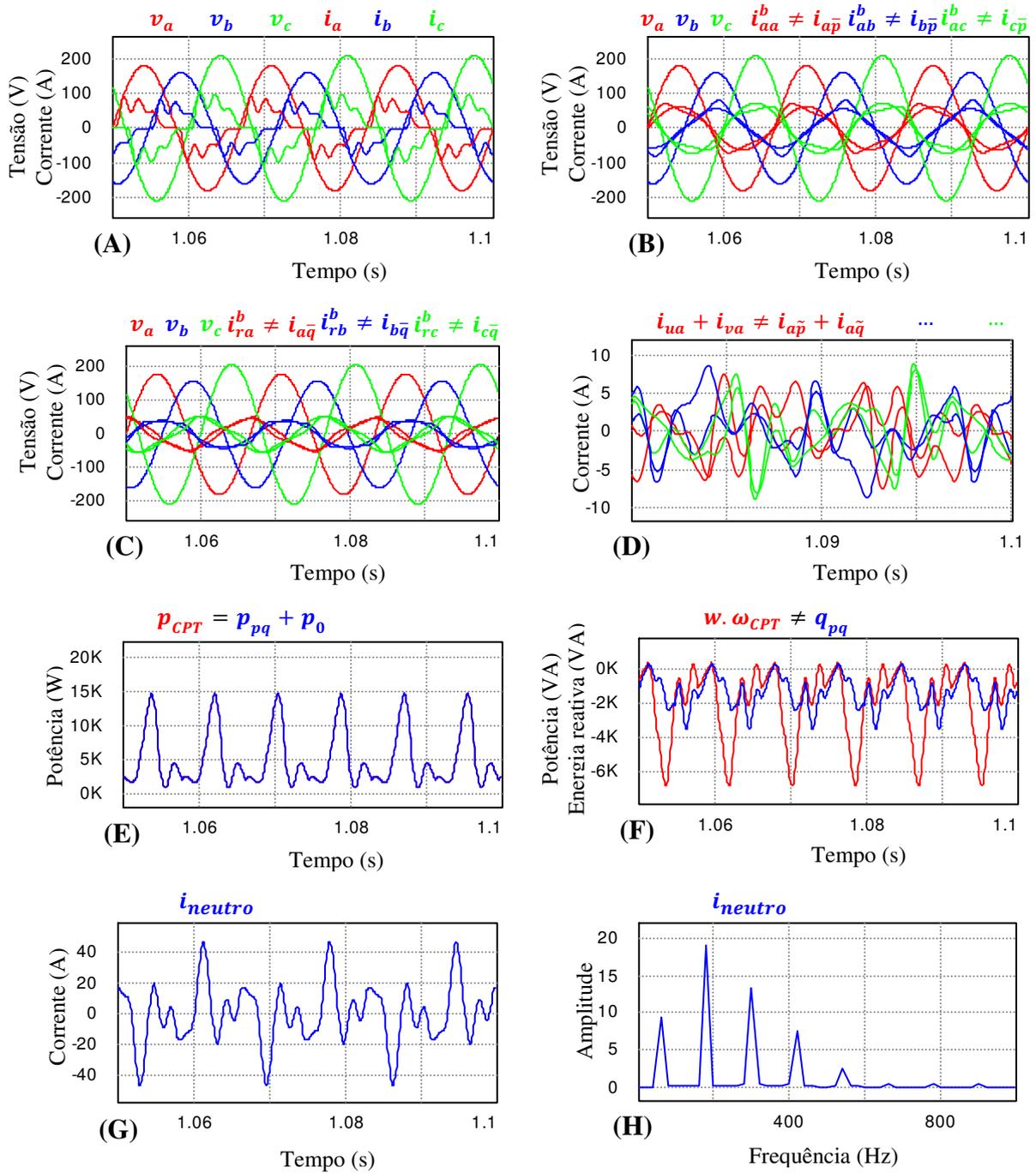
Figura 3.36 – Circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga não linear desbalanceada.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.37 mostra os valores instantâneos das tensões, correntes, potências e fator de potência para a carga não linear balanceada a quatro condutores (3F-N), alimentada por tensões senoidais desequilibradas.

Figura 3.37 – Valores instantâneos de tensões, correntes, potências, fator de potência e corrente no neutro para carga não linear desbalanceada.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.37 (A) mostra que tensões ( $v_\mu$ ) no PAC são senoidais desequilibradas e as correntes ( $i_\mu$ ) são distorcidas e desequilibradas. As distorções das correntes são geradas pela carga não linear, já os desequilíbrios são impostos pelas tensões e pela carga.

A Figura 3.37 (B) mostra que as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{p\mu}$ ) não são equivalentes, pelo fato das tensões serem desequilibradas. Nota-se que a parcela da CPT é senoidal e está em fase com as respectivas tensões de fase. Porém, o mesmo não ocorre com as parcelas da Teoria pq que são distorcidas. Estas oscilações surgem nas correntes médias da Teoria pq pelo fato que a norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) é oscilatória com tensões desequilibradas e/ou distorcidas. Tais fatos já foram apresentados no início deste capítulo.

A Figura 3.37 (C) mostra que as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{q\mu}$ ) não são equivalentes, pelo fato das tensões serem desequilibradas. Nota-se que as parcelas de correntes da CPT são senoidais e da Teoria pq são distorcidas, pelo fato da norma quadrática instantâneas das tensões serem oscilatórias ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ).

A Figura 3.37 (D) mostra as correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{p\mu} + i_{q\mu}$ ), como a carga é não linear, as distorções das correntes são geradas pela carga não linear e os desbalanços são impostos pelas tensões e pela carga. Nota-se que estas parcelas não são equivalentes, pelo fato das tensões serem desequilibradas. Pois, tensões desequilibradas faz com que a norma instantânea quadrática das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) tenha valor oscilatório e que na CPT os valores são constantes (norma rms).

A Figura 3.37 (E) mostra a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) e a potência real instantânea e de sequência zero instantânea da Teoria pq ( $p + p_0$ ). Como o circuito é a quatro condutores, existe circulação de corrente pelo neutro, pelo fato das tensões serem desequilibradas e a carga desbalanceada. Isto garante a presença de tensão e corrente de sequência zero, das quais surge a potência de sequência zero ( $p_0 = v_0 i_0$ ). Portanto, a potência instantânea é soma da potência real com a potência de sequência zero ( $p = p_{real} + p_0$ ), sendo equivalente com a potência ativa da CPT.

A Figura 3.37 (F) mostra que a energia reativa instantânea da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ) não são equivalentes, pelo fato das tensões serem desequilibradas. Pois, na Teoria pq, surgem oscilações nas correntes reativas médias, pelo fato

da norma quadrática instantânea da tensão ( $v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$ ) ter valor oscilante em condições de tensões desequilibradas e/ou distorcidas.

A Figura 3.37 (G) mostra que tem circulação de corrente pelo neutro ( $i_{neutro} \neq 0$ ), pelo fato das tensões serem desequilibradas e a carga desbalanceada.

A Figura 3.37 (H) mostra o espectro de frequências da corrente no neutro. As frequências harmônicas são geradas pela carga não linear, as quais estão presentes nas correntes.

A Tabela 3.13 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, o fator de potência e distorções harmônicas das correntes para a carga não linear desbalanceada.

Tabela 3.13 – Dados para carga não linear a quatro condutores (3F-N).

CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	25,855	$I_a(A)$	25,855
$I_b(A)$	10,469	$I_c(A)$	10,469
$I_c(A)$	15,838	$I_c(A)$	15,838
$I_{aa}^b(A)$	12,992	$I_{a\bar{p}}(A)$	13,960
$I_{ab}^b(A)$	11,541	$I_{b\bar{p}}(A)$	13,937
$I_{ac}^b(A)$	15,081	$I_{c\bar{p}}(A)$	13,941
$I_{ra}^b(A)$	4,838	$I_{a\bar{q}}(A)$	3,453
$I_{rb}^b(A)$	4,311	$I_{b\bar{q}}(A)$	3,458
$I_{rc}^b(A)$	5,622	$I_{c\bar{q}}(A)$	3,457
$I_{va} + i_{ua}(A)$	8,391	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	7,494
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	8,867	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	6,913
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	8,899	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	6,832
$I_{neutro}(A)$	18,710	$I_{neutro} A$	18,710
$A(kVA)$	7,215	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	5,336
$P(kW)$	5,177	$P_{\alpha\beta} + P_0(kW)$	5,177
$Q(kVA)$	1,931	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	1,293
$D(kVA)$	4,346	$H(kVA)$	4,391
$N(kVA)$	1,621	$P_0(VA)$	41,177
$\lambda$	0,718	$FP_{\alpha\beta 0}$	0,971
$THD_{Ia}(\%)$	83,318	$THD_{Ia}(\%)$	83,318
$THD_{Ib}(\%)$	25,209	$THD_{Ib}(\%)$	25,209
$THD_{Ic}(\%)$	73,834	$THD_{Ic}(\%)$	73,834

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 3.13 mostra que existem todas as parcelas de correntes e suas respectivas parcelas de potências, pelo fato da carga ser não linear desbalanceada sendo alimentada por tensões desequilibradas.

Nota-se que só existe equivalência entre a potência ativa da CPT através da soma das potências real e de sequência zero da Teoria pq, isso ocorre pelo fato de ter circulação de corrente pelo neutro.

Nota-se que a potência residual ( $D$ ) da CPT e a potência harmônica ( $H$ ) da Teoria pq são bem parecidas, pelo fato das tensões serem senoidais, apesar de desequilibradas.

O fator de potência é bem diferente entre as teorias, principalmente pelo fato de que a proposta de cálculo do fator de potência da Teoria pq não considera as não linearidades e desbalanços da carga, nem os desequilíbrios das tensões da fonte (2.62 a 2.64). Nota-se que o fator de potência da Teoria pq é bem próximo da unidade, apesar da corrente ser totalmente distorcida. O mesmo ocorre com a potência aparente, os valores são bem diferentes em função da proposta de definição da potência aparente da Teoria pq (2.62).

Ao contrário do caso com cargas lineares, onde as distorções de corrente são impostas pela tensão, neste caso com carga não linear, as correntes são consideravelmente distorcida em função do comportamento da carga.

*Neste capítulo é importante destacar que a CPT não mistura o efeito das não linearidades e do desbalanço da carga com as distorções e os desequilíbrios das tensões. A Figura 3.7 (A), (C), (E) e (G) mostram que as correntes que representam as não linearidades e desbalanços da carga são nulas (CPT), independente se as tensões são senoidais ou distorcidas, equilibradas ou desequilibradas. O mesmo não ocorre com a Teoria pq, que tem as correntes distorcidas e desequilibradas mesmo com tensões senoidais e carga balanceada. Ou seja, os efeitos da carga e os distúrbios das tensões são contabilizados juntos, o que dificulta descrever o que realmente é responsabilidade da carga na composição das correntes.*



#### 4. CIRCUITOS TRIFÁSICOS COM IMPEDÂNCIA DE LINHA

Esta seção apresenta uma análise comparativa entre a Teoria de Potência Conservativa e a Teoria de Potências Instantâneas para circuitos trifásicos a três e quatro condutores (3F e 3F-N) [34], [35], com tensões senoidais e não senoidais equilibradas, com cargas lineares e não lineares. O objetivo central é verificar o comportamento das tensões e correntes no PAC com a presença das impedâncias de linha, as quais se referem somente aos cabos de baixa tensão, sem considerar a impedância dos transformadores.

Como visto no Capítulo 3, a presença do condutor de retorno pode haver circulação de corrente pelo neutro, com isso podem surgir as componentes de sequência zero. A presença da impedância de linha faz que com que haja queda de tensão na rede, podendo tornar as tensões no PAC distorcidas, dependendo das características das correntes da carga. Isso é algo indesejado, pois as cargas são projetadas para trabalharem com tensões nominais, senoidais e equilibradas, sendo que tais condições podem provocar seu mau funcionamento, bem como redução da sua vida útil.

Para a análise de circuitos a quatro condutores (3F-N), com a Teoria pq, pode surgir potência de sequência zero, como discutido nos Capítulos 2 e 3. Isso depende da presença das tensões e correntes de sequência zero.

Para as simulações foi escolhido um comprimento de cabo de 100 metros, ou seja, do quadro de distribuição até a carga são 100 metros de distância. Foram escolhidos cabos do fabricante Pirelli de  $4\text{mm}^2$ , para tensões de até 750V, com isolamento de PVC, no método de instalação através de condutos fechados não ferromagnéticos.

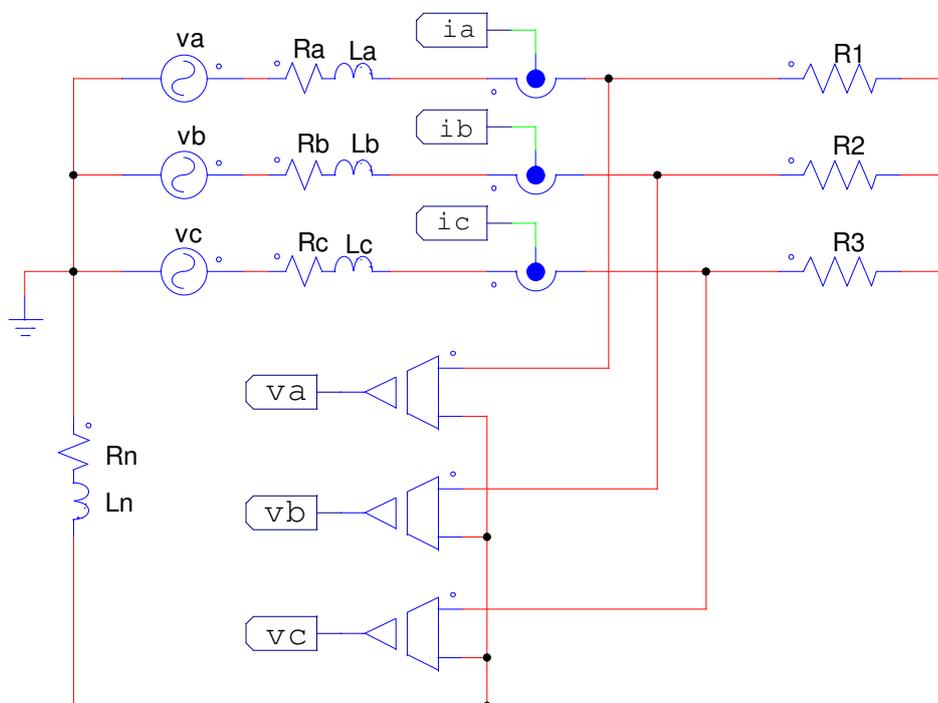
Através do catálogo de dimensionamentos de condutores elétricos da Pirelli [36], para estas condições, a impedância dos cabos é de  $Z_L = 8,87 + j0,15 (\Omega/\text{km})$ . Portanto, em todos os cabos são utilizadas impedância de linha que são representadas por uma resistência de fase de  $R_\mu = 0,887\Omega$  e uma indutância de fase de  $L_\mu = 40\mu\text{H}$ , que são ligados entre a fonte de tensão e a carga, para representar a impedância de linha de cada fase.

Os casos escolhidos foram simulados com tensões senoidais e não senoidais equilibradas. Para as tensões não senoidais foram utilizados 10% da amplitude da frequência fundamental para as frequências de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordem harmônica.

#### 4.1. Carga resistiva desbalanceada com tensões não senoidais equilibradas

A Figura 4.1 mostra o circuito trifásico com carga resistiva desbalanceada. Como visto anteriormente, as parcelas de corrente da CPT são representadas pela soma das parcelas de correntes ativas, reativas e residuais ( $i_\mu = i_{a\mu} + i_{r\mu} + i_{v\mu}$ ). Já as parcelas de corrente da Teoria pq são representadas pela soma das parcelas ativas, reativas e de sequência zero ( $i_\mu = i_{p\mu} + i_{q\mu} + i_0$ ). A Tabela 4.1 mostra os dados das tensões e da carga, sendo que  $\mu$  representa as fases e  $k$  representa as frequências harmônicas.

Figura 4.1 – Circuito trifásico com carga resistiva desbalanceada a quatro condutores (3F-N).



Fonte: Próprio autor.

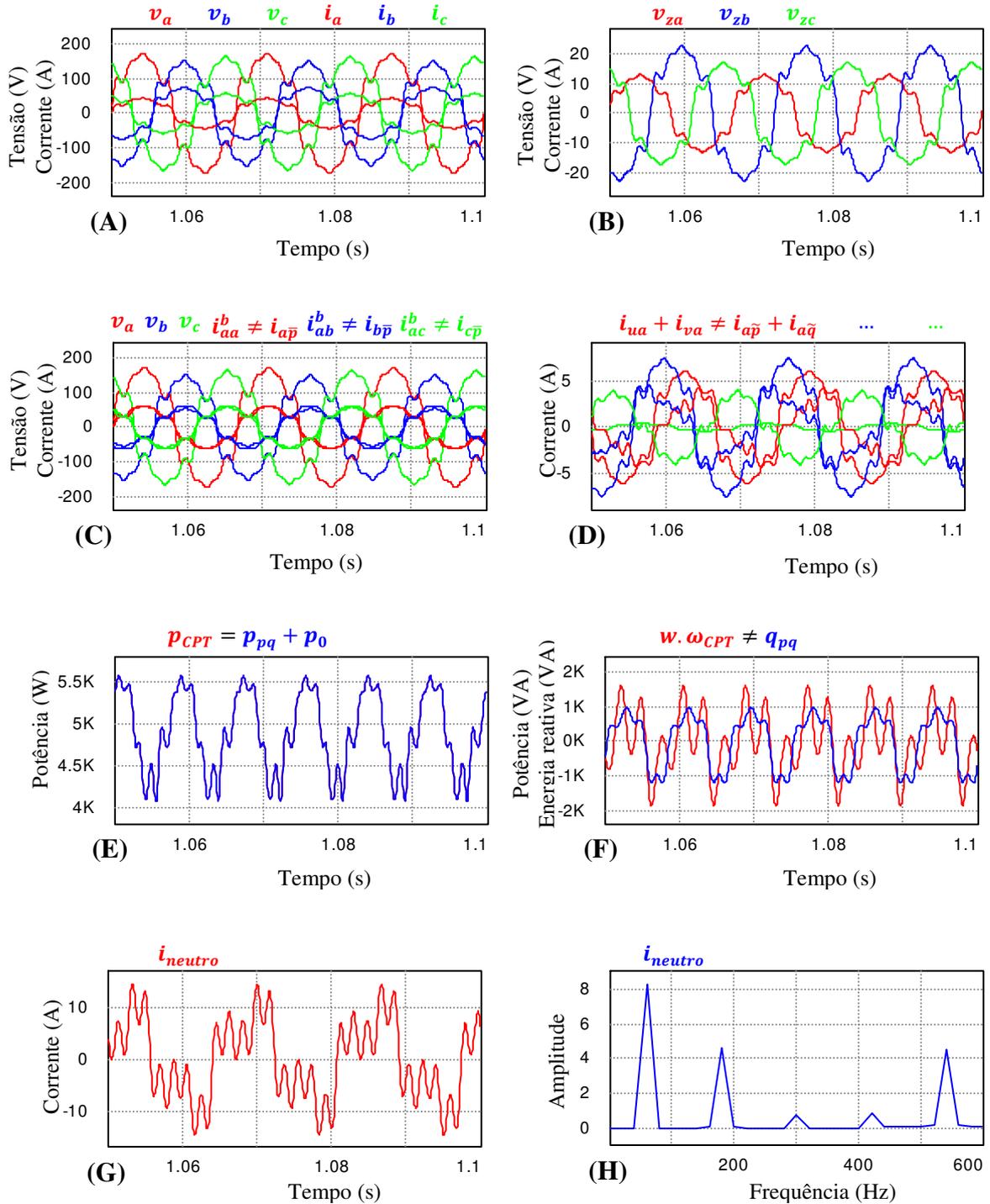
Tabela 4.1 – Dados de tensões e carga.

Tensões não senoidais equilibradas ( $V_{rms}$ )	Dados da carga
$v_a = 127 \angle 0^\circ + \sum V_k$	$R1 = 11,8 \Omega$
$v_b = 127 \angle -120^\circ + \sum V_k$	$R2 = 5,9\Omega$
$v_c = 127 \angle 120^\circ + \sum V_k$	$R3 = 8,5\Omega$

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.2 mostra as correntes, tensões, potências e corrente no neutro para carga resistiva balanceada.

Figura 4.2 – Valores instantâneos de tensões, correntes e potências para carga resistiva sendo alimentadas por tensões não senoidais equilibradas a quatro condutores (3F-N).



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.2 (A) mostra que as tensões ( $v_\mu$ ) e correntes ( $i_\mu$ ) no PAC são distorcidas e desequilibradas. As distorções das correntes são impostas pelas tensões não senoidais e os desequilíbrios pela carga desbalanceada. Já os desequilíbrios das tensões são efeitos provocados pela interação da corrente da carga com as impedâncias de linha que geram quedas de tensões diferentes entre as fases pelo fato da carga absorver correntes desequilibradas.

A Figura 4.2 (B) mostra as quedas de tensões na rede, as quais são distorcidas, desequilibradas e com as mesmas frequências harmônicas presentes nas tensões.

A Figura 4.2 (C) mostra que as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu}$ ) são ligeiramente diferentes pelo fato das tensões no PAC serem desequilibradas. Como visto no Capítulo 3, isso ocorre pelo fato da Teoria pq utilizar a norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) no cálculo das correntes ativas médias, sendo que para tensões desequilibradas e/ou distorcidas surgem oscilações que não são impostas pelas tensões e nem geradas pela carga.

Apesar de não estarem explícitas, devido à carga ser puramente resistiva, as correntes reativas balanceadas da CPT e as correntes reativas médias da Teoria pq são equivalentes e nulas.

A Figura 4.2 (D) mostra as correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ), as quais não são equivalentes pelo fato das tensões no PAC serem distorcidas e desequilibradas. Como a carga é puramente resistiva, as não linearidades da carga são nulas ( $i_{v\mu} = 0$ ) e as distorções das tensões são representadas nas correntes ativas balanceadas, apesar de não estar explícito. Portanto estão presentes somente as correntes desbalanceadas ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u$ ). Já a Teoria pq mistura todos estes distúrbios nas correntes oscilantes ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ).

A Figura 4.2 (E) mostra que a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) e a soma da potência real instantânea com a potência de sequência zero da Teoria pq ( $p = p_{real} + p_0$ ) são equivalentes. Neste caso é preciso usar a soma da potência real com a de sequência zero, pelo fato do sistema ser a quatro condutores (3F-N). No caso de sistemas a três condutores (3F), ou a quatro condutores (3F-N) com ausência de componentes de sequência zero, a equivalência será somente entre a potência ativa e potência real.

A Figura 4.2 (F) mostra que a energia reativa instantânea da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ) não são equivalentes, pelo fato das tensões no PAC serem distorcidas e desequilibradas.

A Figura 4.2 (G) mostra que existe circulação de corrente pelo neutro e em (F) mostra-se o espectro de frequência. Nota-se que as frequências harmônicas são as mesmas frequências presentes nas tensões.

No geral, a interação das correntes desequilibradas da carga com as impedâncias de linha tornou as tensões no PAC desequilibradas. Tais desequilíbrios tornaram divergentes as parcelas de correntes e suas respectivas parcelas de potência.

A Tabela 4.2 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, distorções harmônicas das correntes e o fator de potência.

Tabela 4.2 – Dados para carga resistiva a quatro condutores (3F-N), com impedância de linha.

Carga resistiva desbalanceada alimentada por tensões não senoidais equilibradas			
CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	10,509	$I_a(A)$	10,509
$I_b(A)$	18,296	$I_c(A)$	18,296
$I_c(A)$	13,815	$I_c(A)$	13,815
$I_{aa}^b(A)$	14,891	$I_{a\bar{p}}(A)$	14,110
$I_{ab}^b(A)$	12,963	$I_{b\bar{p}}(A)$	14,041
$I_{ac}^b(A)$	14,101	$I_{c\bar{p}}(A)$	14,063
$I_{ra}^b(A)$	0,000	$I_{a\bar{q}}(A)$	0,000
$I_{rb}^b(A)$	0,000	$I_{b\bar{q}}(A)$	0,000
$I_{rc}^b(A)$	0,000	$I_{c\bar{q}}(A)$	0,000
$I_{va} + i_{ua}(A)$	4,382	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	2,610
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	5,333	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	2,715
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	0,286	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	2,562
$I_{neutro}(A)$	7,502	$I_{neutro}(A)$	7,502
$A(kVA)$	5,096	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	4,901
$P(kW)$	4,901	$P_{\alpha\beta} + P_0(kW)$	4,901
$Q(kVA)$	0,000	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	0,000
$D(kVA)$	0,000	$H(kVA)$	0,914
$U(kVA)$	1,396	$P_0(W)$	16,251
$\lambda$	0,962	$FP_{\alpha\beta 0}$	1,000
$DHT_{Ia}(\%)$	17,532	$DHT_{Ia}(\%)$	17,532
$DHT_{Ib}(\%)$	18,002	$DHT_{Ib}(\%)$	18,002
$DHT_{Ic}(\%)$	17,704	$DHT_{Ic}(\%)$	17,704

Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.2 mostra que só existe equivalência entre as parcelas de correntes reativas balanceadas e médias, pelo fato da carga ser puramente resistiva. Sendo assim, a potência reativa média da CPT e a potência imaginária média da Teoria pq também são nulas.

Observa-se que existe equivalência entre a potência ativa da CPT com a soma da potência real e de sequência zero da Teoria pq, pelo fato das tensões serem a quatro condutores (3F-N) com carga desbalanceada.

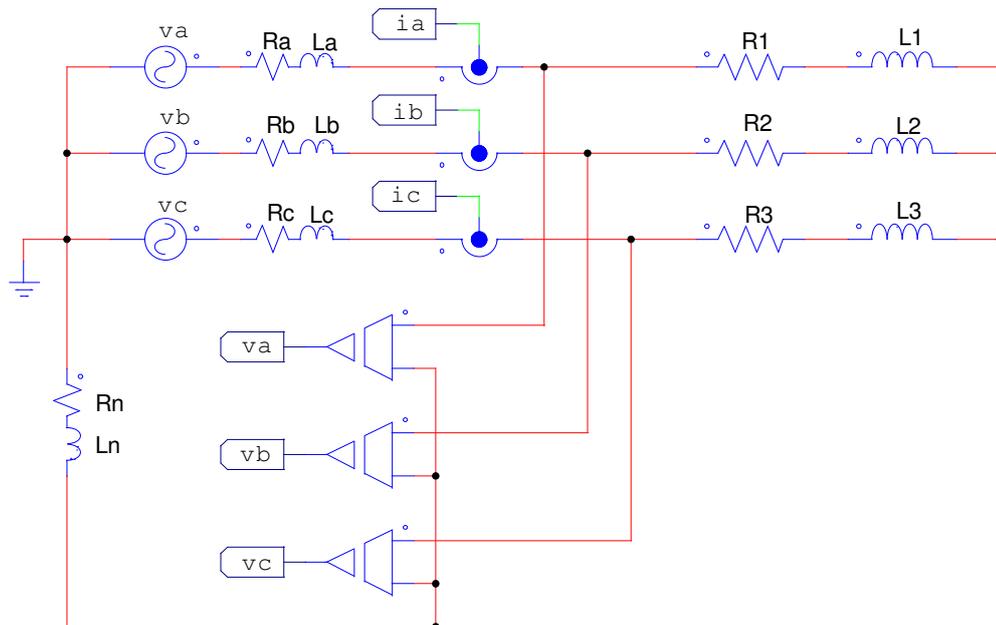
A potência residual é nula ( $D = 0$ ), pelo fato da CPT representar as não linearidades nas parcelas de corrente residuais, as quais são nulas. A potência harmônica da Teoria pq não é nula ( $H \neq 0$ ), pelo fato da Teoria pq misturar desbalanços e não linearidades do circuito nas correntes oscilantes.

O fator de potência da Teoria pq é unitário mesmo com a carga sendo desbalanceada, ao contrário do fator de potência da CPT que é menor do que a unidade. As potências aparentes também divergem, o que significa que as propostas de cálculo da potência aparente ( $S_{\alpha\beta 0}$ ) e fator de potência ( $FP_{\alpha\beta}$ ) não são válidos para todas as condições de operação.

#### 4.2. Carga RL desbalanceada e tensões não senoidais equilibradas a quatro condutores

A Figura 4.3 mostra o circuito trifásico com carga RL desbalanceada, com impedância de linha. A Tabela 4.3 mostra os valores das tensões e da carga.

Figura 4.3 – Circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) para carga RL desbalanceada.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.3 – Dados de tensão e de carga.

Tensões não senoidais equilibradas ( $V_{rms}$ )	Dados da carga RL
$V_a = 127 \angle 0^\circ + \sum V_k$	R1 = 11,8 $\Omega$ e L1 = 20mH
$V_b = 127 \angle -120^\circ + \sum V_k$	R2 = 5,9 $\Omega$ e L2 = 10mH
$V_c = 127 \angle 120^\circ + \sum V_k$	R3 = 8,5 $\Omega$ e L3 = 15mH

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.4 (A) mostra que as tensões ( $v_\mu$ ) e correntes ( $i_\mu$ ) no PAC são distorcidas e desequilibradas. As distorções das correntes são impostas pelas tensões distorcidas e os desequilíbrios são provocados pela carga desbalanceada. Os desequilíbrios das tensões no PAC são provocados pela interação entre as correntes da carga com a impedância de linha.

A Figura 4.4 (B) mostra que as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu}$ ) são ligeiramente diferentes, pelo fato das tensões se tornarem desequilibradas no PAC, com a presença da impedância de linha. Novamente, com tensões desequilibradas, surgem oscilações nas correntes ativas médias da Teoria pq que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões.

A Figura 4.4 (C) mostra que as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) não são equivalentes, pelo fato das tensões no PAC serem distorcidas e desequilibradas. Assim como nas correntes ativas médias da Teoria pq, com tensões desequilibradas, surgem oscilações nas correntes reativas médias que não são impostas pelas tensões e nem geradas pela carga.

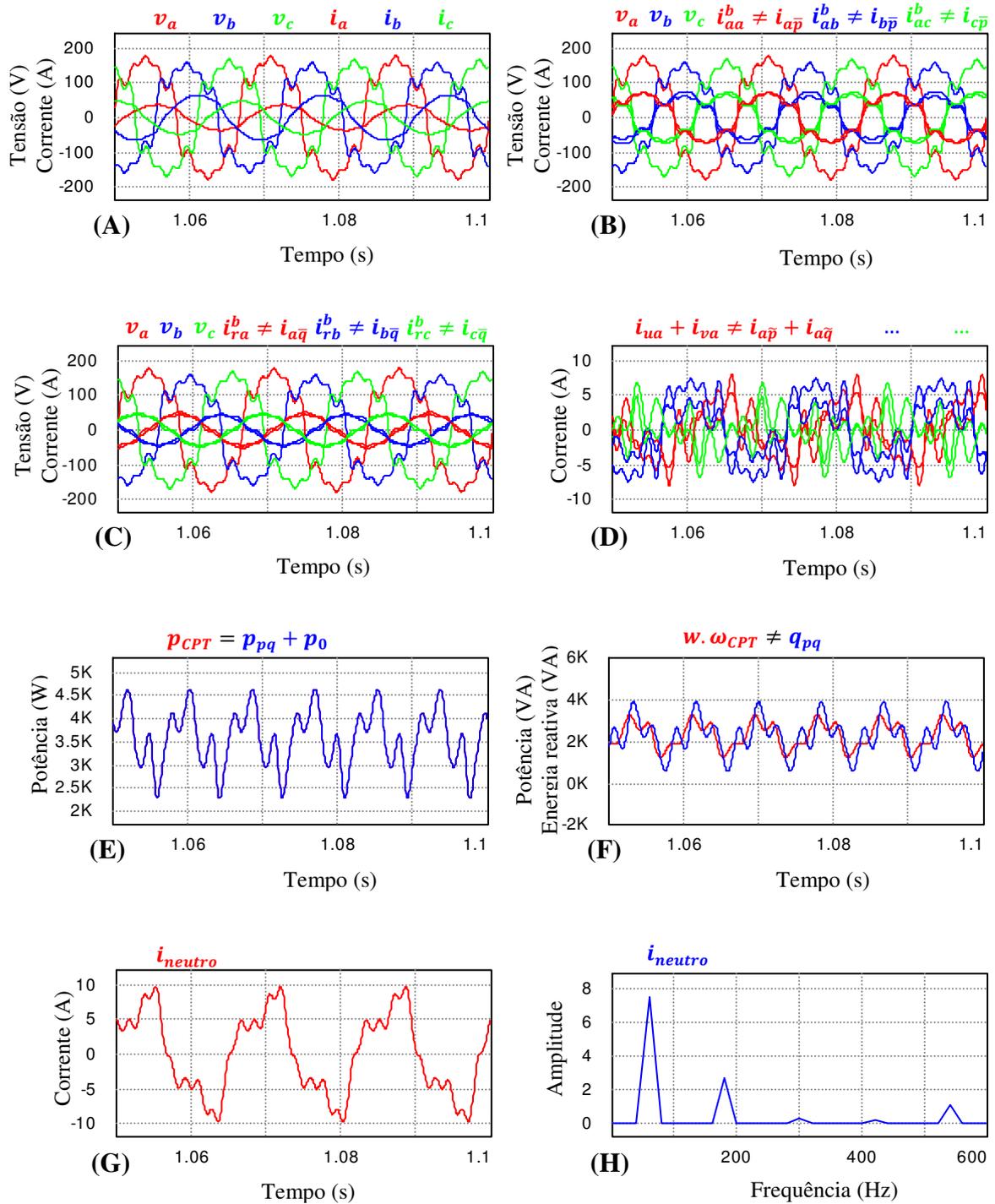
A Figura 4.4 (D) mostra as correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ), as quais são distintas pelo fato das tensões serem distorcidas e desequilibradas.

A Figura 4.4 (E) mostra que a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) tem equivalência com a soma da potência real instantânea e a potência de sequência zero instantânea da Teoria pq ( $p = p_{real} + p_0$ ), isso ocorre pelo fato do sistema ser a quatro condutores.

A Figura 4.4 (F) mostra que a energia reativa instantânea da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ) não são equivalentes pelo fato das tensões no PAC serem distorcidas e desequilibradas.

A Figura 4.4 (G) mostra que existe circulação de corrente no neutro e em (H) mostra o espectro de frequência. Nota-se que as frequências presentes na corrente do neutro são as mesmas frequências presentes nas tensões.

Figura 4.4 – Valores instantâneos de tensões, correntes, potências e corrente no neutro para carga RL alimentada por tensões não senoidais equilibradas a quatro condutores (3F-N).



Fonte: Próprio autor.

No geral, a interação entre as correntes desequilibradas da carga e as impedâncias de linha tornaram as tensões no PAC desequilibrada. Tais desequilíbrios fizeram com que as parcelas de corrente entre as teorias se tornassem divergentes, assim como suas respectivas parcelas de potência. Além disto, esta interação fez surgir potência de sequência zero na Teoria pq, que sem as impedâncias de linha seria nula ( $p_0 = 0$ ).

A Tabela 4.4 mostra os valores eficazes das correntes, assim como suas respectivas parcelas de corrente, os valores médios das potências, o fator de potência e as distorções harmônicas das correntes para carga RL desbalanceada.

A interação entre as impedâncias de linha e as correntes desequilibradas da carga faz com exista todas as parcelas de correntes e suas respectivas parcelas de potências. Porém, são divergentes pelo fato das tensões no PAC serem distorcidas e desequilibradas.

Tabela 4.4 – Dados para carga RL a quatro condutores (3F-N), com impedância de linha.

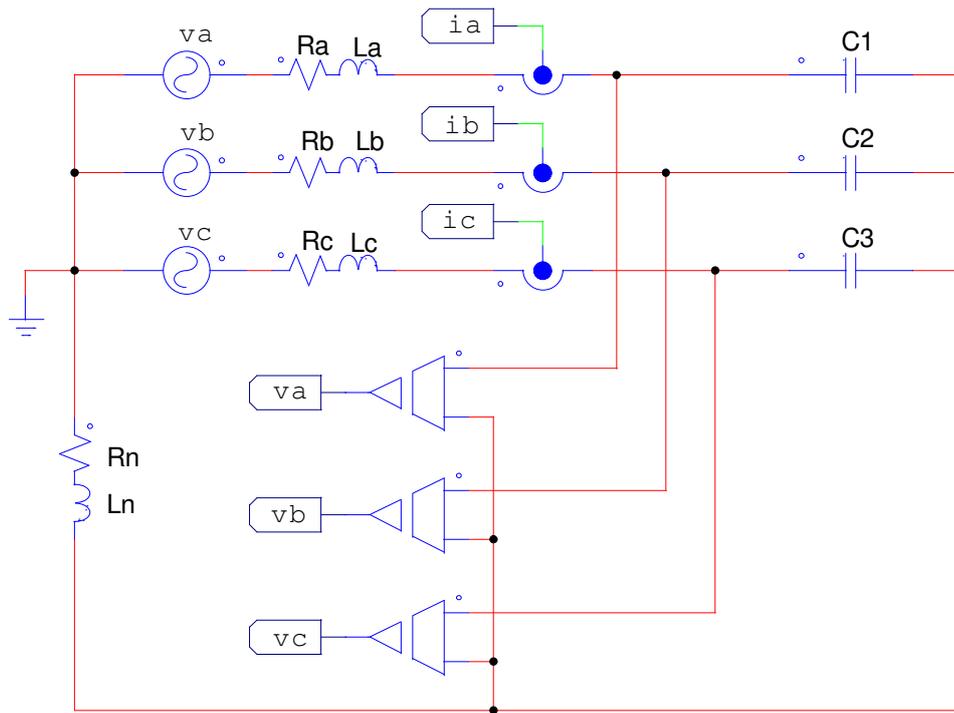
Carga RL desbalanceada alimentada por tensões não senoidais equilibradas			
CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	8,929	$I_a(A)$	8,929
$I_b(A)$	15,953	$I_c(A)$	15,953
$I_c(A)$	11,516	$I_c(A)$	11,516
$I_{aa}^b(A)$	10,437	$I_{a\bar{p}}(A)$	10,067
$I_{ab}^b(A)$	9,344	$I_{b\bar{p}}(A)$	10,044
$I_{ac}^b(A)$	9,832	$I_{c\bar{p}}(A)$	10,060
$I_{ra}^b(A)$	6,894	$I_{a\bar{q}}(A)$	6,421
$I_{rb}^b(A)$	6,166	$I_{b\bar{q}}(A)$	6,436
$I_{rc}^b(A)$	6,498	$I_{c\bar{q}}(A)$	6,426
$I_{va} + i_{ua}(A)$	3,916	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	2,794
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	5,238	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	3,210
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	1,856	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	2,918
$I_{neutro}(A)$	5,712	$I_{neutro}(A)$	5,712
$A(kVA)$	4,508	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	4,244
$P(kW)$	3,570	$P_{\alpha\beta} + P_0(kW)$	3,570
$Q(kVA)$	2,358	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	2,296
$D(kVA)$	0,719	$H(kVA)$	1,066
$U(kVA)$	1,221	$P_0(W)$	21,675
$\lambda$	0,792	$FP_{\alpha\beta 0}$	0,841
$DHT_{Ia}(\%)$	6,802	$DHT_{Ia}(\%)$	6,802
$DHT_{Ib}(\%)$	7,517	$DHT_{Ib}(\%)$	7,517
$DHT_{Ic}(\%)$	7,066	$DHT_{Ic}(\%)$	7,066

Fonte: Próprio autor.

### 4.3. Carga capacitiva com tensões senoidais equilibradas a quatro condutores

A Figura 4.5 mostra o circuito trifásico com carga capacitiva desbalanceada, com impedância de linha. A Tabela 4.5 mostra os dados de tensões e carga a serem utilizados.

Figura 4.5 – Circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga capacitiva desbalanceada.



Fonte: Próprio autor.

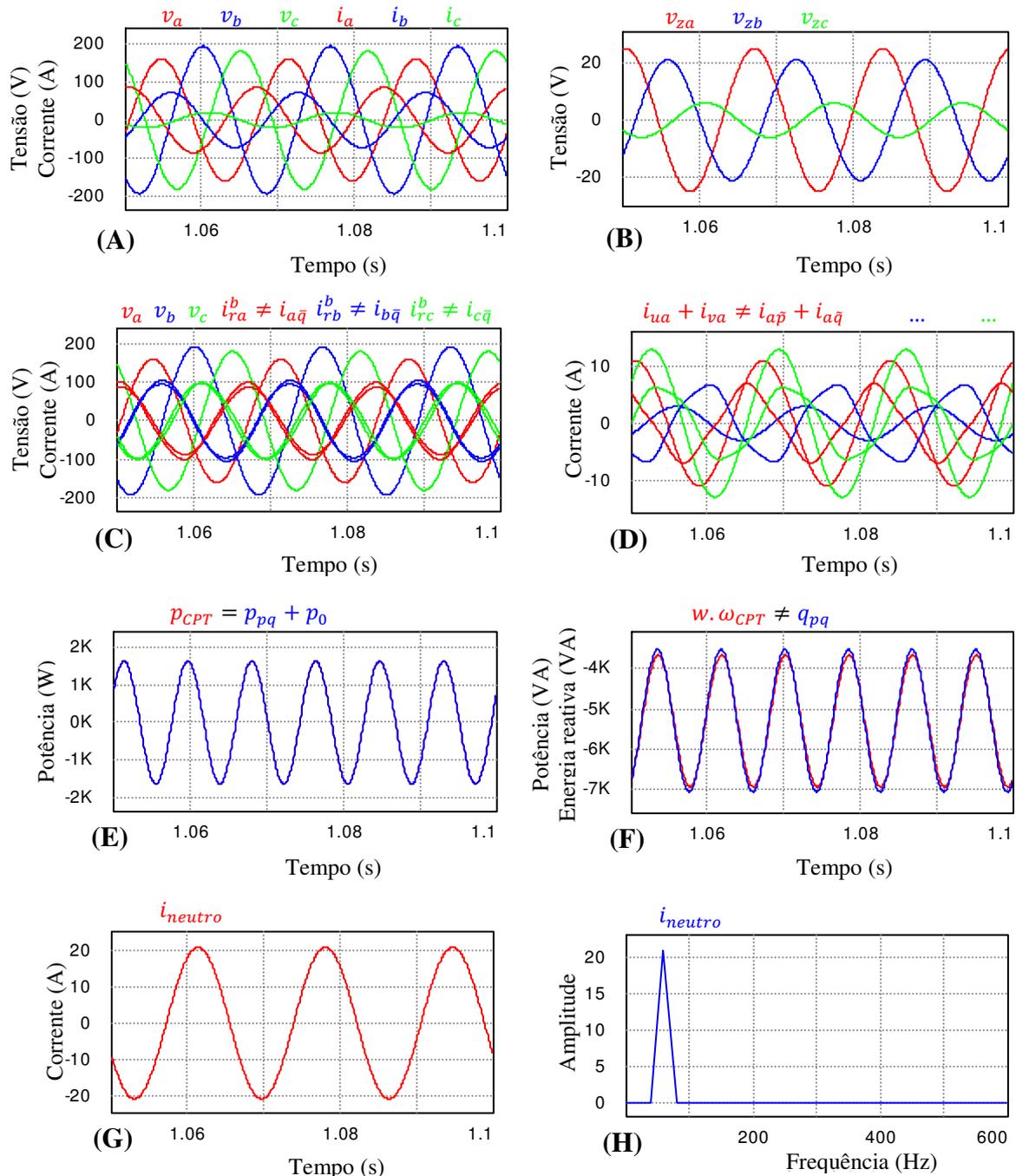
Tabela 4.5 – Dados de tensão e de carga capacitiva a quatro condutores (3F-N).

Tensões senoidais equilibradas ( $V_{rms}$ )	Dados da carga
$V_a = 127 < 0^\circ$	$C1 = 470\mu F$
$V_b = 127 < -120^\circ$	$C2 = 330\mu F$
$V_c = 127 < 120^\circ$	$C3 = 100\mu F$

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.6 mostra as tensões e correntes no PAC. Assim como as parcelas de corrente, parcelas de potência, quedas de tensões nas impedâncias de linha e corrente no neutro para carga capacitiva desbalanceada com quatro condutores (3F-N).

Figura 4.6 – Valores instantâneos de tensões, correntes, potências e corrente no neutro para carga capacitiva com tensões senoidais equilibradas a quatro condutores (3F-N).



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.6 (A) mostra que as tensões ( $v_\mu$ ) e correntes ( $i_\mu$ ) no PAC são senoidais, desequilibradas e não estão em fase, pelo fato da carga ser puramente capacitiva. Os desequilíbrios das tensões no PAC são provocados pela interação entre as correntes desequilibradas da carga com as impedâncias de linha.

A Figura 4.6 (B) mostra as quedas de tensões na rede provocadas pela impedância da linha, as quais são senoidais e desequilibradas, pelo fato da carga ser desbalanceada.

As correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu}$ ), apesar de não estarem explícitas, são equivalentes e nulas, pelo fato da carga ser puramente capacitiva.

A Figura 4.6 (C) mostra que as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) não são equivalentes, pelo fato das tensões no PAC serem desequilibradas. Nota-se que as parcelas da CPT são senoidais e as parcelas da Teoria pq são ligeiramente distorcidas.

A Figura 4.6 (D) mostra as correntes residuais e desbalanceadas da CPT ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ). Nota-se que as parcelas de corrente da CPT são senoidais, as quais são representadas somente pelas parcelas desbalanceadas. Já as parcelas de correntes da Teoria pq são distorcidas pelo fato das tensões no PAC serem desequilibradas.

A Figura 4.6 (E) mostra que a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) e a soma da potência real instantânea com a potência de sequência zero instantânea da Teoria pq ( $p = p_{real} + p_0$ ) são equivalentes. Porém, a Tabela 4.6 mostra que apesar de existir valores instantâneos, os valores médios são nulos.

A Figura 4.6 (F) mostra que a energia reativa instantânea da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ) são ligeiramente distintas, pelo fato das tensões no PAC serem desequilibradas.

A Figura 4.6 (G) mostra que existe circulação de corrente no neutro e em (H) mostra o espectro de frequência. Nota-se que só existe frequência fundamental, pelo fato da carga ser linear e as tensões serem senoidais.

No geral, a interação das correntes desequilibradas da carga com as impedâncias de linha tornaram as tensões no PAC desequilibradas e conseqüentemente as parcelas de corrente e suas respectivas parcelas de potência divergentes entre as teorias.

A Tabela 4.6 mostra os valores eficazes das correntes no PAC para carga capacitiva a quatro condutores (3F-N), assim como suas respectivas parcelas de corrente, os valores

médios das potências, fator de potência e as distorções harmônicas das correntes para carga capacitiva.

Nota-se que as distorções harmônicas das correntes são nulas, independentemente da presença das impedâncias de linha, pelo fato da carga ser linear e as tensões senoidais. As correntes ativas balanceadas e médias, o fator de potência, assim como a potência ativa e real são nulas, pelo fato da carga ser puramente capacitiva.

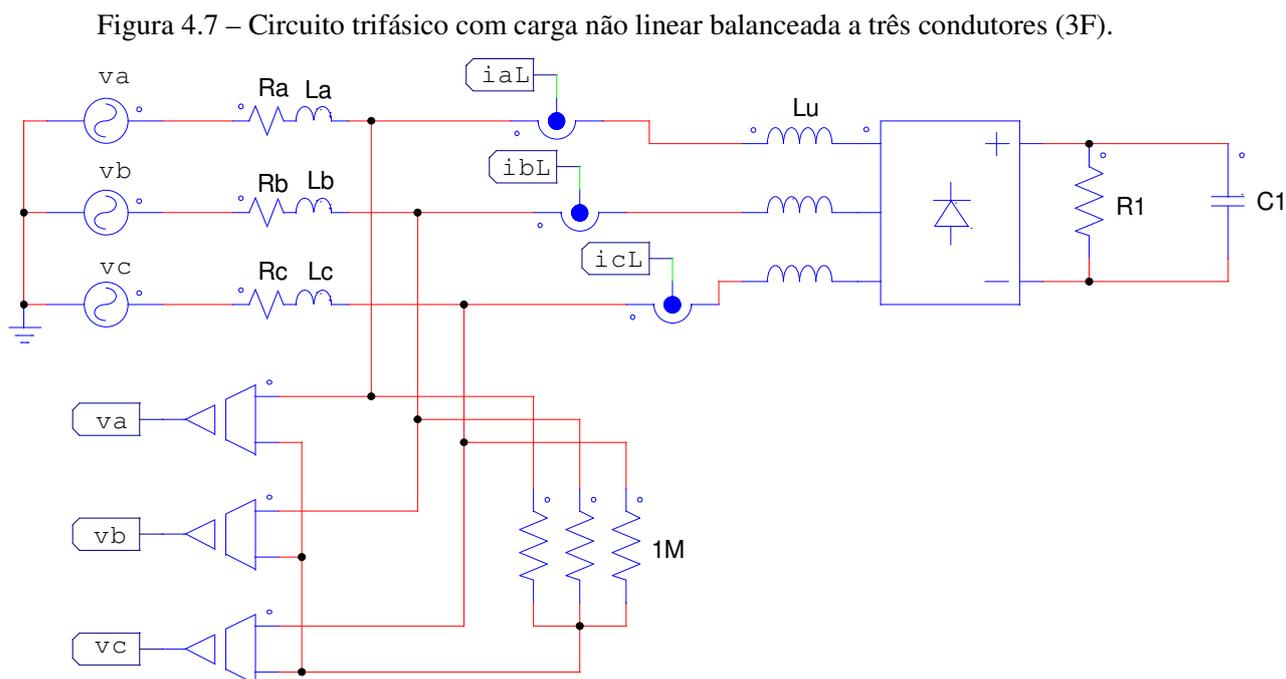
Tabela 4.6 – Dados para carga capacitiva a quatro condutores (3F-N), com impedância de linha.

Carga capacitiva desbalanceada alimentada por tensões senoidais equilibradas			
CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	20,236	$I_a(A)$	20,236
$I_b(A)$	17,108	$I_c(A)$	17,108
$I_c(A)$	4,848	$I_c(A)$	4,848
$I_{aa}^b(A)$	0,000	$I_{a\bar{p}}(A)$	0,000
$I_{ab}^b(A)$	0,000	$I_{b\bar{p}}(A)$	0,000
$I_{ac}^b(A)$	0,000	$I_{c\bar{p}}(A)$	0,000
$I_{ra}^b(A)$	12,457	$I_{a\bar{q}}(A)$	13,987
$I_{rb}^b(A)$	15,000	$I_{b\bar{q}}(A)$	14,001
$I_{rc}^b(A)$	14,027	$I_{c\bar{q}}(A)$	14,006
$I_{va} + i_{ua}(A)$	7,779	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	4,552
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	2,108	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	4,791
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	9,179	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	4,592
$I_{neutro}(A)$	4,922	$I_{neutro}(A)$	4,922
$A(kVA)$	5,934	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	5,283
$P(kW)$	0,000	$P_{\alpha\beta} + P_0(kW)$	0,000
$Q(kVA)$	5,289	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	5,283
$D(kVA)$	0,000	$H(kVA)$	1,753
$N(kVA)$	2,690	$P_0(W)$	0,258
$\lambda$	0,000	$FP_{\alpha\beta 0}$	0,000
$DHT_{Ia}(\%)$	0,000	$DHT_{Ia}(\%)$	0,000
$DHT_{Ib}(\%)$	0,000	$DHT_{Ib}(\%)$	0,000
$DHT_{Ic}(\%)$	0,000	$DHT_{Ic}(\%)$	0,000

Fonte: Próprio autor.

#### 4.4. Carga não linear balanceada com tensões senoidais equilibradas a três condutores

A Figura 4.7 mostra o circuito trifásico a três condutores (3F) com carga não linear balanceada, com impedância de linha. A Tabela 4.7 mostra as tensões e impedância de linha do circuito. As indutâncias na entrada do retificador tem função de filtro para minimizar as distorções de correntes.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.7 – Dados de tensão e impedância de linha.

Tensões não senoidais equilibradas ( $V_{rms}$ )	Dados da carga
$V_a = 127 \angle 0^\circ + \sum V_k$	Retificador trifásico
$V_b = 127 \angle -120^\circ + \sum V_k$	$L_u = 500\mu\text{H}$
$V_c = 127 \angle 120^\circ + \sum V_k$	$R_1 = 13,8\Omega$ e $C_1 = 2350\mu\text{F}$

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.8 (A) mostra que as tensões ( $v_\mu$ ) e correntes ( $i_\mu$ ) no PAC são distorcidas, equilibradas e não estão em fase. As distorções das correntes são geradas pela carga não

linear. As distorções das tensões são provocadas pela interação entre as correntes distorcidas da carga com as impedâncias de linha.

A Figura 4.8 (B) mostra as quedas de tensão na rede que são provocadas pela presença da impedância de linha, as quais são distorcidas e com mesmas frequências harmônicas presentes nas correntes da carga.

A Figura 4.8 (C) mostra o espectro de frequências das quedas de tensões. Nota-se que não há presença de frequências de sequência zero.

A Figura 4.8 (D) mostra que as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu}$ ) são aproximadamente iguais. Esta pequena diferença que ocorre entre as correntes ativas é pelo fato das tensões no PAC se tornarem ligeiramente distorcidas. Como visto no capítulo 3, tensões não senoidais equilibradas geram pequenas oscilações na norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) da Teoria pq, as quais podem ser desprezíveis na maioria dos casos.

A Figura 4.8 (E) mostra que as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) são aproximadamente iguais. Pelos mesmos motivos das divergências que ocorrem nas correntes ativas.

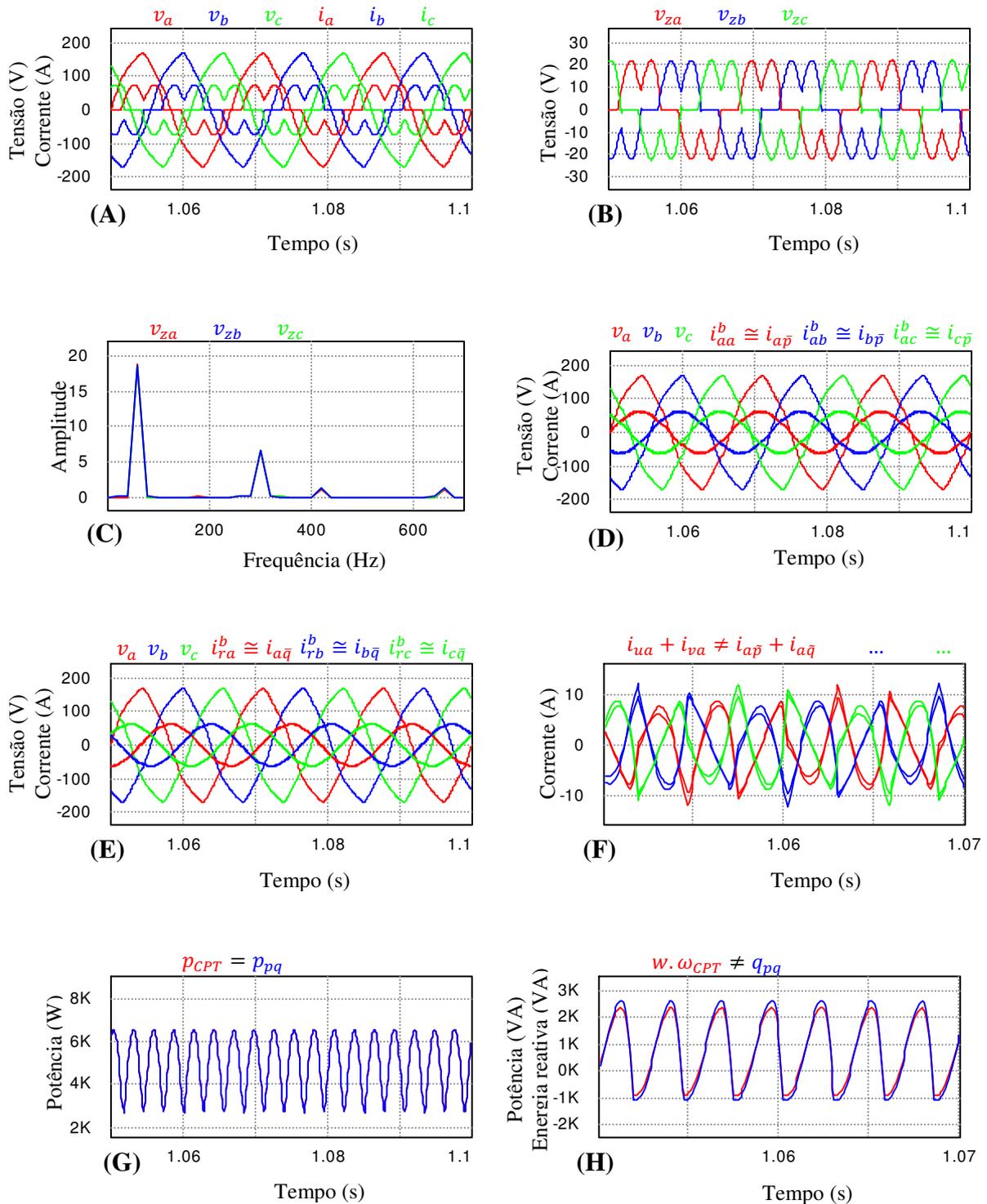
A Figura 4.8 (F) mostra as correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ), as quais são distintas. Como a carga é não linear, as distorções harmônicas são geradas pela carga e impostas nas tensões do PAC pela interação entre as correntes distorcidas da carga com as impedâncias de linha.

A Figura 4.8 (G) mostra que a potência ativa instantânea trifásica da CPT ( $p$ ) e a potência real instantânea trifásica da Teoria pq ( $p$ ) são equivalentes, pelo fato de serem calculadas através dos valores instantâneos das tensões e correntes no PAC (2.41).

A Figura 4.8 (H) mostra que a energia reativa instantânea trifásica da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea trifásica da Teoria pq ( $q$ ) são ligeiramente distintas, pelo fato das tensões no PAC serem ligeiramente distorcidas.

O principal efeito provocado pela interação entre as correntes distorcidas da carga com as impedâncias de linha foi que as tensões no PAC se tornaram ligeiramente distorcidas. Assim ocasionaram uma ligeira diferença entre as parcelas de corrente das duas teorias, bem como entre suas respectivas parcelas de potência.

Figura 4.8 – Valores instantâneos de tensões, correntes e potências para carga não linear balanceada com tensões senoidais equilibradas a três condutores (3F), com impedância de linha.



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 4.8 mostra os valores eficazes das correntes no PAC para carga não linear a três condutores, assim como suas respectivas parcelas de corrente, valores médios das potências, fator de potência e distorções harmônicas das correntes e das tensões.

Nota-se que as distorções harmônicas das correntes têm valores elevados. A interação entre as correntes distorcidas da carga com as impedâncias de linha faz com que as tensões no PAC se tornem distorcidas com valor aproximado de 4% em cada fase.

As potências que geram trabalho se mantiveram equivalentes pelo fato do circuito ser a três condutores (3F). Assim como nos casos anteriores, a potência aparente e o fator de potência em ambas as teorias se mantiverem distintos. Nota-se que a potência desbalanceada da CPT é nula, o que mostra que as parcelas ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) representam exclusivamente as distorções das correntes da carga.

Tabela 4.8 – Dados para carga não linear a três condutores (3F), como impedância de linha.

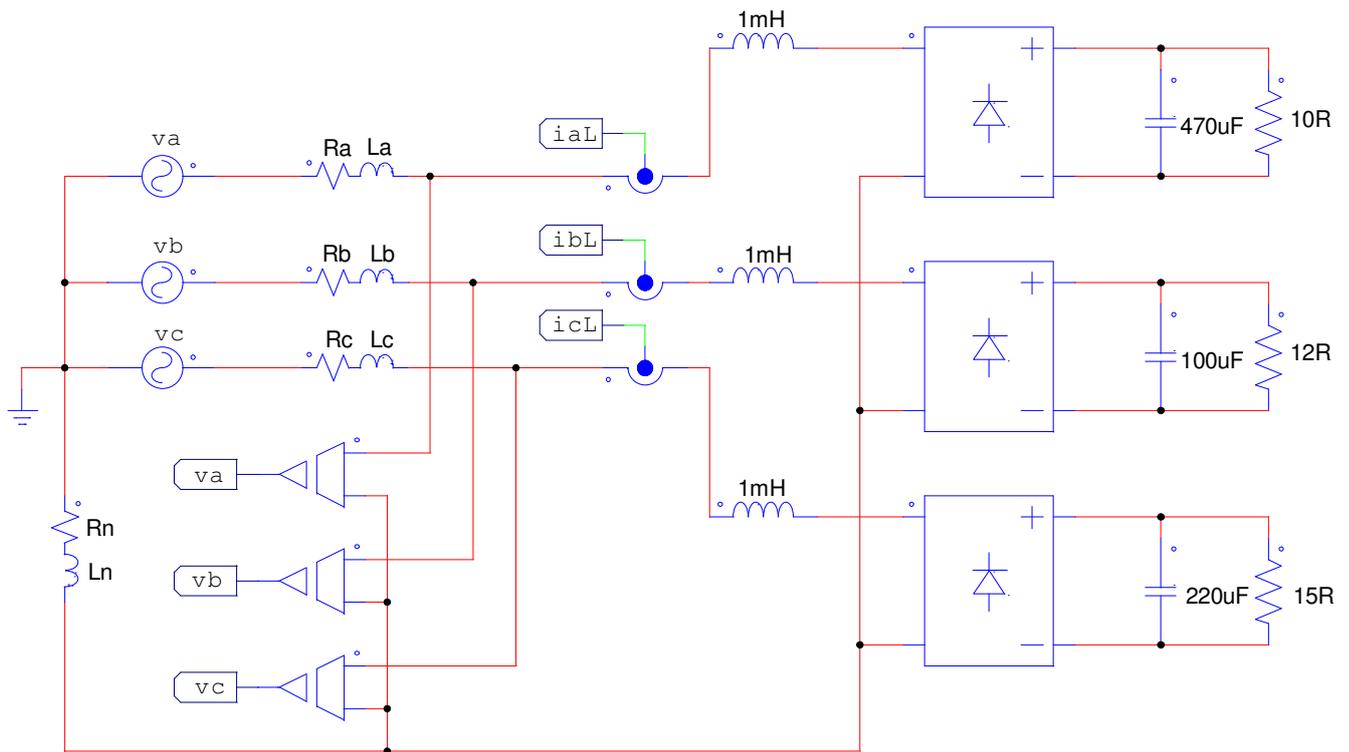
Carga não linear balanceada alimentada por tensões senoidais equilibradas			
CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	15,953	$I_a(A)$	15,953
$I_b(A)$	15,916	$I_c(A)$	15,916
$I_c(A)$	15,912	$I_c(A)$	15,912
$I_{aa}^b(A)$	14,530	$I_{a\bar{p}}(A)$	14,563
$I_{ab}^b(A)$	14,516	$I_{b\bar{p}}(A)$	14,546
$I_{ac}^b(A)$	14,516	$I_{c\bar{p}}(A)$	14,544
$I_{ra}^b(A)$	2,183	$I_{a\bar{q}}(A)$	2,209
$I_{rb}^b(A)$	2,186	$I_{b\bar{q}}(A)$	2,211
$I_{rc}^b(A)$	2,186	$I_{c\bar{q}}(A)$	2,211
$I_{va} + i_{ua}(A)$	6,174	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	5,438
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	6,181	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	5,443
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	6,194	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	5,456
$A(kVA)$	5,447	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	5,021
$P(kW)$	4,964	$P_{\alpha\beta}(kW)$	4,964
$Q(kVA)$	0,747	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	0,754
$D(kVA)$	2,113	$H(kVA)$	1,876
$U(kVA)$	0,000	$P_0(kW)$	0,000
$\lambda$	0,911	$FP_{\alpha\beta 0}$	0,989
$DHT_{Ia}(\%)$	36,903	$DHT_{Ia}(\%)$	36,903
$DHT_{Ib}(\%)$	37,005	$DHT_{Ib}(\%)$	37,005
$DHT_{Ic}(\%)$	37,074	$DHT_{Ic}(\%)$	37,074
$DHT_{va}(\%)$	4,027	$DHT_{va}(\%)$	4,027
$DHT_{vb}(\%)$	4,051	$DHT_{vb}(\%)$	4,051
$DHT_{vc}(\%)$	4,058	$DHT_{vc}(\%)$	4,058

Fonte: Próprio autor.

#### 4.5. Carga não linear com tensões senoidais equilibradas a quatro condutores

A Figura 4.9 mostra o circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga não linear desbalanceada, com impedância de linha. A Tabela 4.9 mostra os valores das tensões do circuito. A indutância na entrada da carga tem função de filtro para minizar as distorções das correntes.

Figura 4.9 – Circuito trifásico a quatro condutores (3F-N) com carga não linear desbalanceada.



Fonte: Próprio autor.

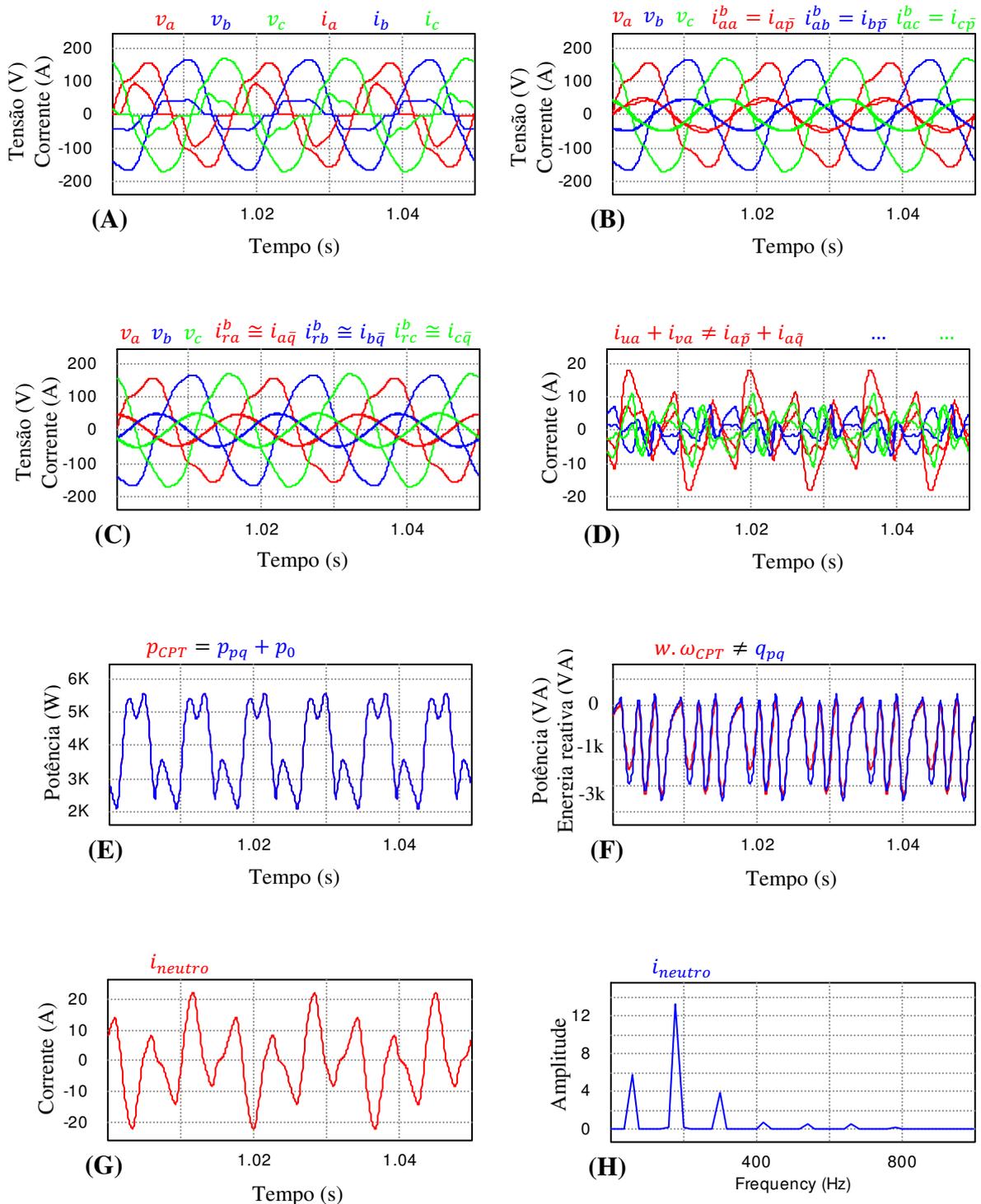
Tabela 4.9 – Dados de tensões para carga não linear desbalanceada a quatro condutores (3F-N).

Tensões senoidais equilibradas ( $V_{rms}$ )
$V_a = 127 < 0^\circ$
$V_b = 127 < -120^\circ$
$V_c = 127 < 120^\circ$

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.10 mostra as tensões e correntes no PAC. Assim como as parcelas de corrente decompostas, as parcelas de potência e a corrente no neutro para carga não linear desbalanceada a quatro condutores (3F-N), com impedância de linha.

Figura 4.10 – Valores instantâneos de tensões, correntes, potências e corrente no neutro para carga não linear desbalanceada com tensões senoidais equilibradas a quatro condutores (3F-N).



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.9 (A) mostra que as tensões ( $v_\mu$ ) e correntes ( $i_\mu$ ) no PAC são distorcidas e desequilibradas. As distorções e desequilíbrios das tensões no PAC são provocadas pela interação entre as correntes distorcidas e desequilibradas da carga com as impedâncias de linha. As distorções das correntes são geradas pela carga.

A Figura 4.9 (B) mostra que as correntes ativas balanceadas da CPT ( $i_{a\mu}^b$ ) e as correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu}$ ) não são equivalentes pelo fato das tensões no PAC se tornarem distorcidas e desequilibradas. Como mostrado nos casos anteriores, tensões desequilibradas e/ou distorcidas fazem surgir oscilações nas correntes ativas médias da Teoria pq que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões.

A Figura 4.9 (C) mostra que as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) são aproximadamente iguais. Isso ocorre pelo fato das oscilações da norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) terem amplitude pequena e que podem ser desprezadas.

A Figura 4.9 (D) mostra que as correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{v\mu} + i_{u\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ) não são equivalentes, pelo fato das tensões no PAC serem distorcidas e desequilibradas. Como a carga é não linear desbalanceada, as distorções harmônicas e os desbalanços são gerados pela carga.

A Figura 4.9 (E) mostra que a potência ativa instantânea da CPT ( $p$ ) tem equivalência com a soma da potência real instantânea e a potência de sequência zero instantânea da Teoria pq ( $p$ ).

A Figura 4.9 (F) mostra que a energia reativa instantânea da CPT ( $\omega w$ ) e a potência imaginária instantânea da Teoria pq ( $q$ ) são ligeiramente diferentes, pelo fato das tensões no PAC serem distorcidas e desequilibradas.

A Figura 4.9 (G) mostra que existe circulação de corrente pelo neutro e em (H) mostra-se o espectro de frequência. As frequências harmônicas são as próprias frequências geradas pela carga.

O principal efeito provocado pela interação entre as correntes da carga e as impedâncias de linha é fazer com que as tensões no PAC se tornem distorcidas e desequilibradas. Tais distúrbios provocam divergência entre as parcelas de corrente entre estas duas teorias (CPT e Teoria pq), assim como em suas respectivas parcelas de potência.

A Tabela 4.9 mostra os valores eficazes das correntes, os valores médios das potências, fator de potência, as distorções harmônicas das correntes e das tensões.

Tabela 4.10 – Dados para carga não linear desbalanceada com quatro condutores (3F-N), com impedância de linha.

Carga não linear desbalanceada alimentada por tensões senoidais equilibradas			
CPT		Teoria pq	
$I_a(A)$	17,116	$I_a(A)$	17,116
$I_b(A)$	10,962	$I_c(A)$	10,962
$I_c(A)$	11,070	$I_c(A)$	11,070
$I_{aa}^b(A)$	10,525	$I_{a\bar{p}}(A)$	11,805
$I_{ab}^b(A)$	11,337	$I_{b\bar{p}}(A)$	11,571
$I_{ac}^b(A)$	11,500	$I_{c\bar{p}}(A)$	11,395
$I_{ra}^b(A)$	3,206	$I_{a\bar{q}}(A)$	3,342
$I_{rb}^b(A)$	3,479	$I_{b\bar{q}}(A)$	3,412
$I_{rc}^b(A)$	3,525	$I_{c\bar{q}}(A)$	3,463
$I_{va} + i_{ua}(A)$	9,537	$I_{a\bar{p}} + I_{a\bar{q}}(A)$	4,447
$I_{vb} + i_{ub}(A)$	2,606	$I_{b\bar{p}} + I_{b\bar{q}}(A)$	4,008
$I_{vc} + i_{uc}(A)$	5,577	$I_{c\bar{p}} + I_{c\bar{q}}(A)$	3,070
$I_{neutro}(A)$	10,588	$I_{neutro}(A)$	10,588
$A(kVA)$	4,702	$S_{\alpha\beta 0}(kVA)$	4,095
$P(kW)$	3,918	$P_{\alpha\beta} + P_0(kW)$	3,918
$Q(kVA)$	1,199	$Q_{\alpha\beta}(kVA)$	1,190
$D(kVA)$	2,110	$H(kVA)$	1,353
$U(kVA)$	0,931	$P_0(kW)$	0,132
$\lambda$	0,833	$FP_{\alpha\beta 0}$	0,957
$DHT_{Ia}(\%)$	43,800	$DHT_{Ia}(\%)$	43,800
$DHT_{Ib}(\%)$	18,419	$DHT_{Ib}(\%)$	18,419
$DHT_{Ic}(\%)$	40,454	$DHT_{Ic}(\%)$	40,454
$DHT_{va}(\%)$	13,021	$DHT_{va}(\%)$	13,021
$DHT_{vb}(\%)$	7,311	$DHT_{vb}(\%)$	7,311
$DHT_{vc}(\%)$	9,599	$DHT_{vc}(\%)$	9,599

Fonte: Próprio autor.

Nota-se que a interação entre as correntes da carga e as impedâncias de linha provocou distorções nas tensões do PAC, as quais provocam divergências entre as parcelas de correntes, assim como em suas parcelas de potências.

O fator de potência e a potência aparente resultam diferentes entre as teorias. Assim como nos casos anteriores, isso significa que a proposta de cálculo não é suficiente para representar todos os efeitos presentes no circuito.



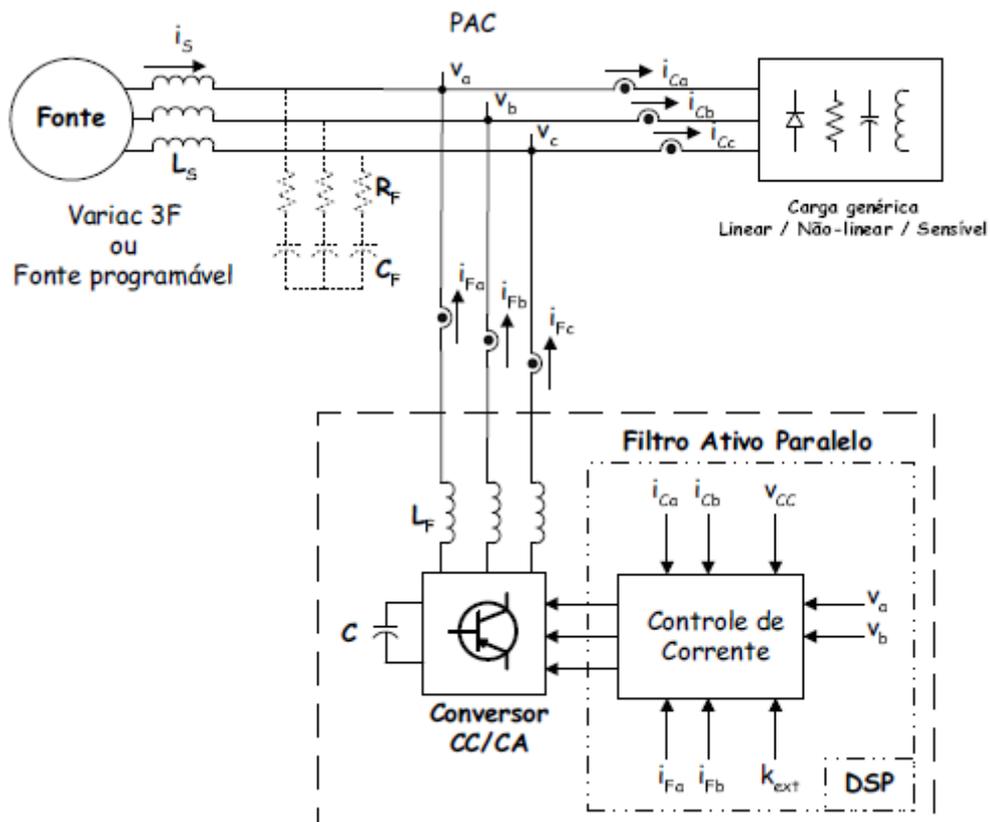
## 5. COMPENSAÇÃO DE CORRENTES NÃO ATIVAS

O desenvolvimento dos chamados compensadores ou condicionadores de energia passa pelo estudo e proposição de diversas tecnologias distintas, sendo uma delas o estudo de técnicas de análise dos circuitos elétricos ou de suas formas de onda, para o projeto e/ou definição de estratégias de controle dos dispositivos compensadores de distúrbios [1], [21].

No caso da compensação de distúrbios de corrente, a topologia mais efetiva é a dos filtros ativos paralelos [1], [21], [37], [38], [39], que são capazes de minimizar ou eliminar determinadas parcelas de corrente em função de referências que usualmente são definidas através de uma teoria de potência adequada [40], [41], [42], [43], [44].

A Figura 5.1 indica a topologia básica de um filtro ativo paralelo trifásico, para circuitos com três condutores (3F), o qual é composto por um conversor CC/CA, filtros indutivos, banco de capacitores, sensores e dispositivo de processamento. Tal filtro deve ser controlado de forma adequada para injetar correntes de compensação de acordo com a estratégia de compensação escolhida.

Figura 5.1 – Filtro ativa paralelo.



Fonte: Marafão, Tese de doutorado, 2004.

Neste contexto, a Teoria de Potências Instantâneas tem sido a teoria mais citada na literatura [21], [45]. Por esta razão, a Teoria pq foi escolhida neste trabalho como base para um estudo comparativo com a Teoria de Potência Conservativa, na definição das correntes de referência para a compensação através de filtros ativos paralelos [46], [47]. Assim, o foco deste capítulo é explorar as semelhanças e diferenças entre as parcelas de correntes e potências de cada teoria, especialmente analisando-se sua aplicação na geração de referências de compensação para filtros ativos paralelos.

Assim, diversas simulações serão apresentadas, buscando-se explorar a compensação dos distúrbios de corrente de forma seletiva ou conjunta, através de referências fornecidas pelas duas teorias de potência. No caso da compensação de todas as parcelas de correntes não ativas, as correntes da fonte resultam as próprias correntes ativas balanceadas ( $i_{a\mu}^b$ ) da CPT e as correntes ativas médias ( $i_{p\mu}$ ) da Teoria pq. No caso da compensação seletiva, apenas determinados tipos de distúrbios são compensados através das parcelas de corrente e potência correspondentes.

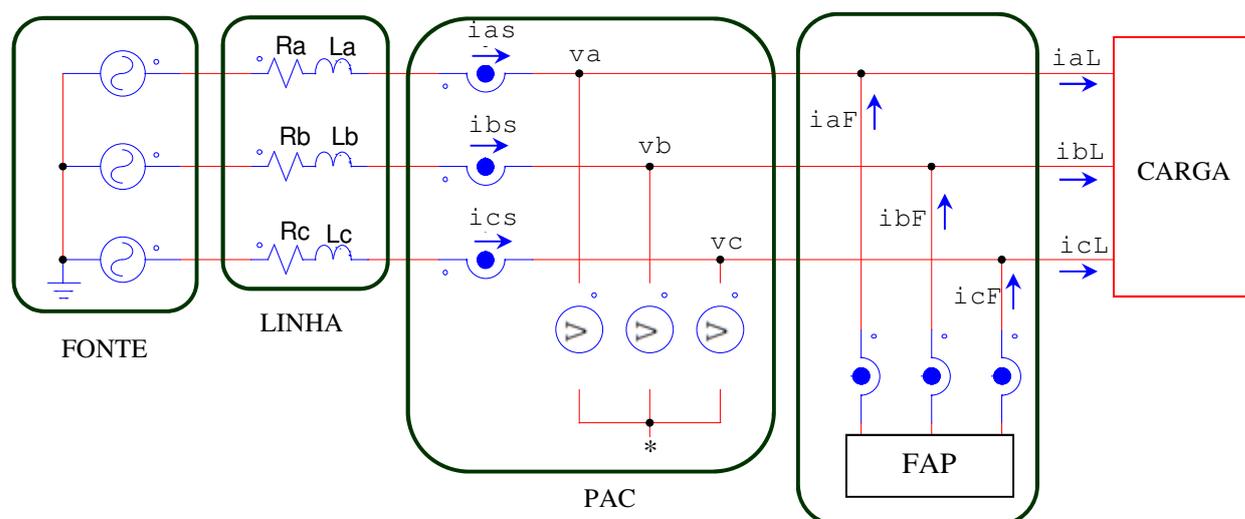
Para o estudo foram escolhidas algumas configurações de carga e tensões de alimentação, de maneira a explorar as principais semelhanças e diferenças na compensação das correntes não ativas e suas subparcelas, em função de cada teoria utilizada. Também foram simulados sistemas sem e com impedância de linha, com o intuito de evidenciar o efeito da compensação com cada teoria, nos diferentes tipos de circuitos.

No caso da CPT serão injetadas na rede as parcelas de correntes que não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga, as quais são: as correntes ativas desbalanceadas ( $i_{a\mu}^u$ ), as correntes reativas balanceadas ( $i_{r\mu}^b$ ), as correntes reativas desbalanceadas ( $i_{r\mu}^u$ ) e as correntes residuais ( $i_{v\mu}$ ). Tais parcelas podem ser compensadas isoladamente ou em combinações entre si. No caso da Teoria pq são: as correntes ativas oscilantes ( $i_{p\mu}$ ), as correntes reativas médias ( $i_{q\mu}$ ) e as correntes reativas oscilantes ( $i_{q\mu}$ ), que também podem ser compensadas isoladamente ou em combinações entre si.

### ***Sistema utilizado nas simulações para a análise das teorias em compensação de correntes***

A Figura 5.2 mostra o circuito elétrico utilizado para as análises em termos da compensação de correntes não ativas. Neste sistema está indicada a presença da impedância de linha ( $R_a = R_b = R_c = 0,887\Omega$  e  $L_a = L_b = L_c = 40\mu F$ ), a qual não será utilizada em todos os casos, mas apenas nos casos indicados na sequência.

Figura 5.2 – Sistema utilizado nas simulações para a análise em compensação de correntes.



Fonte: Próprio autor.

O símbolo “\*” representa o referencial de medição de tensão, também conhecido como ponto estrela virtual.

Os algoritmos das duas teorias foram implementados no software PSIM, em linguagem C. A frequência de amostragem foi padronizada em 12 kHz.

O filtro ativo de potência (FAP) foi modelado idealmente neste trabalho, através de fontes de corrente controladas, evitando assim que imperfeições de controle ou chaveamento dos conversores CC/CA influenciassem nos resultados de compensação das correntes no PAC.

As cargas utilizadas para as análises dos circuitos trifásicos a três condutores (3F), com tensões senoidais equilibradas e sem a presença das impedâncias de linha são:

- ✓ a – Carga resistiva desbalanceada com tensões senoidais equilibradas;
- ✓ b – Carga resistiva-indutiva desbalanceada com tensões senoidais equilibradas;
- ✓ c – Carga não linear balanceada com tensões senoidais equilibradas;
- ✓ d – Carga não linear desbalanceada com tensões senoidais equilibradas;

As cargas simuladas com a presença das impedâncias de linha são:

- ✓ e – Carga não linear desbalanceada;
- ✓ f – Carga não linear desbalanceada com tensões senoidais desequilibradas.

A Tabela 5.0 mostra os valores das tensões utilizadas em todos os casos simulados.

Tabela 5.0 – Dados de tensões senoidais a três condutores (3F-N).

Casos: a, b, c, d, e.	Caso: f
$v_a = 127 < 0^\circ (V)$	$v_a = 127 < 0^\circ (V)$
$v_b = 127 < -120^\circ (V)$	$v_b = 113 < -104,4^\circ (V)$
$v_c = 127 < 120^\circ (V)$	$v_c = 147,49 < 144 (V)$

Fonte: Paredes, Tese de doutorado, 2010.

A escolha das tensões nos casos de a – e buscou enfatizar os distúrbios provocados pela carga, para então compensá-los. No caso f, o objetivo foi evidenciar os efeitos de desequilíbrio da tensão nas correntes compensadas.

As estratégias de compensação que foram utilizadas no estudo comparativo foram:

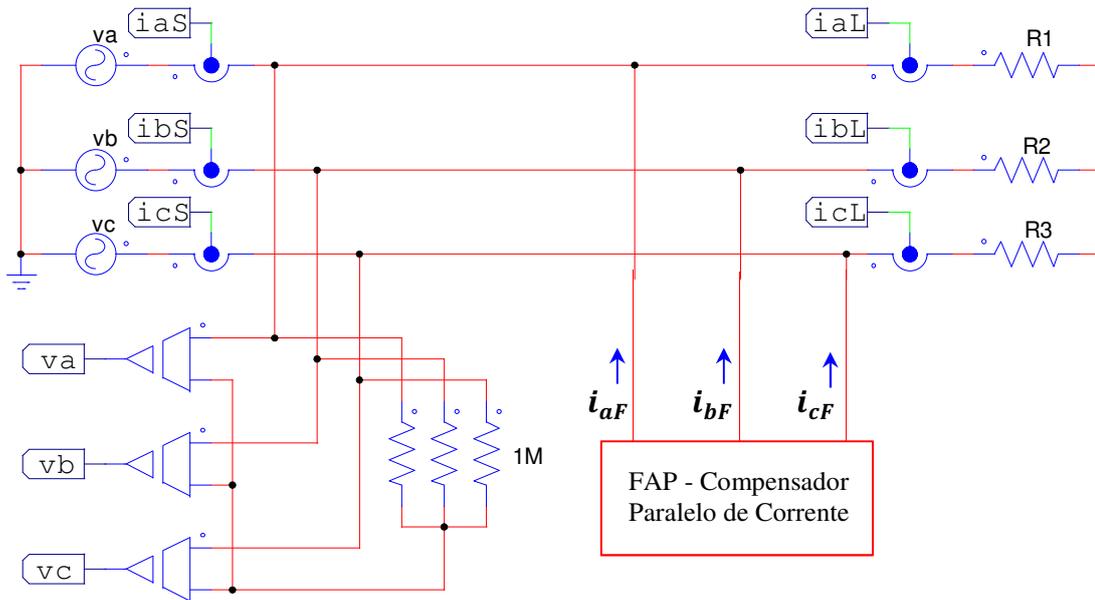
- Compensar as correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ );
- Compensar as correntes reativas da CPT ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u$ ) e as correntes reativas da Teoria pq ( $i_{r\mu} = i_{\bar{q}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ );
- Compensar as correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ );
- Compensar as correntes não ativas para as duas teorias, as quais são dadas por: ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u + i_{v\mu}$ ) e ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ).

Muitas outras estratégias de compensação poderiam ainda ser avaliadas e comparadas, no entanto, a escolha destas parcelas é motivada pela possibilidade de haver equivalência entre as parcelas de correntes.

### 5.1. Carga resistiva desbalanceada – a

A Figura 5.3 mostra o circuito trifásico com carga resistiva balanceada para as análises comparativas entre as parcelas de corrente, em compensação. A Tabela 5.1 mostra os valores da carga.

Figura 5.3 – Circuito trifásico a três condutores (3F) com carga resistiva desbalanceada – a.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.1 – Valores da carga resistiva - a.

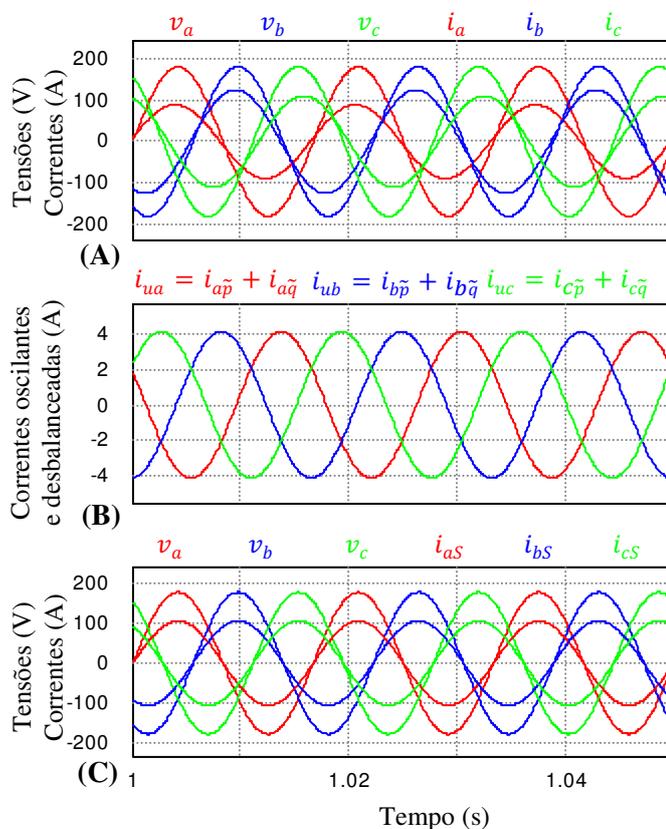
Dados da carga
$R1 = 11,8 \Omega$
$R2 = 5,9 \Omega$
$R3 = 8,5 \Omega$

Fonte: Próprio autor.

Neste caso, as correntes que representam as não linearidades são nulas. Assim, como as correntes reativas balanceadas e médias, pelo fato da carga ser puramente resistiva. Portanto, somente as parcelas de corrente que representam os desbalanços são compensadas. Ou seja, as correntes de referências injetadas pelo compensador através da CPT são dadas por:  $(i_u = i_a^u + i_r^u)$  e, através da Teoria pq são dadas por:  $(i_{p\mu} + i_{q\mu})$ , que neste caso só representam os desbalanços da carga.

A Figura 5.4 mostra em (A) que as tensões e correntes no PAC são senoidais. Porém, as correntes são desequilibradas, pelo fato da carga ser desbalanceada. Em (B) mostra-se as correntes de referência que são compensadas, para as duas teorias. Em (C) mostra-se que após a compensação, as tensões e correntes no PAC são senoidais equilibradas e estão perfeitamente em fase. Ou seja, as correntes da fonte são as próprias correntes ativas balanceadas  $(i_{S\mu} = i_{a\mu}^b)$  da CPT e, as próprias correntes ativas médias  $(i_{S\mu} = i_{p\mu})$  da Teoria pq.

Figura 5.4 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) – a.

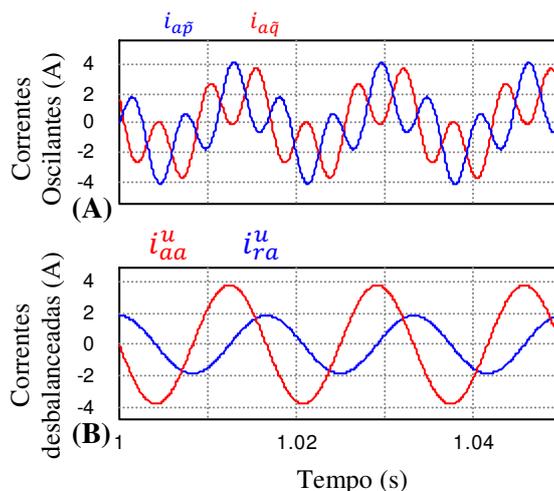


Fonte: Próprio autor.

Não existe equivalência na compensação entre as parcelas ativas desbalanceadas e ativas oscilantes, assim como entre as parcelas reativas desbalanceadas e reativas oscilantes.

A Figura 5.5 (A) mostra que as parcelas ativas e reativas oscilantes da Teoria pq são distorcidas, apesar de a carga ser puramente resistiva e as tensões serem senoidais equilibradas. No entanto, em (B) mostra-se que as correntes ativas e reativas desbalanceadas da CPT são senoidais. Para haver correspondência entre estas parcelas de corrente é preciso comparar as parcelas desbalanceadas da CPT e as parcelas oscilantes da Teoria pq, ou seja,  $(i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u = i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu})$ .

Figura 5.5 – Correntes oscilantes da fase *a* da Teoria pq (A) e desbalanceadas da CPT (B) – a.



Fonte: Próprio autor.

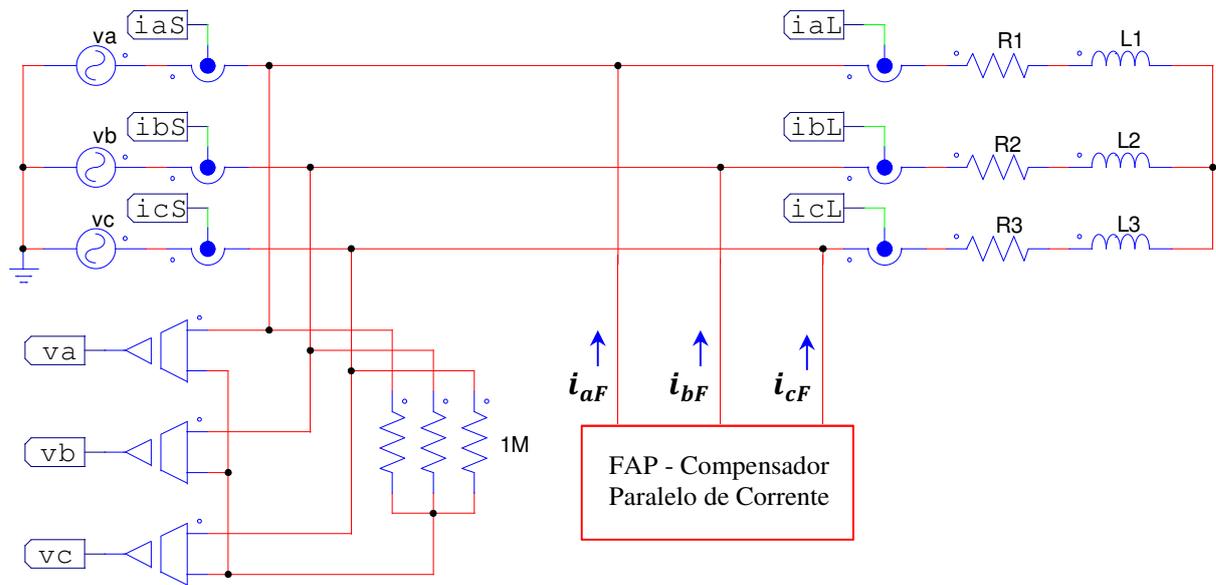
Estas distorções presentes nas correntes oscilantes da Teoria pq tem frequência de 180Hz. Isso ocorre pelo fato que o cálculo das correntes oscilantes depende das potências oscilantes, que tem dupla frequência (120Hz). No processo de interação entre as potências e as tensões instantâneas surge a frequência de 180Hz [9]. Portanto, mesmo com tensões senoidais equilibradas e carga puramente resistiva desbalanceada, não há equivalência entre as parcelas ativas desbalanceadas e as ativas oscilantes, assim como não há equivalência entre as reativas desbalanceadas e as reativas oscilantes.

Estas oscilações de tripla frequência (180Hz) também irão aparecer em carga RL, C e não linear, sempre que estas forem desbalanceadas. Assim, para comparar as não linearidades e desbalanços entre as teorias é necessário utilizar a soma das parcelas oscilantes da Teoria pq, com a soma das correntes desbalanceadas e residuais da CPT. No entanto, para cargas lineares com tensões senoidais, as correntes residuais sempre serão nulas ( $i_{v\mu} = 0$ ) e as correntes oscilantes representarão exclusivamente os desbalanços do circuito.

## 5.2. Carga resistiva-indutiva desbalanceada – b

A Figura 5.6 mostra o circuito trifásico com carga resistiva-indutiva desbalanceada, para as análises comparativas das parcelas de correntes entre as teorias. A Tabela 5.2 mostra os valores da carga.

Figura 5.6 – Circuito trifásico a três condutores (3F) com carga resistiva-indutiva – b.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.2 – Valores da carga resistiva-indutiva – b.

Dados da carga
$R_1 = 11,8 \Omega$ e $L_1 = 20 \text{ mH}$
$R_2 = 5,9\Omega$ e $L_2 = 10 \text{ mH}$
$R_3 = 8,5\Omega$ e $L_3 = 15 \text{ mH}$

Fonte: Próprio autor.

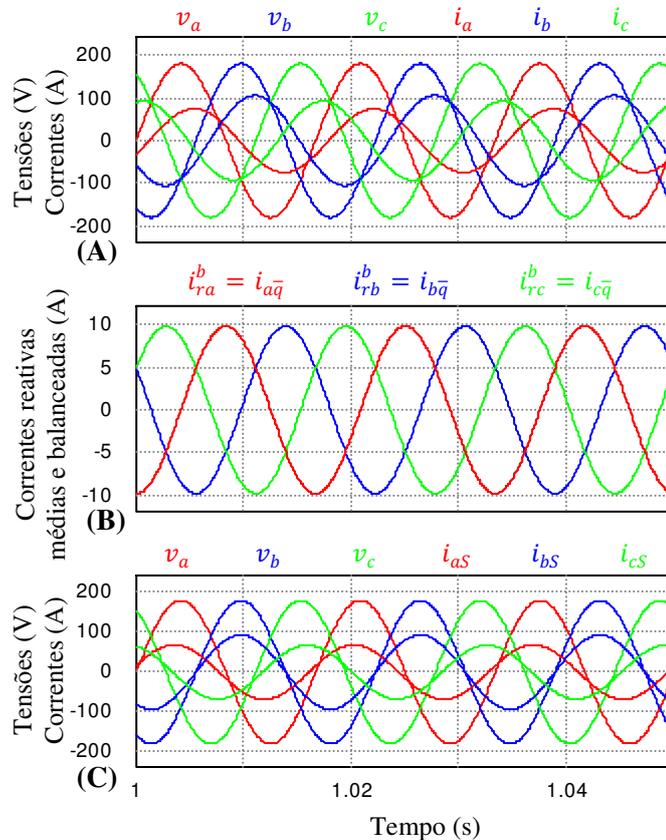
Neste caso, as correntes que representam as não linearidades da carga são nulas, pelo fato das tensões serem senoidais e a carga linear. No entanto, existem desbalanço e reativos para serem compensados.

### 5.2.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – b

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas balanceadas ( $i_{r\mu}^b$ ) da CPT e as correntes reativas médias ( $i_{q\mu}$ ) da Teoria pq.

A Figura 5.7 mostra as tensões e correntes antes e depois da compensação das parcelas reativas, assim como as correntes de referência das duas teorias.

Figura 5.7 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte depois da compensação (C) – b.



Fonte: Próprio autor.

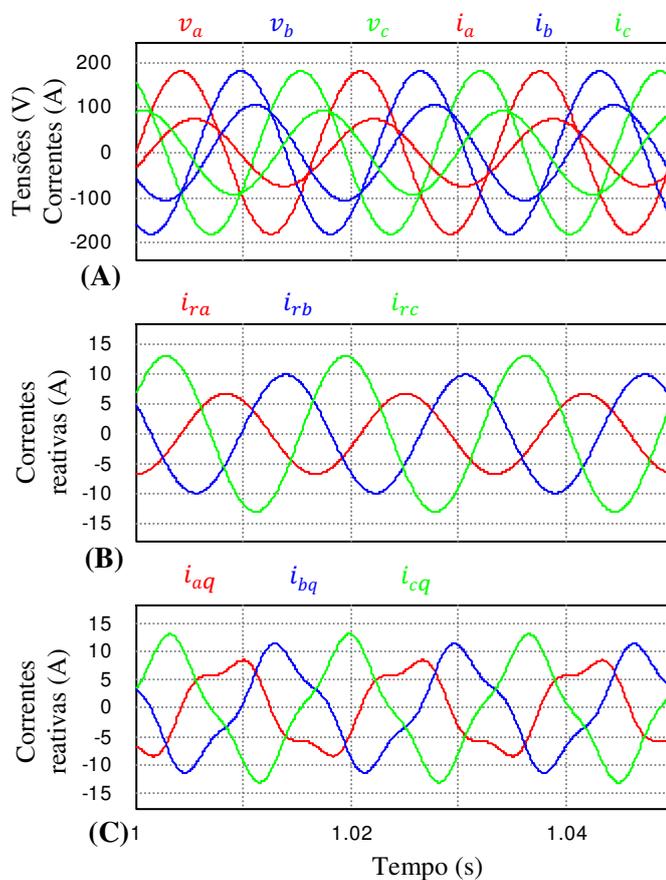
A Figura 5.7 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são senoidais e desequilibradas, pelo fato da carga ser linear desbalanceada. Porém, não estão em fase devido à presença de indutores na carga. Em (B) mostra-se as correntes de referência para as duas teorias. Em (C) mostra-se as tensões e correntes após a compensação, para as duas teorias, as quais resultam senoidais, desequilibradas e ligeiramente defasadas. Isto ocorre pelo fato que ainda estão presentes as parcelas de desbalanço, que no caso da CPT são dadas por:  $(i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u)$  e no caso da Teoria pq são dadas por:  $(i_{p\mu} + i_{q\mu})$ .

### 5.2.2. Compensação das correntes reativas – b

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas da CPT  $(i_{r\mu} = i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u)$  e as correntes reativas da Teoria pq  $(i_{q\mu} = i_{q\mu} + i_{q\mu})$ .

A Figura 5.8 mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, assim como as correntes de referência das duas teorias.

Figura 5.8 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte, após da compensação (C) – b.



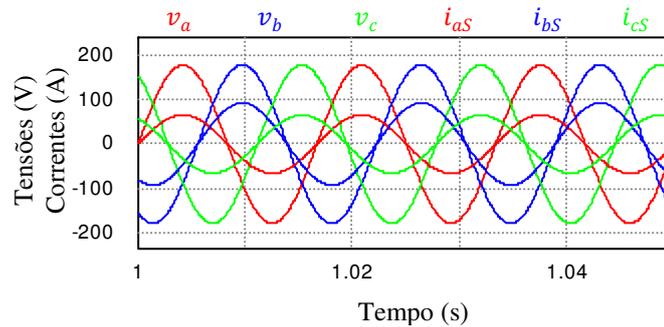
Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.8 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.2.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT e em (C) com a Teoria pq, as quais são compensadas do sistema.

A Figura 5.9 mostra a compensação com a CPT e a Figura 5.10 mostra a compensação com a Teoria pq.

A Figura 5.9 mostra as tensões e correntes após a compensação com a CPT, as quais são senoidais e desequilibradas. Os desequilíbrios presentes nas correntes são representados pelas correntes ativas desbalanceadas, que não foram compensadas.

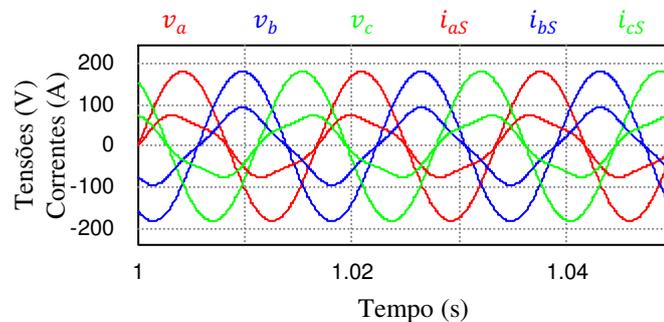
Figura 5.9 – Tensões e correntes na fonte, após da compensação (CPT) – b.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.10 mostra as tensões e correntes, após a compensação com a Teoria pq, as quais são distorcidas e desequilibradas, as distorções ocorrem em função do aparecimento da frequência de 180Hz nas correntes ativas e reativas no processo de decomposição de correntes em parcelas médias e oscilantes. Após a compensação das parcelas reativas, ainda estão presentes no sistema as parcelas ativas oscilantes. Caso fossem compensadas as duas parcelas juntas, isso não ocorreria, pelo fato que a soma das parcelas oscilantes resultam senoidais.

Figura 5.10 – Tensões e correntes na fonte, após da compensação (Teoria pq) – b.



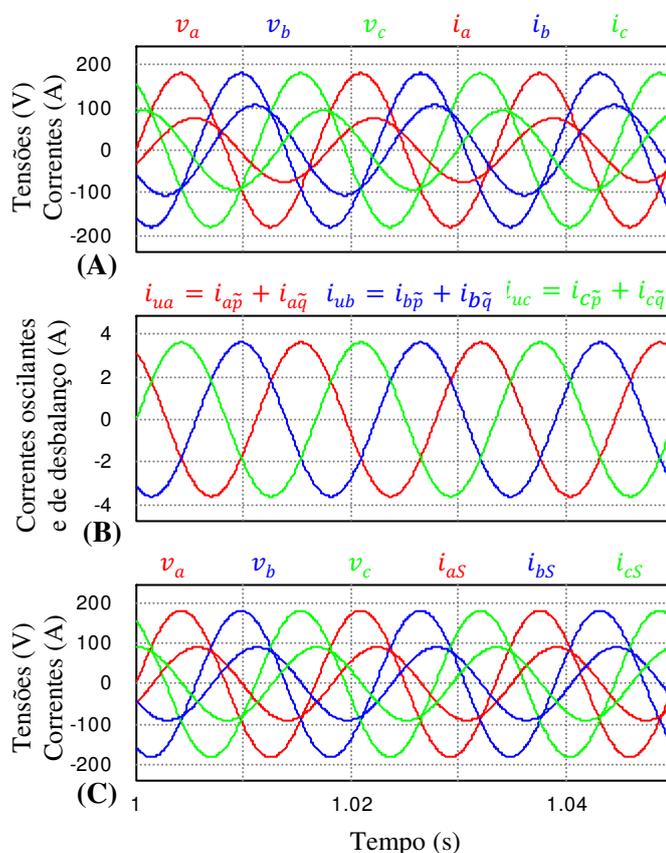
Fonte: Próprio autor.

### 5.2.3. Compensação das correntes desbalanceadas e oscilantes – b

Esta seção mostra a compensação das correntes desbalanceadas ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^u + i_{r\mu}^o$ ) da CPT e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{q\mu} = i_{p\mu} + i_{q\mu}$ ). Recordando, que as não linearidades são nulas. Portanto, as parcelas oscilantes da Teoria pq representam exclusivamente os desbalanços da carga.

A Figura 5.11 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, que são as mesmas apresentadas na seção 5.2.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência das duas teorias, as quais são senoidais. Em (C) mostra-se as tensões e correntes, após a compensação, as quais são senoidais equilibradas. Porém, ainda estão defasadas, pelo fato das correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) da Teoria pq não terem sido compensadas.

Figura 5.11 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) para ambas as teorias – b.



Fonte: Próprio autor.

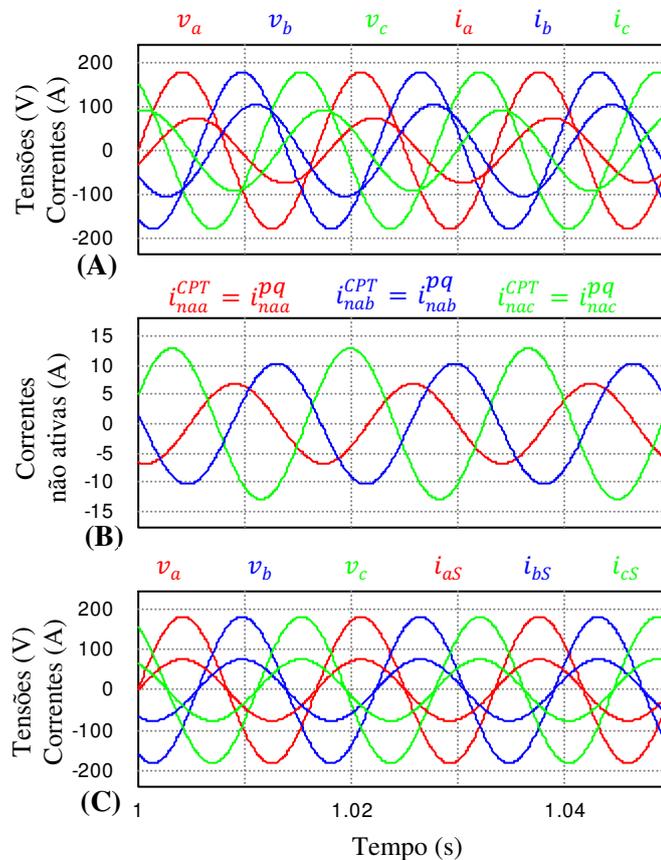
#### 5.2.4. Compensação das correntes não ativas – b

Esta seção mostra a compensação das correntes não ativas, as quais não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga. No caso da CPT, são representadas por: ( $i_{na\mu}^{CPT} = i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^b + i_{\bar{q}\mu}^u$ ) e, na da Teoria pq por: ( $i_{na\mu}^{pq} = i_{\tilde{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} + i_{\tilde{q}\mu}$ ).

A Figura 5.12 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.2.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência

para as duas teorias. Em (C) mostra-se as tensões e correntes na fonte, após a compensação das correntes não ativas, as quais são senoidais equilibradas e estão perfeitamente em fase. Esta é a melhor estratégia de compensação, pelo fato de serem compensados todos os distúrbios provocados pela carga. Neste caso, toda a energia da fonte é transferida para a carga.

Figura 5.12 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) – b.

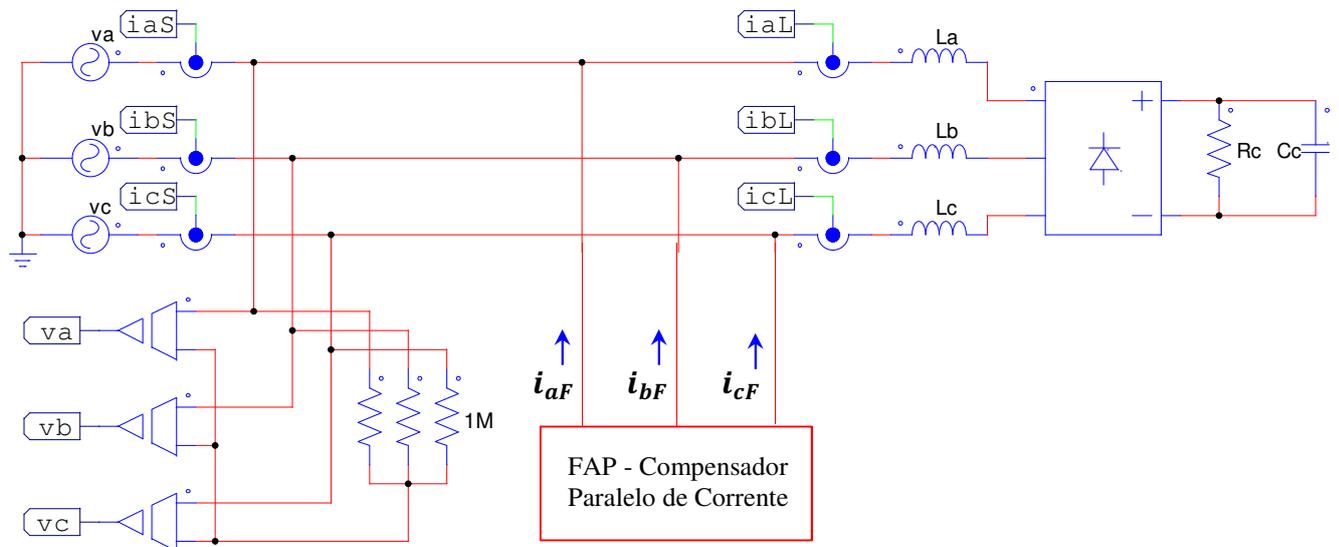


Fonte: Próprio autor.

### 5.3. Carga não linear balanceada – c

A Figura 5.13 mostra o circuito com carga não linear balanceada para as análises em compensação, a qual é representada por um retificador trifásico a diodo. A Tabela 5.3 mostra as características da carga. As indutâncias na entrada da carga tem função de filtro para minimizar as distorções das correntes.

Figura 5.13 – Circuito trifásico a três condutores (3F) com carga não linear balanceada – c.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.3 – Valores da carga não linear balanceada – c.

$L_a = L_b = L_c = 500\mu H$
$R_c = 13,8\Omega$
$C_c = 2350\mu F$

Fonte: Próprio autor.

As correntes que representam os desbalanços são nulas, pelo fato da carga ser balanceada. Porém, as não linearidades e os reativos serão compensados nas próximas seções.

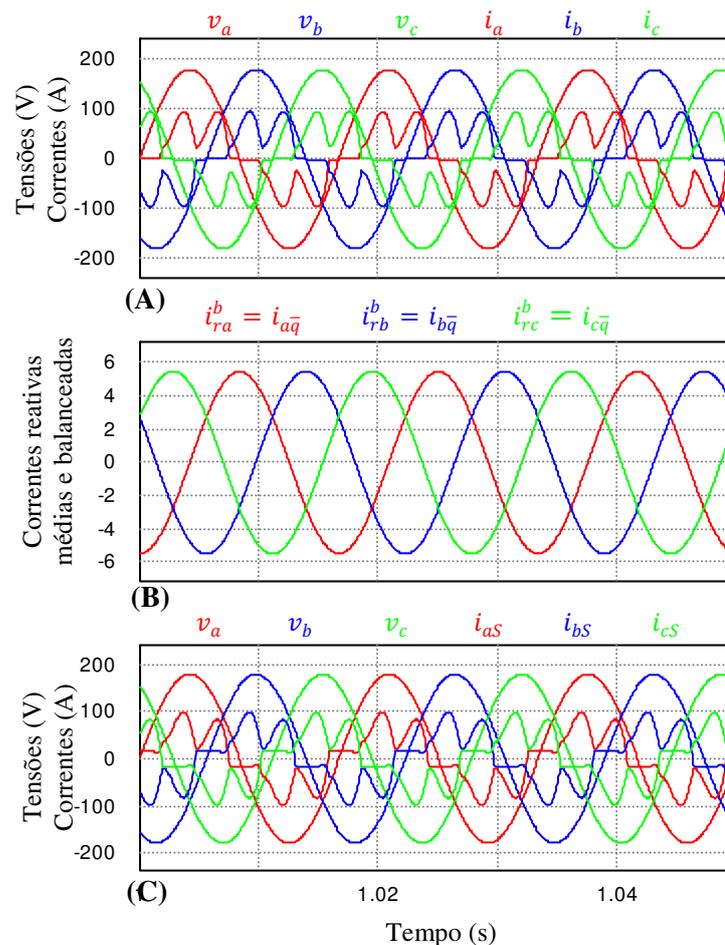
### 5.3.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – c

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ). Como neste caso a carga é balanceada e as tensões são senoidais equilibradas, os desbalanços são nulos. Assim, fazer a compensação das correntes reativas balanceadas é o mesmo que fazer a compensação das correntes reativas ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b$ ) da CPT, o que não ocorre com a Teoria pq, pois as parcelas oscilantes representam tanto desbalanços quanto os harmônicos gerados pela carga. Portanto, as correntes reativas não são iguais as correntes reativas médias ( $i_{r\mu} \neq i_{\bar{q}\mu}$ ).

A Figura 5.14 (A) mostra as tensões e correntes antes da compensação. Nota-se que as tensões são senoidais equilibradas e as correntes são distorcidas, pelo fato da carga ser não

linear. Em (B) mostra-se as correntes de referência para as duas teorias, as quais são senoidais equilibradas. Em (C) mostra-se as tensões e correntes após a compensação. Nota-se que as correntes continuam distorcidas, pelo fato de ainda estarem presentes as não linearidades da carga. Relembrando que os desbalanços são nulos, pelo fato da carga ser balanceada.

Figura 5.14 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) – c.



Fonte: Próprio autor.

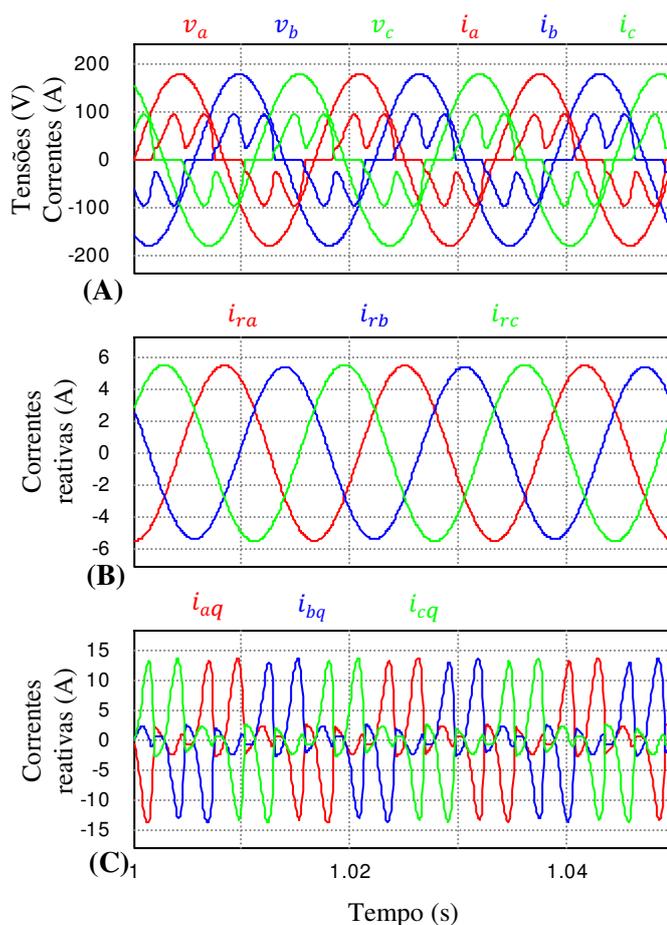
### 5.3.2. Compensação das correntes reativas – c

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas da CPT ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas da Teoria pq ( $i_{q\mu} = i_{\bar{q}\mu} + i_{\hat{q}\mu}$ ). Neste caso, os desbalanços são nulos. Então, as correntes reativas da CPT são representadas somente pelas parcelas balanceadas ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b$ ). As correntes reativas da Teoria pq não podem ser representadas somente pelas

parcelas médias ( $i_{r\mu} \neq i_{\bar{q}\mu}$ ), pelo fato das correntes reativas oscilantes ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) representarem tanto os desbalanços, quanto as não linearidades da carga.

A Figura 5.15 mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação. Assim como as correntes de referência das duas teorias.

Figura 5.15 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) – c.



Fonte: Próprio autor.

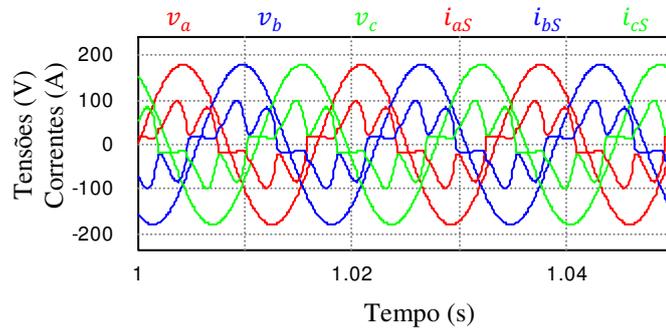
A Figura 5.15 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na Seção 5.3.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT, as quais são senoidais equilibradas. Em (C) mostra-se as correntes de referência com a Teoria pq, as quais são distorcidas, pelo fato da Teoria pq representar as não linearidades da carga nas parcelas ativas e reativas oscilantes.

A Figura 5.16 mostra as tensões e as correntes no PAC, após a compensação, com a CPT, as quais têm as mesmas características da compensação das correntes reativas balanceadas. Sendo estas parcelas distorcidas, pelo fato das correntes residuais ( $i_{v\mu}$ ) ainda

estarem presentes no sistema. As Figuras 5.14 (d) e 5.16 mostra que compensar as correntes reativas balanceadas ( $i_{r\mu}^b$ ) é o mesmo que compensar as correntes reativas ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u$ ), pelo fato da carga ser balanceada.

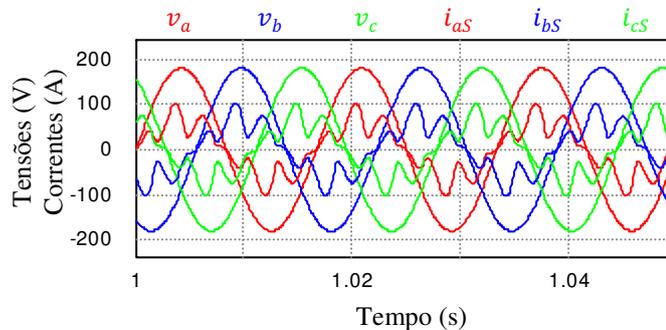
A Figura 5.17 mostra as tensões e correntes no PAC, após a compensação com a Teoria pq, as quais continuam distorcidas, pelo fato das correntes ativas oscilantes ainda estarem presentes na rede.

Figura 5.16 – Tensões e correntes na fonte após da compensação (CPT) – c.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.17 – Tensões e correntes na fonte após da compensação (Teoria pq) – c.



Fonte: Próprio autor.

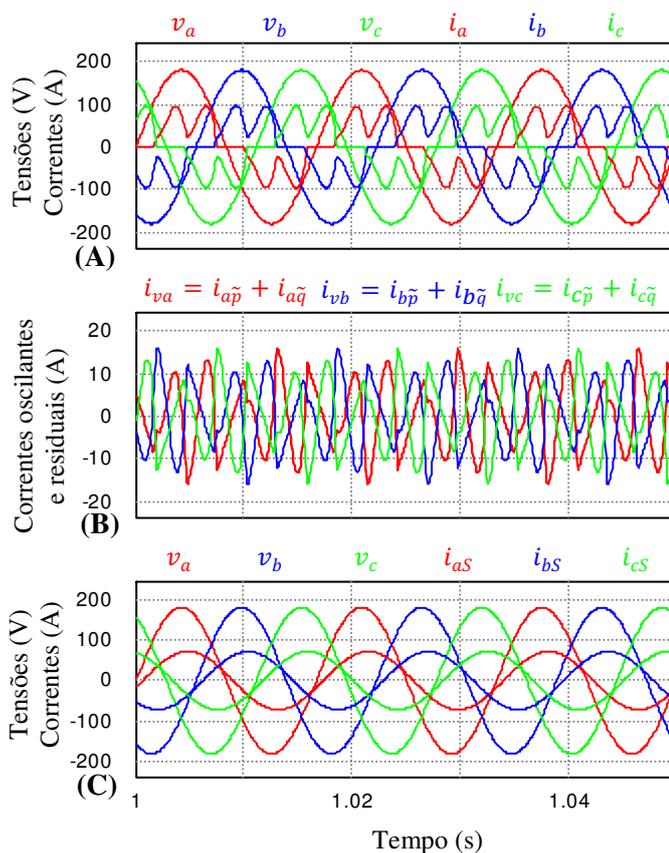
As Figuras 5.16 e 5.17 mostram que não existe correspondência na compensação das correntes reativas entre as teorias, pelo fato que na CPT estão presentes as não linearidades carga. Enquanto que na Teoria pq, parte das não linearidades presentes no circuito foram compensadas através das correntes reativas.

### 5.3.3. Compensação das correntes residuais e oscilantes – c

Esta seção mostra a compensação das correntes residuais ( $i_{v\mu}$ ) da CPT, pois as parcelas desbalanceadas são nulas ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u = 0$ ), e as correntes oscilantes ( $i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu}$ ) da Teoria pq, as quais representam somente as não linearidades da carga. Pois, os desbalanços são nulos.

A Figura 5.18 mostra as tensões e correntes no PAC antes e depois da compensação. Assim como as correntes de referência das duas teorias.

Figura 5.18 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) – c.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.18 (A) mostra-se as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.3.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência para as duas teorias. Em (C) mostra-se as tensões e correntes, após a compensação, para as duas teorias, as quais são senoidais equilibradas, pelo fato que as não linearidades não foram compensadas. Porém, continuam defasadas entre si, pelo fato que as correntes reativas

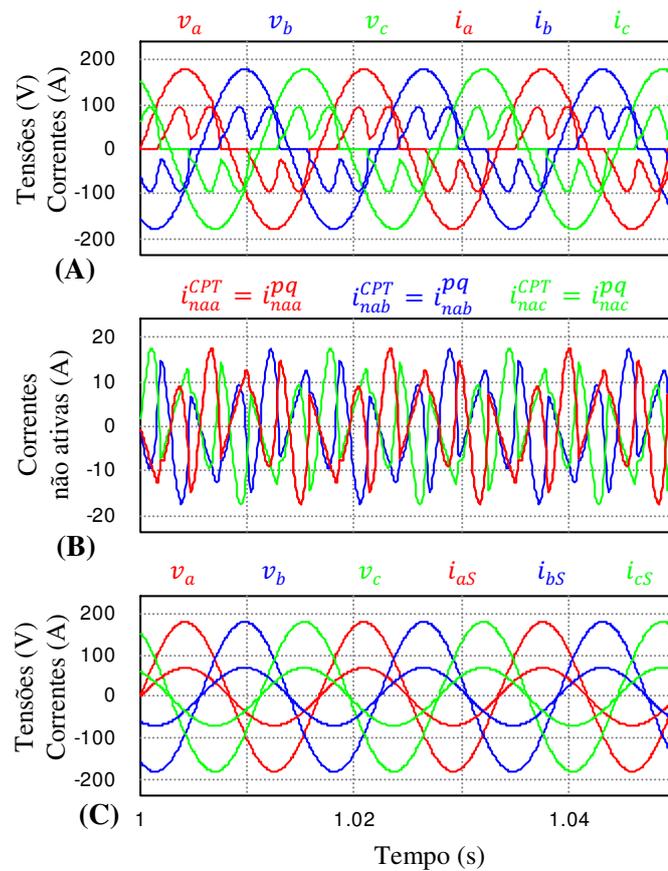
balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ) não foram compensadas.

### 5.3.4. Compensação das correntes não ativas – c

Esta seção mostra a compensação das correntes não ativas para as duas teorias. Estas parcelas de corrente não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga, estas são dadas por: ( $i_{na\mu}^{CPT} = i_{r\mu}^b + i_{v\mu}$ ), com a CPT e por: ( $i_{na\mu}^{pq} = i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ), com a Teoria pq.

A Figura 5.19 mostra as tensões e correntes das duas teorias, antes da compensação da corrente não ativa.

Figura 5.19 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) – c.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.19 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.3.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência

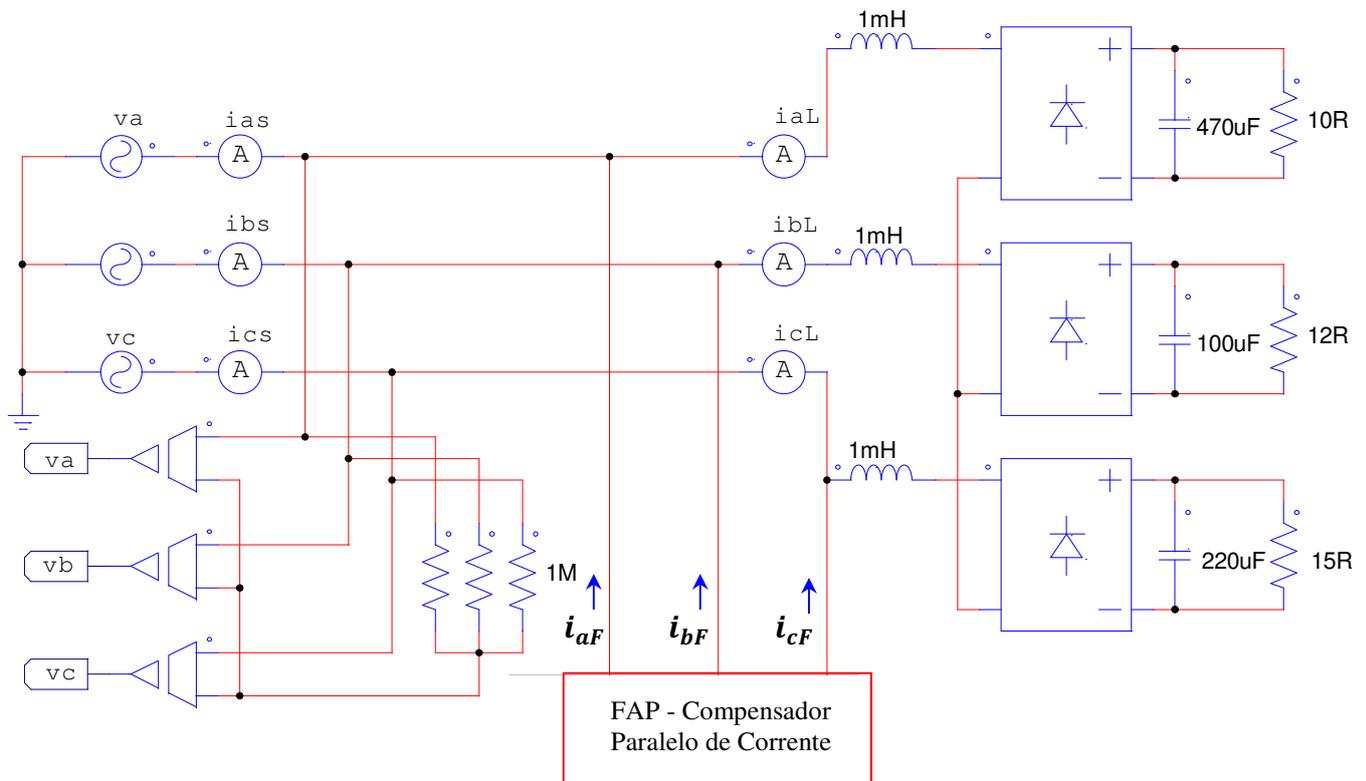
para as duas teorias. A Figura 5.19 (C) mostra as tensões e correntes, após a compensação, para as duas teorias, as quais são senoidais equilibradas e estão perfeitamente em fase. Isto ocorre pelo fato de que foram compensados todos os distúrbios provocados pela carga.

Para esta condição de compensação, toda a energia gerada pela fonte é transferida para a carga, representando assim uma carga puramente resistiva balanceada. Esta seria a condição ideal de compensação.

#### 5.4. Carga não linear desbalanceada – d

A Figura 5.20 mostra o circuito com carga não linear desbalanceada, para as análises em compensação entre as teorias, sendo a carga representada por 3 retificadores monofásicos a diodo. Os indutores nas entradas dos retificadores tem função de filtro, para minimizar as distorções das correntes.

Figura 5.20 – Circuito trifásico a três condutores com carga não linear desbalanceada – d.



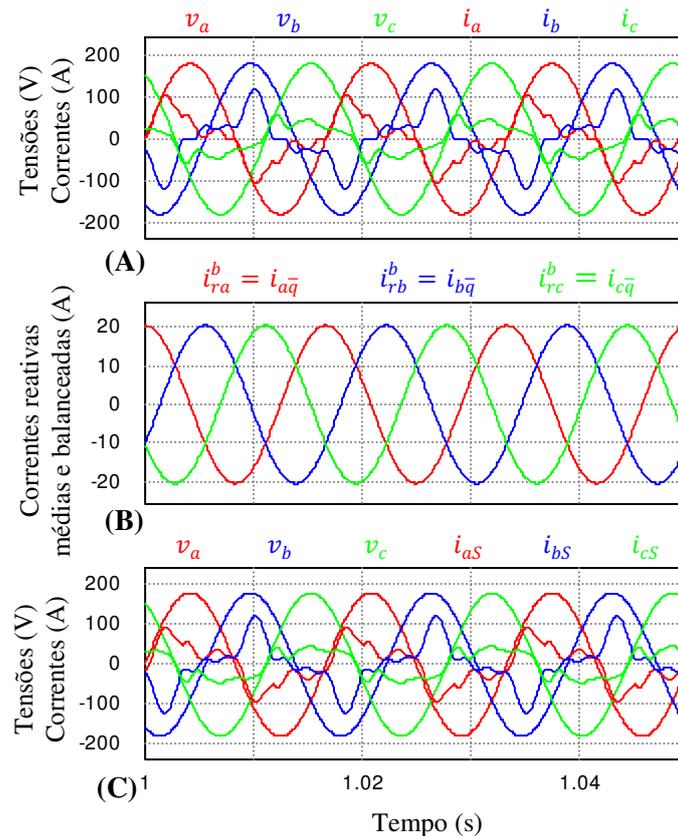
Fonte: Próprio autor.

### 5.4.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – d

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e as correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ).

A Figura 5.21 (A) mostra as tensões e correntes, antes da compensação. Nota-se que as correntes são distorcidas e desequilibradas, pelo fato da carga ser não linear desbalanceada. Em (B) mostra-se as correntes de referência para as duas teorias, as quais são senoidais e equilibradas. Em (C) mostra-se as tensões e correntes, após a compensação, com as duas teorias. Nota-se que as correntes continuam distorcidas e desequilibradas, pelo fato de que não foram compensadas as não linearidades e os desbalanço da carga.

Figura 5.21 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes após a compensação (C) – d.



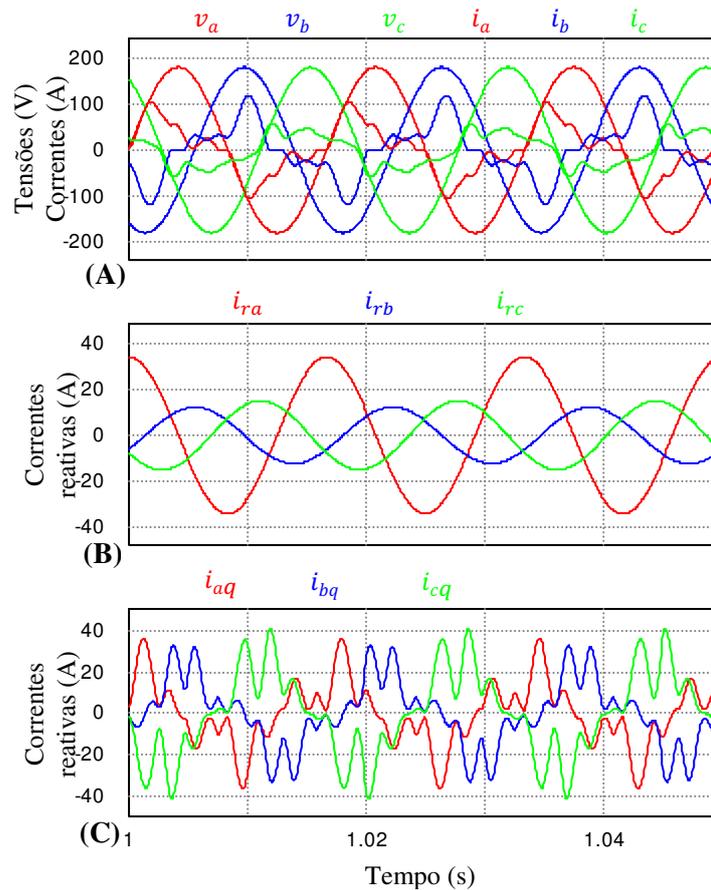
Fonte: Próprio autor.

### 5.4.2. Compensação das correntes reativas – d

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas da CPT ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u$ ) e as correntes reativas da Teoria pq ( $i_{q\mu} = i_{q\mu}^b + i_{q\mu}^u$ ).

A Figura 5.22 (A) mostra as tensões e correntes, antes da compensação, que são as mesmas apresentadas na seção 5.4.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT, as quais são senoidais. Em (C) mostra as correntes de referências com a Teoria pq, as quais são distorcidas, pelo fato da Teoria pq representar as não linearidades nas correntes ativas e reativas oscilantes.

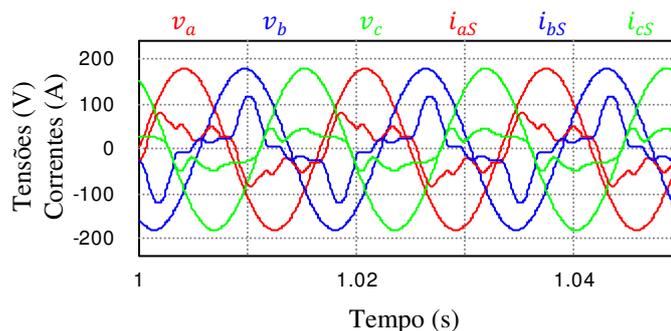
Figura 5.22 – Tensões e correntes antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes após a compensação (C) – d.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.23 mostra as tensões e correntes após a compensação, com a CPT. As correntes continuam distorcidas e desequilibradas, pelo fato que as correntes ativas desbalanceadas e as não linearidades da carga não foram compensadas.

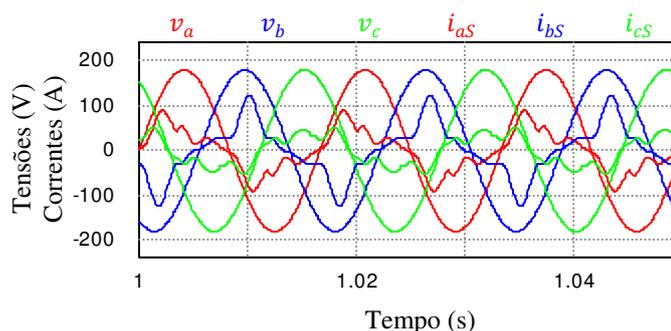
Figura 5.23 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (CPT) – d.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.24 mostra as tensões e correntes, após a compensação, com a Teoria pq. Nota-se que as correntes continuam distorcidas e desequilibradas. Os desbalanços e as não linearidades presentes nas correntes reativas foram compensados. Porém, os desbalanços e as não linearidades presentes nas correntes ativas continuam presentes no circuito ( $i_{\tilde{q}\mu} \neq 0$ ).

Figura 5.24 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (Teoria pq) – d.



Fonte: Próprio autor.

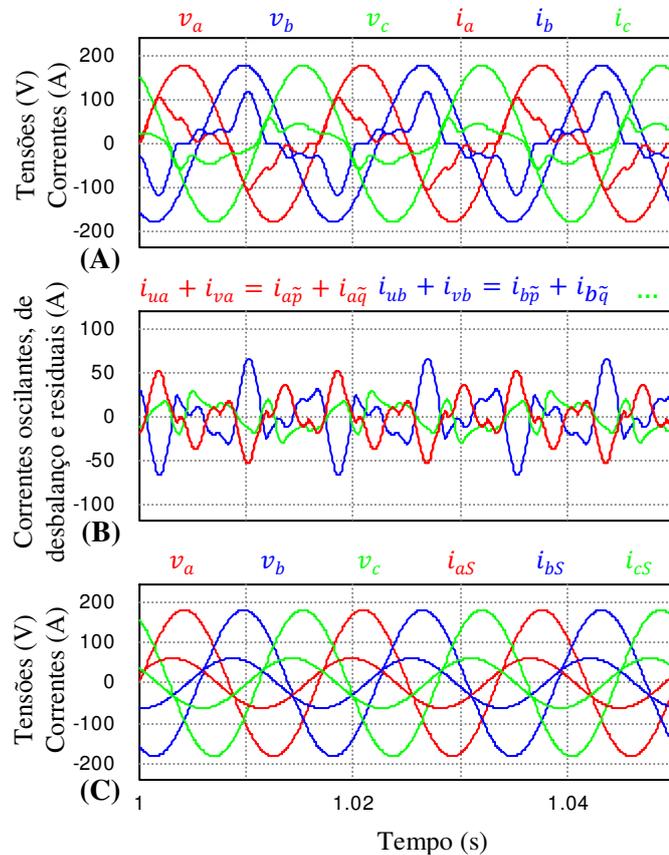
As Figuras 5.23 e 5.24 mostram que não existe equivalência entre as teorias na compensação das correntes reativas, pelo fato de que as não linearidades e os desbalanços da carga são representados juntos nas correntes reativas oscilantes. Enquanto que a CPT separa desbalanços e não linearidades em parcelas distintas. As divergências ocorrem pelo fato que foram compensadas parte das não linearidades com a Teoria pq e não foram compensadas com a CPT.

### 5.4.3. Compensação das correntes oscilantes, desbalanceadas e residuais – d

Esta seção mostra a compensação das correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu}$ ) e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu}$ ).

A Figura 5.25 (A) mostra as tensões e correntes, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.4.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência para as duas teorias. Em (C) mostra-se as tensões e as correntes, após compensação, para as duas teorias. As correntes tornam-se senoidais equilibradas, pelo fato de que foram compensados os desbalanços e as não linearidades da carga. No entanto, continuam desfasadas, pelo fato de que ainda estão presentes as correntes reativas balanceadas da CPT e as correntes reativas médias da Teoria pq.

Figura 5.25 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) – d.



Fonte: Próprio autor.

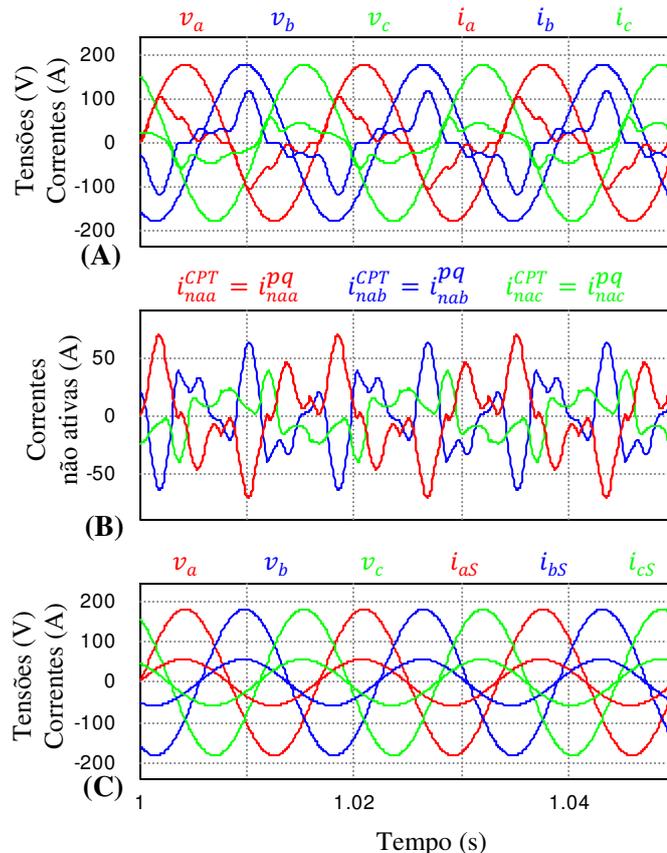
#### 5.4.4. Compensação das correntes não ativas – d

Esta seção mostra a compensação das correntes não ativas, para as duas teorias, que são dadas por: ( $i_{na\mu}^{CPT} = i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u + i_{v\mu}$ ) com a CPT, e com a Teoria pq por: ( $i_{na\mu}^{pq} =$

$i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} + i_{\bar{r}\mu}$ ). Tais parcelas de corrente não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga. Portanto são compensadas.

A Figura 5.26 (A) mostra as tensões e correntes, antes da compensação, que são as mesmas apresentadas na seção 5.4.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência para as duas teorias. Em (C) mostra-se as tensões e correntes, após a compensação com as duas teorias, as correntes tornam-se senoidais equilibradas e estão perfeitamente em fase com suas respectivas tensões de fase. Isso ocorre pelo fato que foram compensados todos os distúrbios gerados pela carga. Portanto, as correntes da fonte são as próprias correntes ativas balanceadas ( $i_{s\mu} = i_{a\mu}^b$ ) da CPT e as próprias correntes ativas médias da Teoria pq ( $i_{s\mu} = i_{\bar{p}\mu}$ ). Com isso as correntes da fonte podem ser representadas por uma carga balanceada puramente resistiva.

Figura 5.26 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência (B) e tensões e correntes na fonte após a compensação (C) – d.



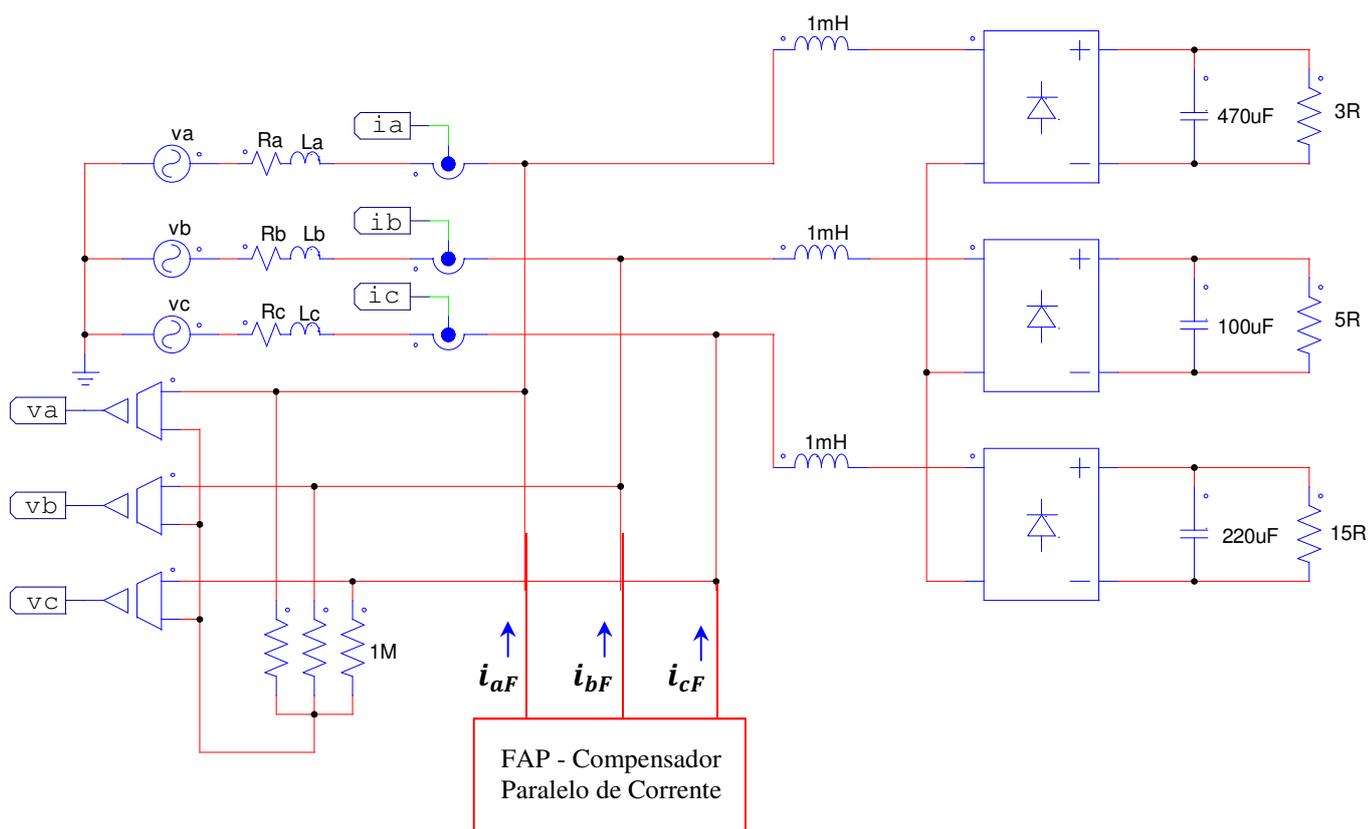
Fonte: Próprio autor.

### 5.5. Carga não linear desbalanceada com impedância de linha – e

A Figura 5.27 mostra o circuito trifásico com carga não linear desbalanceada, com impedância de linha. A carga é representada por três retificadores monofásicos a diodo. Além de fazer as análises comparativas para compensação das correntes não ativas. Esta seção também tem o objetivo de verificar o comportamento das tensões no PAC, após a compensação das correntes. A presença de impedância de linha na interação com as correntes da carga pode mudar as características das tensões no PAC, gerando distorções e desequilíbrios das tensões.

As indutâncias nas entradas dos retificadores tem função de filtro para minimizar as distorções das correntes. A Tabela 5.5 mostra os valores das impedâncias de linha.

Figura 5.27 – Circuito trifásico com tensões senoidais desequilibradas para carga não linear desbalanceada – e.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 5.5 – Valores de impedância de linha – e.

Impedância de linha
$R_a = R_b = R_c = 0,887\Omega$
$L_a = L_b = L_c = 40\mu F$

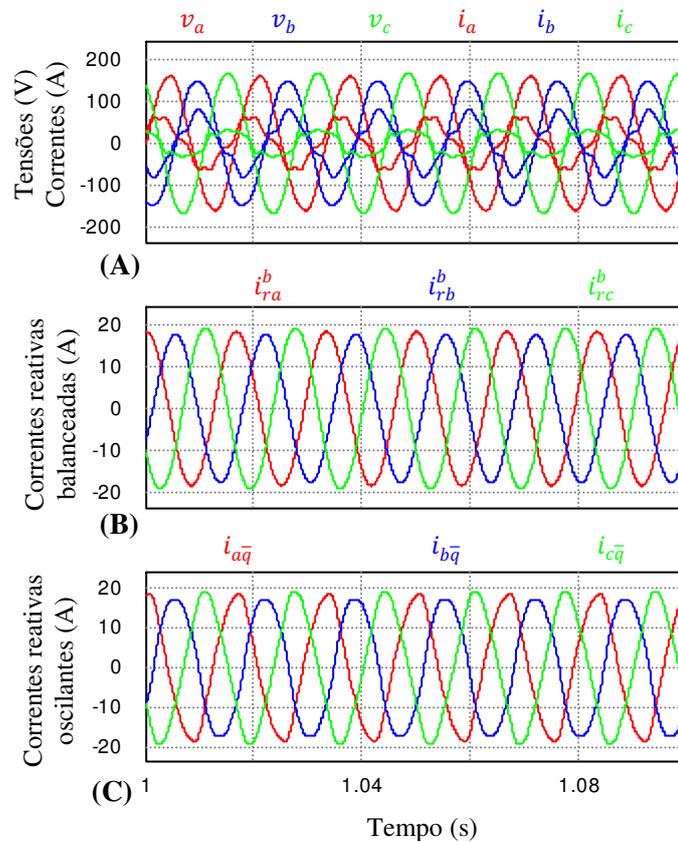
Fonte: Próprio autor.

### 5.5.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – e

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e das correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ).

A Figura 5.28 mostra as tensões e correntes antes da compensação. Assim como as correntes de referência das duas teorias.

Figura 5.28 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência com a CPT (B) e com a Teoria pq (C) – e.

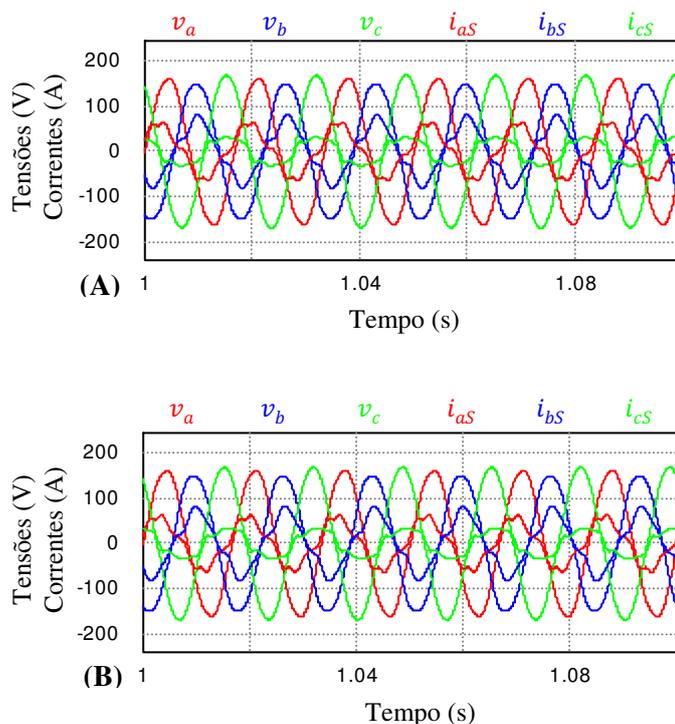


Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.28 (A) mostra as tensões e correntes, antes da compensação, as quais são distorcidas e desequilibradas, pelo fato da carga ser não linear desbalanceada. As tensões no PAC se tornaram ligeiramente distorcidas e desequilibradas, em função da interação entre as correntes da carga e as impedâncias de linha. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT, as quais são senoidais pelo fato da CPT representar as não linearidades da carga nas correntes residuais ( $i_{v\mu}$ ). Em (C) mostra-se as correntes de referência com a Teoria pq, as quais são ligeiramente distorcidas, pelo fato das tensões no PAC serem desequilibradas. Estas distorções surgem pelo fato da Teoria pq utilizar a norma quadrática instantânea das tensões ( $v_\alpha^2 + v_\beta^2$ ) nos cálculos das correntes e potências, que tem valor oscilatório para tensões desequilibradas e/ou distorcidas.

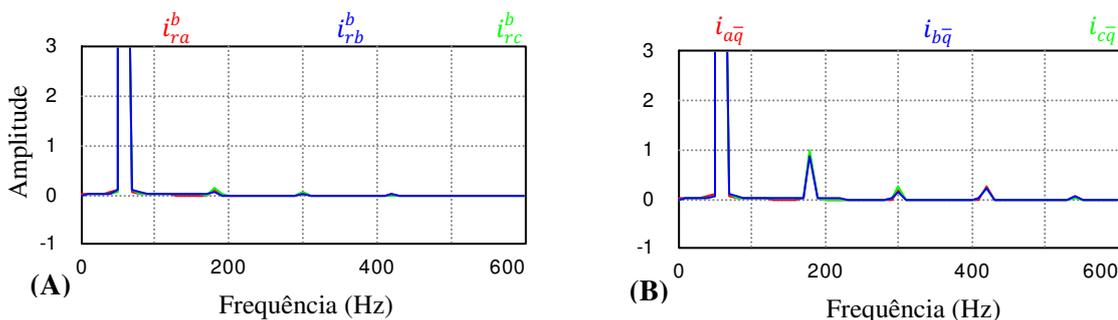
A Figura 5.29 (A) e (B) mostra as tensões e correntes, após a compensação para as duas teorias. Nota-se que as correntes continuam distorcidas e desequilibradas, pelo fato que as não linearidades e os desbalanços gerados pela carga não foram compensados. Existe uma ligeira diferença entre as correntes, após a compensação, pelo surgimento das oscilações nas correntes reativas médias da Teoria pq, com o desequilíbrio das tensões no PAC, como mostra a Figura 5.30. Comentários semelhantes são válidos para as correntes ativas.

Figura 5.29 – Tensões e correntes no PAC após da compensação com a CPT (A) e Teoria pq (B) – e.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.30 – Espectro de frequências das correntes reativas balanceadas e médias – e.



Fonte: Próprio autor.

### 5.5.2. Compensação das correntes reativas – e

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas da CPT ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u$ ) e as correntes reativas da Teoria pq ( $i_{q\mu} = i_{q\mu}^b + i_{q\mu}^u$ ).

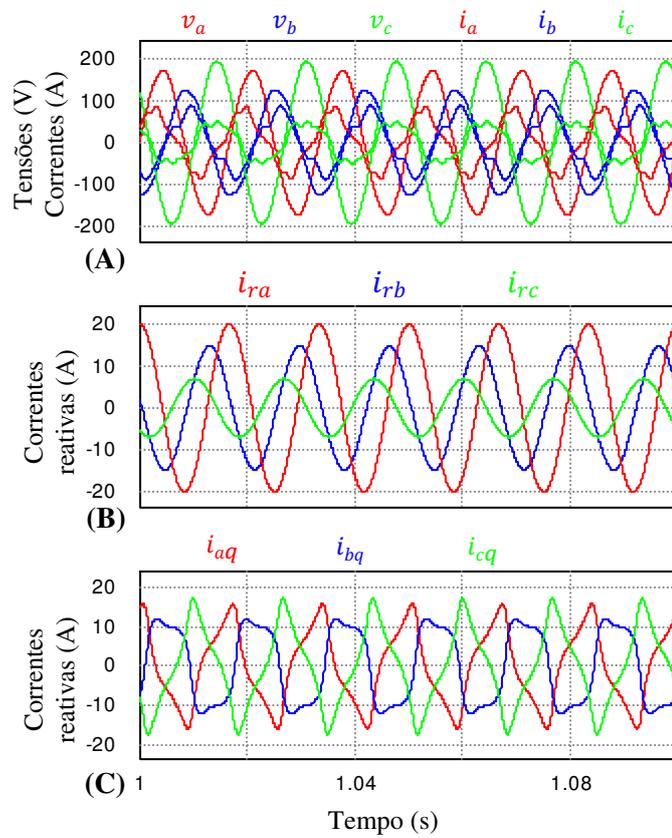
A Figura 5.31 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.5.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT, as quais são senoidais e desequilibradas. No entanto, em (C) mostra-se que, as correntes de referência com a Teoria pq são distorcidas e desequilibradas, pelo fato que a Teoria pq representa as não linearidades e os desbalanços da carga nas as correntes oscilantes.

A Figura 5.32 mostra as tensões e correntes, após a compensação, com a CPT. Nota-se que as correntes continuam distorcidas e desequilibradas. Porém, os desbalanço das correntes reativas foram compensados. Nota-se que as tensões e correntes cruzam pelo eixo zero no mesmo instante de tempo, não havendo deslocamento de fase.

A Figura 5.33 mostra as tensões e correntes, após a compensação, com a Teoria pq. Nota-se que as correntes também continuam distorcidas e desequilibradas. No entanto, foram compensados os desbalanços e as não linearidades da carga que estão presentes nas correntes reativas, porém, continuam presentes nas correntes ativas oscilantes.

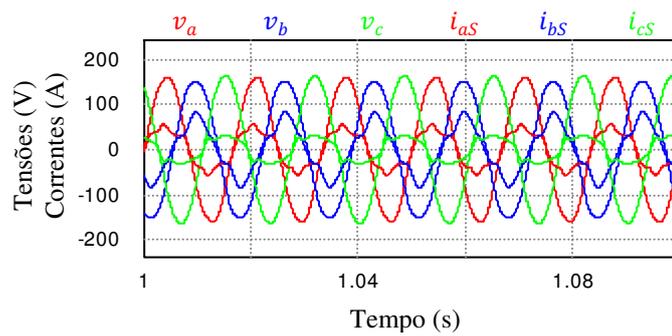
As Figuras 5.32 e 5.33 mostram que não existe correspondência entre as teorias na compensação destas parcelas de correntes, pelo fato da Teoria pq representar os desbalanços e as não linearidades simultaneamente nas correntes oscilantes. Neste caso foram compensadas as não linearidades presentes nas correntes reativas oscilantes da Teoria pq e que não foram compensadas com a CPT, pelo fato que esta teoria representa as não linearidades e os desbalanços em parcelas distintas.

Figura 5.31 – Tensões e correntes antes da compensação (A), correntes de referências com a CPT (B) e com a Teoria (C), com impedância de linha – e.



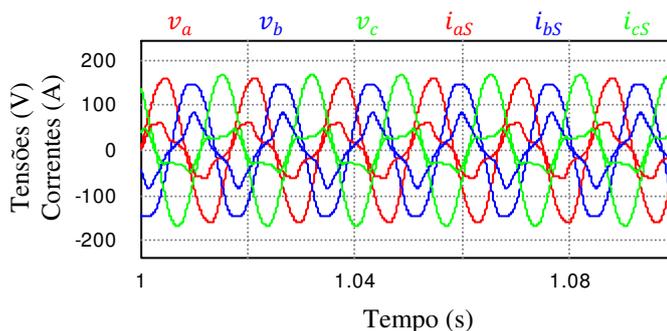
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.32 – Tensões e correntes no PAC, após da compensação com a CPT – e.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.33 – Tensões e correntes no PAC após da compensação com a Teoria pq – e.



Fonte: Próprio autor.

### 5.5.3. Compensação das correntes oscilantes, desbalanceadas e residuais – e

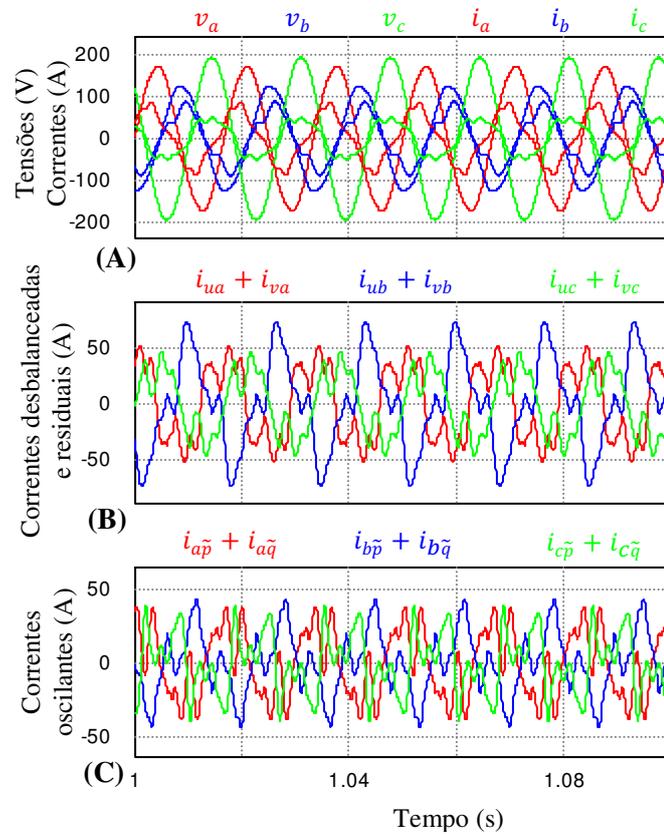
Esta seção mostra a compensação das correntes desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu}^u$ ), e as correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ).

A Figura 5.34 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.5.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT e em (C) com a Teoria pq. Nota-se que estas parcelas de correntes não são equivalentes, pelo fato das tensões no PAC serem desequilibradas.

As Figuras 5.35 e 5.36 mostram as tensões e correntes, após a compensação, com a CPT e a Teoria pq, respectivamente. Estas são senoidais e equilibradas, porém continuam defasadas, pelo fato que as correntes reativas balanceadas da CPT e as correntes reativas médias da Teoria pq não foram compensadas. Isto é visível se observado que as tensões e correntes não cruzam o eixo zero no mesmo instante de tempo.

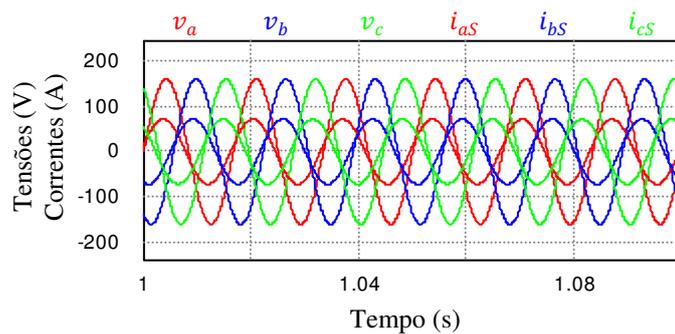
As teorias são equivalentes na compensação destas parcelas de corrente, pelo fato que com a compensação dos desbalanços e não linearidades da carga, as tensões no PAC têm as mesmas características das tensões da fonte.

Figura 5.34 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência com a CPT (B) e com a Teoria pq (C) – e.



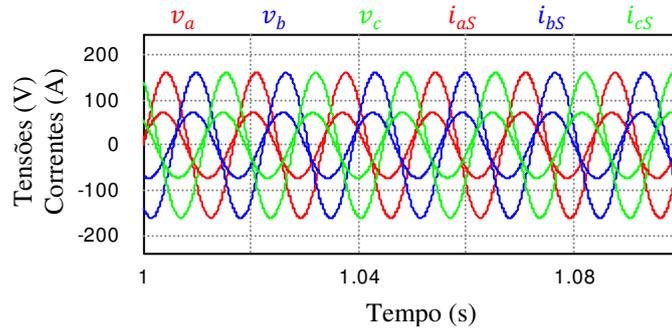
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.35 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (CPT) – e.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.36 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (Teoria pq) – e.



Fonte: Próprio autor.

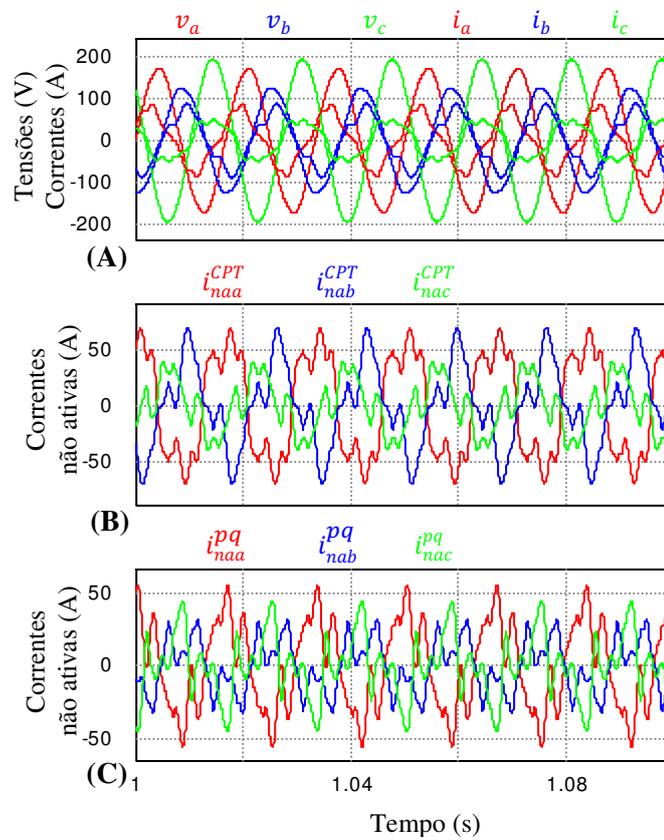
#### 5.5.4. Compensação das correntes não ativas – e

Esta seção mostra a compensação das correntes não ativas para as duas teorias, as quais são dadas por:  $(i_{na\mu}^{CPT} = i_{a\mu}^u + i_{r\mu} + i_{v\mu})$ , com a CPT e por:  $(i_{na\mu}^{pq} = i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} + i_{\bar{q}\mu})$ , com a Teoria pq. Neste caso, são compensadas todas as parcelas de correntes que não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga.

A Figura 5.37 (A) mostra as tensões e correntes, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.5.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT e em (C) com a Teoria pq. Nota-se que instantaneamente não há equivalência entre estas parcelas de correntes.

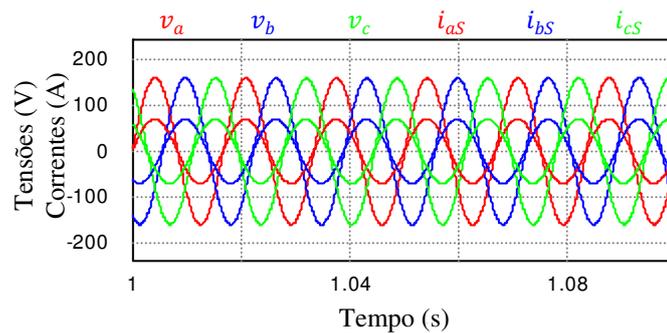
As Figuras 5.38 e 5.39 mostram as tensões e correntes, após a compensação, para as duas teorias, as quais são senoidais equilibradas e estão perfeitamente em fase, pelo fato de que foram compensados todos os distúrbios gerados pela carga. Isto faz com que as correntes na fonte sejam as próprias correntes ativas balanceadas  $(i_{s\mu} = i_{a\mu}^b)$  da CPT, assim como as próprias correntes ativas médias da Teoria pq  $(i_{s\mu} = i_{\bar{p}\mu})$ , podendo ser representadas por uma carga balanceada puramente resistiva.

Figura 5.37 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência com a CPT (B) e correntes de referências com a Teoria pq (C) – e.



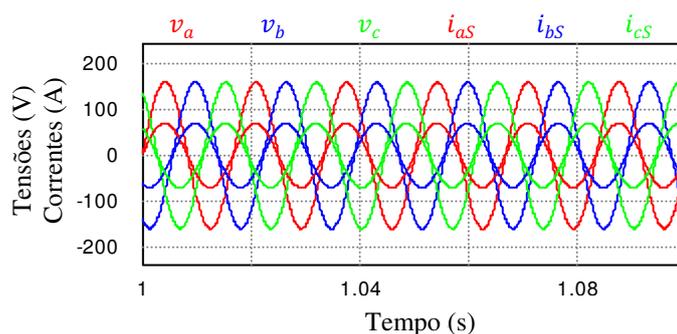
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.38 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (CPT) – e.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.39 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (Teoria pq) – e.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que antes da compensação, a interação entre as correntes distorcidas e desequilibradas da carga com as impedâncias de linha provocam distorções e desequilíbrios nas tensões no PAC, as quais provocam divergências entre as parcelas de corrente e potência para cada teoria. Porém, com a compensação de todos os distúrbios provocados pela carga, as tensões no PAC têm as mesmas características das tensões da fonte (senoidais equilibradas). Entretanto, ocorre uma queda de tensão de aproximadamente de 10%, em função dos efeitos provocados pela presença das impedâncias de linha na interação com as correntes distorcidas e desequilibradas da carga.

### 5.6. Carga não linear desbalanceada e tensões senoidais desequilibradas – f

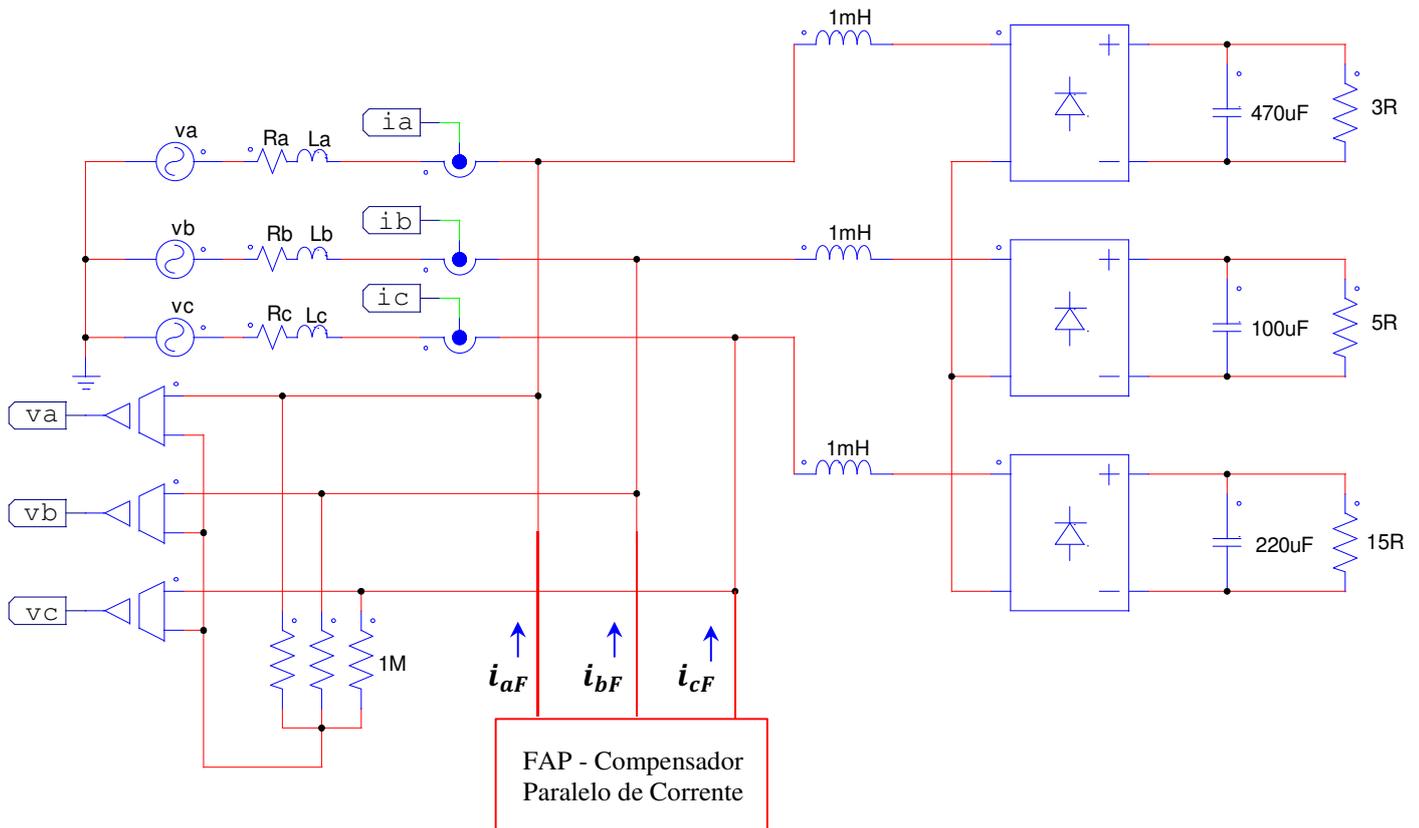
A Figura 5.40 mostra o circuito trifásico com carga não linear desbalanceada, que será utilizada nas análises comparativas, em compensação. A carga é representada três retificadores monofásicos a diodo, que são alimentados por tensões senoidais desequilibradas a três condutores, com impedância de linha, como mostrado na Tabela 5.5.

O objetivo principal desta seção é mostrar os efeitos provocados nas tensões e correntes do PAC, através da interação das correntes da carga com as impedâncias de linha, após a compensação de correntes não ativas, com tensões senoidais desequilibradas. Na prática, tal condição poderia ser provocada por cargas geradoras de distúrbios compartilhadas no mesmo ponto de acoplamento comum.

Nos Capítulos três e quatro foram mostrados que as tensões desequilibradas fazem surgir oscilações nas correntes da Teoria pq que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões da fonte, isso leva as divergências entre as parcelas de correntes das teorias. Estas distorções aparecem no processo de decomposição das correntes, em parcelas ativas e

reativas, igualmente na decomposição destas parcelas em médias e oscilantes. O objetivo principal é verificar as semelhanças e divergências entre as parcelas de corrente resultantes, em compensação de correntes não ativas, nas duas teorias. Principalmente pelo fato das tensões serem desequilibradas.

Figura 5.40 – Circuito com carga não linear desbalanceada, com impedância de linha – f.



Fonte: Próprio autor.

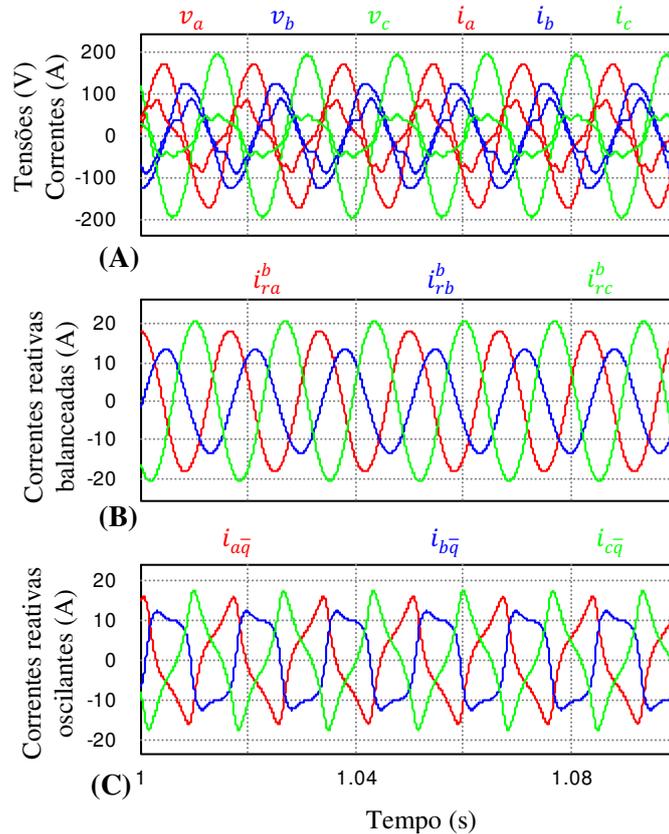
### 5.6.1. Compensação das correntes reativas balanceadas e médias – f

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas balanceadas da CPT ( $i_{r\mu}^b$ ) e das correntes reativas médias da Teoria pq ( $i_{\bar{q}\mu}$ ).

A Figura 5.41 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação. Nota-se que as correntes são distorcidas e desequilibradas, pelo fato da carga ser não linear desbalanceada. As tensões são ligeiramente distorcidas, devido à interação entre as correntes distorcidas da carga com as impedâncias de linha. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT, as quais são senoidais desequilibradas. Em (C) mostra-se as correntes de

referência com a Teoria pq, as quais são distorcidas e desequilibradas, pelo fato carga ser não linear e as tensões da fonte serem desequilibradas.

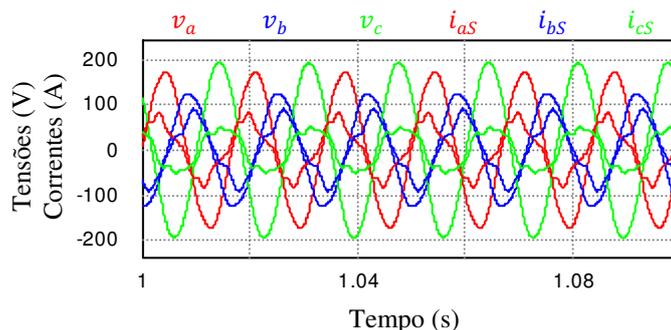
Figura 5.41 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência com a CPT (B) e com a Teoria pq (C) – f.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.42 mostra as tensões e correntes após a compensação com a CPT. Nota-se que as correntes continuam distorcidas e desequilibradas. Isso ocorre pelo fato que foram compensadas somente as correntes reativas balanceadas. As tensões no PAC continuam ligeiramente distorcidas e desequilibradas, pelo fato que ainda estão presentes no sistema as não linearidades e desbalanços da carga.

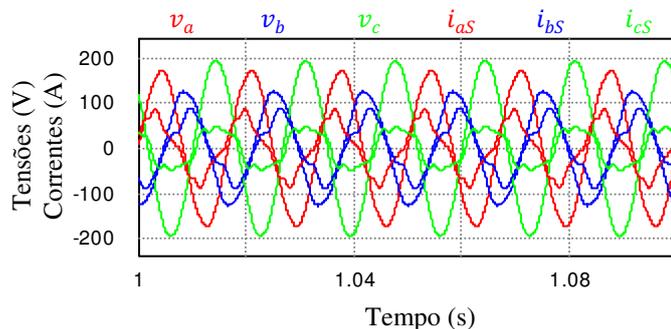
Figura 5.42 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (CPT) – f.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.43 mostra as tensões e correntes, após a compensação, com a Teoria pq, assim como na CPT, as correntes continuam distorcidas e desequilibradas. Pois, as correntes oscilantes não foram compensadas.

Figura 5.43 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (Teoria pq) – f.



Fonte: Próprio autor.

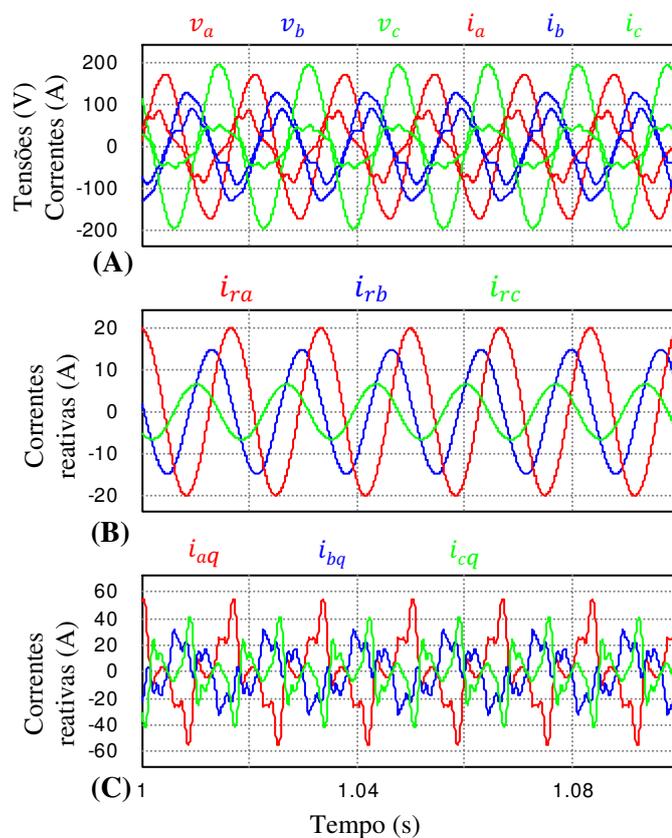
As Figuras 5.42 e 5.43 mostram que existe uma ligeira diferença entre as teorias, na compensação destas parcelas correntes, pelo fato das tensões no PAC serem desequilibradas, as quais provocam distorções nas parcelas de corrente da Teoria pq, que apesar de terem sido compensadas as distorções das correntes reativas médias, ainda estão presentes nas outras parcelas de corrente.

### 5.6.2. Compensação das correntes reativas – f

Esta seção mostra a compensação das correntes reativas da CPT ( $i_{r\mu} = i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u$ ) e as correntes reativas da Teoria pq ( $i_{q\mu} = i_{q\mu}^b + i_{q\mu}^u$ ).

A Figura 5.44 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.6.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT, as quais são senoidais desequilibradas. Em (C) mostra-se as correntes de referência com a Teoria pq, nota-se que estas são distorcidas e desequilibradas, pelo fato da Teoria pq representar as não linearidades e os desbalanços nas correntes oscilantes.

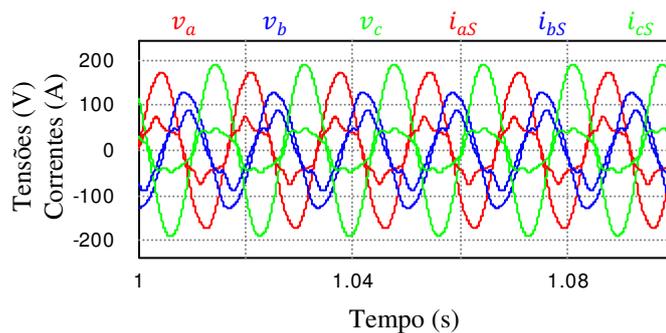
Figura 5.44 – Tensões e correntes antes da compensação (A), correntes de referências com a CPT (B) e com a Teoria pq (C) – f.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.45 mostra as tensões e correntes, após a compensação, com a CPT. Nota-se que as correntes continuam distorcidas e desequilibradas. Pois, as não linearidades da carga e as correntes ativas desbalanceadas não foram compensadas.

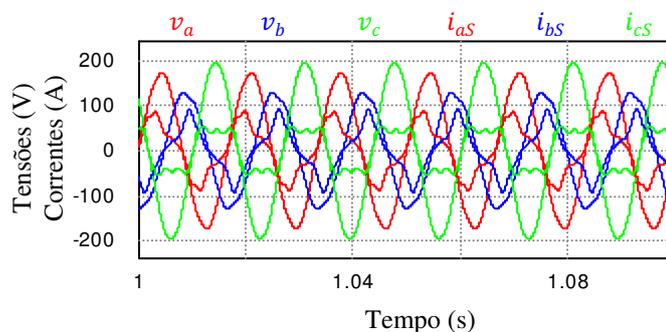
Figura 5.45 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (CPT) – f.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.46 mostra as tensões e correntes, após a compensação com Teoria pq, assim como na CPT, as correntes continuam distorcidas e desequilibradas. Porém, foi compensada uma parte das não linearidades que são representadas nas correntes reativas. Os desbalanços e não linearidades presentes na rede são das parcelas ativas oscilantes, que não foram compensadas.

Figura 5.46 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (Teoria pq) – f.



Fonte: Próprio autor.

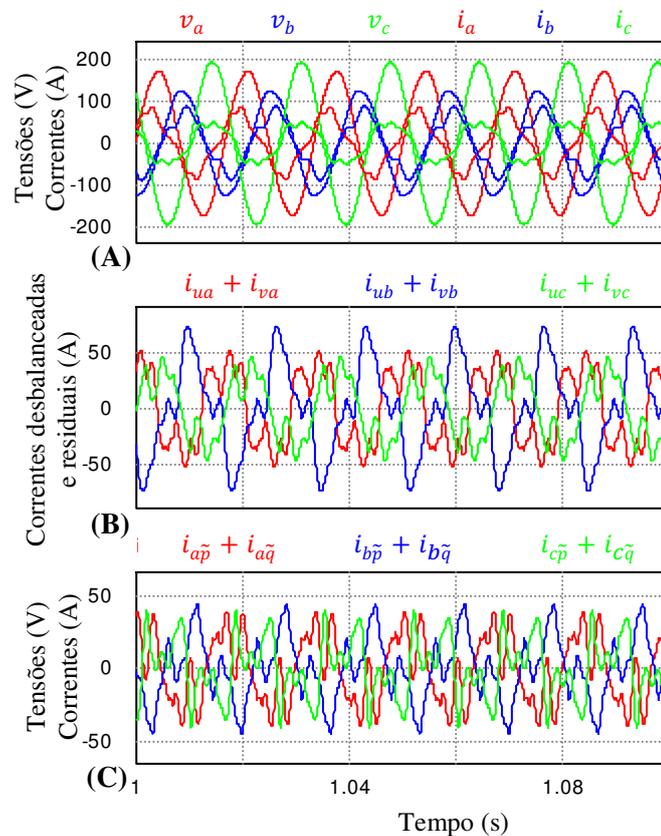
As Figuras 5.45 e 5.46 mostram que as teorias divergem na compensação das correntes reativas, pelo fato da Teoria pq representar as não linearidades e desbalanços nas correntes oscilantes. Enquanto que a CPT representa tais distúrbios em parcelas distintas de corrente.

### 5.6.3. Compensação das correntes oscilantes, desbalanceadas e residuais – f

Esta seção mostra a compensação das parcelas de corrente desbalanceadas e residuais da CPT ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu}$ ) e as correntes ativas e reativas oscilantes da Teoria pq ( $i_{p\mu} + i_{q\mu}$ ).

A Figura 5.47 (A) mostra as tensões e correntes no PAC, antes da compensação, as quais são as mesmas apresentadas na seção 5.6.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT e em (C) com a Teoria pq, as quais não são equivalentes entre as teorias.

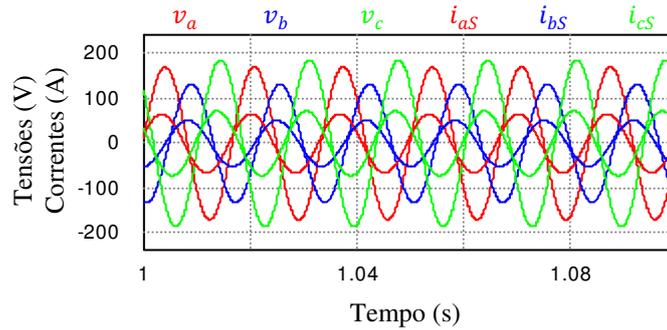
Figura 5.47 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência com a CPT (B) e com a Teoria pq (C) – f.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.48 mostra as tensões e correntes após a compensação, com a CPT, as quais são senoidais e desequilibradas. No entanto, tensões e correntes estão defasadas, pelo fato de ainda estarem presentes as correntes reativas balanceadas. Os desequilíbrios das tensões são imposições da fonte, que não são compensados.

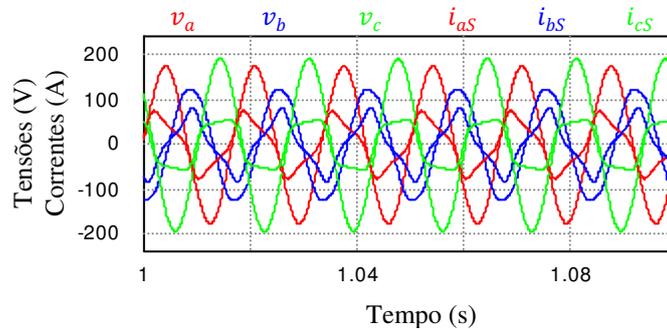
Figura 5.48 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (CPT) – f.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.49 mostra as tensões e correntes após a compensação com a Teoria pq, as quais são distorcidas e desequilibradas, apesar de ter sido compensado os desbalanços e as não linearidades do circuito. Isto ocorre pelo fato que surgem oscilações nas parcelas de corrente com a presença de tensões desequilibradas. Sendo estas distorções refletidas nas tensões do PAC na interação com as impedâncias de linha.

Figura 5.49 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (Teoria pq).



Fonte: Próprio autor.

As Figuras 5.48 e 5.49 mostram que as teorias divergem na compensação destas parcelas de corrente, pelo fato das tensões da fonte serem desequilibradas. As correntes são senoidais com a CPT e distorcidas com a Teoria pq.

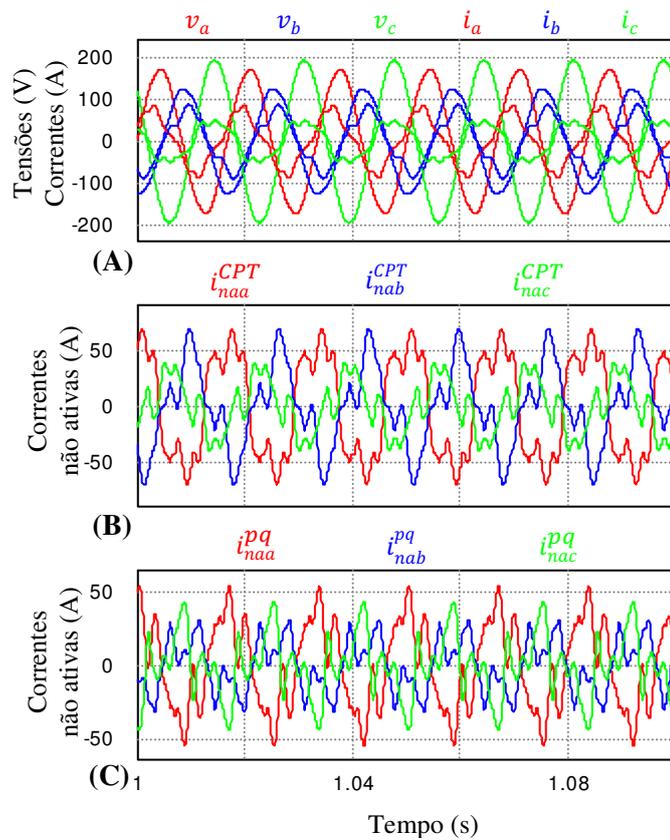
#### 5.5.4. Compensação das correntes não ativas – f

Esta seção mostra a compensação das correntes não ativas, quae são dadas por:  $(i_{na\mu}^{CPT} = i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^b + i_{r\mu}^u + i_{v\mu})$  com a CPT, e por:  $(i_{na\mu}^{pq} = i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} + i_{\bar{q}\mu})$  com a Teoria pq.

Estas parcelas de corrente não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga, portanto, devem ser compensadas.

A Figura 5.50 (A) mostra as tensões e correntes no PAC antes da compensação, que são as mesmas apresentadas na seção 5.6.1. Em (B) mostra-se as correntes de referência com a CPT e em (C) com a Teoria pq.

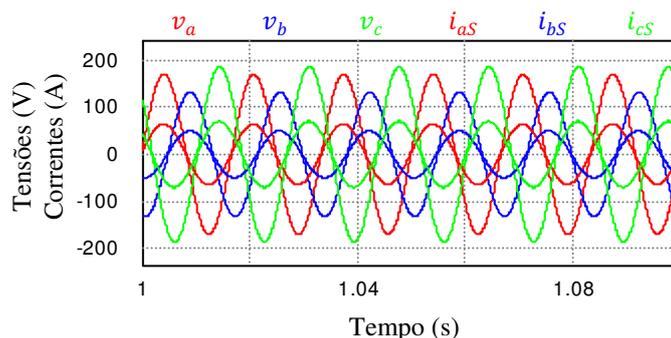
Figura 5.50 – Tensões e correntes no PAC antes da compensação (A), correntes de referência com a CPT (B) e com a Teoria pq (C) – f.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.51 mostra as tensões e correntes após a compensação com a CPT, as quais são senoidais e estão perfeitamente em fase, no entanto, são desequilibradas. Os desequilíbrios continuam no sistema, pelo fato de serem imposições das tensões da fonte.

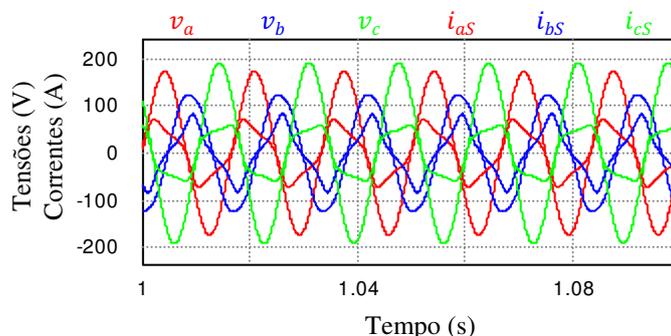
Figura 5.51 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (CPT) – f.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 5.52 mostra as tensões e correntes após a compensação das correntes não ativas, com a Teoria pq. Nota-se que as correntes são distorcidas e desequilibradas, apesar de ter sido compensado todos os distúrbios provocados pela carga. Como mostrado nos Capítulos 3 e 4, a presença de tensões desequilibradas faz surgir oscilações nas correntes que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões.

Figura 5.52 – Tensões e correntes no PAC após da compensação (Teoria pq).



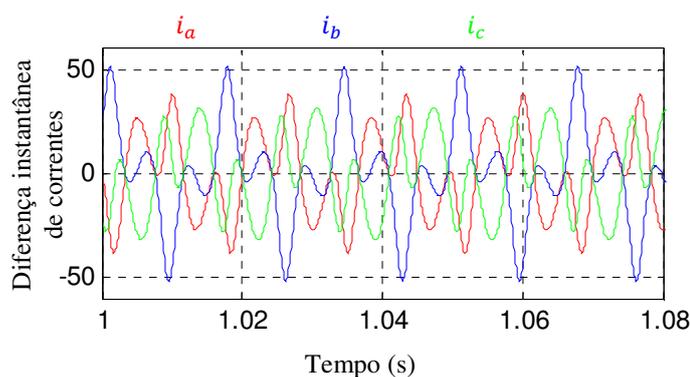
Fonte: Próprio autor.

As Figuras 5.51 e 5.52 mostram que não existe equivalência entre as teorias, na compensação de correntes não ativas, com tensões desequilibradas.

A Figura 5.53 mostra a diferença instantânea entre as teorias após a compensação das correntes não ativas. As correntes da CPT são utilizadas como referência para o cálculo. O resultado representa as oscilações que aparecem nas correntes ativas médias da Teoria pq e que não estão presentes nas correntes ativas balanceadas da CPT. Isto mostra que mesmo após a compensação de todos os distúrbios gerados pela carga, as oscilações provocadas pelos desequilíbrios das tensões continuam no sistema.

Estas oscilações não aparecem nas correntes da CPT, pelo fato desta teoria utilizar a norma quadrática rms (eficaz) no cálculo das tensões e correntes, ou seja, independentemente da configuração das tensões e da carga, as tensões e correntes no PAC sempre terão valores constantes (2.65) e (2.66).

Figura 5.53 – Diferença instantânea após compensação das correntes não ativas.



Fonte: Próprio autor.

A diferença percentual das correntes coletivas<sup>7</sup> após a compensação de todas as correntes não ativas é calculada através de (4.1), resultando em um valor aproximado de 5%. Este valor representa os harmônicos gerados nas correntes da Teoria pq, devido as tensões da fonte serem desequilibradas..

$$\varepsilon(\%) = \frac{|I_{CPT} - I_{pq}|}{I_{CPT}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

De todos os casos analisados, este foi o melhor caso para mostrar a diferença percentual entre as teorias, assim enfatizar as distorções harmônicas que aparecem nas correntes da Teoria pq em casos com tensões desequilibradas. Pois, mesmo após a compensação de todos os distúrbios gerados pela carga, as correntes da fonte continuam distorcidas e desequilibradas.

## 5.6. Complexidade computacional

Esta seção apresenta uma análise da complexidade computacional para cada estratégia de compensação para as duas teorias. O número de operações matemáticas pode ajudar na escolha mais apropriada do microcontrolador para uma determinada aplicação. A Tabela 5.7

<sup>7</sup> As correntes coletivas das CPT e da Teoria pq foram calculadas através de:  $I = \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}$ .

mostra o número de operações matemáticas e o número total de instruções para cada estratégia de compensação [46]. A estimativa do número de instruções foi baseada em um processador de sinais digitais da Texas instruments, o modelo comercial F2812.

Tabela 5.7 – Número de operações matemáticas para cada método de controle.

<b>Estratégia de compensação</b>	<b>( + )</b>	<b>( - )</b>	<b>( * )</b>	<b>( / )</b>	<b>sqrt</b>	<b>Número total de instruções</b>
$\underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u$	29	30	50	8	8	461
$\underline{i}_v$	21	18	42	12	6	507
$\underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u + \underline{i}_v$	25	16	32	4	2	215
$\underline{i}_r^b + \underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u + \underline{i}_v$	10	5	14	2	1	100
$i_{\bar{p}}$	4	6	12	1	0	49
$i_{\bar{q}}$	4	6	12	1	0	49
$i_{\bar{p}} + i_{\bar{q}}$	6	5	13	2	0	78
$i_q + i_{\bar{p}}$	4	5	12	1	0	48

Fonte: Mortezaei, ECCE 2014.

Nota-se que a CPT apresenta o maior número de operações matemáticas para todas as estratégias de compensação, assim como o maior número de instruções. Enquanto que a Teoria pq apresenta o menor número de operações matemáticas e também menor número de instruções.

Para uma análise comparativa justa, todos os filtros passa-baixa foram implementados através do método de filtros de média móvel com 200 posições, a fim de criar um padrão para os cálculos na análise entre a CPT e a Teoria pq.

Para uma melhor interpretação dos resultados em relação a complexidade computacional foi feito uma breve discussão de dois casos estudados, com base na análise das estratégias de compensação de correntes não ativas.

### **1º caso: Carga resistiva desbalanceada com tensões senoidais equilibradas**

Para esta configuração só existem correntes desbalanceadas ( $\underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u$ ) da CPT e correntes oscilantes ( $i_{\bar{p}} + i_{\bar{q}}$ ) da Teoria pq, que não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga. As não linearidades e os reativos que provocam deslocamento de fase são nulos. Portanto, a única estratégia é compensar os desbalanços gerados pela carga. Analisando a Tabela 5.7, é possível notar que para esta estratégia de compensação, com a CPT é preciso processamento de 461 instruções matemáticas. Enquanto

que com a Teoria pq são necessárias 78 instruções. Isso significa que a CPT precisa de aproximadamente 6 vezes mais processamento para obter um resultado semelhante de compensação. A vantagem da Teoria pq em relação à CPT, para esta estratégia de compensação, é o menor custo do processamento.

## **2º caso: Carga não linear desbalanceada com tensões senoidais equilibradas**

Para esta configuração existem algumas possibilidades de estratégia de compensação de corrente seletiva que não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga.

A estratégia de compensação das não linearidades e desbalanços da carga para a análise da complexidade computacional será representada pelas correntes residuais e desbalanceadas da CPT ( $\underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u + \underline{i}_v$ ) e pelas correntes oscilantes da Teoria pq ( $i_{\bar{p}} + i_{\bar{q}}$ ). A Tabela 5.7 mostra que a CPT precisa de 215 instruções matemáticas para esta estratégia de compensação, enquanto a Teoria pq necessita de 78 instruções. Isto mostra que a CPT precisa de 2,75 vezes mais processamento do que a Teoria pq.

Se o objetivo for obter correntes senoidais em fase com as respectivas tensões, é preciso compensar todos os distúrbios gerados pela carga, que são representados com a CPT pela soma das parcelas de correntes desbalanceadas, reativas balanceadas e residuais ( $\underline{i}_r^b + \underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u + \underline{i}_v$ ). Com a Teoria pq, são representados pela soma das parcelas de correntes oscilantes e reativas médias ( $i_q + i_{\bar{p}}$ ). A Tabela 5.7 mostra que para esta estratégia de compensação com a CPT é preciso 100 instruções matemáticas, enquanto a Teoria pq precisa de 48 instruções. Isto mostra que a CPT precisa de aproximadamente 2 vezes mais processamento do que a Teoria pq, para este caso.

Assim, a Tabela 5.7 indica que o custo computacional para cada estratégia de compensação pode variar significativamente.

## 6. CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizado um estudo comparativo entre a Teoria de Potência Conservativa e a Teoria de Potências Instantâneas na análise de circuitos trifásicos com três e quatro condutores (3F e 3F-N), a fim de mostrar as similaridades e divergências entre as teorias para a caracterização dos fenômenos físicos dos circuitos (consumo de energia, reatividade, desbalanço e não linearidade). As teorias também foram analisadas em termos da compensação de correntes que não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga (correntes não ativas). No estudo foram analisados circuitos com cargas lineares (resistiva, resistiva-indutiva e capacitiva) e não lineares (retificadores monofásicos e trifásicos), balanceadas e desbalanceadas, sendo alimentadas por tensões senoidais e não senoidais, equilibradas e desequilibradas, com e sem impedância de linha.

As duas teorias separam as correntes em parcelas ativas e reativas, as quais no caso da CPT ainda podem ser separadas em parcelas balanceadas e desbalanceadas ( $i_a^u + i_r^u$ ). A CPT ainda representa as não linearidades do circuito através das parcelas residuais ( $i_v$ ). No caso da Teoria pq, esta propõe a separação das correntes ativas e reativas em parcelas médias e oscilantes ( $i_{\tilde{p}} + i_{\tilde{p}} + i_{\tilde{q}} + i_{\tilde{q}}$ ). Entretanto, a Teoria pq mistura os efeitos das não linearidades e desequilíbrios das formas de onda nas parcelas oscilantes ( $i_{\tilde{p}} + i_{\tilde{q}}$ ).

Dentre os resultados apresentados, algumas conclusões importantes podem ser destacadas:

### *Circuitos trifásicos com três condutores (3F), com tensões senoidais equilibradas, sem impedância de linha*

- ***Cargas lineares e não lineares balanceadas***
  - As correntes ativas e reativas balanceadas da CPT são equivalentes às correntes ativas e reativas médias da Teoria pq ( $i_{a\mu}^b = i_{\tilde{p}\mu} \leftrightarrow i_{r\mu}^b = i_{\tilde{q}\mu}$ ). Porém, como esperado, as correntes reativas balanceadas e médias são nulas ( $i_{r\mu}^b = i_{\tilde{q}\mu} = 0$ ) para a carga resistiva;
  - Para as cargas lineares, as parcelas de corrente que representam as não linearidades e desbalanços das cargas são equivalentes e nulas, para as duas teorias ( $i_{v\mu} = i_{\tilde{p}\mu} + i_{\tilde{q}\mu} = 0$ ). No entanto, para as cargas não lineares, somente os desbalanços são nulos

( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u = i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu} = 0$ ). Portanto, as correntes oscilantes ( $i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ) estão representando exclusivamente as não linearidades da carga;

- As correntes não ativas representam todos os distúrbios gerados pela carga, as quais são equivalentes entre as teorias ( $i_{r\mu}^b + i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu} = i_{\bar{q}\mu} + i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ).

- ***Cargas lineares e não lineares desbalanceadas***

- As correntes ativas e reativas balanceadas da CPT são equivalentes com as correntes ativas e reativas médias da Teoria pq ( $i_{a\mu}^b = i_{\bar{p}\mu} \leftrightarrow i_{r\mu}^b = i_{\bar{q}\mu}$ );
- As parcelas de corrente que representam as não linearidades e desbalanços da carga são equivalentes entre as teorias ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu} = i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ). No caso de cargas lineares desbalanceadas, as não linearidades são nulas e ( $i_{v\mu} = 0$ ), de forma que as correntes oscilantes resultam idênticas as correntes de desbaço ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u = i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ).
- Os distúrbios gerados pela carga ( $i_{r\mu}^b + i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu} = i_{\bar{q}\mu} + i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ) são equivalentes entre as teorias.

***Circuitos trifásicos com três condutores (3F), com tensões não senoidais equilibradas, sem impedância de linha***

- ***Cargas lineares balanceadas ou desbalanceadas***

As correntes ativas e reativas balanceadas da CPT e as correntes ativas e reativas médias da Teoria pq são praticamente equivalentes ( $i_{a\mu}^b \cong i_{\bar{p}\mu} \leftrightarrow i_{r\mu}^b \cong i_{\bar{q}\mu}$ ), assim como as parcelas de corrente que representam as não linearidades e os desbalanços da carga ( $i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u + i_{v\mu} \cong i_{\bar{p}\mu} + i_{\bar{q}\mu}$ ). As pequenas diferenças encontradas ocorrem em função de a Teoria pq usar a norma quadrática instantânea das tensões ( $v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$ ) nos cálculos das correntes, sendo que a norma tem valores oscilatórios de pequena amplitude, assim tais parcelas de corrente podem ser consideradas iguais, para a faixa de distorção das tensões de até 10%, o que em geral atende as normas nacionais e internacionais [48], [49].

- ***Cargas não lineares balanceadas ou desbalanceadas***

As análises com cargas não lineares mostram que as correntes ativas balanceadas da CPT e as correntes ativas médias da Teoria pq são praticamente equivalentes ( $i_{a\mu}^b \cong i_{\bar{p}\mu}$ ). Porém, as correntes reativas balanceadas da CPT e as correntes reativas médias da Teoria pq não são equivalentes ( $i_{a\mu}^b \neq i_{\bar{q}\mu}$ ). A norma quadrática instantânea das tensões da Teoria pq ( $v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$ ) tem valor oscilatório com amplitude pequena, que não devem ser desprezíveis com a presença de correntes reativas distorcidas.

***Circuitos trifásicos com três condutores (3F), com tensões senoidais e não senoidais desequilibradas, sem impedância de linha***

- ***Cargas lineares e não lineares balanceadas e desbalanceadas***

As teorias divergem em todas as parcelas de corrente, pois, com *tensões desequilibradas* a norma quadrática instantânea das tensões da Teoria pq ( $v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2$ ) resulta em valor oscilatório não desprezível, os quais geram frequências harmônicas nas parcelas de corrente da Teoria pq que não são geradas pela carga e nem impostas pelas tensões. Isto não ocorre com a CPT, pois esta usa a norma eficaz das tensões, a qual tem valores constantes, independente das condições das tensões.

***Circuitos trifásicos com quatro condutores (3F-N), sem impedância de linha***

Diversos comentários e comparações entre as parcelas de corrente para circuitos trifásicos a três condutores são válidos para circuitos a quatro condutores. Porém, a presença do condutor de retorno em circuitos com quatro condutores (3F-N) leva ao surgimento de corrente de sequência zero, a qual deve ser considerada na soma das correntes que não geram potência útil da Teoria pq, em comparação com as correntes não ativas CPT. Assim, só haverá equivalência entre parcelas específicas de corrente na condição de tensões senoidais equilibradas.

***Circuitos trifásicos com três e quatro condutores (3F e 3F-N), com tensões senoidais e não senoidais equilibradas, com impedância de linha***

As análises com cargas lineares desbalanceadas mostram que a presença das impedâncias de linha, na interação com as correntes da carga, torna as tensões no PAC desequilibradas. Tais desequilíbrios fazem com que as parcelas de corrente entre as teorias sejam distintas.

As análises com cargas não lineares desbalanceadas mostram que as tensões no PAC são distorcidas e desequilibradas, as quais são provocadas pela interação entre as correntes distorcidas e desequilibradas da carga com as impedâncias de linha. Isso faz com que as parcelas de corrente entre as teorias sejam distintas. No caso de cargas não lineares balanceadas, esta interação faz com as tensões no PAC se tornem distorcidas, porém, equilibradas.

Em circuitos trifásicos a três condutores (3F), a potência ativa da CPT e a potência real da Teoria pq são equivalentes para todos os casos simulados. Em circuitos trifásicos a quatro condutores (3F-N), na ausência de componentes de sequência zero, estas parcelas de potência também são equivalentes, as quais são calculadas através da soma do produto interno dos vetores instantâneos das tensões e correntes em todas as fases (2.41).

***Compensação de correntes não ativas para circuitos trifásicos com três condutores (3F), com tensões senoidais equilibradas e desequilibradas, com e sem impedância de linha***

- ***Tensões senoidais equilibradas, circuito sem impedância de linha***

Os resultados mostram que existe equivalência entre as teorias para a compensação das correntes não ativas, independentemente se as cargas são lineares ou não lineares, balanceadas ou desbalanceadas. Porém, não existe equivalência entre as correntes reativas balanceadas da CPT e correntes reativas médias da Teoria pq com carga resistiva-indutiva desbalanceadas, por surgirem oscilações com o triplo da frequência fundamental (180Hz) nas correntes reativas médias da Teoria pq, as quais não estão presentes nas correntes reativas balanceadas da CPT. Estas oscilações surgem no processo de decomposição das correntes reativas em parcelas médias e oscilantes ( $i_q = i_{\bar{q}} + i_{\hat{q}}$ ). No caso de cargas lineares, as correntes reativas oscilantes estão representando exclusivamente os desbalanços da carga (não linearidades são nulas).

Para as cargas não lineares, não existe equivalência na compensação entre as correntes reativas balanceadas da CPT e as correntes reativas médias da Teoria pq, pelo fato que a Teoria pq representa os desbalanços e as não linearidades da carga juntos nas correntes reativas oscilantes. Estas divergências ocorrem pelo fato que, com a CPT é compensado o deslocamento de fase ( $i_r^b$ ) e o desbalanço da carga ( $i_r^u$ ), enquanto que com a Teoria pq, além destes distúrbios, são compensadas as não linearidades que estão presentes nas correntes reativas oscilantes ( $i_{\tilde{q}}$ ).

- ***Tensões senoidais equilibradas, com impedância de linha, com cargas não lineares balanceadas***

Os resultados mostram que a presença das impedâncias de linha, na interação com as correntes da carga, torna as tensões no PAC distorcidas e desequilibradas. Estas condições fazem com que não haja correspondência entre as parcelas de corrente de compensação. Porém, ao compensar todas as correntes que não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga (correntes não ativas), as tensões e correntes no PAC se tornam senoidais equilibradas e estão perfeitamente em fase, para as duas teorias.

- ***Tensões senoidais desequilibradas, com impedância de linha, com cargas não lineares desbalanceadas***

Os resultados mostram que mesmo após compensação de todas as correntes que não contribuem com a transferência de energia útil da fonte para a carga, com a Teoria pq as tensões e correntes no PAC são distorcidas e desequilibradas. Já com a CPT, as tensões e correntes no PAC são senoidais e estão perfeitamente em fase. Porém, são desequilibradas já que o desequilíbrio é imposto pelas tensões da fonte.

### ***Conclusões gerais***

Os estudos mostram que apesar das teorias serem bastante distintas em suas formulações, existe equivalência entre diversas parcelas de correntes e suas respectivas parcelas de potência, em circuitos trifásicos com tensões equilibradas. Porém, no caso de tensões desequilibradas as diferenças entre as duas teorias podem ser bastante significativas.

Os resultados indicam que ambas as teorias podem ser utilizadas em análises dos circuitos elétricos, assim como em compensação de correntes não ativas. Porém, a escolha da teoria para aplicações com tensões desequilibradas necessita de análises criteriosas.

A análise da complexidade computacional mostra que a escolha da Teoria, para qualquer que seja a estratégia de compensação, está diretamente ligada com os custos de processamento. A Tabela 5.7 mostra que compensar as não linearidades da carga com a CPT exige processamento 6,5 vezes maior do que se uma estratégia equivalente fosse utilizada através da Teoria pq.

### ***Sugestões para trabalhos futuros***

Após o trabalho realizado, vislumbram-se algumas possibilidades de trabalhos futuros que poderiam complementar os estudos realizados, dentre eles:

- 1 – A validação e comparação experimental das teorias, seja do ponto de vista da análise, seja do ponto de vista de compensação em circuitos polifásicos genéricos.
- 2 – A expansão do trabalho, considerando-se a comparação com outras teorias apresentadas na literatura internacional, em especial a Teoria CPC [50].
- 3 – Detalhamento das análises com relação ao custo computacional das teorias avaliadas.
- 4 – Avaliação do impacto da escolha da teoria e suas respectivas parcelas de corrente ou potência, do ponto de vista da resposta dinâmica dos filtros ativos paralelos.

### ***Publicações correlatas à dissertação***

BOGILA, A.; MARAFÃO, F. P; PAREDES, H. K. M; SIMOES, M. G. Análise Comparativa entre a Teoria de Potência Instantânea e a Teoria de Potência Conservativa para Aplicação em Filtros Ativos Paralelos. **Simpósio Brasileiro de Sistemas elétricos (SBSE)**, Foz do Iguaçu, 22 - 25 Abril 2014.

MORTEZAEI, A; MARAFÃO, F. P; SIMOES, M. G; BOGILA, A. PQ, DQ and CPT Control Methods for Shunt Active Compensators – A Comparative Study. **IEEE Energy Conversion Congress & Expo**, Pittsburgh, 2014.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MARAFÃO, F. P. Análise e controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais. **Tese de Doutorado**, Universidade Estadual de Campinas, SP-Brasil, 2004.
2. PAREDES, H. K. M. Teoria de Potência Conservativa: Uma Nova Abordagem para o Controle Cooperativo de Condicionadores de Energia e Considerações Sobre Atribuição de Responsabilidades. **Tese de Doutorado**, Universidade Estadual de Campinas, SP-Brasil, 2011.
3. IEEE 1459. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions (Revision of IEEE 1459-2000), 2010.
4. WILLEMS, J. L. A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-phase Situations. **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, v. 41, n. 4, p. 523-527, August 1992.
5. DEPENDROCK, M. The FBD-Method, a Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations. **IEEE Trans. on Power Systems**, v. 8, n. 2, p. 381-387, May 1993.
6. CZARNECKI, L. S. Orthogonal Decomposition of the Currents in a 3-phase Nonlinear Asymmetrical Circuit with a Nonsinusoidal Voltage Source. **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, v. 1, n. 37, p. 30-34, March 1988.
7. TENTI, P.; MATTAVELLI, P.; PAREDES, H. K. M. Conservative Power Theory, sequence components and accountability in smart grids, 2010.
8. SOUZA, W. A. D. Desenvolvimento de Sistema de Aquisição e Processamento para Aplicações em Qualidade de Energia. **Dissertação de Mestrado**, UNESP, SP- Brasil, 2011.
9. WATANABE, E. H.; AKAGI, H.; AREDES, M. Instantaneous p-q Power Theory for compensating nonsinusoidal systems. **International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation**, p. 1-10, 2008.
10. MARAFÃO, F. P. et al. Decoupled Reference Generator for Shunt Active Filters Using the Conservative Power Theory. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, p. 522-534, 2013.
11. BRANDAO, D. I. et al. Inverter control strategy for DG systems based on the Conservative power theory. **Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)**, Denver, 2013. 3283-3290.
12. MARAFÃO, F. P.; DECKMANN, S. M.; PAREDES, H. K. M. The influence of the Voltage Referential to Power Quality Evaluation. **IEEE Latin America Transactions (Revista IEEE America Latina)**, v. 6, n. 1, p. 81-88, March 2008.
13. PAREDES, H. K. M. Influência do Referencial de Tensão na Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Estadual de Campinas, SP-Brasil, 2006.
14. AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE., A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits. **In IPEC – International Power Electronics**

- Conference**, Tokio, p. 1375-1386, 1983.
15. WATANABE, E. H.; STEPHAN, R. M.; AREDES, M. New concepts of instantaneous active and reactive powers in electrical systems with generic loads. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 8, n. 2, p. 697–703, Abril 1993.
  16. AKAGI, H.; OGASAWARA, S.; KIM, H. The Theory of Instantaneous Power in Three-phase Four-wire Systems: A Comprehensive Approach, Phoenix, AZ, p. 431–439, 1999.
  17. TENTI, P.; MATTAVELL, P. A Time-Domain Approach to Power Term Definitions under Non- Sinusoidal Conditions. **L'Energia Elettrica**, v. 81, p. 75-84, 2003.
  18. TENTI, P.; MATTAVELLI, P.; TEDESCHI, E. Compensation Techniques Based on Reactive Power Conservation. **Electrical Power Quality and Utilization**, v. XIII, n. 1, p. 17–24, 2007.
  19. EMANUEL, A. E. **Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow**. 1. ed. Chichester, USA: Wiley-IEEE Press, 2011. 280 p.
  20. AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components. **IEEE Trans. on Industrial Application**, v. 20, n. 3, p. 625-630, May/June 1984.
  21. AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. **IEEE Press and Wiley-Interscience**, p. 25-28, 2007.
  22. WATANABE, E. H.; AREDES, M.; AKAGI, H. The p-q Theory for Active Filter Control: Some Problems and Solutions. **SBA-Revista Controle & Automação**, v. 15, n. 1, p. 78-84, Jan/Mar 2004.
  23. WATANABE, E. H. et al. Compensation Algorithms Based on the p-q and CPC Theories for Switching Compensators in Micro-Grids. **Eletrônica de Potência**, v. 14, n. 4, p. 259-268, Novembro 2009.
  24. WATANABE, E. H. et al. Instantaneous pq power theory for control of compensators in micro-grids. **International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC)**, p. 17-26, 2010.
  25. ORDONEZ, C. A. et al. p - q theory for active compensation applied to supergrids and microgrids. **Workshop on Engineering Applications (WEA)**, p. 1-6, 2012.
  26. CLARKE, E. Circuit Analysis of A-C power systems - Symmetrical and Related Components, n. 1, New York: John Wiley, 1943.
  27. BARBI I. **Teoria fundamental do motor de indução**. Florianópolis: UFSC, 1985.
  28. FORTESCUE, C. L. Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. **AIEE Transaction**, v. 37, p. 1027-1140, 1918.
  29. WATANABE, E. H. et al. Instantaneous p-q Power Theory for Control of Compensators in Micro-Grids. **Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)**, v. 86, n. 6, p. 1-10, June 2010.
  30. 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.

28-33, January 2011.

31. WATANABE, E.; R, S. Potência ativa e reativa instantâneas em sistemas elétricos com fontes e cargas genéricas. **SBA: Controle & Automação**, Rio de Janeiro, v. 3, n. 1, p. 253-263, 1991-1992.
32. TENTI, P. et al. Load Characterization and Revenue Metering Under Non-Sinusoidal and Asymmetrical Operation. **IEEE Transactions on Instrumentation and measurement**, 2013.
33. SOUZA, W. A. et al. Load Analyser using Conservative Power Theory. **IX International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation**, Zielona Gora, Poland, 2013.
34. PAREDES, H. K. M.; MARAFÃO, F. P.; SILVA, L. C. P. A Comparative Analysis of FBD, PQ and CPT Current Decompositions Part I: Three-Phase Three-Wire Systems, Bucharest , June/July 2009.
35. PAREDES, H. K. M.; MARAFÃO, F. P.; SILVA, L. C. P. A Comparative Analysis of FBD, PQ and CPT Current Decompositions Part II: Three-Phase Four-Wire Systems, Bucharest, June/July 2009.
36. PIRELLI. Catálogo de cabos elétricos Pirelli, 2010. Disponível em: <[http://www.miuraengenharia.com.br/docs\\_pdf%5Cpirelli.pdf](http://www.miuraengenharia.com.br/docs_pdf%5Cpirelli.pdf)>. Acesso em: 25 Março 2014.
37. HAFNER, J.; AREDES, M.; HEUMANN, K. A shunt active power filter applied to high voltage distribution lines. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 12, p. 266-272, 1997.
38. TOLBERT, L. M. et al. Compensation of irregular currents with active filters. **Power Engineering Society General Meeting (IEEE)**, v. 2, 13-17 Julho 2003.
39. SINGH, B.; AL-HADDAD, K.; CHANDRA, A. A review of active filters for power quality improvement. **Industrial Electronics, IEEE Transactions on**, v. 46, p. 960-971, October 1999.
40. PENG, F. Z.; LAI, J. Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-phase Power Systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 45, n. 1, p. 293-297, February 1996.
41. MARAFÃO, F. P. et al. Selective disturbance compensation and comparisons of active filtering strategies. **Harmonics and Quality of Power, 10th International Conference on (IEEE)**, 2002. 484-489.
42. AKAGI, H.; WATANABE, E.; AREDES, M. Shunt Active Filters. **Wiley-IEEE Press**, n. 1, p. 109-220, 2007.
43. SOARES, V.; VERDELHO, P.; MARQUES, G. **A control method for active power filters under unbalanced nonsinusoidal conditions**. Power Electronics and Variable Speed Drives, Sixth International Conference on. [S.l.]: [s.n.]. 1996. p. 120-124.
44. CZARNECKI, L. S. Compensation objectives and currents' physical components-based generation of reference signals for shunt switching compensator control. **Power Electronics, IET**, January 2009. 33-41.

45. AKAGI, H.; NABAE, A. The p-q Theory in Three-phase Systems Under Non-Sinusoidal Conditions. **ETEP - European Transaction Electrical Power Engineering**, v. 3, n. 1, p. 27-31, January/February 1993.
46. MORTEZAEI, A. et al. PQ, DQ and CPT Control Methods for Shunt Active Compensators – A Comparative Study. **IEEE Energy Conversion Congress & Expo**, em publicação, 2014.
47. BOGILA, A. et al. Análise Comparativa entre a Teoria de Potência Instantânea e a Teoria de Potência Conservativa para Aplicação em Filtros Ativos Paralelos. **Simpósio Brasileiro de Sistemas elétricos (SBSE)**, Foz do Iguaçu, 22 - 25 de Abril, 2014.
48. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS (IEEE). IEEE Std 519-1992: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. **IEEE Industry Applications Society**, p. 112, 1993.
49. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). PRODIST Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica, Fevereiro, 2012.
50. CZARNECKI, L. S. Currents' Physical Components (CPC) Concept: a Fundamental of Power Theory. **International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation**, Poland, 2008. 1-11.