



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia de Bauru



PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA PARA
ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

Autor: Fernando Buzzo Fraissat

Orientador: Fernando Pinhabel Marafão

Bauru, fevereiro de 2011.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia de Bauru



PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ESTUDO DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA PARA ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Autor: Fernando Buzzo Fraissat

Orientador: Fernando Pinhabel Marafão

Bauru, fevereiro de 2011.

Fraissat, Fernando Buzzo.

Estudo da teoria de potência conservativa para
análise de sistemas elétricos / Fernando Buzzo
Fraissat, 2011.

97 f.

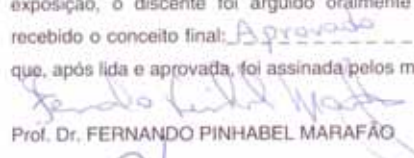
Orientador: Fernando Pinhabel Marafão

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011


1. Potência elétrica. 2. Condições não ideais. 3.
Potência conservativa. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado DE FERNANDO BUZZO FRAISSAT, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 04 dias do mês de fevereiro do ano de 2011, às 10:00 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, 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 / UNESP - Sorocaba, Prof. Dr. MÁRIO OLESKOVICZ do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade de São Paulo, Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / UNESP - Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de FERNANDO BUZZO FRAISSAT, intitulado "ESTUDO DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA PARA ANÁLISE DE SISTEMAS ELÉTRICOS". Após a exposição, o discente foi argüido 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. MÁRIO OLESKOVICZ



Prof. Dr. FLÁVIO ALESSANDRO SERRÃO GONÇALVES

Agradecimentos

A Deus, pela benção e proteção.

A minha mãe Aparecida e a minha filha Fernanda, pela compreensão durante minhas ausências nos momentos de dedicação ao mestrado.

Ao Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão, pelo incentivo e paciência, bem como pela demonstração de profissionalismo, ética, disciplina e trabalho em equipe.

Aos colegas Eduardo Verri Liberado, Wesley Angelino de Souza, Helmo Kelis Morales Paredes e Thiago Menezes Terrazas, pelo apoio e companheirismo durante minha jornada pelo laboratório do GASI (Grupo de Automação e Sistemas Integráveis) da UNESP de Sorocaba.

Resumo

A influência de distorções e assimetrias nos sistemas elétricos é um assunto quase tão antigo quanto o próprio sistema elétrico de corrente alternada. Importantes discussões datam do final do século XIX. Entretanto, com o crescimento contínuo do uso das chamadas cargas não-lineares, não só em atividades industriais e comerciais, mas também em aplicações residenciais, a presença de distorções nas formas de onda de corrente e/ou tensão têm provocado perturbações cada vez mais relevantes para o sistema elétrico. Somem-se a isto os efeitos do desbalanço de cargas ao longo dos sistemas polifásicos. Tem-se então uma situação que demanda uma revisão detalhada da metodologia de cálculo da potência e fator de potência nos sistemas elétricos atuais.

Neste sentido, inúmeras teorias e definições de potência para circuitos com tensões e correntes distorcidas e/ou desequilibradas têm sido apresentadas, tanto no domínio da frequência, quanto no domínio do tempo. No entanto, ainda existem muitas divergências em torno das várias metodologias apresentadas. A única certeza parece ser o fato de que a teoria convencional tem se mostrado incompatível com a realidade dos sistemas monofásicos e polifásicos atuais.

Neste contexto, buscando contribuir com a discussão de novas propostas de teorias de potência, este trabalho apresenta uma breve revisão histórica de alguns dos mais importantes métodos propostos na literatura, para o cálculo da potência elétrica sob condições ditas não ideais de transferência e consumo de energia. Além disto, o trabalho traz uma análise detalhada da aplicação da Teoria de Potência Conservativa (TPC), proposta recentemente por Tenti et al.. A teoria TPC foi analisada por meio de simulações computacionais de circuitos elétricos sob diversas condições de operação, bem como através do estudo de um caso experimental. Os resultados indicam que tal teoria pode ser uma alternativa interessante para compreensão do comportamento dos circuitos elétricos polifásicos com cargas não lineares.

Abstract

The discussion about the influences of waveform distortions and asymmetries dates almost from the same period of the alternating current power system. However, considering the continuous increasing of non linear loads utilization, not only in industrial applications, but also in commercial and residential installations, such voltage and current distortions have lead to relevant power system's perturbation. In addition, assuming multiphase electrical circuits, the effects of load unbalances lead to a novel situation, which demands a meticulous review of power and power factor calculation methodologies.

In this sense, numerous power theories have been proposed in order to deal with distorted and unbalanced voltage and current conditions, some in the frequency domain and some in the time domain. Nevertheless, there is not a convergence in terms of the specialists' opinions. The only certainty seems to be the fact that the conventional theory should be revised, since it does not comply anymore with the modern power system's reality.

In such context, this work tries to contribute to the discussion and understanding of novel power theories. It starts with a concise review of some proposals found in literature and then, it presents a particular analysis of the Conservative Power Theory (CPT), proposed by Tenti et al.. The CPT has been analyzed by means of the computational simulation of several different power circuits, as well as by means of experimental activities. The results indicate that such theory could be an interesting alternative for the understanding of the physical phenomena related to multiphase and non linear power circuits.

Sumário

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Lista de Figuras.....	vi
Lista de Tabelas.....	xi
1. Introdução	1
1.1. Organização do Trabalho	3
2. Definições de potência elétrica em condições não ideais	4
2.1. Abordagens no domínio da frequência	4
2.1.1. Proposta de Budeanu (1927).....	4
2.1.2. Proposta de Kimbark (1971).....	5
2.1.3. Proposta de Shepherd e Zakikhani (1972).....	6
2.1.4. Proposta de Czarnecki (1988/2008).....	6
2.1.5. Proposta do IEEE (2010).....	7
2.2. Abordagens no domínio do tempo	9
2.2.1. Proposta de Fryze (1932)	9
2.2.2. Proposta de Akagi et al. (1983).....	10
2.2.3. Proposta de Depenbrock (1962/1992).....	11
2.2.4. Proposta de Tenti e Rosseto (1992).....	12
2.2.5. Proposta de Willems (1992)	12
2.2.6. Proposta de Peng e Lai (1996).....	13
3. Teoria de Potência Conservativa (2010).....	15
3.1. Ferramentas matemáticas.....	16
3.2. Decomposição da corrente em parcelas relacionadas com as características dos circuitos elétricos reais	18
3.3. Decomposição da potência elétrica em parcelas associadas com as características dos circuitos e da tensão de fornecimento	20
3.4. Discussões sobre a Teoria TPC.....	21
4. Análise de Casos Simulados	22
4.1. Monofásico senoidal (sem impedância de rede).....	22

4.1.1. Carga Resistiva de 10 kW	22
4.1.2. Carga Resistiva-Indutiva (RL) de 10 kVA.....	25
4.1.3. Carga Resistiva-Capacitiva (RC) de 10 kVA	28
4.1.4. Carga Capacitiva de 10 kVA.....	31
4.1.5. Carga Não Linear de 10 kVA.....	33
4.1.6. Carga Mista: RL + Não Linear	36
4.2. Monofásico senoidal (com impedância de rede).....	39
4.2.1. Carga Não Linear.....	39
4.3. Monofásico com tensão não senoidal (com impedância da rede).....	42
4.3.1. Carga Resistiva de 10 kW	42
4.3.2. Carga Resistiva-Indutiva (RL) de 10 kVA.....	45
4.3.3. Carga Não Linear de 10 kVA.....	47
4.4. Trifásico 3 condutores com tensão senoidal equilibrada e simétrica (sem impedância de rede).....	50
4.4.1. Carga Resistiva Balanceada de 30 kW	50
4.4.2. Carga Não Linear Balanceada de 30 kVA.....	53
4.4.3. Carga Mista: RL + Não Linear Desbalanceada.....	57
4.4.4. Carga Resistiva Desbalanceada	61
4.4.5. Carga Resistiva-Indutiva (RL) Desbalanceada	64
4.4.6. Carga Não Linear Desbalanceada de 30 kVA.....	67
4.5. Trifásico 4 condutores com tensão senoidal equilibrada e simétrica (sem impedância de rede).....	71
4.5.1. Carga Resistiva Desbalanceada	71
4.5.2. Carga Não Linear Desbalanceada de 30 kVA.....	74
4.5.3. Caso Típico Residencial - Cargas Bifásicas e Monofásicas	77
4.6. Trifásico 4 condutores com tensão desequilibrada e assimétrica (com impedância de rede).....	82
4.6.1. Carga Mista: RL + Não Linear Desbalanceada.....	82
5. Análise de Caso Experimental	88
6. Conclusões.....	92
Referências Bibliográficas.....	94

Lista de Figuras

Figura 4.1 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva.	23
Figura 4.2 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva.	23
Figura 4.3 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva.	24
Figura 4.4 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva.	24
Figura 4.5 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva-indutiva. ...	25
Figura 4.6 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva-indutiva.	26
Figura 4.7 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva-indutiva.	27
Figura 4.8 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva-indutiva.	27
Figura 4.9 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva-capacitiva.	28
Figura 4.10 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva-capacitiva.	29
Figura 4.11 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva-capacitiva.	29
Figura 4.12 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva-capacitiva.	30
Figura 4.13 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga capacitiva.	31
Figura 4.15 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga capacitiva.	32
Figura 4.16 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga capacitiva.	32
Figura 4.17 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga não linear.	33
Figura 4.18 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga não linear.	34
Figura 4.19 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga não linear.	34
Figura 4.20 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga não linear.	35

Figura 4.21 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga mista (RL + não linear).....	36
Figura 4.22 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga mista (RL + não linear).....	37
Figura 4.23 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga mista (RL + não linear).....	37
Figura 4.24 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga mista.....	38
Figura 4.25 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: carga não linear.....	39
Figura 4.26 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: tensão e corrente na carga não linear.....	40
Figura 4.27 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga não linear.....	40
Figura 4.28 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga não linear.....	41
Figura 4.29 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: carga resistiva.....	42
Figura 4.30 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva.....	43
Figura 4.31 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva.....	43
Figura 4.32 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva.....	44
Figura 4.33 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: carga resistiva-indutiva.....	45
Figura 4.34 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva-indutiva.....	45
Figura 4.35 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva-indutiva.....	46
Figura 4.36 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva-indutiva.....	46
Figura 4.37 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: carga não linear.....	47
Figura 4.38 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente na carga não linear.....	48
Figura 4.39 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga não linear.....	48
Figura 4.40 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga não linear.....	49
Figura 4.41 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva balanceada.....	50

Figura 4.42 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva balanceada.	51
Figura 4.43 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga resistiva balanceada.....	51
Figura 4.44 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga resistiva balanceada.....	52
Figura 4.45 – Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga resistiva balanceada.	52
Figura 4.46 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga não linear.	54
Figura 4.47 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga não linear.....	54
Figura 4.48 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga não linear.....	55
Figura 4.49 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga não linear.....	55
Figura 4.50 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nula na carga não linear.	56
Figura 4.51 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga não linear.	56
Figura 4.52 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga mista (RL + não linear) desbalanceada.	58
Figura 4.53 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga mista desbalanceada.	58
Figura 4.54 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga mista desbalanceada.	59
Figura 4.55 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga mista desbalanceada.....	59
Figura 4.56 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga mista desbalanceada.	60
Figura 4.57 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva desbalanceada.	61
Figura 4.58 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga resistiva desbalanceada.....	62
Figura 4.59 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga resistiva desbalanceada.....	62
Figura 4.60 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga resistiva desbalanceada.....	63
Figura 4.61 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga resistiva desbalanceada.	63

Figura 4.62 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva-indutiva (RL) desbalanceada.	65
Figura 4.63 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga resistiva-indutiva desbalanceada.	65
Figura 4.64 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga resistiva-indutiva desbalanceada.	66
Figura 4.65 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga resistiva-indutiva desbalanceada.	66
Figura 4.66 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga não linear desbalanceada.	68
Figura 4.67 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga não linear desbalanceada.	68
Figura 4.68 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga não linear desbalanceada.	69
Figura 4.69 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga não linear desbalanceada.	69
Figura 4.70 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nula na carga não linear desbalanceada.	70
Figura 4.71 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva desbalanceada.	72
Figura 4.72 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga resistiva desbalanceada.	72
Figura 4.73 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga resistiva desbalanceada.	73
Figura 4.74 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga resistiva desbalanceada.	73
Figura 4.75 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga não linear desbalanceada.	75
Figura 4.76 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga não linear desbalanceada.	75
Figura 4.77 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga não linear desbalanceada.	76
Figura 4.78 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga não linear desbalanceada.	76
Figura 4.79 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga mista - carga típica residencial.	78
Figura 4.80 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: tensões e correntes (multiplicadas por 10) na carga típica residencial.	79
Figura 4.81 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: tensões e correntes (multiplicadas por 10) ativas balanceadas na carga típica residencial.	79

Figura 4.82 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga típica residencial.	80
Figura 4.83 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga típica residencial.	81
Figura 4.84 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: carga mista desbalanceada.	83
Figura 4.85 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: tensões e correntes na carga mista desbalanceada.	84
Figura 4.87 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga mista desbalanceada.	85
Figura 4.88 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga mista desbalanceada.	85

Lista de Tabelas

4.1 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva.	25
4.2 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva indutiva.	28
4.3 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva-capacitiva.....	30
4.4 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga capacitiva.	33
4.5 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear.	36
4.6 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga mista (RL + não linear).....	38
4.7 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear.	42
4.8 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva.	44
4.9 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva-indutiva.	47
4.10 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear.	49

4.11 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva balanceada.....	53
4.12 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear.....	57
4.13 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga mista desbalanceada.	61
4.14 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva desbalanceada.	64
4.15 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva-indutiva desbalanceada.	67
4.16 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear desbalanceada.	71
4.17 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva desbalanceada.....	74
4.18 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear desbalanceada.	77
4.19 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga típica residencial.....	82
4.20 - Valores eficazes das Correntes, Parcelas de Potência, Fatores de Potência e Distorções Harmônicas Totais.	86

1. Introdução

A evolução tecnológica, o aperfeiçoamento de técnicas de produção e a redução nos custos, têm feito com que a parcela no consumo de energia elétrica, referente às cargas não lineares aumente a cada dia. De maneira geral, esse tipo de carga possui um comportamento não linear, ou seja, o espectro da corrente elétrica apresenta além da frequência fundamental, inúmeras outras componentes: as harmônicas (quando múltiplas inteiras da frequência fundamental) e inter-harmônicas (quando múltiplas não inteiras da frequência fundamental), resultando em uma série de perturbações no sistema elétrico.

Considerando ainda as características dos sistemas polifásicos de geração, transmissão e distribuição de energia, somam-se aos distúrbios de forma de onda, os efeitos dos desequilíbrios e assimetrias das formas de onda de tensão e corrente.

Tais perturbações, suas causas, consequências e eventuais soluções têm sido estudadas nas últimas duas décadas sob a ótica da área denominada de Qualidade da Energia Elétrica (QEE) (Bollen 2000), (Dugan, McGranaghan e Beaty 2002). Os principais desafios permeiam: a identificação e caracterização precisa dos distúrbios, a identificação das fontes de distúrbio (Cristaldi e Ferrero 1994), (Pavas, Staudt e Torres-Sánchez 2008), a instrumentação e a monitoração da QEE (Paredes, Marafão e Brandão, et al. 2009), a proposição de soluções (condicionadores da qualidade da energia) (Paredes, et al. 2009), a tarifação de energia (Tenti, Paredes, et al. 2010), dentre outros.

Se considerarmos ainda as recentes proposições e discussões referentes ao futuro dos sistemas elétricos, especialmente, o conceito de Micro Redes Inteligentes (Amin e Wollenberg 2005), (Venkataramann e Marnay 2008), (Monti, et al. 2010), o qual se baseia na instalação de múltiplas e pequenas fontes de energia pelos sistemas de distribuição (isolados ou não das redes convencionais), observaremos que a complexidade do sistema elétrico tende a crescer ainda mais nos próximos anos. Através de um sistema de gestão inteligente, tais Micro Redes poderão fornecer, de forma cooperativa, a energia demandada pela rede em diferentes condições de operação.

Do ponto de vista energético, tal conceito parece bastante interessante, uma vez que prevê a máxima utilização de fontes renováveis de energia, bem como a integração e otimização do fluxo de energia entre diferentes fontes, armazenadores de energia e pontos consumidores. Entretanto, vale destacar que tais Micro-Redes têm, por definição, baixo nível de curto circuito, uma vez que as fontes são projetadas para fornecer energia em valores similares aos demandados pelas cargas nas proximidades.

Isto equivale a dizer que o impacto das cargas não lineares em tais sistemas de geração e distribuição de energia tende a ser ainda mais significativos do que nas redes tradicionais, normalmente com elevados níveis de curto-circuito. Neste sentido, alguns trabalhos vêm avaliando a possibilidade de que os próprios conversores eletrônicos, responsáveis pelo controle da energia gerada nas diversas fontes das micro redes, também atuem no sentido de controlar a qualidade da energia da rede (Tedeschi, et al. 2009). No entanto, este ainda é um universo de estudos pouco explorado e que demandará grandes esforços no futuro.

Neste contexto, dentre muitas outras tecnologias e procedimentos necessários, torna-se fundamental a questão da revisão das técnicas de medição e cálculo das potências nos circuitos elétricos, as quais são utilizadas na monitoração, controle e tarifação da energia no sistema elétrico.

Além das abordagens tradicionais (Budeanu 1927), (Fryze 1932), diversos autores e grupos de pesquisa vêm estudando o assunto e propondo novas metodologias, nas últimas duas ou três décadas, dentre os quais se destacam (L. S. Czarnecki 1988), (L. S. Czarnecki 2008), (Akagi, Kanazawa e Nabae 1983), (Peng e Lai 1996), (Tenti e Rosseto 1992), (Willems 2010). O IEEE reeditou em 2010, o texto de sua recomendação sobre o assunto (IEEE 2010), o qual apesar de não ser adotado pela comunidade internacional como unanimidade, já vem sendo adotado por fabricantes e concessionárias de energia nos EUA. No entanto, como discutido em (F. P. Marafão 2004), (Marafão, Liberado, et al. 2010), ainda não existe uma convergência de opiniões entre os estudiosos e agências reguladoras internacionais, sobre qual metodologia utilizar em circuitos com formas de onda de tensão e corrente, não senoidais e desequilibradas.

Assim, dentre várias definições de potência para circuitos não-lineares que surgiram nos últimos anos, este trabalho busca analisar especificamente a Teoria de Potência Conservativa TPC (do inglês: *Conservative Power Theory, CPT*), proposta por Tenti et al., inicialmente em (Tenti e Mattavelli 2003), e atualizada recentemente em (Tenti, Mattavelli e Paredes 2010).

A principal motivação para o estudo da teoria TPC deve-se ao fato de que em tal proposta, as correntes e posteriormente as potências são decompostas (no domínio do tempo) em parcelas relacionadas com o comportamento dos circuitos em análise, bem como com as tensões de fornecimento. O principal objetivo é associar tais parcelas com as diferentes características dos circuitos, provocadas por exemplo, por não linearidades ou desbalanços das cargas, pela presença de bipólos armazenadores de energia ou pela conversão de energia elétrica em trabalho útil. Acredita-se que tal metodologia possa trazer inovações importantes no contexto das novas aplicações do sistema elétrico do futuro, além de permitir a interpretação detalhada dos sistemas elétricos, em termos das características e comportamentos dos circuitos e formas de onda envolvidas.

Neste sentido, vale destacar que a Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) aprovou em 28/09/2010 a abertura de audiência pública (Audiência Pública nº. 043/2010-novo padrão de medidor eletrônico), para discutir o modelo de medidor inteligente que passará a ser instalado nas residências e estabelecimentos comerciais e industriais atendidas em baixa tensão (Aneel, Audiência Pública nº. 043/2010 2010).

A proposta de resolução colocada em audiência prevê que os novos equipamentos possam apurar a tensão do fornecimento e a energia ativa e da energia reativa consumidas, além de registrar o número e o tempo das interrupções para cálculo dos indicadores individuais de qualidade.

Pela norma colocada em debate, o novo medidor também deverá informar a tarifa por horário de consumo e permitir a comunicação remota entre consumidor e distribuidora para verificação do consumo, suspensão do fornecimento e religação do serviço. Outra proposta é que o aparelho venha a permitir que o consumidor visualize o montante de energia consumida e as informações sobre continuidade do fornecimento.

Toda esta modernização prevista seria ainda mais interessante, se a ANEEL estivesse colocando também em audiência pública, a discussão da metodologia aplicada para a tarifação de energia elétrica, baseada nas condições atuais, não senoidais e desbalanceadas. Porém, o mais preocupante é que a mesma não está colocando em discussão este assunto especificamente, o que pode tornar o processo de modernização incompleto e no futuro gerar mais encargos para as adequações necessárias.

1.1. Organização do Trabalho

Até este ponto, foi apresentada uma breve contextualização do trabalho e a motivação para o estudo da TPC.

O Capítulo 2 apresenta uma breve revisão das principais definições de potência e fator de potência, focando a base conceitual de cada uma das definições, e, tem o objetivo de comparar as diferentes linhas de pesquisas identificando as semelhanças e diferenças entre elas, principalmente com relação ao objetivo pelo qual cada proposta foi desenvolvida. No desenvolvimento das análises optou-se pela separação dos trabalhos por autores e domínios de abordagem.

O Capítulo 3 discorre sobre a Teoria de Potência Conservativa (TPC), detalhando o equacionamento matemático utilizado e destacando possíveis vantagens e desvantagens com relação as demais teorias.

O Capítulo 4 apresenta uma ampla avaliação dos resultados da TPC através de casos de simulação, onde foram explorados diversos tipos de circuitos elétricos, sob diferentes condições de operação. Foram estudados circuitos monofásicos, trifásicos com e sem condutor de retorno, com cargas lineares e não-lineares.

O Capítulo 5 aborda a análise dos resultados da TPC para um circuito montado experimentalmente, através da implementação de uma bancada com fonte de potência programável e sistema de aquisição de dados.

Conclusões gerais deste trabalho, bem como propostas de trabalhos futuros, são apresentadas no Capítulo 6.

2. Definições de potência elétrica em condições não ideais

As próximas seções apresentarão uma breve revisão de algumas, dentre muitas, teorias de potência propostas nas últimas décadas. Optou-se por separar as propostas em função do domínio de análise ao qual cada uma é associada.

2.1. Abordagens no domínio da frequência

As propostas no domínio da frequência resultam da utilização da série e/ou transformada de Fourier. Baseiam-se na decomposição dos sinais de tensão e corrente em suas componentes harmônicas, e, tem como objetivo principal definir grandezas que possam ser aplicadas para medição e tarifação de energia elétrica. As próximas subseções discutem algumas das propostas mais citadas na literatura, baseadas no domínio da frequência.

2.1.1. Proposta de Budeanu (1927)

É um dos métodos mais conhecidos e utilizados pelos engenheiros eletricitistas do mundo inteiro, seja no universo acadêmico, nas indústrias ou nas concessionárias de energia elétrica (Budeanu 1927). Também pode ser considerada a base da proposta atual do IEEE (IEEE 2010).

Na proposta de Budeanu, é sugerida a definição das seguintes parcelas de potência:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_B^2 + D_B^2} = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \quad (2.1)$$

onde S corresponde a potência aparente, P a potência ativa, Q_B a potência reativa e D_B a potência de distorção, a qual será zero apenas se todas as componentes harmônicas forem nulas.

V_h e I_h correspondem as componentes harmônicas de tensão e corrente respectivamente.

A potência reativa é expressa por:

$$Q_B = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \text{sen} \phi_h \quad (2.2)$$

A potência ativa é calculada com expressão similar a anterior, substituindo-se o seno, pelo cosseno do ângulo de fase para cada frequência harmônica. Já a potência de distorção é calculada pela diferença das potências da expressão (2.1).

Esta proposta é interessante do ponto de vista da existência de uma parcela de potência que contém as distorções do sistema. No entanto, apresenta algumas incoerências, como a falta de associação direta das componentes de potência com as características dos circuitos analisados (Czarnecki 1987).

O fato de não isolar as parcelas ativas e reativas das parcelas harmônicas, dificulta a compensação, além disso, o método foi desenvolvido apenas para sistemas monofásicos.

Entretanto, muitas aplicações atuais ainda utilizam os conceitos de Budeanu, mas consideram apenas as parcelas fundamentais de tensão e corrente no cálculo das potências ativa e reativa. Neste caso, a parcela D_B é normalmente desprezada. Outra situação que pode ser encontrada na literatura é o cálculo da potência distorcível como a diferença (quadrática) entre a potência aparente considerando-se todas as harmônicas e as potências ativa e reativa fundamentais.

2.1.2. Proposta de Kimbark (1971)

Esta proposta tem como base as definições de Budeanu, e apresenta a idéia de que o termo potência reativa seja utilizado apenas para os reativos da fundamental, separando este valor das parcelas de potência devido às distorções (Kimbark 1971):

$$Q_K = V_1 I_1 \text{sen} \phi_1 \quad (2.3)$$

onde Q_K é a potência reativa da fundamental. O índice K neste caso, faz referência ao sobrenome do autor.

E a potência aparente é dada por:

$$S^2 = P^2 + Q_K^2 + D_K^2 \quad (2.4)$$

onde D_K é a potência de distorção.

Esta metodologia faz a separação das potências não ativas, em relativa à fundamental (reativos puros) e componentes de distorção, porém, D_K permanece atrelada ao valor de Q_K não permitindo a compensação de potência reativa sem alterar o valor de D_K . Outra limitação desta proposta está no fato que a mesma não é capaz de identificar claramente os sinais de distorção de tensão e corrente.

2.1.3. Proposta de Shepherd e Zakikhani (1972)

O método proposto por Shepherd e Zakikhani (Zakikhani e Shepherd 1972) apresenta o conceito de que as tensões e correntes podem possuir componentes comuns e não-comuns entre si. Componentes comuns são aquelas que são encontradas na corrente de carga e na fonte de alimentação, já as componentes não-comuns são aquelas encontradas em apenas uma das variáveis (tensão ou corrente), devido a não linearidades no sistema fonte-carga.

Nesta proposta, a potência aparente foi dividida em três componentes:

$$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2 \quad (2.5)$$

S_R representa a parte ativa da potência, S_X à parte reativa que poderia ser compensável com elementos passivos, e S_D à parte proporcional as componentes de distorção (não-comuns), todas calculadas através das componentes da série de Fourier.

Concebida para a compensação de potências não ativas em sistemas monofásicos, a proposta é falha, pois ao se compensar S_X conseqüentemente a parcela S_D também seria modificada, mostrando que as parcelas não são linearmente independentes entre si (F. P. Marafão 2004). Outra desvantagem está no fato de a mesma não trazer informações sobre os sinais de tensão e corrente que resultam em cada parcela de potência, e também a potência ativa S_R não ser igual a potência ativa P de Budeanu (Budeanu 1927), sendo este conceito um dos poucos consensos entre os estudiosos do assunto.

2.1.4. Proposta de Czarnecki (1988/2004)

A proposta foi concebida no domínio da frequência, mas utiliza a definição de corrente ativa de Fryze (Fryze 1932) no domínio do tempo, e pode ser aplicada tanto para sistemas monofásicos quanto para polifásicos.

O principal objetivo de (L. S. Czarnecki 1988), (L. S. Czarnecki 2008), foi desenvolver uma teoria em que as propriedades da potência estivessem o mais relacionadas possível com o comportamento do circuito que as originam. Sendo assim, utiliza valores de Condutâncias (G), Susceptâncias (B) e Admitâncias (Y) para encontrar as parcelas de corrente relacionadas com harmônicos, assimetrias, reativos, etc.

Para simplificar a análise de sua proposta, Czarnecki propõe o estudo de alguns subcircuitos:

2.1.4.1 Circuito linear equilibrado

A corrente total do circuito poderia ser decomposta em parcelas ortogonais entre si, como:

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_r\|^2 + \|i_s\|^2 \quad (2.6)$$

sendo i_a a corrente ativa, definida através da condutância média do circuito, que é responsável pelo consumo da potência ativa P . A diferença resultante entre a corrente total e ativa pode ser decomposta em i_r e i_s , corrente reativa e componente referente à variação da condutância em função da frequência harmônica, respectivamente.

Multiplicando $\|i\|^2$ por $\|v\|^2$ resulta em (2.7):

$$S^2 = P^2 + Q_r^2 + D_s^2 \quad (2.7)$$

2.1.4.2 Circuito não-linear

As correntes harmônicas originadas devido a não linearidade da carga originam uma nova componente denominada i_h , sendo a corrente total decomposta em (2.8):

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_r\|^2 + \|i_s\|^2 + \|i_h\|^2 \quad (2.8)$$

o que resulta em termos de potência (2.9):

$$S^2 = P^2 + Q_r^2 + D_s^2 + D_h^2 \quad (2.9)$$

2.1.4.3 Circuito assimétrico (desequilibrado)

Neste caso, Gzarnecki propõe outra componente de corrente, denominada “corrente assimétrica ou de desbalanço” (i_u) que é mutuamente ortogonal às demais, ou seja:

$$\|i\|^2 = \|i_a\|^2 + \|i_r\|^2 + \|i_s\|^2 + \|i_h\|^2 + \|i_u\|^2 \quad (2.10)$$

Esta corrente resulta em uma potência denominada de “desbalanço”, sendo a potência aparente expressa por cinco parcelas:

$$S^2 = P^2 + Q_r^2 + D_s^2 + D_h^2 + D_u^2 \quad (2.11)$$

A proposta de (Gzarnecki 2004) não tem sido muito utilizada por outros autores, provavelmente devido a complexidade do equacionamento no domínio da frequência. Mesmo assim, pode ser muito interessante se o objetivo for tarifação, compensação das correntes de distúrbios ou mesmo compreensão do comportamento dos circuitos em análise.

Por se tratar de uma proposta do domínio da frequência, eventuais inter-harmônicos presentes nos sinais de tensão e corrente, podem não ser interpretados corretamente.

2.1.5. Proposta do IEEE (2010)

Na década de 90, o grupo de trabalho do IEEE para situações não-senoidais, coordenado pelo professor Alexander Emanuel, foi responsável pela publicação de diversos trabalhos, dentre os quais se destacam (IEEE Working Group 1996). Em 2000, o grupo publicou a versão preliminar de uma nova recomendação do IEEE para cálculo de potências em circuitos com cargas não lineares e/ou

desequilibradas, a STD 1459-2000. Em 2010, o documento foi revisado e republicado, como versão oficial (IEEE 2010).

Tal publicação traz a definição da “potência aparente efetiva” para sistemas a 3 fios como:

$$S_e = 3V_e I_e \quad (2.12)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}}, \quad I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}. \quad (2.13)$$

V_e corresponde a tensão equivalente e I_e a corrente equivalente.

Para situações não-senoidais, mesmo utilizando grandezas equivalentes ou efetivas, as parcelas de tensão, corrente e potência são separadas em sub-parcelas de componentes fundamentais e harmônicas (ou não fundamentais, com índice N):

$$S_e^2 = S_{e1}^2 + S_{eN}^2 \quad (2.14)$$

S_{e1} é a potência aparente fundamental efetiva e S_{eN} é a potência não-fundamental efetiva, sendo ainda possível decompô-la em:

$$S_{eN} = \sqrt{S_e^2 - S_{e1}^2} = \sqrt{D_{eI}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2} \quad (2.15)$$

D_{eI} é a potência proveniente da distorção de corrente, D_{eV} proveniente da distorção de tensão e S_{eH} a potência aparente harmônica, causada pelas distorções da tensão e da corrente.

Em casos desbalanceados, a potência aparente fundamental de desbalanço foi definida como (2.16):

$$S_{U1} = \sqrt{S_{e1}^2 - (S_1^+)^2} \quad (2.16)$$

onde S_1^+ é a potência aparente fundamental de sequência positiva.

Em resumo, a publicação STD 1459-2010 defende a separação da contribuição das parcelas fundamentais de seqüência positiva, das outras parcelas de potência, por exemplo: potência não-ativa (tudo que não gera P) e não-fundamental (parcela atribuída aos harmônicos, inter-harmônicos e suas interações).

As principais contribuições desta proposta estão na separação da potência fundamental e de seqüência positiva das demais parcelas e também na utilização de valores equivalentes, porém, um dos pontos que ainda não foi resolvido é a identificação do sentido do fluxo de potência harmônico. Embora exista uma tentativa de atribuição de responsabilidades no que diz respeito a quantificar a influência de distorções na tensão e na corrente, a influência da impedância de rede não foi devidamente explorada, o que certamente contribui para o sentido do fluxo de potência harmônico resultante.

Em relação à definição da potência aparente efetiva, esta recomendação parece ser bem mais rigorosa do que as tradicionais médias aritméticas ou geométricas (das fases), propostas pelo IEEE até sua publicação.

Vale destacar que por se tratar de uma normativa do IEEE, a abrangência desta proposta é bastante significativa do ponto de vista de fabricantes de instrumentos, medidores ou mesmo condicionadores de energia, especialmente no mercado americano.

2.2. Abordagens no domínio do tempo

O foco principal da maioria das propostas no domínio do tempo é a compensação de distúrbios, sendo que algumas teorias são impraticáveis em aplicações como análise, medição ou tarifação de energia. As análises dos sinais de tensão e corrente no domínio do tempo não necessitam da decomposição em seus componentes harmônicos (Transformada de Fourier).

2.2.1. Proposta de Fryze (1932)

Proposta para sistemas monofásicos é válida para sinais de qualquer forma de onda, desde que periódicos (Fryze 1932).

A corrente total eficaz definida por Fryze pode ser dividida em:

I_w é a corrente eficaz que corresponde à parte ativa e que representa a corrente de uma carga puramente resistiva. I_b é a corrente eficaz denominada de não-ativa, conforme (2.17).

$$I^2 = I_w^2 + I_b^2 \quad (2.17)$$

A potência aparente é expressa por (2.18.):

$$P_S^2 = P_w^2 + P_b^2 \quad (2.18)$$

P_w é a potência ativa e P_b a potência fictícia ou não-ativa.

Uma vantagem da proposta de Fryze (Fryze 1932) é a possibilidade de calcular a corrente ativa a partir da “condutância equivalente” do sistema (F. P. Marafão 2004), além de permitir uma boa precisão para a quantificação da energia supérflua (não-ativa).

Entre as desvantagens desta proposta, pode-se citar que a metodologia não foi desenvolvida para sistemas polifásicos, além disso, a parcela de corrente I_b agrupa todos os distúrbios e não permite o aprofundamento dos estudos sobre cada tipo de fenômeno físico envolvido na transferência de energia, portanto não é possível a monitoração ou compensação seletiva dos distúrbios de corrente presentes no circuito.

Conhecida na literatura como Teoria (Watanabe, Akagi e Aredes 2008) *pq* (Akagi, Kanazawa e Nabae 1983) tem como base a transformação algébrica de coordenadas de um sistema trifásico, com os eixos das fases simetricamente defasados entre si, para um sistema bifásico ou trifásico, de eixos mutuamente ortogonais entre si (Transformada de Clarke). V_0, V_α e V_β correspondem as tensões trifásicas dadas nas coordenadas \mathbf{a}, \mathbf{b} e \mathbf{c} , as quais se encontram defasadas de 120° e podem ser transpostas para as coordenadas $0, \alpha$ e β , onde α e β são ortogonais entre si, pela expressão algébrica (2.19).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Esta transformação pode ser realizada da mesma forma para correntes.

Baseia-se na definição de três potências instantâneas para sistemas trifásicos com ou sem condutor de retorno (neutro):

- potências “reais” instantâneas ($p_{\alpha\beta}$ e p_0) e
- potência “imaginária” instantânea ($q_{\alpha\beta}$).

Para o sistema trifásico a quatro fios, é possível relacionar correntes e tensões com as potências, através de (2.20).

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

p_0 é a potência instantânea de seqüência zero, $p_{\alpha\beta}$ a potência real ativa instantânea e $q_{\alpha\beta}$ a potência imaginária instantânea.

A potência real ativa instantânea $p_{\alpha\beta}$ é a responsável pela transferência de potência fonte-carga, enquanto a potência imaginária instantânea $q_{\alpha\beta}$ é ortogonal a anterior, portanto, não participa da transferência de potência fonte-carga.

A representação da potência instantânea para um sistema trifásico a quatro fios pode ser expressa por (2.21).

$$p_{3\phi} = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta + v_0 \cdot i_0 = p_{\alpha\beta} + p_0 \quad (2.21)$$

A teoria *pq* pode ser considerada muito eficiente para o projeto de compensadores eletrônicos (filtros ativos de potência) (Watanabe, Akagi e Aredes 2008), no entanto, a necessidade de transformação das coordenadas é uma desvantagem em termos de teorias de potências, pois não permite a associação direta dos fenômenos físicos com as grandezas elétricas de tensão, corrente e potência. Diversos trabalhos têm explicitado algumas dificuldades da aplicação da teoria *pq* do ponto de vista de uma teoria de potência ampla e abrangente (F. P. Marafão 2004), (J. L. Willems 1992), (Czarnecki 2004), (Paredes, Marafão e da Silva 2009).

2.2.2. Proposta de Depenbrock (1962/1992)

Baseado no trabalho de Fryze (Fryze 1932), este método ficou conhecido como método FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock), (Depenbrock 1992), (Staudt 2008), pois também incorpora os conceitos de valores “equivalentes ou coletivos” de Buchholz (Emanuel 1998).

Depenbrock propõe uma decomposição da corrente em parcelas proporcionais e ortogonais à tensão, através de cálculos “instantâneos” das correntes responsáveis pela transferência da potência instantânea entre fonte e carga, originando as “correntes de potência” (\dot{i}_{vp}), que são calculadas através da condutância equivalente instantânea do circuito de análise.

Outra definição desta proposta são as “correntes de potência zero”:

$$\dot{i}_{vz} = \dot{i}_v - \dot{i}_{vp} \quad (2.22)$$

onde v é uma variável criada para representar o condutor conectado a um determinado nó. As “correntes de potência zero” não contribuem para transferência de energia, e poderiam ser compensadas sem a necessidade de armazenadores de energia.

Devido \dot{i}_{vp} não coincidir com a corrente ativa de Fryze (Fryze 1932), que é a definição mais aceita para tensões periódicas, torna-se necessária a identificação de outras parcelas de corrente para caracterizar melhor os circuitos analisados.

A corrente ativa instantânea \dot{i}_{va} , definida pela condutância equivalente média do circuito coincide com a definição de corrente ativa de Fryze, e as correntes não-ativas totais \dot{i}_{vn} :

$$\dot{i}_{vn} = \dot{i}_v - \dot{i}_{va} = \dot{i}_{vz} + \dot{i}_{vv} \quad (2.23)$$

Estas são associadas aos distúrbios e oscilações, mas não transferem energia média para a carga. \dot{i}_{vv} é a componente de corrente responsável pelas “variações” da condutância equivalente em torno da condutância equivalente média, ou variações da potência coletiva instantânea em torno da potência ativa coletiva.

Além destas componentes de corrente, destaca-se a possibilidade de decompor a tensão e a corrente em outras sub-parcelas, tais como componentes fundamentais, componentes residuais (harmônicos), componentes de seqüência positiva, componentes médias e oscilatórias, etc. A quantidade das decomposições das parcelas de corrente depende da sua aplicação.

Entre as vantagens desta proposta esta a possibilidade de executar cálculos instantâneos da corrente i_{vz} , relacionada com a parte não-ativa que poderia ser compensada sem armazenadores de energia, além de sugerir o cálculo de diversas parcelas de tensão e corrente, permitindo projetar compensadores passivos ou ativos, com ou sem armazenadores de energia.

2.2.3. Proposta de Tenti e Rosseto (1992)

Proposta desenvolvida para aplicações em condicionamento de energia e compensação de distúrbios (Tenti e Rosseto 1992), é considerada uma expansão da teoria de Fryze (Fryze 1932) para sistemas trifásicos, com semelhanças com as propostas do Akagi et al. (Akagi, Kanazawa e Nabae 1983) e (Depenbrock 1992). Utilizando o conceito de Multiplicador de Lagrange, os autores definem a corrente ativa instantânea i_p , como a mínima corrente necessária para proporcionar a potência média requerida pela carga. i_q é definida como sendo a diferença entre a corrente total instantânea e a corrente ativa instantânea, sendo as correntes ortogonais entre si, conforme (2.24).

$$\|i\|^2 = \|i_p\|^2 + \|i_q\|^2 \quad (2.24)$$

A potência aparente instantânea é definida como (2.25).

$$s^2 = p^2 + q^2 \quad (2.25)$$

p é a potência ativa instantânea e q potência reativa instantânea.

Nesta proposta, também foi definida uma parcela de corrente útil i_a , como a parcela de corrente ativa simétrica que seria consumida por uma carga resistiva equilibrada, de mesma potência média que uma carga distorciva qualquer. Esta parcela de corrente é semelhante à corrente ativa de Fryze, e diferente de i_p .

2.2.4. Proposta de Willems (1992)

Nesta proposta (J. L. Willems 1992), o autor propõe uma adequação à teoria pq apresentada por Akagi et al. (Akagi, Kanazawa e Nabae 1983), mas sem a necessidade de transformações de eixo, pois no seu entendimento, as tensões e correntes de um sistema de “ m ” fases, poderiam ser representadas mediante vetores m -dimensionais v e i . Esta proposta é muito semelhante à de Tenti et al., porém com foco nos sistemas trifásicos com quatro fios.

A partir de uma análise vetorial das grandezas elétricas, e da ortogonalidade entre as correntes, pode-se calcular a corrente total instantânea i :

$$\|i\|^2 = \|i_p\|^2 + \|i_q\|^2 \quad (2.26)$$

i_p é definida como a projeção do vetor i sobre o vetor v e i_q :

$$\dot{i}_q = \dot{i} - \dot{i}_p \quad (2.27)$$

As correntes instantâneas são decompostas em dois vetores ortogonais entre si, um proporcional à tensão e outro ortogonal. O vetor \dot{i}_p é definido como corrente ativa instantânea e corresponderia ao fluxo de energia entre fontes e cargas, enquanto \dot{i}_q é definido como corrente não-ativa instantânea e não contribui para a transferência de potência.

Comparando-se com a teoria pq, a potência real instantânea $p_{3\phi}$ é definida diretamente pelo produto escalar dos vetores instantâneos de tensão e corrente e a potência imaginária q é definida como o vetor resultante do produto vetorial de tensão e corrente.

A potência aparente instantânea pode ser calculada por (2.28).

$$s^2 = p_{3\phi}^2 + \|q\|^2 \quad (2.28)$$

Observa-se que o autor define que corrente de seqüência zero influi no valor de q , diferentemente de Akagi et al., que defendem a idéia de que a seqüência zero só contribui para o valor da potência real instantânea. Entretanto, Willems mostrou que não é necessário calcular as potências ativa e imaginária instantâneas para determinar as componentes ativas e não ativas de corrente.

2.2.5. Proposta de Peng e Lai (1996)

Não traz grandes inovações com relação às propostas de Tenti et al. e de Willems (Peng e Lai 1996) (J. L. Willems 1992). Define $p_{3\phi}$ como potência trifásica instantânea e diz que as correntes se dividem em ativa (p) e não-ativa (q), portanto a potência instantânea também se divide em:

$$p_{3\phi} = p_{ap} + p_{bp} + p_{cp} \quad (2.29)$$

$$p_{aq} + p_{bq} + p_{cq} = 0 \quad (2.290)$$

De forma similar à proposta de Akagi et al. (Akagi, Kanazawa e Nabae 1983), as componentes de potência foram decompostas em:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.301)$$

O sinal barrado representa as componentes médias (CC), originárias da componente fundamental simétrica (seqüência positiva). O sinal oscilatório representa as componentes CA, originárias de componentes harmônicos e componentes fundamentais assimétricos (seqüência negativa):

$$\tilde{p} = p_{2w} + p_h \quad \tilde{q} = q_{2w} + q_h \quad (2.312)$$

$2w$ e h representam as componentes de seqüência negativa fundamental (desequilíbrio) e os harmônicos respectivamente. Para a determinação dos valores das componentes, são necessários a

utilização de filtros passa-baixa e passa-faixa. Os sinais referentes a \tilde{p} e q podem ser utilizados para compensação ativa.

Esta proposta pode ser considerada abrangente, porém não relaciona diretamente as grandezas elétricas com os fenômenos físicos que as origina, mas sim pelas componentes de potência ativas e reativas, constantes ou oscilatórias.

2.3. Conclusões preliminares

Neste capítulo, foram revisadas algumas das mais citadas teorias de potência apresentadas na literatura internacional, partindo de teorias clássicas como a de Budeanu e a de Fryze e passando por propostas mais recentes como as de Depenbrock, Czarnecki, Akagi e, a proposta do IEEE, com a STD 1459-2010.

A análise apresentada buscou identificar as condições nas quais as teorias consideradas seriam válidas ou não, bem como discutir as características inovadoras de cada uma. Foi evidenciado que dentre as muitas propostas, ainda não existe uma convergência com relação às definições de potência sob condições de operação com distorções e assimetrias nas formas de onda (circuitos polifásicos não lineares).

Embora sabendo que uma teoria de potência deveria ser geral o suficiente para atender novas aplicações, fica cada vez mais evidente que as divergências em torno das várias metodologias estão diretamente relacionadas com o objetivo de cada autor quando da apresentação da proposta (F. P. Marafão 2004), (Marafão, Liberado, et al. 2010).

No próximo capítulo, será considerada uma nova proposta de teoria de potência, a qual foi apresentada recentemente por Tenti et al (Tenti, P, P Mattavelli, e H K M Paredes) e como será discutido nos capítulos 3 e 4, pode representar uma alternativa interessante para a análise de circuitos sob condições não ideais.

3. Teoria de Potência Conservativa TPC (2010)

Em 2003, Tenti et al. (Tenti e Mattavelli 2003) apresentaram uma nova proposta, diferente da apresentada em 1992, direcionada à análise de circuitos não-lineares, no domínio do tempo. Esta proposta baseava-se na definição de variáveis elementares de corrente e tensão relacionadas com suas respectivas derivadas e integrais. Para relacionar a corrente com seus respectivos fenômenos físicos de potência (ou energia) na carga, os autores introduziram o conceito de homo-variáveis. Tal proposta, apesar de já bastante completa em 2003, seja pela dificuldade de seu formalismo, seja por apresentar algumas inconsistências do ponto de vista do princípio de conservação de energia de algumas das parcelas de potência propostas, foi completamente reformulada e reapresentada em 2010 (Tenti, Mattavelli e Paredes 2010).

Assim, a nova proposta, objetivo de estudo deste trabalho, tem foco na compreensão do comportamento dos sistemas elétricos e sua associação com correntes e potências decompostas. Suas definições são ditas conservativas por terem como base as Leis de Tensões e Correntes de Kirchhoff e o Teorema de Tellegen. Tal teoria foi chamada de Teoria de Potência Conservativa (TPC), do inglês, *Conservative Power Theory* (CPT). Nesta proposta, os autores introduziram o conceito de variáveis de derivada e *unbiased integral* (integral sem influência do valor médio). Tais variáveis são consistentes em qualquer rede elétrica, o que permite introduzir o conceito de conservação da potência ativa e energia reativa sob condições não-senoidais.

Do ponto de vista prático, especialmente na área de redes inteligentes, do inglês *Smart Grid*, tal teoria tem evoluído constantemente, sendo revisada, ampliada e rediscutida (Tedeschi, et al. 2009), (Tenti, Mattavelli e Paredes 2010). Trabalhos recentes trazem inclusive, novas discussões no que se refere à atribuição de responsabilidades no caso de tarifação de sistemas elétricos com cargas não lineares desbalanceadas (Tenti, Paredes, et al. 2010).

3.1. Ferramentas matemáticas

Alguns conceitos matemáticos são necessários para o entendimento da proposta TPC e sua análise. Consideram-se grandezas periódicas: período T ; frequência $f = 1/T$ e frequência angular $\omega = 2\pi f$. Assim, algumas informações são definidas como segue:

Valor Médio:

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

Derivada temporal Instantânea:

$$\dot{x} = \frac{dx}{dt}. \quad (3.2)$$

Integral Temporal Instantânea:

$$x_j = \int_0^t x(\tau) d\tau. \quad (3.3)$$

Unbiased Integral:

$$\hat{x} = x_j - \bar{x}. \quad (3.4)$$

Produto interno:

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x \cdot y dt. \quad (3.5)$$

Norma Eficaz:

$$X = \|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle}. \quad (3.6)$$

Ortogonalidade:

$$\langle x, y \rangle = 0. \quad (3.7)$$

Para grandezas vetoriais, x e y de tamanho N :

Produto escalar:

$$\underline{x} \circ \underline{y} = \sum_{n=1}^N x_n y_n. \quad (3.8)$$

Magnitude do vetor multidimensional:

$$|\underline{x}| = \sqrt{\underline{x} \circ \underline{x}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N x_n^2}. \quad (3.9)$$

Produto interno de vetores:

$$\langle \underline{x}, \underline{y} \rangle = \langle \underline{x} \circ \underline{y} \rangle = \sum_{n=1}^N \langle x_n, y_n \rangle \quad (3.10)$$

Norma:

$$\mathbf{X} = \|\underline{x}\| = \sqrt{\sum_{n=1}^N \langle x_n, x_n \rangle} = \sqrt{\sum_{n=1}^N X_n^2} \quad (3.11)$$

Propriedades das ferramentas descritas:

$$\langle x, \tilde{x} \rangle = 0 \quad \langle x, \hat{x} \rangle = 0 \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \langle x, \tilde{y} \rangle &= -\langle \tilde{x}, y \rangle \\ \langle x, \hat{y} \rangle &= -\langle \hat{x}, y \rangle \end{aligned} \quad (3.13)$$

$$\langle x, y \rangle = -\langle \tilde{x}, \hat{y} \rangle = -\langle \hat{x}, \tilde{y} \rangle \quad (3.14)$$

3.2. Termos de Potência e Energia Conservativa

No sistema polifásico, considera-se que os conjuntos das tensões e correntes de fase possam ser representados pelos vetores de tensão e corrente \underline{u} e \underline{i} . Assim, duas grandezas principais podem ser definidas através do produto escalar, de forma que:

A **Potência Instantânea** polifásica resulte:

$$p = \underline{u} \circ \underline{i} \quad (3.15)$$

E a **Energia Reativa Instantânea** polifásica resulte:

$$w = \underline{\hat{u}} \circ \underline{\hat{i}} \quad (3.16)$$

Também podem ser definidos, para o sistema polifásico, os valores médios de:

Potência Ativa:

$$P = \bar{p} = \langle \underline{u}, \underline{i} \rangle \quad (3.17)$$

Energia Reativa:

$$W = \bar{w} = \langle \hat{u}, \hat{i} \rangle \quad (3.18)$$

A associação destas grandezas com os componentes passivos pode ser dada por:

Para um Resistor R :

$$u_R = R i_R \Rightarrow P_R = U_R^2 / R, \quad W_R = 0 \quad (3.19)$$

Para um Indutor L :

$$u_L = L \dot{i}_L \Rightarrow P_L = 0, \quad W_L = L I_L^2 \quad (3.20)$$

Para um Capacitor C :

$$i_C = C \dot{u}_C \Rightarrow P_C = 0, \quad W_C = -C U_C^2 \quad (3.21)$$

Independente das formas de ondas de tensão e corrente, em se tratando de indutores e capacitores, a energia reativa é proporcional ao valor médio da energia armazenada. Além disto, vale destacar que de acordo com a formulação proposta, tanto a potência ativa, quanto a energia reativa são conservativas em qualquer circuito elétrico, independentemente das formas de onda da tensão e corrente do mesmo. Neste caso, o termo conservativo faz referência ao Teorema de Tellegen, que indica que o somatório das energias em um dado circuito deve ser nulo.

Outros termos conhecidos e considerados não conservativos, também fazem parte da teoria TPC, como por exemplo, a **Potência Aparente** (A) pode ser expressa pelo produto dos valores eficazes coletivos (norma) como em (3.22):

$$A = \mathbf{U} \mathbf{I} \quad (3.22)$$

Desta forma, também foi definido um **Fator de Potência Total** (polifásico) como:

$$\lambda = \frac{P}{A} \quad (3.23)$$

3.3. Decomposição da corrente em parcelas relacionadas com as características dos circuitos elétricos reais

Em uma rede polifásica, considerando-se os vetores de tensão e corrente \underline{u} e \underline{i} , a **corrente ativa** é a mínima necessária para fornecer potência ativa P_n para uma fase:

$$\underline{i}_a = \{i_{an}\}_{n=1}^N, \quad i_{an} = \frac{\langle \underline{u}_n, i_n \rangle}{\|\underline{u}_n\|^2} \underline{u}_n = \frac{P_n}{U_n^2} \underline{u}_n = G_n \underline{u}_n \quad (3.24)$$

onde G_n é a condutância equivalente por fase.

A **corrente reativa** é a mínima necessária para fornecer energia reativa W_n para uma fase:

$$\underline{i}_r = \{i_{rn}\}_{n=1}^N, \quad i_{rn} = \frac{\langle \hat{\underline{u}}_n, i_n \rangle}{\|\hat{\underline{u}}_n\|^2} \hat{\underline{u}}_n = \frac{W_n}{\hat{U}_n^2} \hat{\underline{u}}_n = B_n \hat{\underline{u}}_n \quad (3.25)$$

B_n é a susceptância equivalente por fase.

A **corrente nula** é a resultante da subtração das correntes ativa e reativa da corrente total:

$$\underline{i}_v = \underline{i} - \underline{i}_a - \underline{i}_r \quad (3.26)$$

Considerando apenas valores eficazes de corrente, e a ortogonalidade das parcelas, tem-se:

$$\mathbf{I}^2 = \mathbf{I}_a^2 + \mathbf{I}_r^2 + \mathbf{I}_v^2 \quad (3.27)$$

Para as correntes ativa e reativa, outra decomposição, em parcelas balanceadas e desbalanceadas, é proposta na TPC. A corrente ativa balanceada é a mínima, em valor eficaz, necessária para fornecer potência ativa P para a rede polifásica:

$$\underline{i}_a^b = \frac{\langle \underline{u}, \underline{i} \rangle}{\|\underline{u}\|^2} \underline{u} = \frac{P}{\mathbf{U}^2} \underline{u} = G^b \underline{u} \quad (3.28)$$

G^b é a condutância equivalente balanceada para todas as fases.

Corrente reativa balanceada é a mínima necessária para fornecer energia reativa total W para a rede polifásica:

$$\underline{i}_r^b = \frac{\langle \hat{\underline{u}}, \underline{i} \rangle}{\|\hat{\underline{u}}\|^2} \hat{\underline{u}} = \frac{W}{\hat{\mathbf{U}}^2} \hat{\underline{u}} = B^b \hat{\underline{u}} \quad (3.29)$$

B^b é a susceptância equivalente balanceada para todas as fases.

Corrente ativa desbalanceada:

$$\underline{i}_a^u = \underline{i}_a - \underline{i}_a^b \Rightarrow \{i_{an}^u\}_{n=1}^N = \{(G_n - G^b) \underline{u}_n\}_{n=1}^N \quad (3.30)$$

Corrente reativa desbalanceada:

$$\underline{i}_r^u = \underline{i}_r - \underline{i}_r^b \Rightarrow \{i_{rn}^u\}_{n=1}^N = \{(B_n - B^b) \hat{\underline{u}}_n\}_{n=1}^N \quad (3.31)$$

A decomposição completa do vetor de corrente é dada por:

$$\underline{i} = \underline{i}_a^b + \underline{i}_r^b + \underline{i}_a^u + \underline{i}_r^u + \underline{i}_v \quad (3.32)$$

Devido à ortogonalidade dos termos, pode-se expressar I como (3.33).

$$I = \sqrt{I_a^{b^2} + I_r^{b^2} + I_a^{u^2} + I_r^{u^2} + I_v^2} \quad (3.33)$$

3.4. Decomposição da potência elétrica em parcelas associadas com as características dos circuitos e da tensão de fornecimento

A potência Aparente (A) pode ser de acordo com (3.34).

$$\begin{aligned} A^2 &= \underbrace{U^2 I_a^{b^2}}_{P^2} + \underbrace{U^2 I_r^{b^2}}_{Q^2} + \underbrace{U^2 I_a^{u^2}}_{N_a^2} + \underbrace{U^2 I_r^{u^2}}_{N_r^2} + \underbrace{U^2 I_v^2}_{V^2} = \\ &= P^2 + Q^2 + \underbrace{N_a^2 + N_r^2}_{N^2} + V^2 = P^2 + Q^2 + N^2 + V^2 \end{aligned} \quad (3.34)$$

onde:

P é a potência ativa;

Q é a potência reativa;

N é a potência de desbalanço, devido à corrente ativa e devido à corrente reativa;

V é a potência nula.

Ao contrário do que havia sido proposto em 2003, Tenti et. al demonstraram que a definição de potência reativa da TPC, não é conservativa, pois a mesma é influenciada pela frequência da linha (ω) e distorção harmônica (DHT) da tensão (Tenti, Mattavelli e Paredes 2010). Tal conclusão tem importância relevante, particularmente nos sistemas contendo geração distribuída (micro-redes, por exemplo), onde são esperadas condições com desvios de frequência entre as diferentes fontes de energia (ainda que pequenas), assim como distorções de tensão, uma vez que tais sistemas são tipicamente de baixo nível de curto-circuito.

$$Q = \frac{U}{\hat{U}} W = \omega W \frac{\sqrt{1 + (DHT(U))^2}}{\sqrt{1 + (DHT(\hat{U}))^2}} \quad (3.35)$$

3.5. Conclusões preliminares

Baseada em ferramentas matemáticas clássicas da álgebra vetorial, a TPC apresenta uma metodologia de decomposição das correntes e potências, que busca associar as parcelas resultantes, com respectivas características dos circuitos analisados. As correntes ativas e reativas têm origem em bipólos lineares equivalentes (por fase ou polifásicos), ou seja, as condutâncias e susceptâncias dos circuitos. Tais correntes ainda podem ser divididas em parcelas balanceadas e desbalanceadas, como indicativo dos desbalanços das cargas. Além disto, a corrente nula indica a presença de não linearidades no circuito.

Vale ainda observar que os autores da TPC demonstraram a influência das distorções de tensão e variações de frequência, no cálculo da potência reativa ao longo de uma rede, indicando que esta só seria conservativa em condições de frequência constante e tensões senoidais. Em se considerando os possíveis novos cenários do setor elétrico, tais informações podem se tornar bastante relevantes.

Tal proposta permite a quantificação da potência reativa na carga, relacionando-a diretamente com a energia média armazenada na rede (em indutores e capacitores).

Vale ainda observar que o fator de potência (λ) definido em (3.23) representa a eficiência do sistema ou circuito elétrico polifásico. Uma vez que a razão entre a potência ativa e a aparente leva em consideração a presença de potência nula e de desbalanço do circuito. Para isto, não são necessárias médias por fase ou qualquer outra associação destas. O sistema polifásico é naturalmente interpretado através das variáveis vetoriais utilizadas.

Ainda sobre o fator de potência, apenas para fins de comparação, no próximo capítulo também será utilizada uma definição baseada na utilização apenas das potências ativa e reativa, conforme (3.36).

No entanto, destaca-se que tal definição não faz parte da TPC.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (3.36)$$

Desta forma, para análise e validação da TPC, no próximo capítulo serão apresentados diversos exemplos de simulação de circuitos elétricos (monofásicos e trifásicos, com três ou quatro condutores), sob diferentes condições de operação (tensão senoidal e distorcida, com cargas lineares e não lineares, balanceadas ou não).

4. Análise e Interpretação dos Casos Simulados

Neste capítulo serão apresentados os resultados de simulação referentes a configurações específicas de alimentação, circuitos elétricos e cargas, de forma a permitir a interpretação e discussão das definições propostas pela TPC (conforme capítulo anterior).

Para uma análise detalhada, as próximas seções estão divididas entre circuitos monofásicos e trifásicos, considerando 3 ou 4 condutores, bem como em função das características das tensões de alimentação e do tipo de cargas associadas a cada circuito.

As definições da teoria TPC foram implementadas em linguagem C, com o intuito de gerar uma biblioteca dinâmica (DLL) para posterior associação com o simulador de circuitos elétricos (PSim).

Todas as formas de onda de tensão e corrente indicadas nos gráficos deste capítulo tem unidades definidas em Volts [V] e Ampères [A], respectivamente.

4.1. Monofásico senoidal (sem impedância de rede)

Nesta seção serão considerados alguns casos envolvendo circuitos monofásicos, alimentados com tensão senoidal de valor eficaz igual a 127V. A princípio, a impedância da rede será desconsiderada, de forma que a análise do circuito possa ser realizada diretamente através da decomposição de correntes e potências propostas pela TPC, sem a influência de distúrbios na tensão de alimentação ou da interação com a impedância da rede.

4.1.1. Carga Resistiva de 10 kW

A Figura 4.1 mostra o circuito monofásico, composto basicamente por uma fonte de tensão senoidal alimentando uma impedância com características apenas resistivas. A carga foi representada por um resistor de $1,62 \Omega$. Sensores de tensão e corrente estão presentes (série e paralelo) para proporcionar acesso aos sinais simulados.

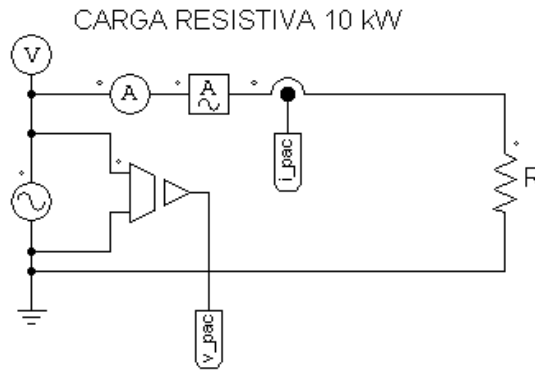


Figura 4.1 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva.

A Figura 4.2 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente na carga. Observa-se que a tensão e a corrente são senoidais, e, estão em fase entre si, o que resulta em um fator de potência unitário, conforme indicado na Tabela 4.1, tanto para (λ), quanto para (FP).

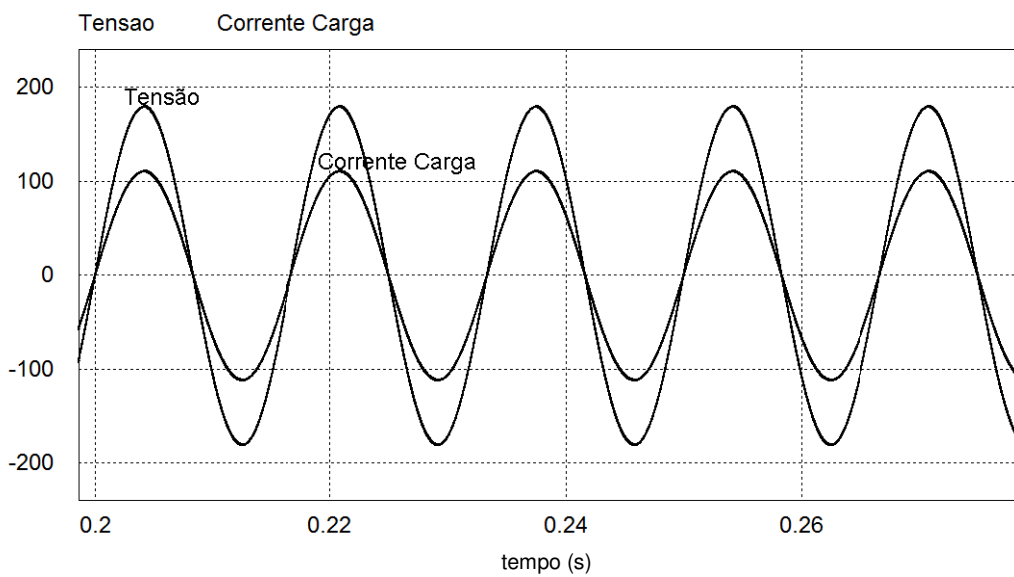


Figura 4.2 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva.

A Figura 4.3 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa da carga. A Figura 4.4 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa, corrente reativa e corrente nula. Observa-se que a corrente ativa, aparentemente, tem a mesma amplitude que a corrente total e não existe corrente reativa e nem corrente nula, devido ser uma carga linear resistiva.

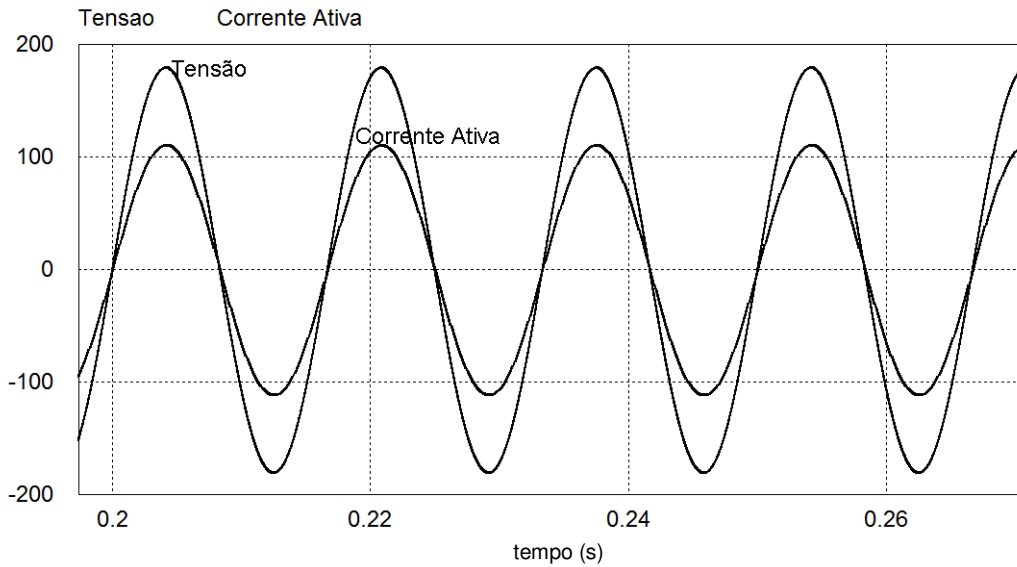


Figura 4.3 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva.

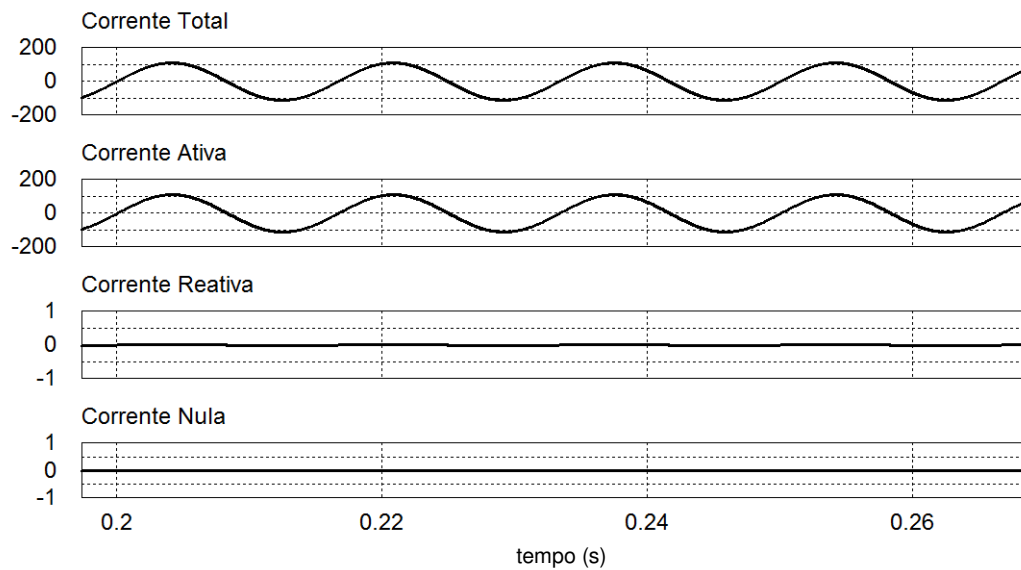


Figura 4.4 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva.

A Tabela 4.1 apresenta os valores eficazes das correntes, as parcelas de potências, os fatores de potência e as distorções harmônicas totais de tensão e corrente obtidas através da simulação para este caso. Observa-se a presença apenas de corrente e potência ativa. Os fatores de potência λ e FP definidos conforme (3.23) e (3.36) resultam idênticos e unitários.

Tabela 4.1 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
78,51	78,51	0	0	
Potências				
A	P	V	Q	W
9,99k	9,99k	0	0	0
Fatores				
λ	FP	DHT _v	DHT _i	
1	1	0	0	

4.1.2. Carga Resistiva-Indutiva (RL) de 10 kVA

A Figura 4.5 apresenta o circuito simulado para este caso. Os valores do resistor (1,3Ω) e do indutor (2,5mH) foram definidos para uma potência aparente (A) de 10 kVA e para um fator de potência λ de 0,8.

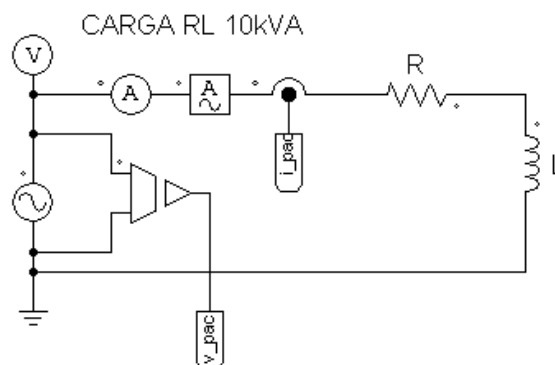


Figura 4.5 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva-indutiva.

A Figura 4.6 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que a tensão e a corrente são senoidais e a corrente está atrasada em relação à tensão, visto se tratar de uma carga com componente indutivo.

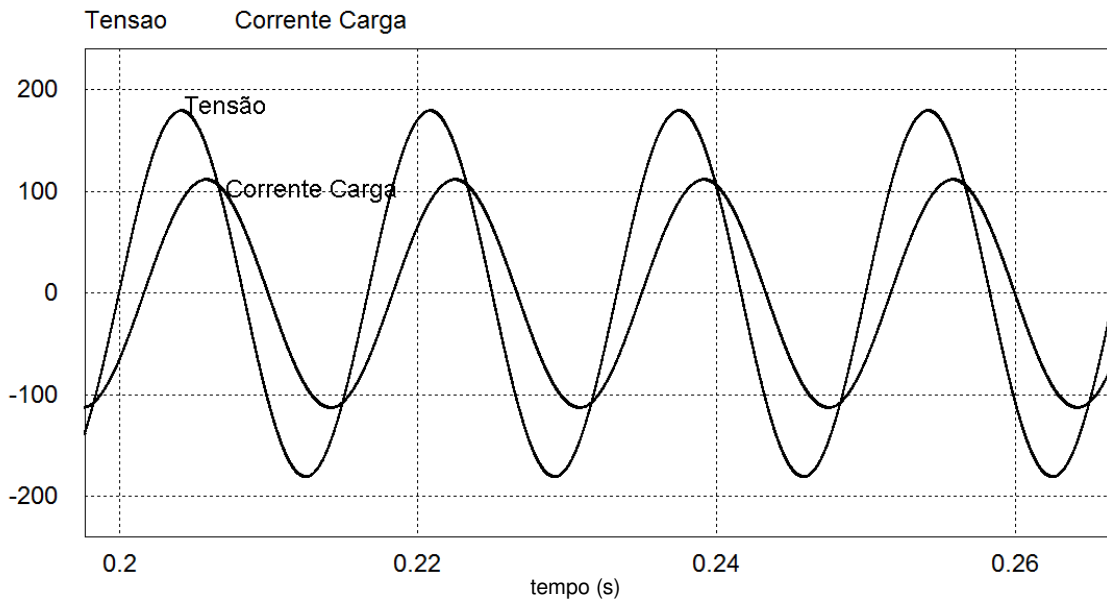


Figura 4.6 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva-indutiva.

A Figura 4.7 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa da carga. Observa-se que a corrente ativa da carga está em fase com a tensão, o que seria esperado de acordo com a equação (3.24). A Figura 4.8 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa, corrente reativa e corrente nula. Observa-se a presença de correntes ativa e reativa, sendo que a corrente reativa está defasada de 90° com relação à corrente ativa (e a tensão), uma vez que é calculada através de uma equação integral da tensão (3.25). Também se verifica que não existe corrente nula, por tratar-se de uma carga linear, alimentada com tensão senoidal.

A Tabela 4.2 indica a presença de correntes ativa e reativa, bem como suas respectivas parcelas de potência. Neste caso, a energia reativa também pode ser calculada e tem valor positivo em função da carga indutiva, exatamente como no caso do sinal da potência reativa convencional. Os fatores de potência resultam idênticos e de valor menor do que 1, em função da carga RL.

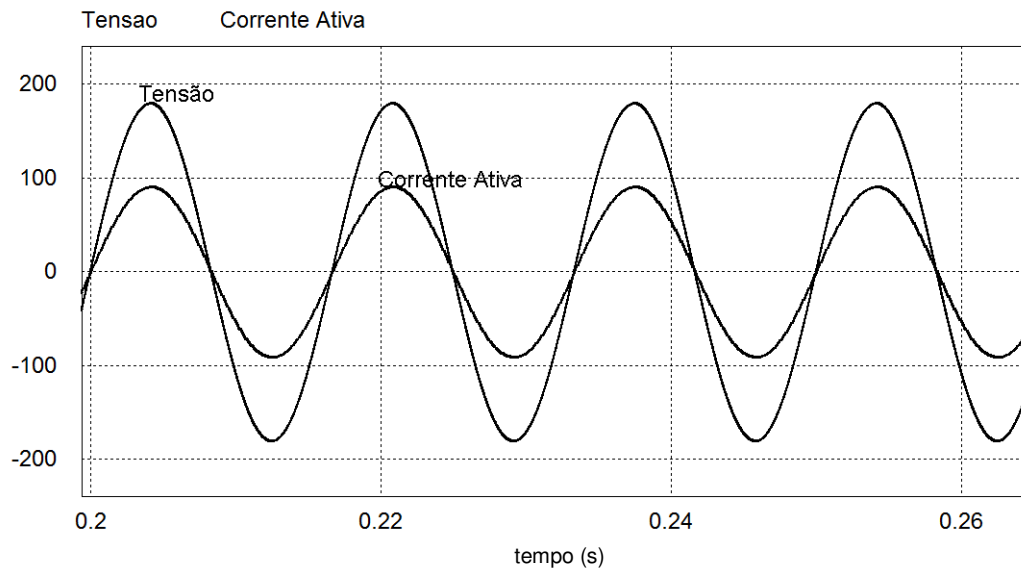


Figura 4.7 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva-indutiva.

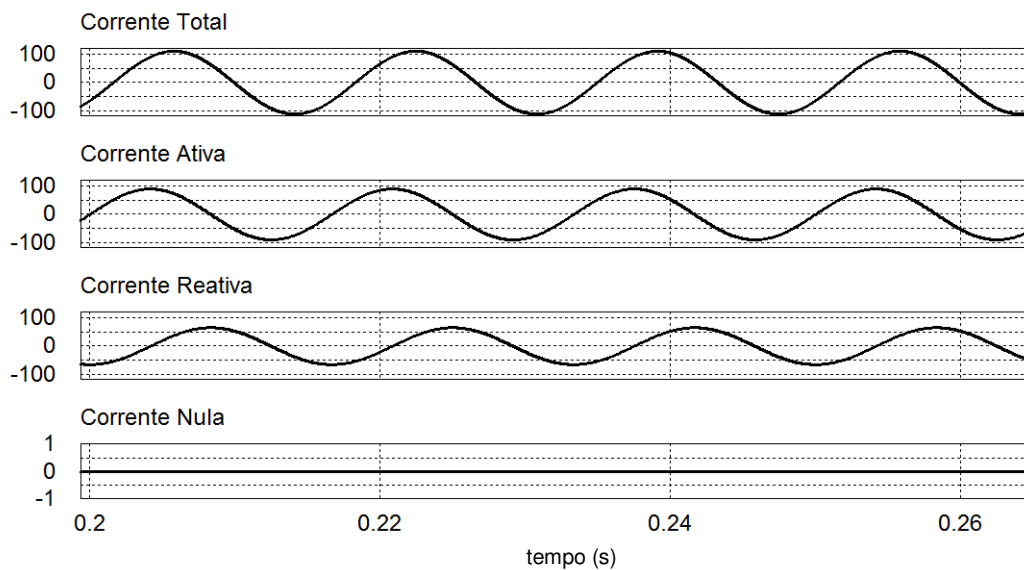


Figura 4.8 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva-indutiva.

Tabela 4.2 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva indutiva.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
79,24	64,24	46,47	0	
Potências				
A	P	V	Q	W
10,09k	8,17k	0	5,90k	15,67
Fatores				
λ	FP	$DHTv$	$DHTi$	
0,810	0,810	0	0	

4.1.3. Carga Resistiva-Capacitiva (RC) de 10 kVA

A Figura 4.19 apresenta o circuito analisado. Os valores do resistor (1,3 Ω) e do capacitor (2,74 mF) foram ajustados para uma potência aparente (A) de 10 kVA e um fator de potência de 0,8.

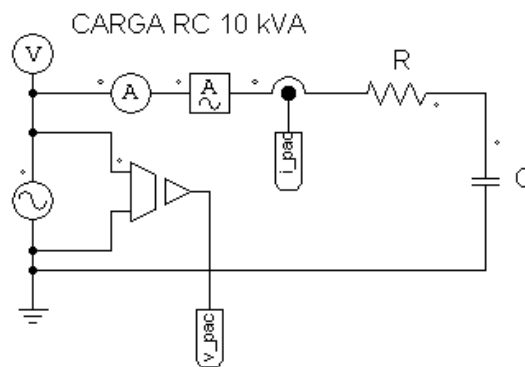


Figura 4.9 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva-capacitiva.

A Figura 4.10 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que a tensão e a corrente são senoidais e agora a corrente está adiantada em relação à tensão, visto se tratar de uma carga com comportamento capacitivo.

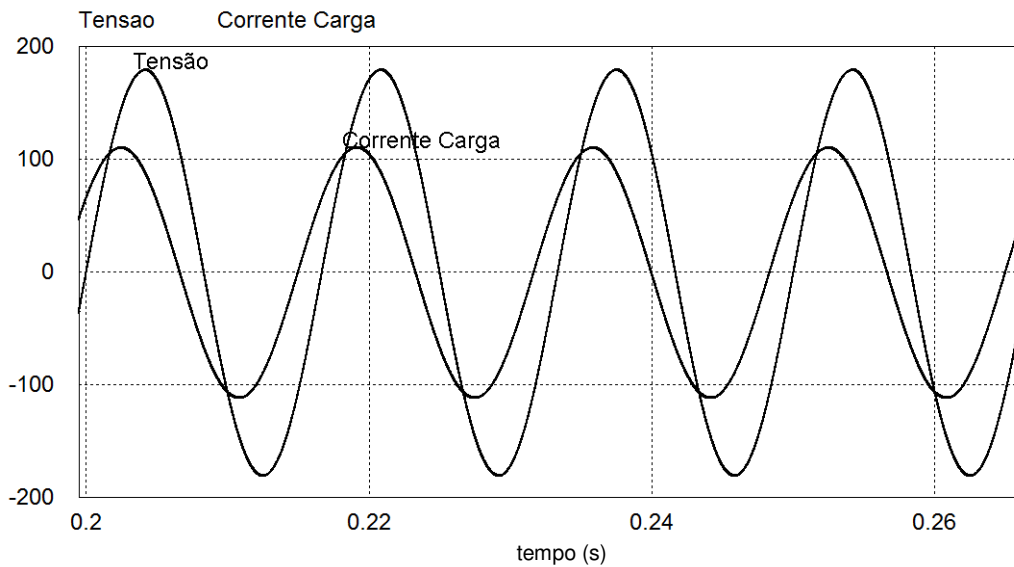


Figura 4.10 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva-capacitiva.

A Figura 4.11 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa da carga. A Figura 4.12 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa, corrente reativa e corrente nula. Observa-se a presença de corrente ativa e reativa, sendo a corrente reativa adiantada em relação à corrente ativa e a tensão, e a não existência de parcela referente a corrente nula.

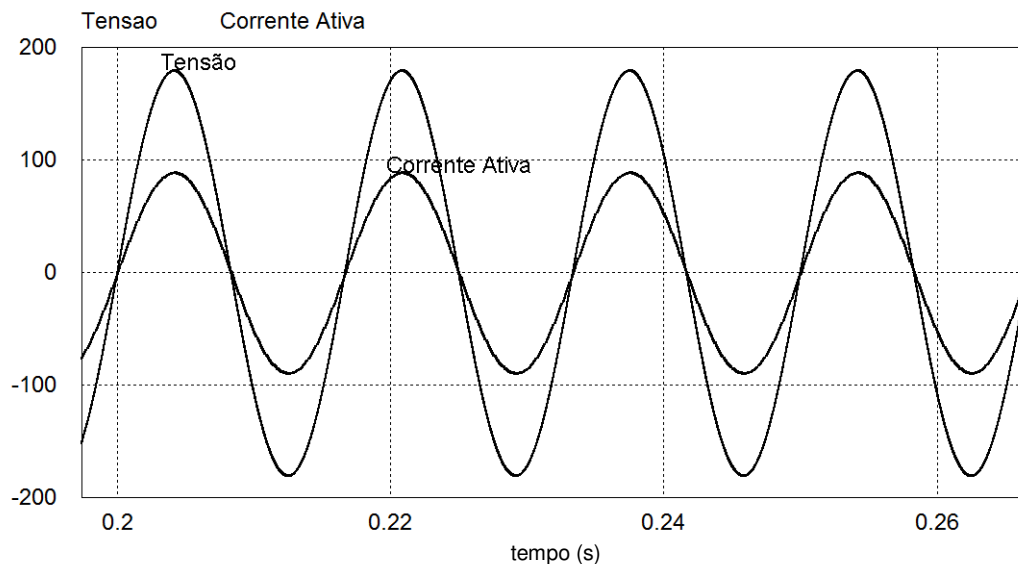


Figura 4.11 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva-capacitiva.

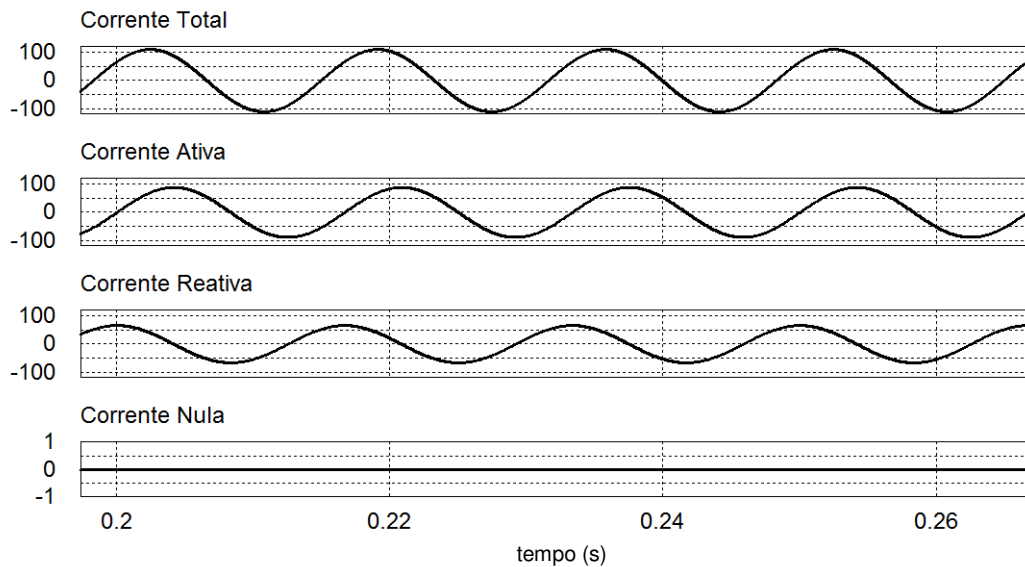


Figura 4.12 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva-capacitiva.

A tabela 4.3 indica valores muito semelhantes ao da tabela 4.2, com existência apenas de parcelas ativa e reativa de correntes e potências. Vale destacar o sinal negativo da energia reativa, por tratar-se de uma carga de comportamento capacitivo (como obtido na teoria convencional para a potência reativa).

Tabela 4.3 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva-capacitiva.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
79,05	63,03	46,85	0	
Potências				
A	P	V	Q	W
9,97k	7,99k	0	5,95k	-15,49
Fatores				
λ	FP	DHT_v	DHT_i	
0,801	0,801	0	0	

4.1.4. Carga Capacitiva de 10 kVA

Neste caso, foi simulado uma carga puramente capacitiva (1,65 mF), conforme o circuito da Figura 4.13.

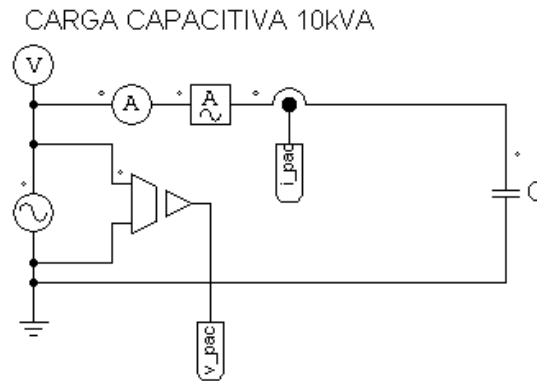


Figura 4.13 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga capacitiva.

A Figura 4.14 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que a tensão e a corrente são senoidais, porém a corrente está adiantada de 90° com relação à tensão. A Figura 4.15 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa da carga. Observa-se que a corrente ativa é nula, devido à carga ser puramente capacitiva. A Figura 4.16 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa, corrente reativa e corrente nula. Observa-se somente a presença de corrente reativa.

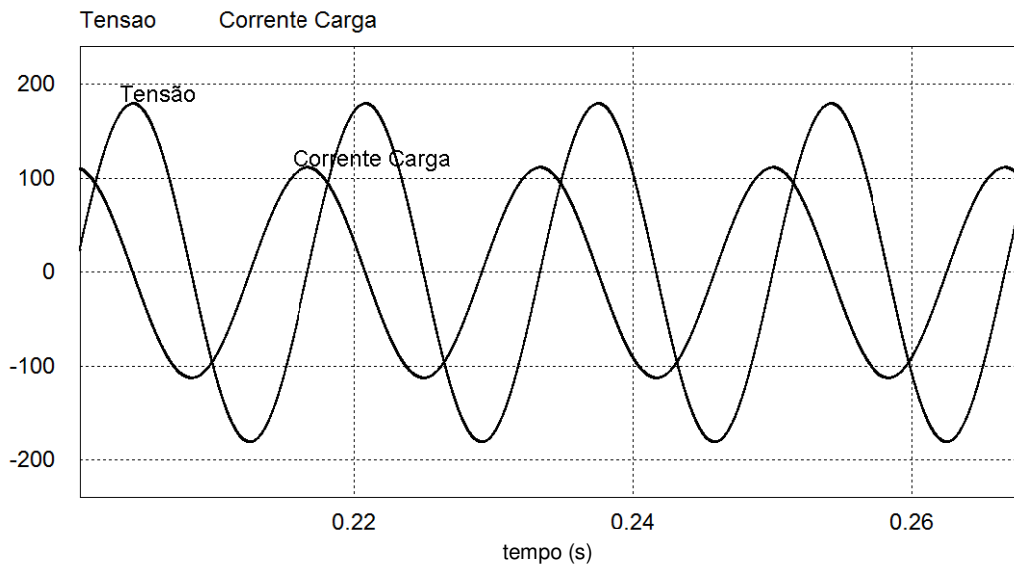


Figura 4.14 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga capacitiva.

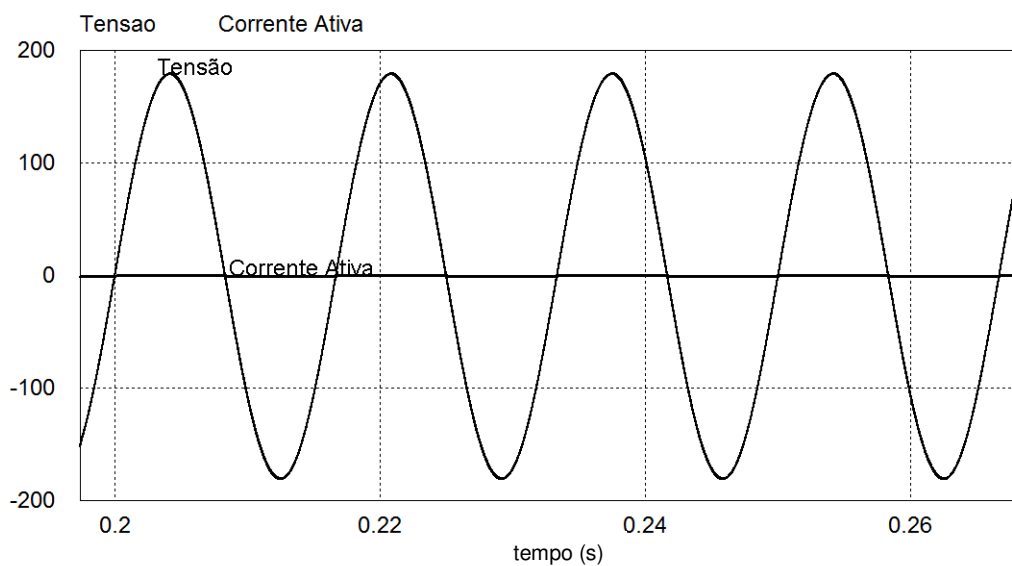


Figura 4.15 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga capacitiva.

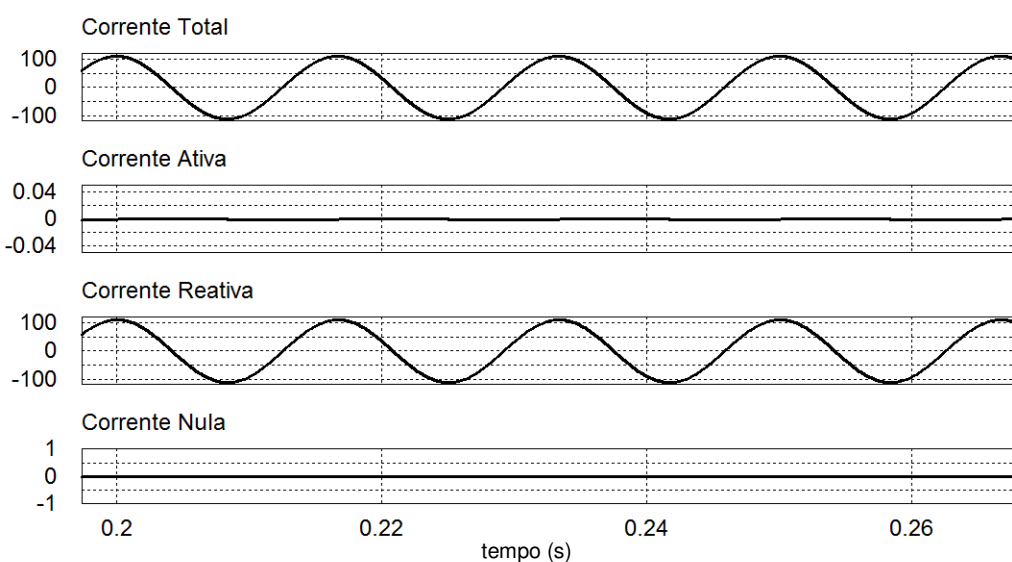


Figura 4.16 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga capacitiva.

A tabela 4.4 ratifica a presença de apenas correntes e potências reativas, devido a carga ser puramente capacitiva. Os fatores de potências são nulos, devido a ausência de potência ativa.

Tabela 4.4 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga capacitiva.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
78,18	0	78,18	0	
Potências				
A	P	V	Q	W
10,07k	0	0	10,07k	-26,72
Fatores				
λ	FP	DHT_v	DHT_i	
0	0	0	0	

4.1.5. Carga Não Linear de 10 kVA

Neste caso, foi simulado um circuito composto por um retificador com filtro capacitivo, configurado de tal forma que o fator de crista fosse aproximadamente 3 (valor de pico da corrente, dividido pelo valor eficaz da mesma) e a potência aparente resultante em torno de 10 kVA. Foram utilizados um resistor de $4,3 \Omega$ e um capacitor de $4,55 \text{ mF}$. A Figura 4.17 apresenta o circuito utilizado.

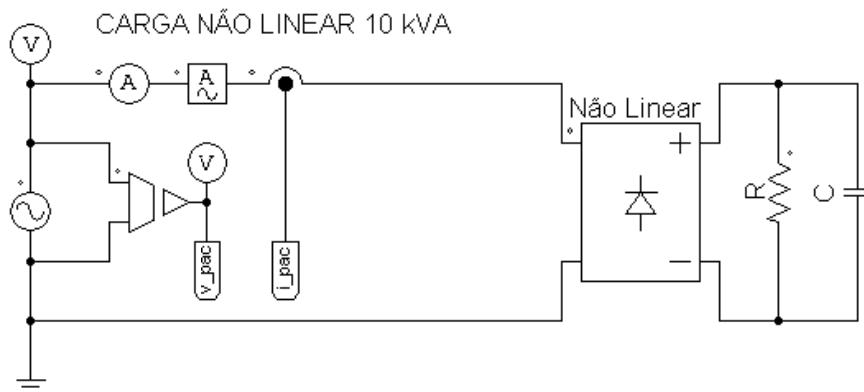


Figura 4.17 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga não linear.

A Figura 4.18 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente de entrada devido a carga não linear. Observa-se que a tensão é senoidal, porém a corrente agora está distorcida e com pico deslocado em relação a tensão, devido a não linearidade do retificador. A Figura 4.19 mostra a tensão e a corrente ativa da carga. Observa-se que as mesmas são senoidais e estão em fase entre si, conforme equação (3.24).

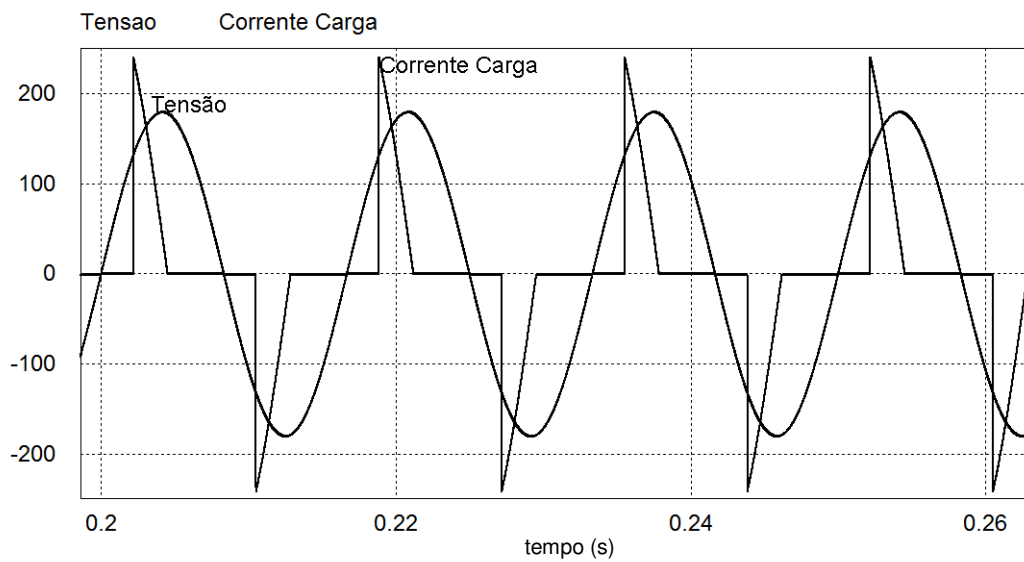


Figura 4.18 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga não linear.

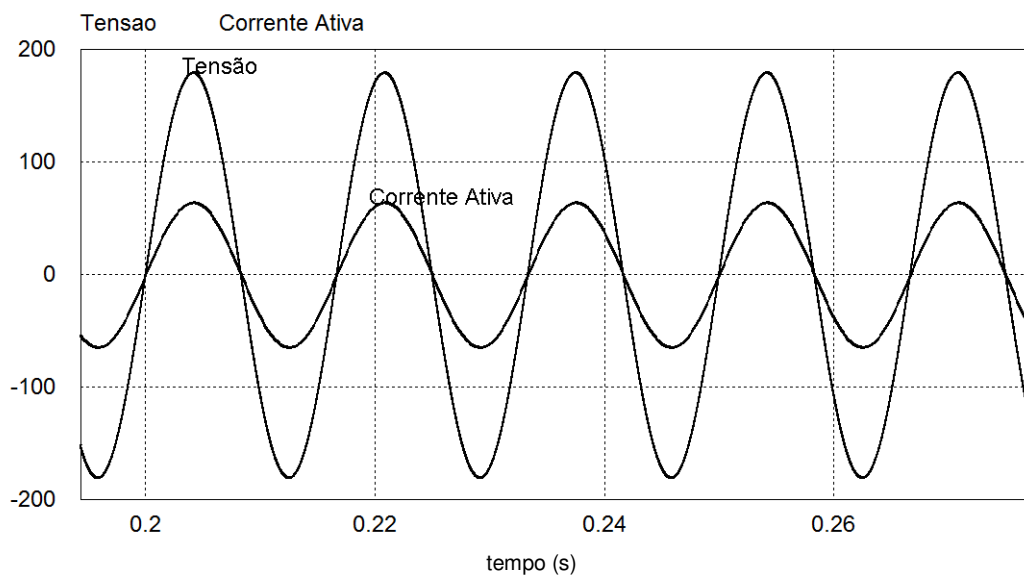


Figura 4.19 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga não linear.

A Figura 4.20 mostra que neste caso, a corrente total é decomposta em parcelas de correntes ativa, reativa e nula, sendo esta última provocada pelo comportamento não linear do retificador. Tal parcela é uma inovação bastante importante, proposta pela TPC, já que trata de uma parcela de corrente calculada no domínio do tempo, para representar as não linearidades da carga.

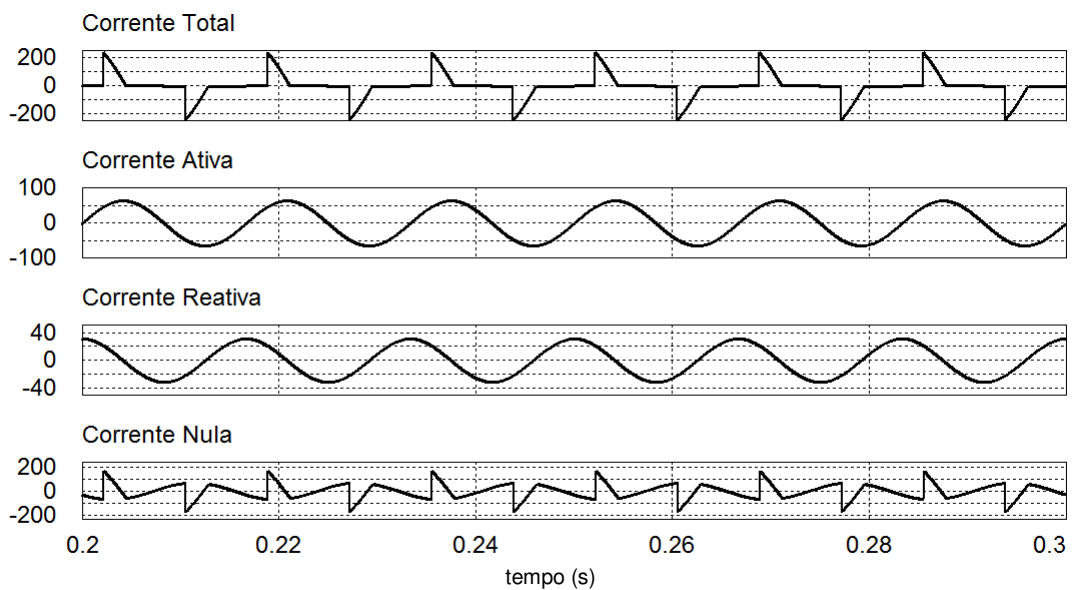


Figura 4.20 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga não linear.

A tabela 4.5 indica a presença de corrente e potência ativa, reativa e nula. Observar que neste caso, a potência nula (V) contribui significativamente para a redução do fator de potência total (λ), com relação ao fator de potência calculado apenas com ativos e reativos (FP). Isto significa que λ representa um fator de rendimento global do circuito, seja com relação à contribuição de reativos, seja através da contribuição das não linearidades do sistema, sem a necessidade de associações entre FP e DHT, como usualmente encontrado na literatura atual (Mohan 1995).

Vale destacar também que a energia reativa resulta negativa (capacitiva), o que pode ser estimado através das formas de onda da Figura 4.18.

Tabela 4.5 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
77,77	45,49	21,8	59,19	
Potências				
A	P	V	Q	W
9,95k	5,77k	7,61k	2,78k	-7,37
Fatores				
λ	FP	DHT_v	DHT_i	
0,579	0,900	0	118,5%	

4.1.6. Carga Mista: Resistiva-Indutiva + Não Linear

Para a modelagem deste circuito, a composição de carga foi realizada através da associação em paralelo de uma carga passiva RL com uma carga não linear. Foram utilizados, na carga RL, um resistor de 5Ω e um indutor de $10,7 \text{ mH}$; enquanto na carga não linear foram utilizados um resistor de $5,3 \Omega$ e um capacitor de $4,55 \text{ mF}$.

A Figura 4.22 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que a tensão é senoidal e a corrente, além de distorcida, tem o pico deslocado com relação ao pico da tensão, devido a influência da parcela indutiva do RL.

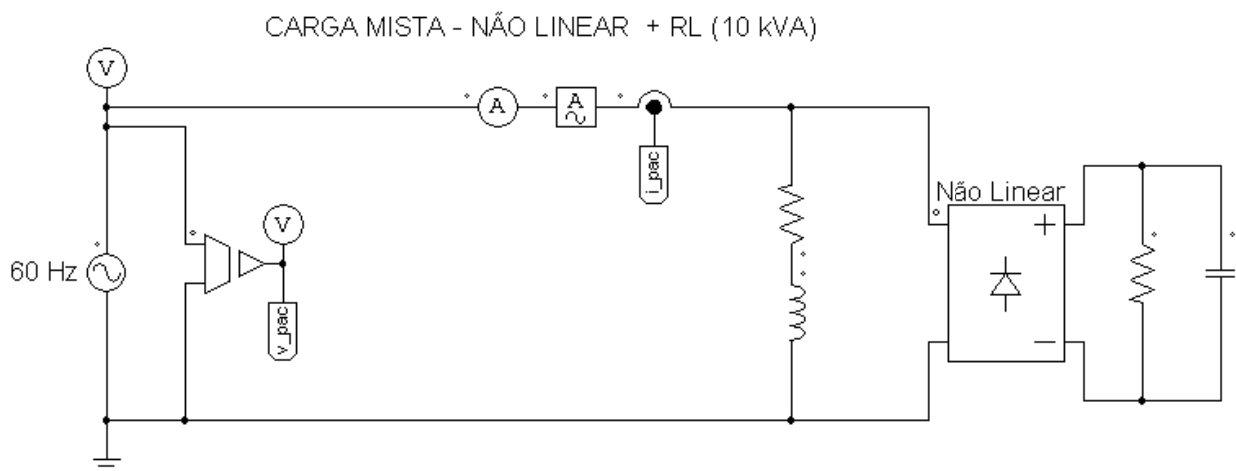


Figura 4.21 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: carga mista (RL + não linear).

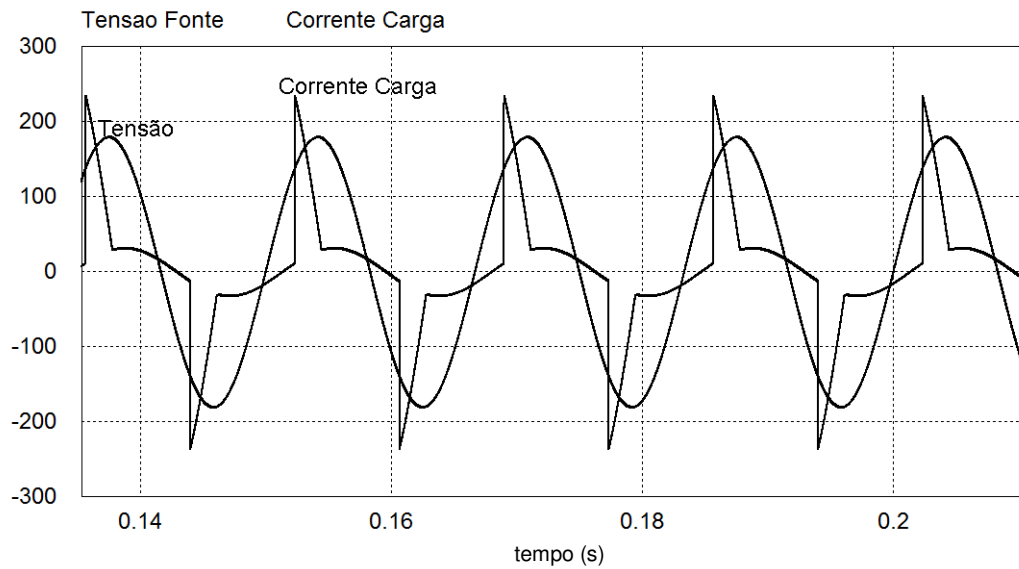


Figura 4.22 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente na carga mista (RL + não linear).

A Figura 4.23 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa da carga, as quais são senoidais e em fase entre si. A Figura 4.24 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa, corrente reativa e corrente nula. Observa-se que além de corrente ativa, existe uma pequena parcela de corrente reativa devido a influência do elemento indutivo da carga RL e uma parcela considerável de corrente nula, devido a não linearidade do retificador.

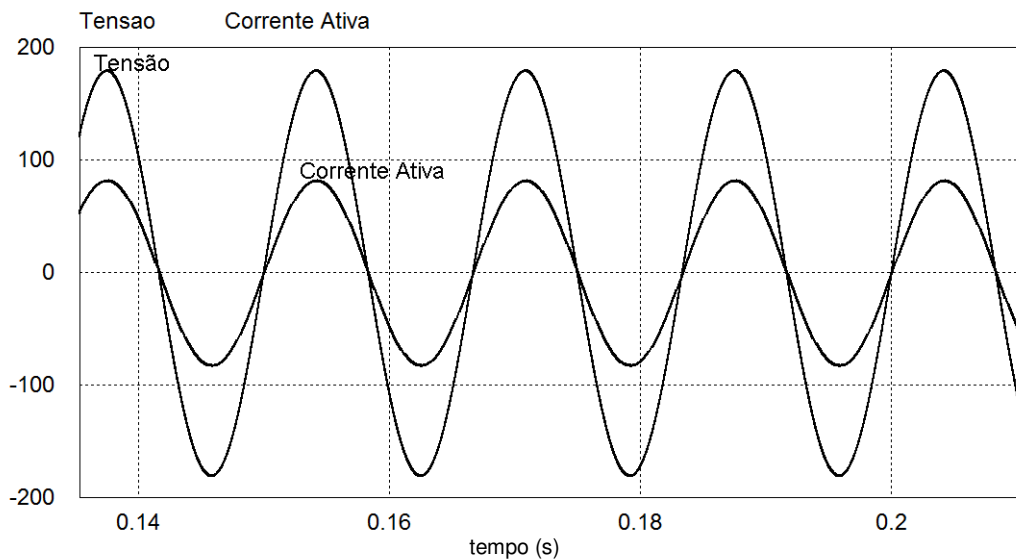


Figura 4.23 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga mista (RL + não linear).

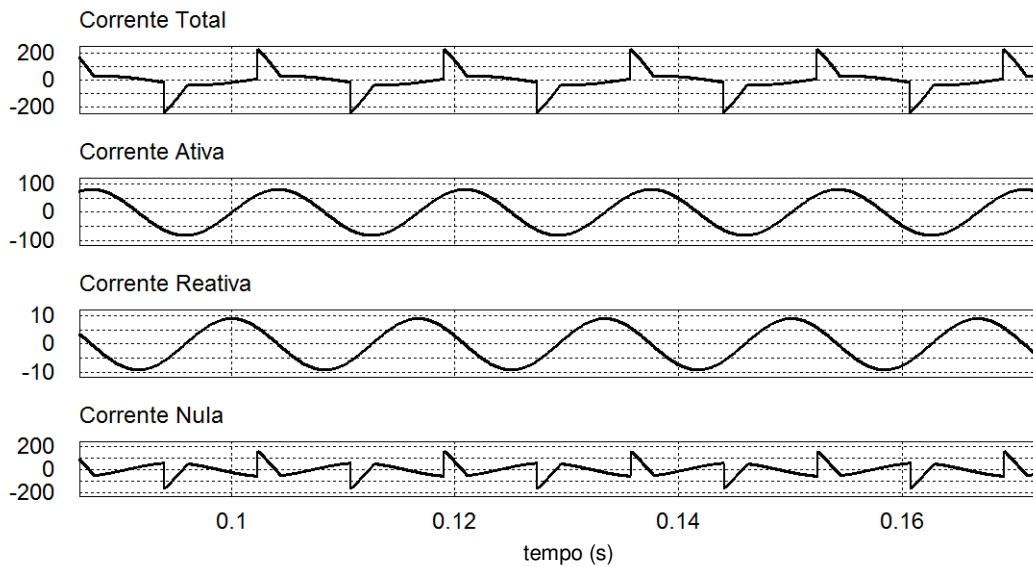


Figura 4.24 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga mista.

A tabela 4.6 indica a presença de correntes e potências, ativa, reativa e nula. Neste caso, destaca-se que a parcela de corrente reativa é pouco significativa com relação as demais, de forma que o fator de potência que considera apenas ativos e reativos seria praticamente unitário. Por outro lado, observando-se o valor da potência nula (V), é possível perceber que as não linearidades neste caso são bastante significativas e podem ser levadas em consideração através do fator de potência total (λ). A distorção harmônica total da corrente no circuito foi de 91,9%.

Tabela 4.6 - Monofásico com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga mista (RL + não linear).

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
79,67	58,66	6,38	53,54	
Potências				
A	P	V	Q	W
10,09k	7,38k	6,83k	822,42	-2,18
Fatores				
λ	FP	DHT_v	DHT_i	
0,731	0,999	0	91,9%	

4.1.7. Monofásico senoidal (com impedância de rede).

Considerando alguns dos circuitos monofásicos discutidos anteriormente, nesta seção será considerada a presença de uma impedância de linha. Para caracterizar tal impedância foram utilizados um resistor de 58,6 mΩ e um indutor de 207 μH, de modo que esta impedância resulte numa queda de tensão de no máximo 5% na linha, em função da corrente eficaz da carga. O percentual de queda de tensão foi estabelecido de acordo com a faixa de normalidade prevista nas normas regulamentadoras (ABNT 1997) e (Aneel 2001).

4.1.8. Carga Não Linear

A Figura 4.25 mostra o circuito que foi utilizado para simular este caso.

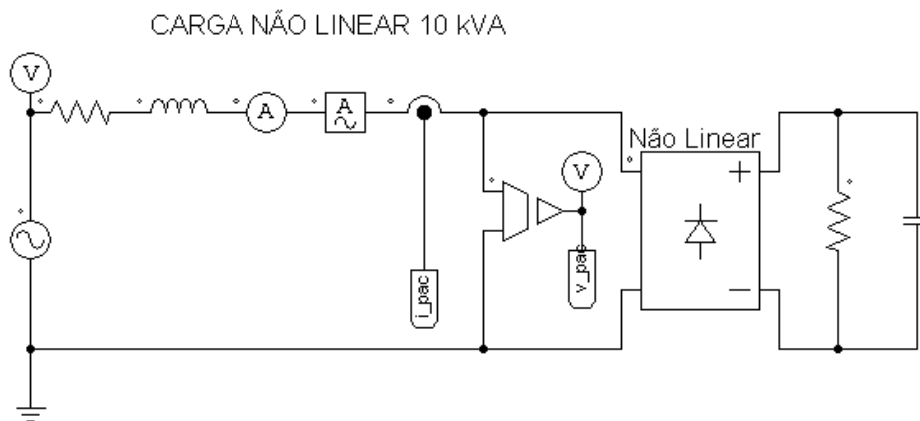


Figura 4.25 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: carga não linear.

A Figura 4.26 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que a tensão e a corrente estão deformadas, devido a não linearidade do retificador.

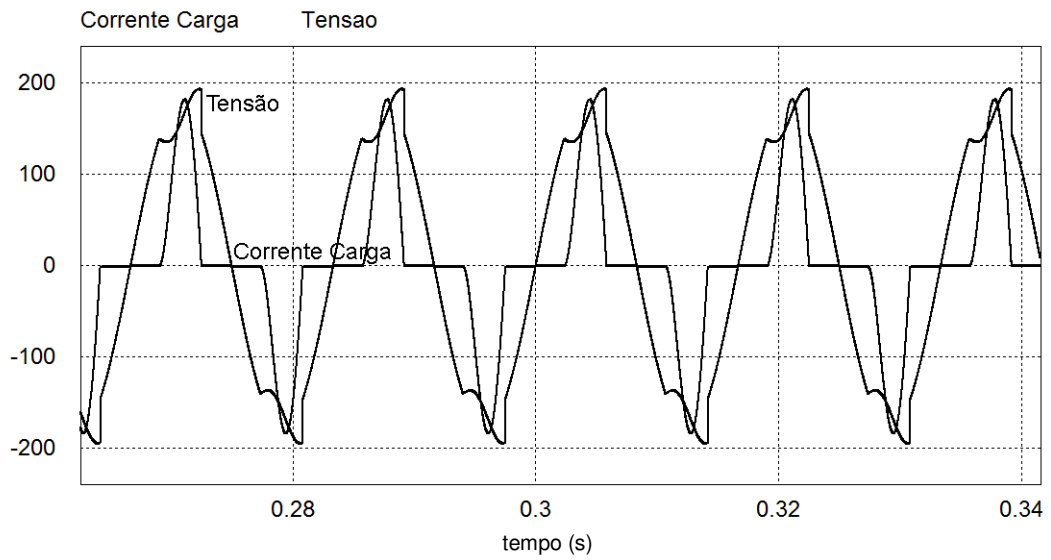


Figura 4.26 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: tensão e corrente na carga não linear.

A Figura 4.27 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa da carga.

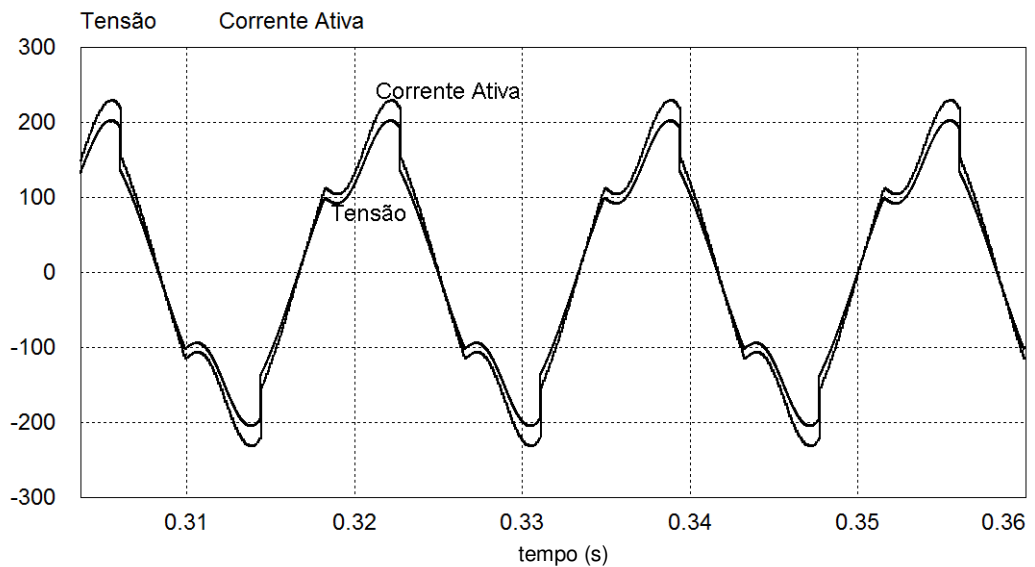


Figura 4.27 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga não linear.

A Figura 4.28 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa, corrente reativa e corrente nula. Observa-se uma diminuição considerável nas amplitudes da corrente reativa e da corrente nula, devido à influência da impedância RL deste circuito

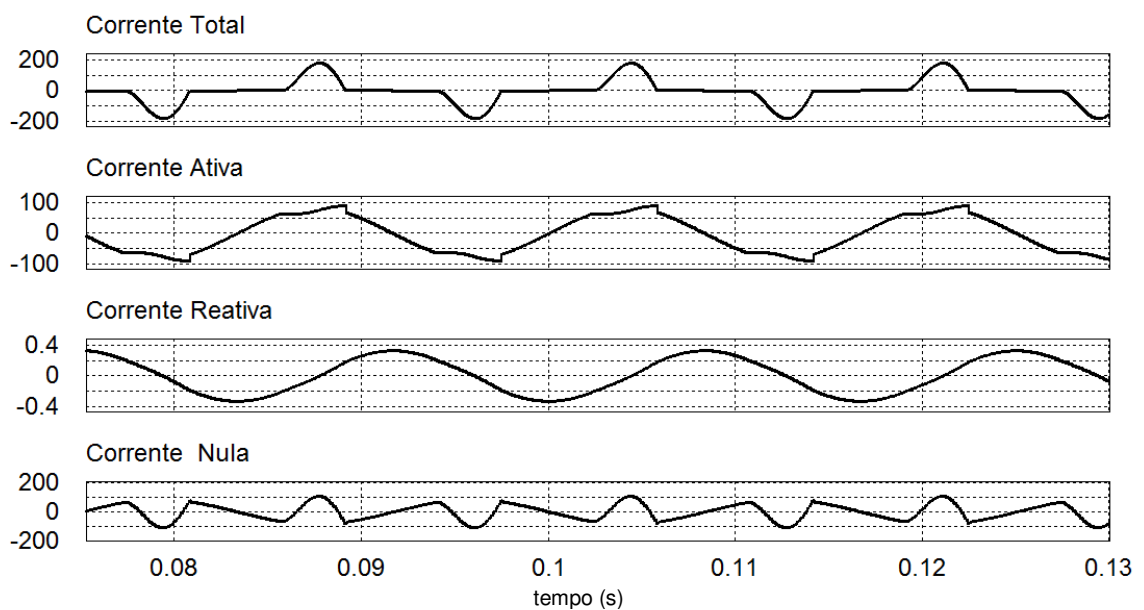


Figura 4.28 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga não linear.

A Tabela 4.7 apresenta os valores eficazes da corrente, as parcelas de potências, os fatores de potência e as distorções harmônicas totais de tensão e corrente obtidas na simulação deste caso. Novamente os fatores de potência são diferentes, pois no caso do λ são consideradas todas as parcelas de potência, inclusive potência nula, resultando num valor menor (pior) se comparado ao valor do FP convencional, que considera somente as parcelas de potência ativa e reativa. Observa-se uma diminuição considerável nos valores da corrente reativa e da corrente nula, devido a influência da impedância RL do circuito. O valor de DHTi é devido as distorções provocadas pela não linearidade do retificador.

Tabela 4.7 - Monofásico com tensão senoidal e com impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
78,27	64,41	0,23	52,79	
Potências				
A	P	V	Q	W
9,74k	7,19k	6,58k	29,04	0,08
Fatores				
λ	FP	$DHTv$	$DHTi$	
0,738	0,999	12,7%	85,8%	

4.2. Monofásico com tensão não senoidal (com impedância da rede)

Para a análise dos casos a seguir, a fonte de alimentação foi configurada com tensão fundamental de 127 V eficaz, com 10% de 3ª harmônica e 5% de 5ª harmônica. A mesma impedância de linha dos casos anteriores foi considerada. Vale ressaltar, que o intuito da análise de casos com a tensão de alimentação distorcida significativamente, tem o objetivo de demonstrar a viabilidade da aplicação da TPC, inclusive em casos extremos, tais como em instalações com baixo nível de curto circuito.

4.2.1. Carga Resistiva de 10 kW

A Figura 4.29 mostra o circuito analisado, considerando uma carga resistiva de 1,6 Ω .

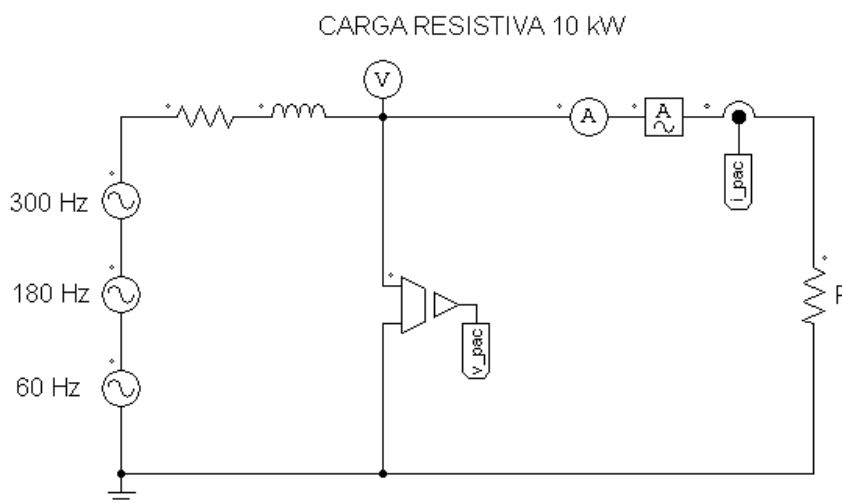


Figura 4.29 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: carga resistiva.

A Figura 4.30 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que a tensão e a corrente estão distorcidas, mas em fase entre si em função do comportamento resistivo da carga. A figura 4.31 mostra a tensão e a corrente ativa da carga. Observar que a corrente ativa é praticamente igual à corrente total, visto se tratar de uma carga linear puramente resistiva e com baixa impedância de linha.

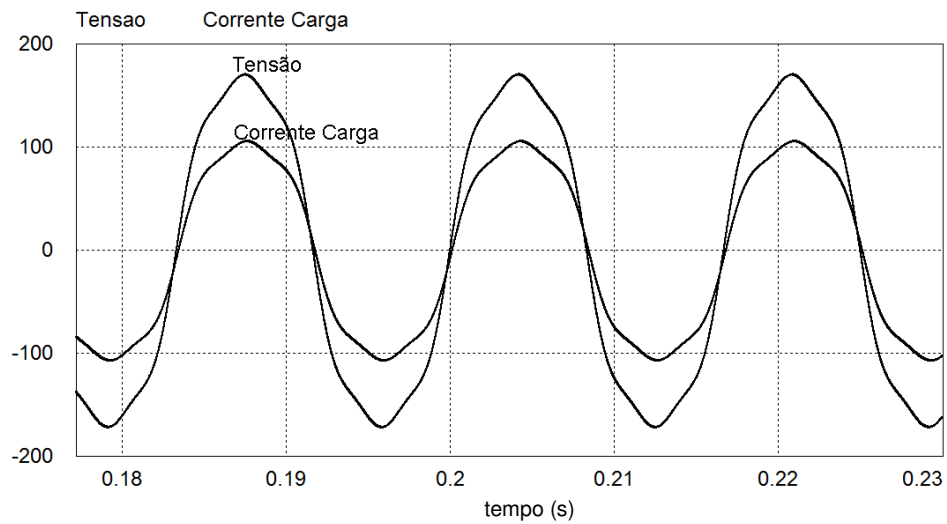


Figura 4.30 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva.

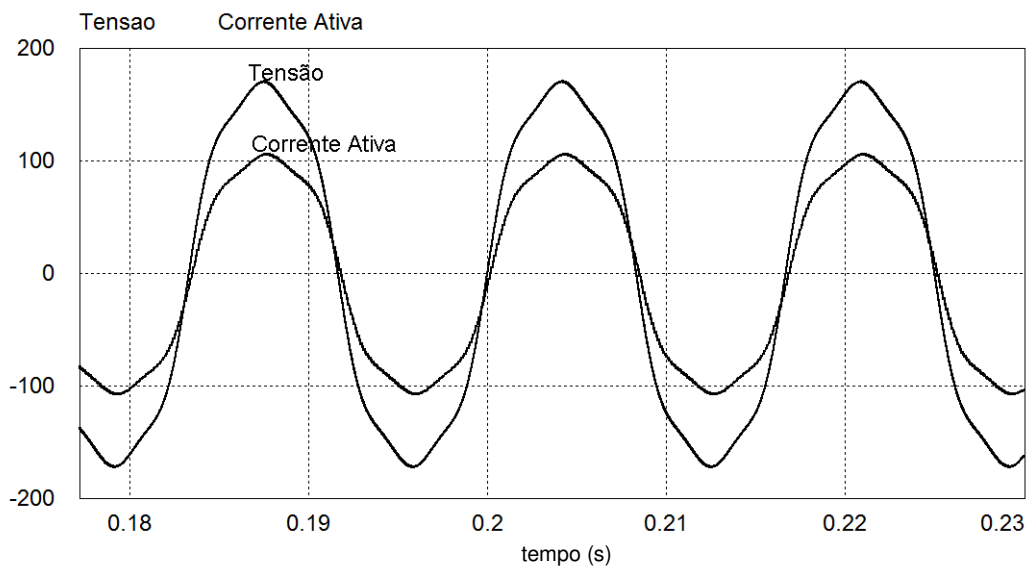


Figura 4.31 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva.

A figura 4.32 mostra que a decomposição da corrente total através da TPC resulta apenas na parcela de corrente ativa, o que indica que mesmo com a distorção de tensão, toda a corrente da carga é convertida em potência útil (ativa), por tratar-se de um resistor. Isto significa que a TPC considera, no domínio do tempo, a influência de todas as componentes harmônicas no cálculo da potência ativa.

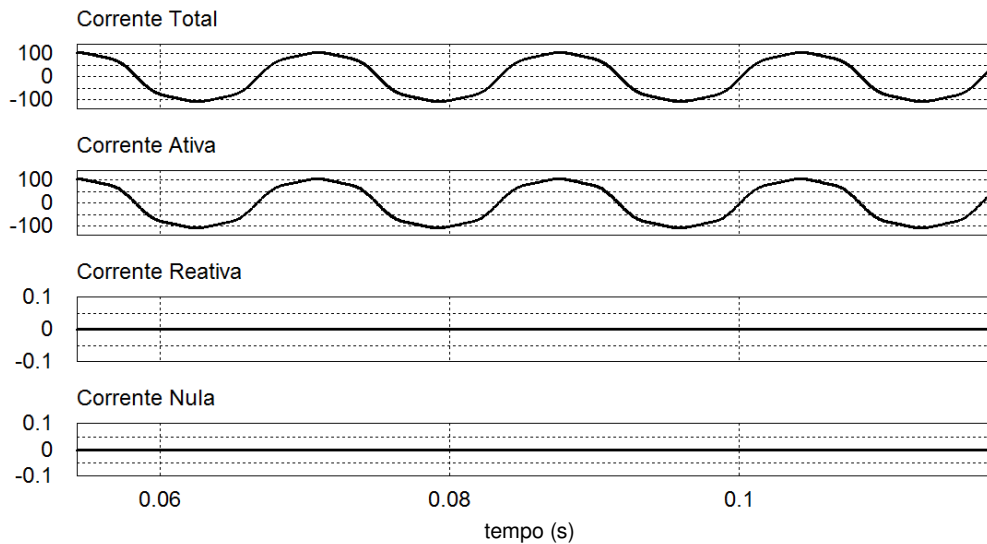


Figura 4.32 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva.

A Tabela 4.8 indica que neste caso, apesar da presença de distorção harmônica na tensão, a corrente decomposta resulta apenas em parcela ativa. Não existe contribuição de reativos e por tratar-se de uma carga linear, a parcela nula também é zero. Desta forma, o fator de potência resulta unitário.

Tabela 4.8 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
79,63	79,63	0	0	
Potências				
A	P	V	Q	W
10,19k	10,19k	0	0	0
Fatores				
λ	FP	DHT_v	DHT_i	
0,998	0,998	11,1%	11,1%	

4.2.2. Carga Resistiva-Indutiva (RL) de 10 kVA

Considerando-se a mesma carga RL do caso (4.1.2), mas agora com impedância de rede e com a tensão de alimentação distorcida. A Figura 4.33 ilustra o circuito simulado.

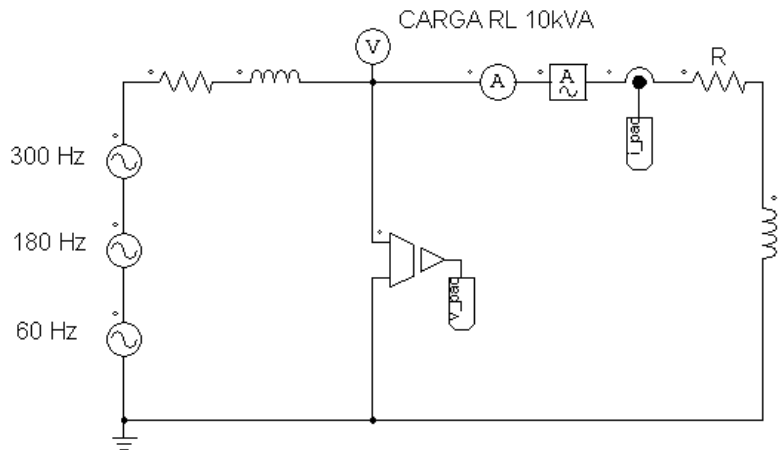


Figura 4.33 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: carga resistiva-indutiva.

A Figura 4.34 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que a tensão e a corrente são distorcidas, porém possuem formas de ondas com envolturas diferentes. Isto ocorre devido ao efeito da carga RL alterar a forma de onda da corrente com relação à tensão. Além disto, a corrente está atrasada com relação à tensão. Já a figura 4.35 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa da carga. Observar que as mesmas estão exatamente em fase e com mesma forma de onda, conforme esperado em (3.24).

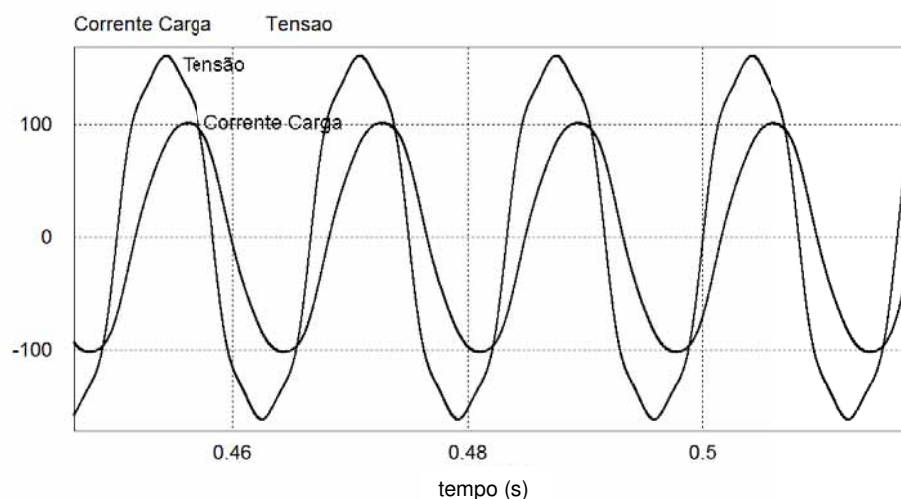


Figura 4.34 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente na carga resistiva-indutiva.

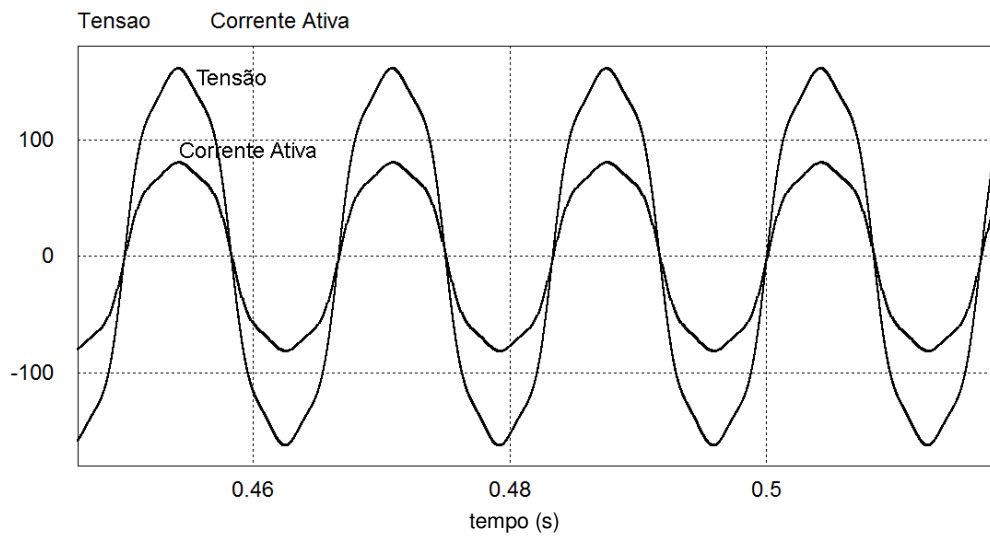


Figura 4.35 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga resistiva-indutiva.

A Figura 4.36 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa, corrente reativa e corrente nula. Observa-se a existência de corrente reativa, devido à presença do indutor e também uma parcela de corrente nula, provocada pela não linearidade entre as formas de onda da tensão e da corrente na carga.

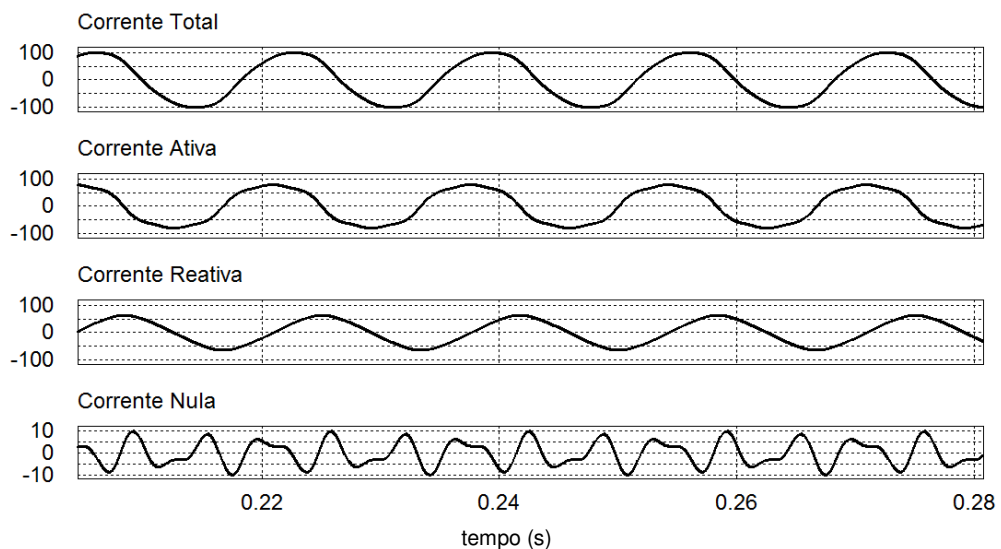


Figura 4.36 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga resistiva-indutiva

Observar pela Tabela 4.9 a existência de parcelas de corrente e potência ativa, reativa e nula. Ainda que o contexto seja de uma carga linear (RL), a diferença entre as formas de onda de tensão e corrente ocasionam a presença de potência nula (V), mesmo que pouco significativa em termos de sua influência no fator de potência (λ). Também vale destacar que a corrente, potência e energia reativas, no caso da TPC, são calculadas no domínio do tempo, incluindo a contribuição de todas as componentes harmônicas da tensão e corrente, conforme deduzido em (3.25).

Tabela 4.9 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva-indutiva.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
75,44	60,74	43,76	5,46	
Potências				
A	P	V	Q	W
9,07k	7,31k	665	5,33k	14,06
Fatores				
λ	FP	DHT_v	DHT_i	
0,804	0,808	10,9%	5,3%	

4.2.3. Carga Não Linear de 10 kVA

Para este caso, foi considerado um retificador com resistor igual a 1,3 Ω e um capacitor de filtro igual a 4,5mF. A impedância da rede era composta de um resistor de 58,6m Ω e um indutor de 207 μ F. A figura 4.37 apresenta o circuito utilizado.

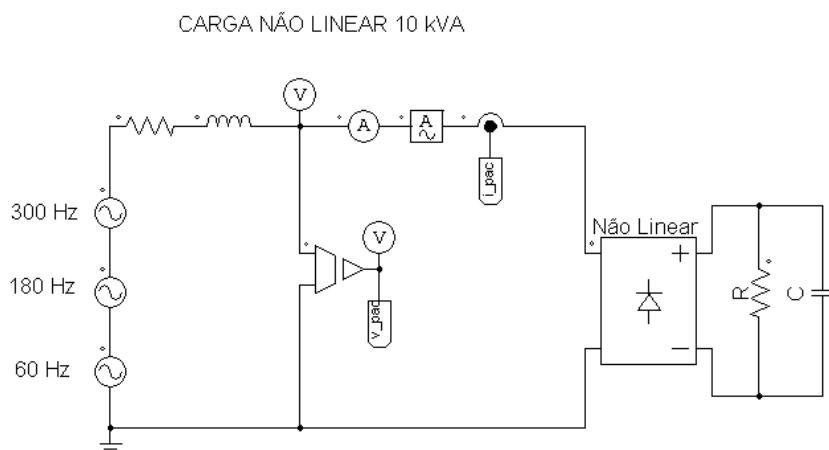


Figura 4.37 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: carga não linear.

A figura 4.38 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que a corrente e a tensão estão distorcidas em função das harmônicas da tensão de alimentação e devido a não linearidade da carga. Observa-se também a influência da impedância de linha, distorcendo ainda mais a tensão do barramento em função da corrente do retificador.

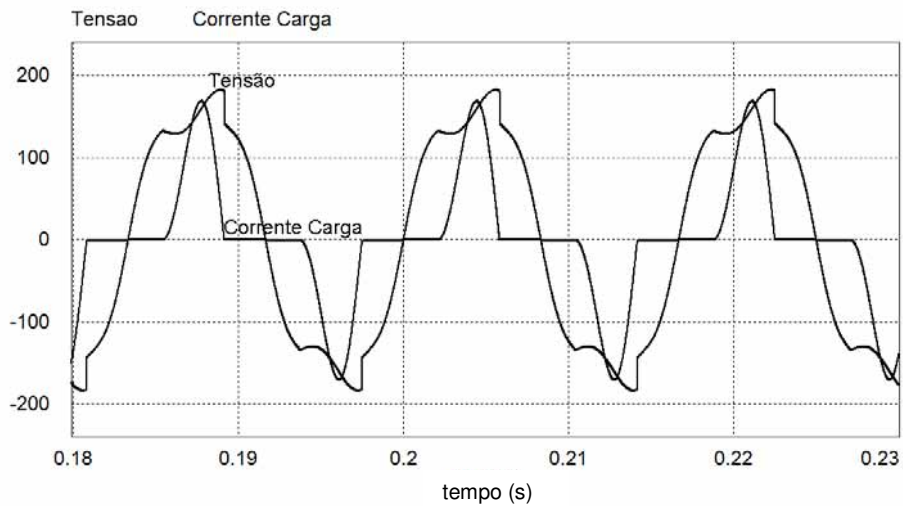


Figura 4.38 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente na carga não linear.

A figura 4.39 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa da carga. Observar que as estas têm a mesma forma de onda e estão em fase entre si. A figura 4.40 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa, corrente reativa e corrente nula. Observa-se a presença de corrente nula, devido as não linearidades da carga.

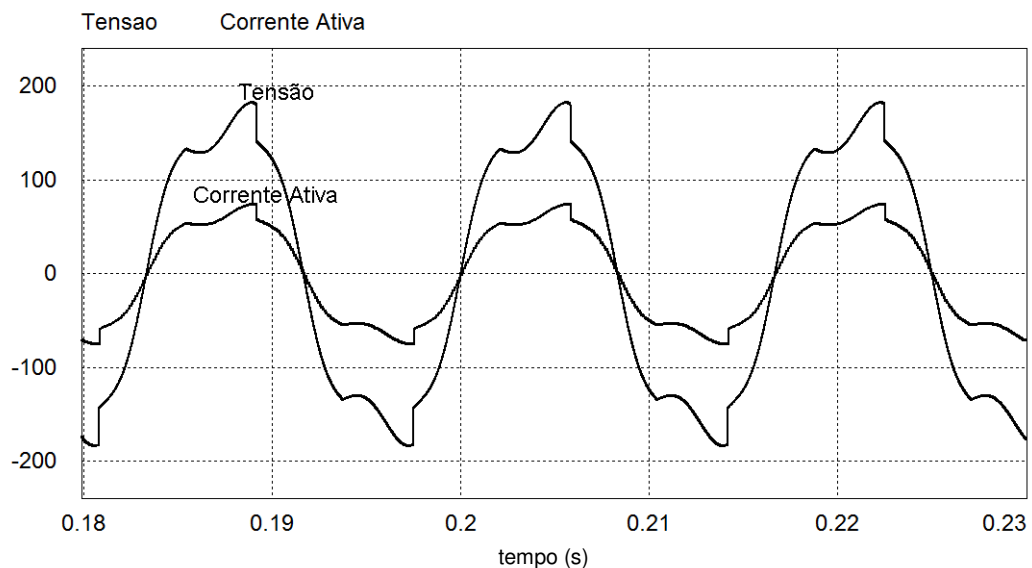


Figura 4.39 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: tensão e corrente ativa na carga não linear.

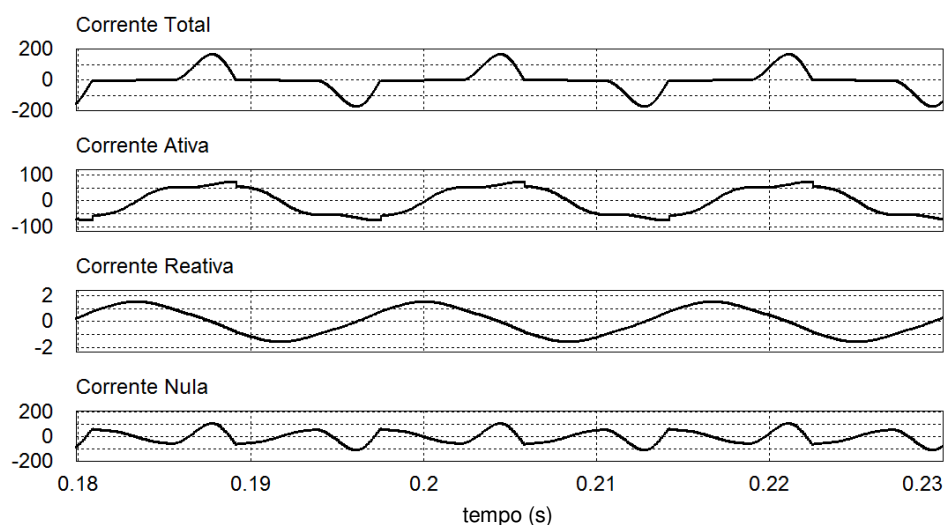


Figura 4.40 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes total, ativa, reativa e nula na carga não linear.

A Tabela 4.10 indica a presença das parcelas de corrente e potência ativa, reativa e nula. Notar-se que a influência da potência nula no fator de potência total é significativa. De acordo com a teoria convencional, se as não linearidades não fossem levadas em consideração, o fator de potência tenderia a indicar uma carga linear resistiva, o que estaria longe de representar a carga simulada.

Tabela 4.10 - Monofásico com tensão distorcida e com impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear.

Correntes				
I	I_a	I_r	I_v	
72,82	51,14	1,05	51,84	
Potências				
A	P	V	Q	W
9,41k	6,48k	6,76k	984,74	-11,65
Fatores				
λ	FP	DHT_v	DHT_i	
0,699	0,997	16,98	82,94	

4.3. Trifásico 3 condutores com tensão senoidal equilibrada e simétrica (sem impedância de rede).

Nas próximas seções serão analisados circuitos trifásicos com três condutores, desconsiderando-se o efeito da impedância de rede, de forma que os efeitos da decomposição da TPC sejam analisados no contexto apenas da corrente da carga.

Os casos a seguir consideram um conjunto de tensões senoidais, simétricas em fase e equilibradas, com 127 V eficazes por fase.

Observar nos circuitos apresentados nas figuras 4.41, 4.46, 4.52, 4.57, 4.62 e 4.66 que as tensões de fase foram medidas com relação a um ponto virtual, formado pela conexão em Y de três resistências de valor elevado, representando o ponto comum de 3 sensores de elevada impedância de entrada. Tal configuração foi analisada detalhadamente em (H. K. Paredes 2006) (Marafão, Deckmann e Paredes 2008) e representa as tensões medidas com relação à terra (real) das fontes do sistema. Vale destacar que estas tensões medidas podem ser distintas das tensões efetivamente impostas nas impedâncias por fase de cargas em Y, quando estas forem desbalanceadas.

4.3.1. Carga Resistiva Balanceada de 30 kW

Para a análise deste caso, o circuito da Figura 4.41 foi simulado. Foram utilizados resistores de $1,62 \Omega$ por fase para configurar a potência desejada. A carga foi configurada para apresentar conexão estrela em Y.

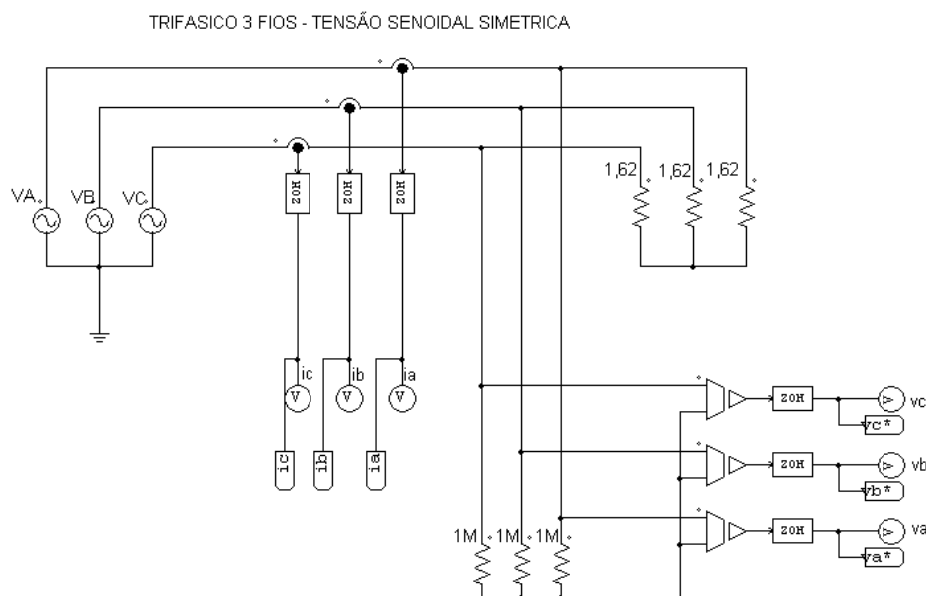


Figura 4.41 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva balanceada.

A Figura 4.42 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes na carga. Observa-se que as tensões e as correntes são senoidais, equilibradas e simétricas, além disso, estão em fase entre si, visto se tratar de uma carga balanceada puramente resistiva.

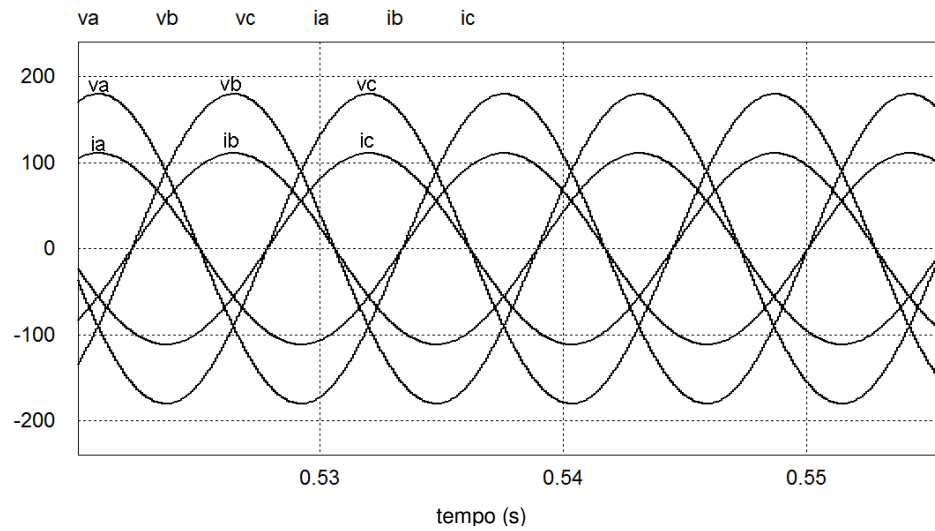


Figura 4.42 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva balanceada.

A Figura 4.43 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes ativas balanceadas da carga, obtidas através de (3.28). Observa-se que as correntes ativas balanceadas são senoidais, iguais nas três fases e iguais às correntes totais.

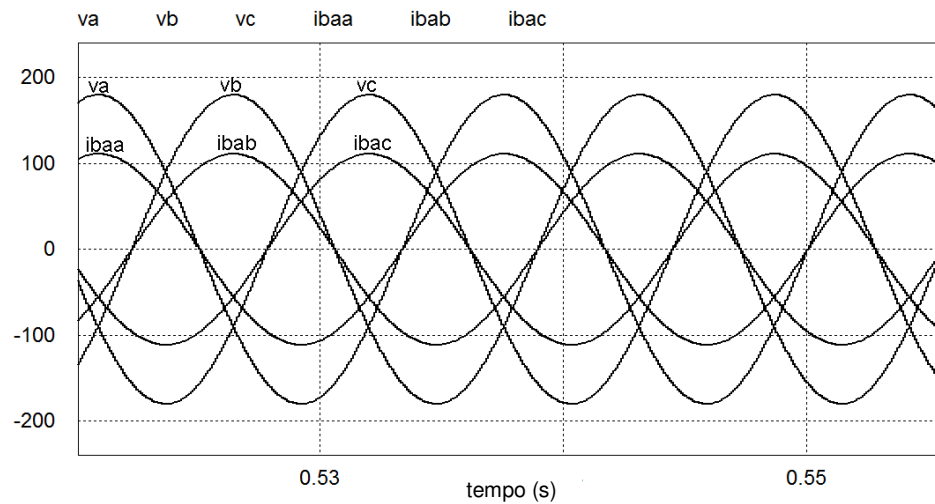


Figura 4.43 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga resistiva balanceada.

A Figura 4.44 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas balanceadas e correntes reativas balanceadas, conforme (3.28) e (3.29), respectivamente. Verifica-se a ausência completa de correntes reativas balanceadas.

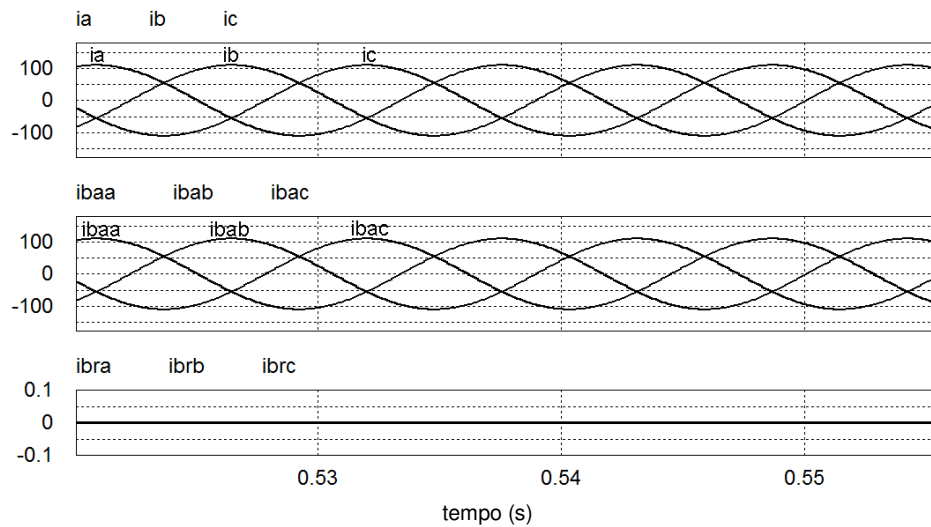


Figura 4.44 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga resistiva balanceada.

A Figura 4.45 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas desbalanceadas, correntes reativas desbalanceadas e correntes nulas nas três fases, calculadas conforme (3.30), (3.31) e (3.32), respectivamente. Observa-se a ausência de qualquer tipo de corrente, desbalanceada e nula, devido tratar-se de um circuito linear balanceado e puramente resistivo.

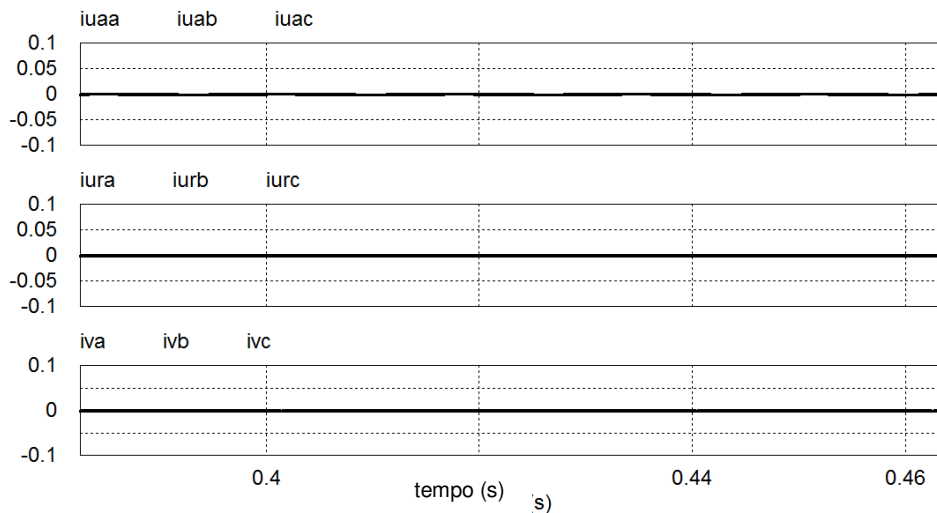


Figura 4.45 – Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga resistiva balanceada.

A Tabela 4.11 apresenta os valores eficazes das correntes nas três fases, as parcelas de potências, os fatores de potência e as distorções harmônicas totais de tensão e corrente obtidas na

simulação deste caso. Observa-se a presença de correntes ativas iguais nas três fases e potência ativa. Por outro lado, todas as demais parcelas de corrente e potência são nulas, o que seria esperado para o caso resistivo balanceado. Observar que neste caso, o fator de potência total (λ), calculado conforme (3.23) é unitário e idêntico ao fator de potência (FP) calculado levando-se em conta apenas ativos e reativos (3.36).

Tabela 4.11 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva balanceada.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
78,56	78,56	78,56	78,56	78,56	78,56	0	0	0
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
0	0	0	0	0	0	0	0	0
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
30,0k	30,0k	0	0	0	0	0	0	
Fatores								
λ	FP	THD v	THDi $_a$	THDi $_b$	THDi $_c$			
1	1	0,86%	0,86%	0,86%	0,86%			

4.3.2. Carga Não Linear Balanceada de 30 kVA

Para a modelagem de uma carga não linear balanceada, foi utilizado um retificador trifásico em ponte completa, conforme ilustra a Figura 4.46.

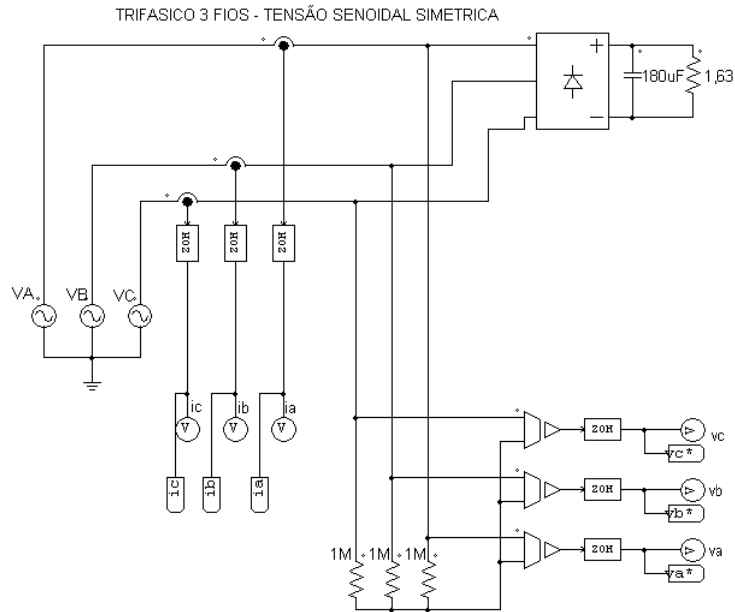


Figura 4.46 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga não linear.

A Figura 4.47 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes da carga. Observa-se que as tensões são senoidais e têm as mesmas amplitudes nas três fases. As correntes estão deformadas, devido a não linearidade do retificador trifásico, porém também têm as mesmas amplitudes nas três fases, visto que se trata de uma carga balanceada.

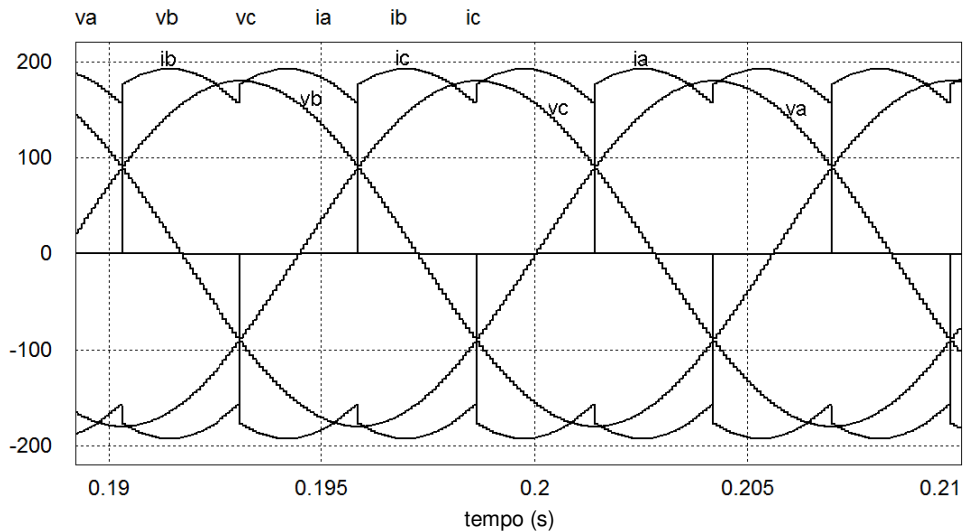


Figura 4.47 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga não linear.

A Figura 4.48 mostra as formas de onda das tensões e das correntes ativas balanceadas da carga. Observa-se que as correntes ativas balanceadas são senoidais, equilibradas e em fase com as tensões, conforme esperado por (3.28).

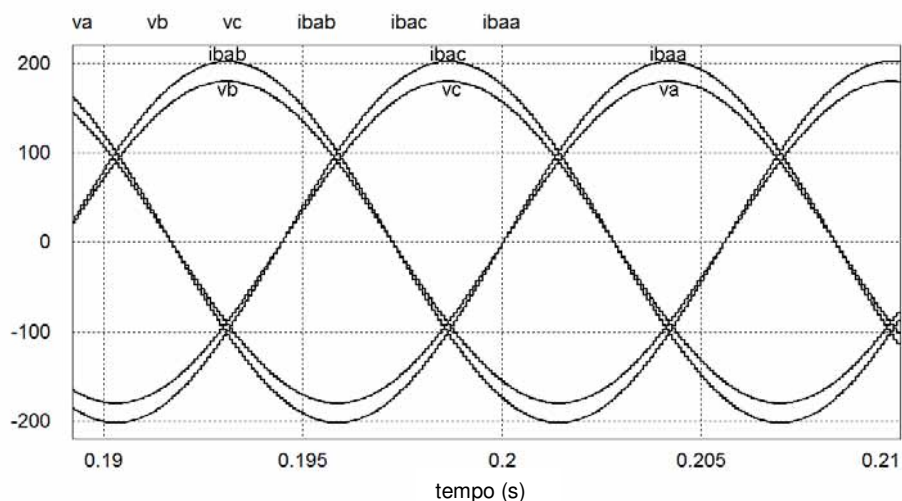


Figura 4.48 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga não linear.

A Figura 4.49 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas balanceadas e correntes reativas balanceadas nas três fases. Verifica-se a presença de correntes reativas balanceadas, ainda que pequenas, as quais são senoidais e com mesma amplitude entre fases, uma vez que dependem das tensões por fase (3.29) do circuito e da presença do filtro capacitivo do retificador.

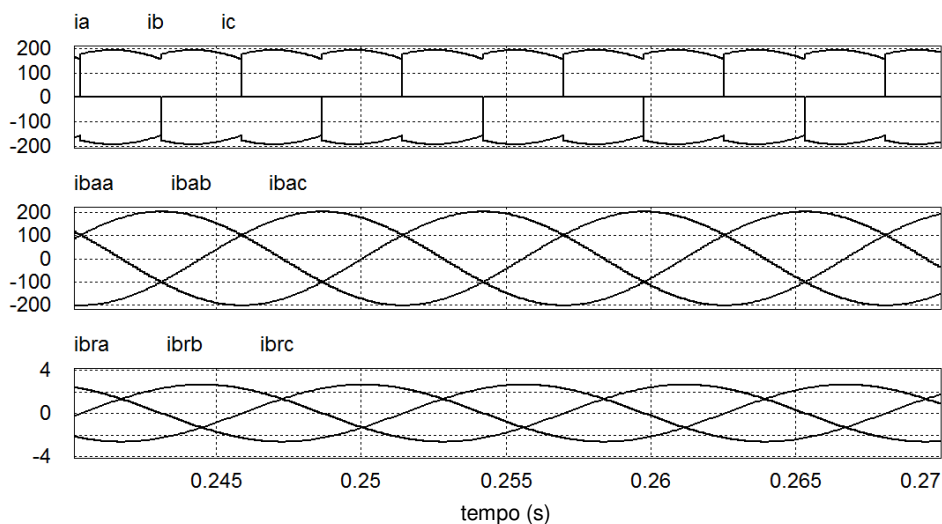


Figura 4.49 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga não linear.

A Figura 4.50 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas desbalanceadas, correntes reativas desbalanceadas e correntes nulas nas três fases. Observa-se a ausência de correntes ativas e reativas desbalanceadas devido se tratar de um circuito balanceado. No entanto, verifica-se a ocorrência de corrente nula, provocada pelo comportamento não linear dos retificadores.

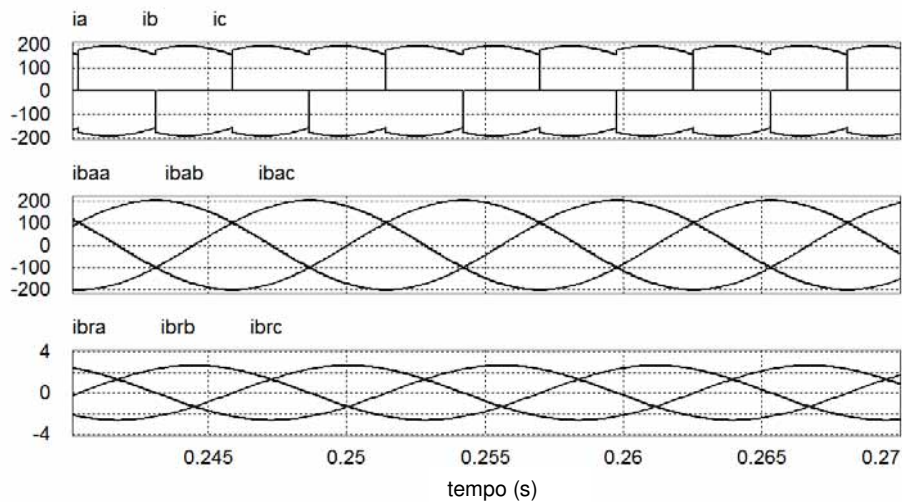


Figura 4.50 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nula na carga não linear.

A Figura 4.51 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas desbalanceadas, correntes reativas desbalanceadas e correntes nulas nas três fases. Observa-se a ausência de correntes ativas e reativas desbalanceadas por tratar-se de um circuito balanceado. No entanto, verifica-se a ocorrência de correntes nulas, provocada pelo comportamento não linear dos retificadores.

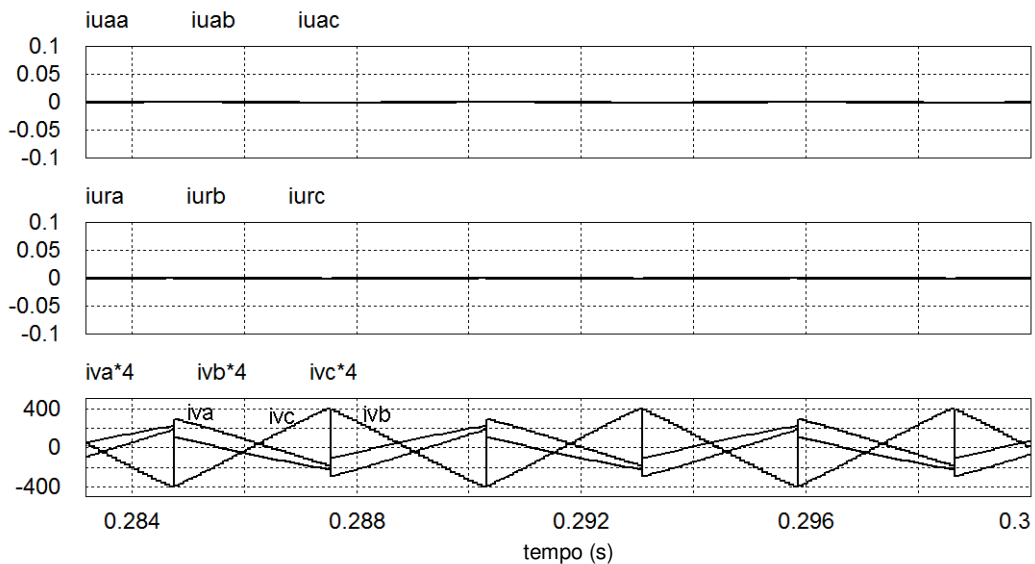


Figura 4.51 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga não linear.

A Tabela 4.12 apresenta os valores eficazes das correntes nas três fases, as parcelas de potência, os fatores de potência e as distorções harmônicas totais de tensão e correntes obtidas na simulação deste caso. Observa-se a predominância de correntes ativas balanceadas, o que resulta em

potência ativa predominante. Notar também a presença de valores significativos de corrente e potência nula, enquanto as parcelas de corrente e potência reativa são tem valores bastante reduzidos. Vale destacar que por se tratar de reativos relativos ao capacitor do filtro capacitivo do retificador trifásico, a energia reativa resultante é negativa.

Também vale destacar a inexistência de correntes e potência de desbalanço, dado o comportamento trifásico balanceado do retificador simulado. Por fim, é importante observar que o fator de potência (FP) resulta praticamente unitário, uma vez que não é influenciado pelas não-linearidades do circuito. Já o fator de potência total (λ) tem seu valor reduzido em função da carga não linear.

Assim como no caso monofásico, tal consideração é bastante significativa e inovadora com relação a teoria convencional, impactando em diversas aplicações, tais como: tarifação de energia, compensação de distúrbios (reativos, harmônicos, etc.), instrumentação, dentre outras.

Tabela 4.12 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
149,38	149,38	149,38	142,70	142,70	142,70	1,87	1,87	1,87
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
0	0	0	0	0	0	43,95	43,95	43,95
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
57,04k	54,48k	16,85k	716,15	0	0	0	-1,89	
Fatores								
λ	FP	DHT_v	$DHTi_a$	$DHTi_b$	$DHTi_c$			
0,855	0,999	0,8%	30,96%	30,93%	30,91%			

4.3.3. Carga Mista: Resistiva-Indutiva + Não Linear Desbalanceada.

A Figura 4.52 mostra o circuito utilizado para simular este caso. Foram utilizados 3 retificadores monofásicos com diferentes potências e uma carga RL trifásica, em Y, desbalanceada.

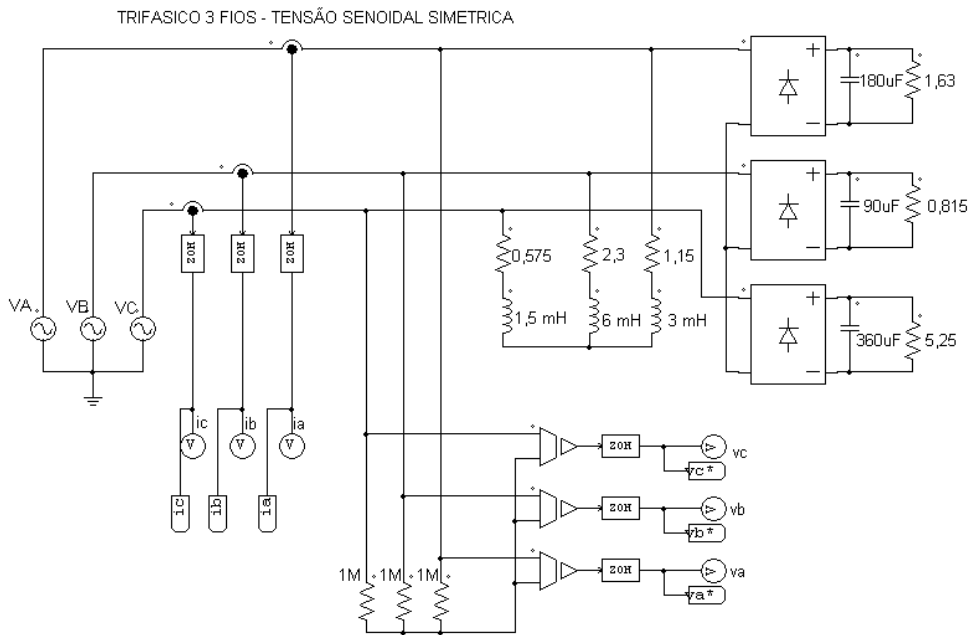


Figura 4.52 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga mista (RL + não linear) desbalanceada.

A Figura 4.53 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes da carga. Com relação às correntes, verifica-se que as mesmas estão deformadas, devido a não linearidade dos retificadores monofásicos, e têm amplitudes diferentes nas três fases, visto que se trata de um circuito desbalanceado. A Figura 4.54 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes ativas balanceadas nas três fases.

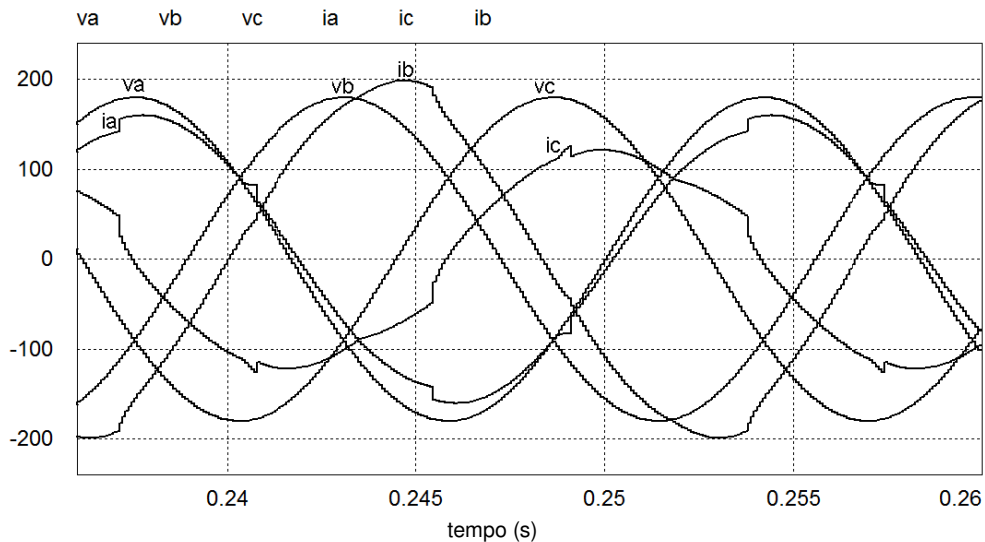


Figura 4.53 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga mista desbalanceada.

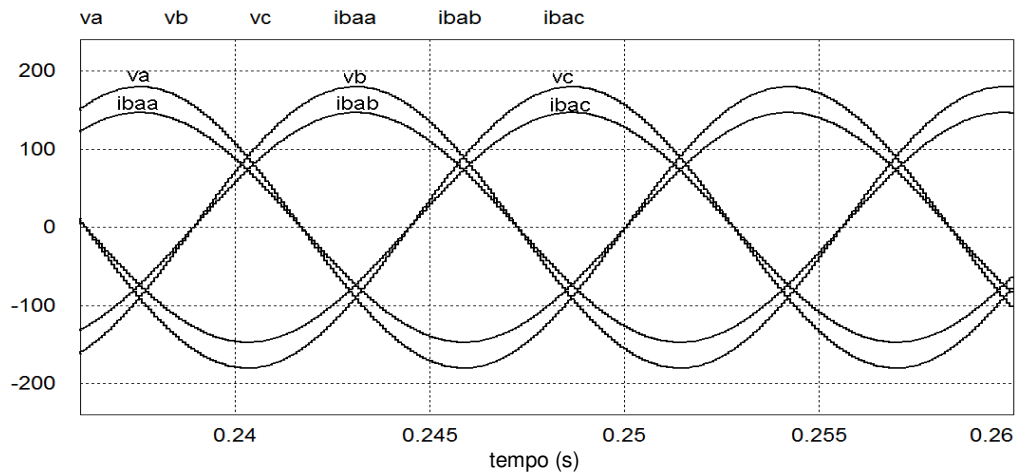


Figura 4.54 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga mista desbalanceada.

A Figura 4.55 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas. Observa-se que tais componentes (ativas e reativas) são senoidais e equilibradas, como esperado em função das tensões impostas (3.28 e (3.29). Além disto, pela análise do instante igual a 0,25 segundos na simulação, pode-se observar que as parcela ativa da fase “a” é ortogonal a parcela reativa da mesma fase.

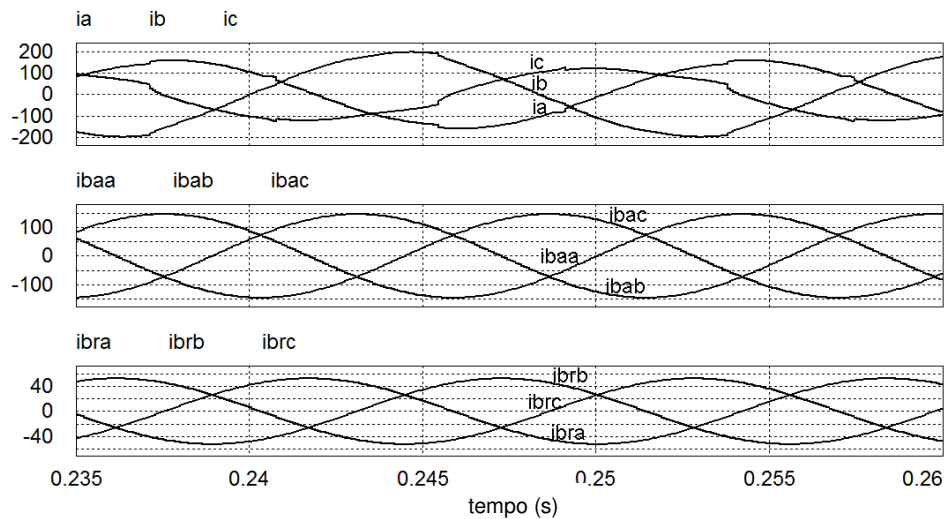


Figura 4.55 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga mista desbalanceada.

A Figura 4.56 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas desbalanceadas e correntes nulas nas três fases. Observa-se a presença significativa de correntes desbalanceadas, por tratar-se de um circuito com carga desbalanceada. Vale destacar novamente, a ortogonalidade entre as correntes ativas e reativas desbalanceadas (observar a fase “a” no instante 0,15 segundos). Além disto, verifica-se também a ocorrência de corrente nula, provocada pelo comportamento não linear dos retificadores.

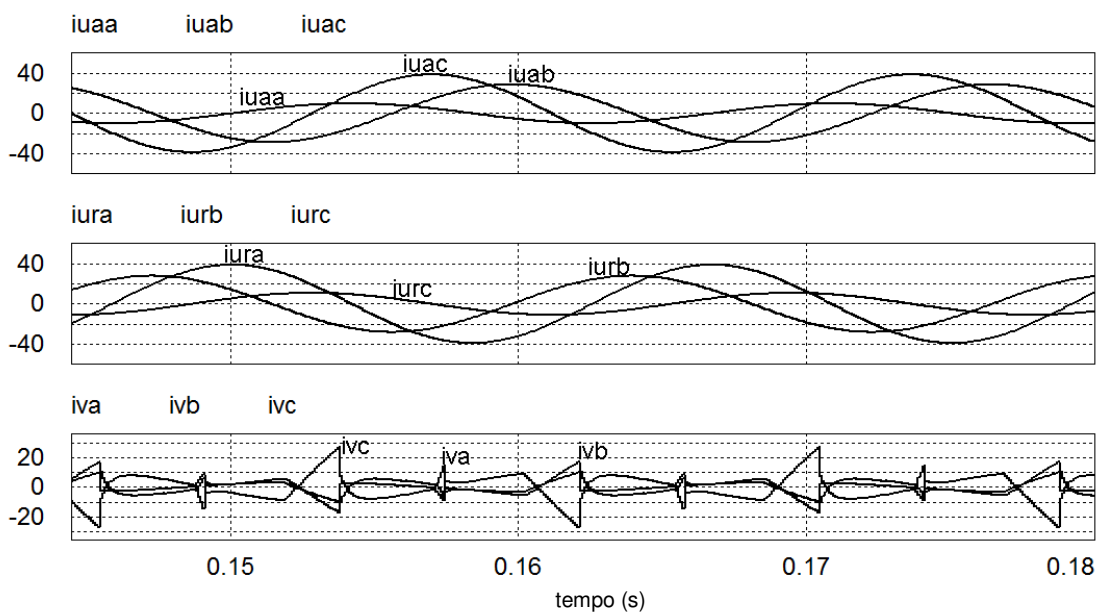


Figura 4.56 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga mista desbalanceada.

A Tabela 4.13 apresenta os valores calculados para este caso. Uma vez que se trata de um circuito com carga trifásica não linear e desbalanceada, observa-se a existência de todas as parcelas de corrente e potência propostas pela TPC. Observa-se a presença de potência de desbalanço ativa (N_a) e reativa (N_r). Também vale destacar a diferença entre os fatores de potência (λ) e (FP), o que demonstra a capacidade da TPC de representar a influência de não linearidades (V) e desbalanços (N) da carga polifásica, em termos de um fator de rendimento global (fator de potência).

Tabela 4.13 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga mista desbalanceada.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
110,47	136,23	89,83	104,21	104,21	104,21	37,47	37,47	36,47
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
6,89	20,40	27,42	27,71	19,70	7,69	3,74	5,57	8,64
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
44,88k	39,66k	2,42k	14,19k	10,82k	7,65k	7,65k	37,65	
Fatores								
λ	FP	THD_v	THD_{i_a}	THD_{i_b}	THD_{i_c}			
0,910	0,941	0,8%	3,46%	4,20%	9,84%			

4.3.4. Carga Resistiva Desbalanceada

A Figura 4.57 mostra o circuito utilizado para simular este caso. A carga resistiva desbalanceada (em Y) foi configurada com 3 resistores de 1,62 Ω , 0,81 Ω e 3,24 Ω .

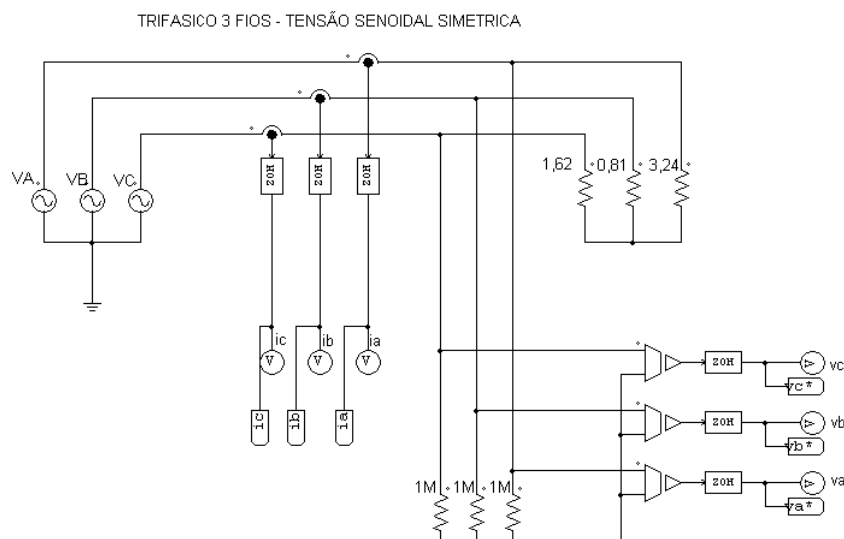


Figura 4.57 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva desbalanceada.

A Figura 4.58 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente na carga. As tensões são impostas senoidais, simétricas e equilibradas, já as correntes são senoidais, mas assimétricas em fase e desequilibradas em amplitude. Vale destacar que as correntes não estão em fase com as respectivas tensões de fase. Isto ocorre porque as tensões medidas para o ponto virtual representam as tensões de fase-terra na fonte, mas as tensões realmente impostas na carga são afetadas pelo desbalanço na carga. Isto significa que existe uma diferença de potencial entre a tensão do centro da carga em Y e a tensão no centro das fontes em Y.

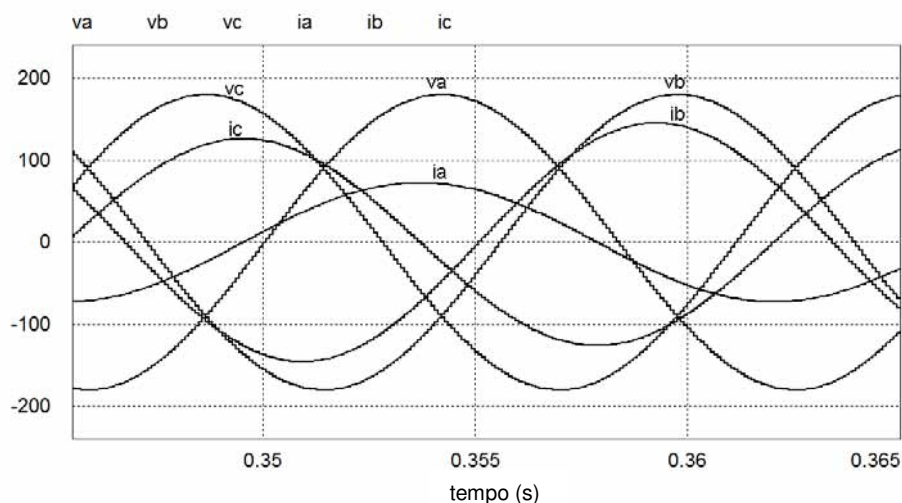


Figura 4.58 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga resistiva desbalanceada.

A Figura 4.59 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes ativas balanceadas da carga. Observa-se que as correntes ativas balanceadas são senoidais, iguais nas três fases e estão em fase com a tensão (3.28).

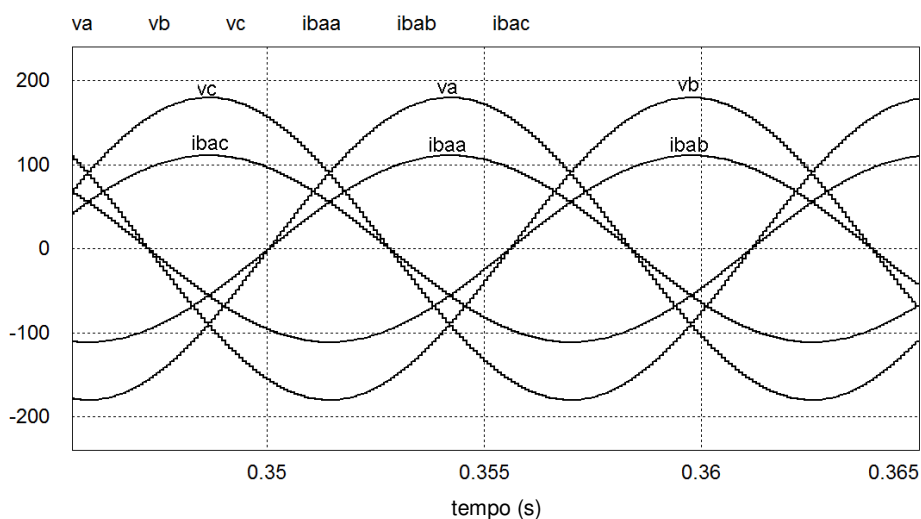


Figura 4.59 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga resistiva desbalanceada.

A Figura 4.60 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas. Observa-se a ausência de correntes reativas balanceadas. Já a Figura 4.61 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas desbalanceadas. Nesta figura, pode-se observar a presença tanto de correntes ativas, quanto de reativas desbalanceadas, devido ao desequilíbrio da carga.

Conforme mencionado anteriormente, a diferença de potencial entre o centro dos Y da carga e da fonte é refletido como uma diferença de fase entre a tensão e corrente no ponto de acoplamento comum, o que conseqüentemente, é interpretado através da TPC como presença de corrente reativa desbalanceada. Verifica-se também pela Figura 4.61, a ausência de potência nula devido tratar-se de um circuito linear resistivo, alimentado com tensão senoidal.

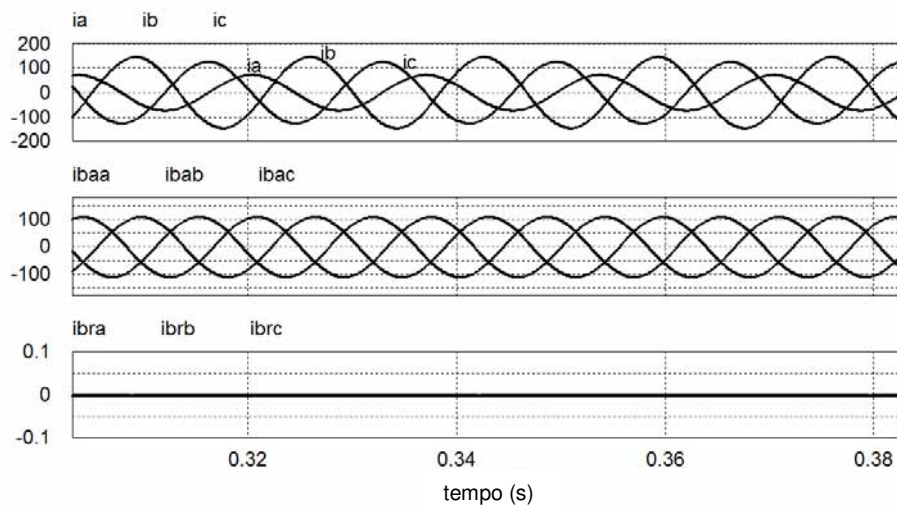


Figura 4.60 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga resistiva desbalanceada.

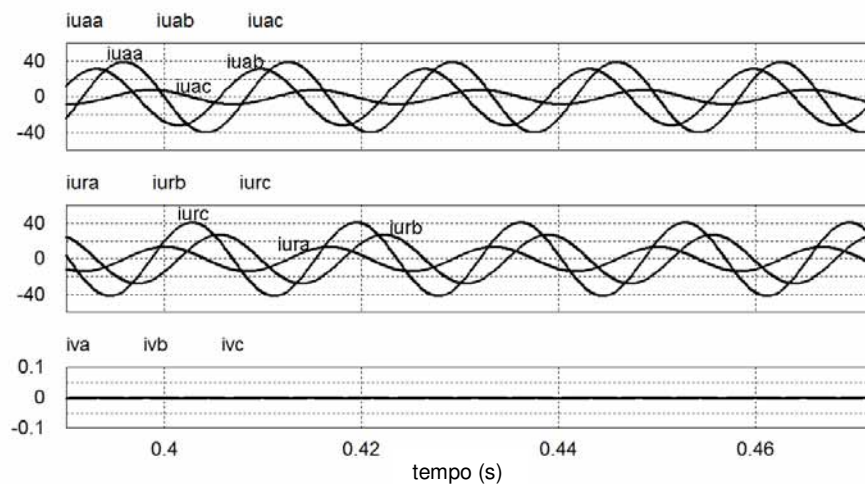


Figura 4.61 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga resistiva desbalanceada.

Conforme esperado pelas figuras anteriores, a Tabela 4.14 indica que não obstante a presença de correntes reativas desbalanceadas, a energia e a potência reativa resultam zero. Tais correntes influenciam apenas a potência de desbalanço (N_r). Assim, se a análise do fator de potência for feita com relação apenas as potências ativa e reativa, o FP indicaria fator de potência unitário.

No entanto, considerando a análise de λ , observa-se que este leva em consideração a influência do desbalanço da carga (N), sendo menor do que 1. Assim fica comprovado que a definição de λ unitário, para circuitos polifásicos, representa apenas a condição de carga resistiva balanceada.

Tabela 4.14 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva desbalanceada.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
51,85	102,52	88,34	79,14	78,54	78,00	0	0	0
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
28,26	22,44	5,57	9,64	19,34	29,65	0	0	0
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
32,07k	30,00k	0	0	11,33k	8,01k	8,01k	0	
Fatores								
λ	FP	THD_v	THD_{i_a}	THD_{i_b}	THD_{i_c}			
0,935	1	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%			

4.3.5. Carga Resistiva-Indutiva (RL) desbalanceada

Para a modelagem desta carga RL balanceada foram utilizados resistores de 0,575 Ω , 2,3 Ω e 1,15 Ω e indutores de 1,5mH, 6mH e 3mH. A Figura 4.62 mostra o circuito utilizado para simular este caso.

TRIFASICO 3 FIOS - TENSÃO SENOIDAL SIMETRICA

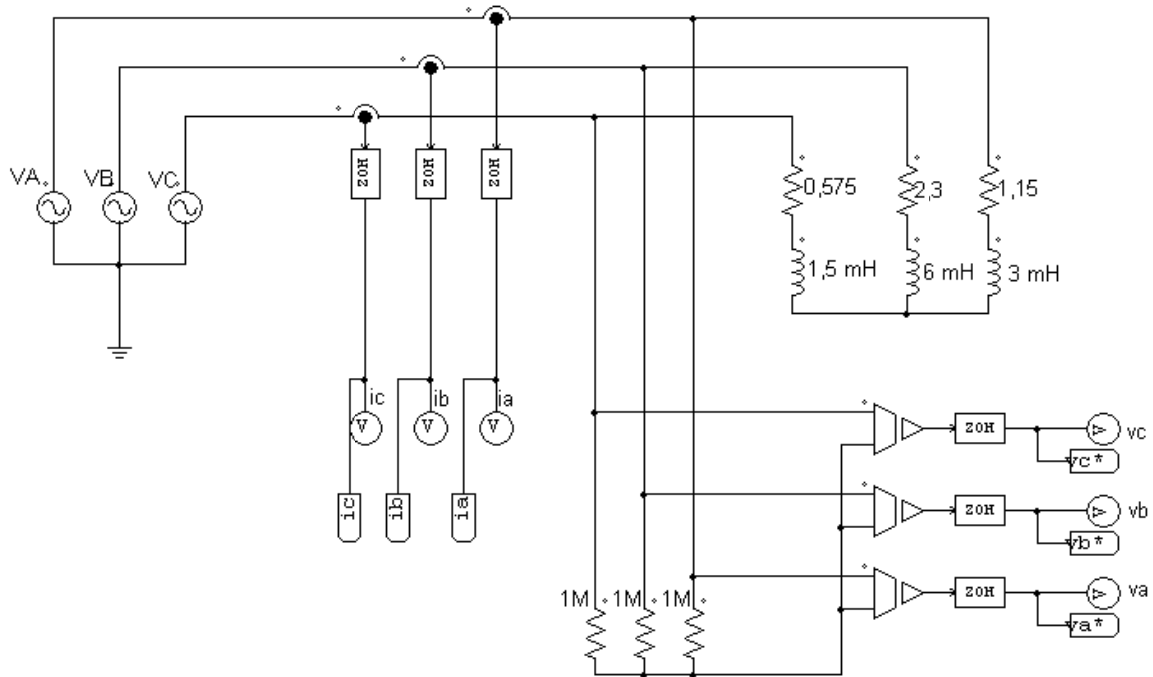


Figura 4.62 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva-indutiva (RL) desbalanceada.

A figura 4.63 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que as tensões e as correntes são senoidais, porém não estão em fase entre si. As correntes estão desbalanceadas, devido ao desequilíbrio da carga.

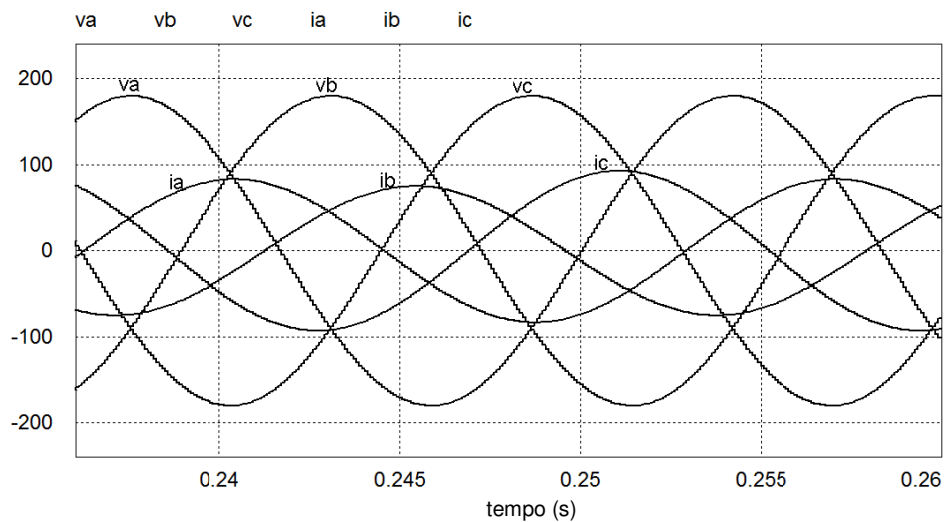


Figura 4.63 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga resistiva-indutiva desbalanceada.

A Figura 4.64 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas, devido à presença de resistores e indutores no circuito.

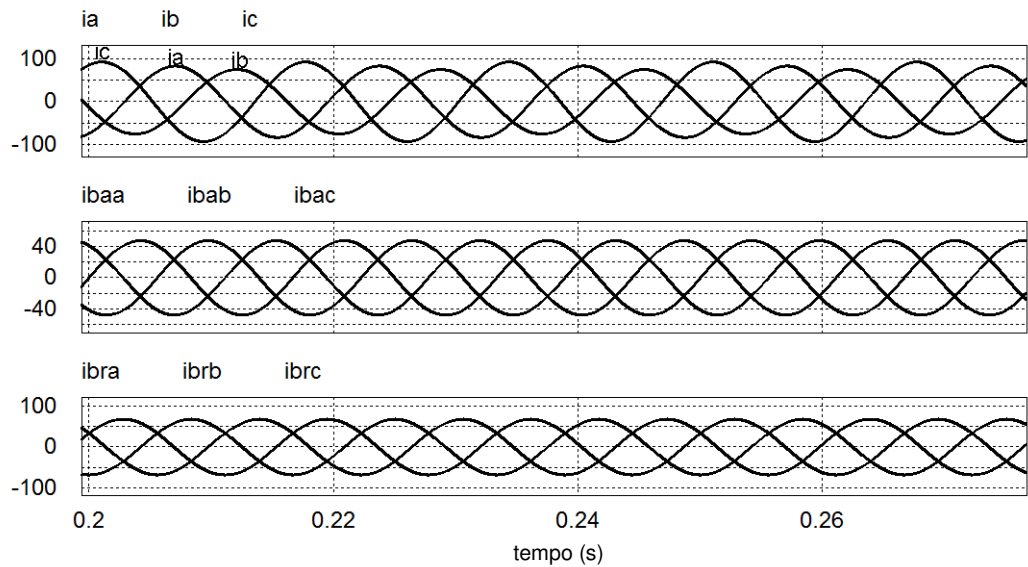


Figura 4.64 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga resistiva-indutiva desbalanceada.

A Figura 4.65 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas, devido ao desbalanço da carga. Verifica-se também ausência de potência nula devido tratar-se de um circuito linear RL, alimentado com tensão senoidal.

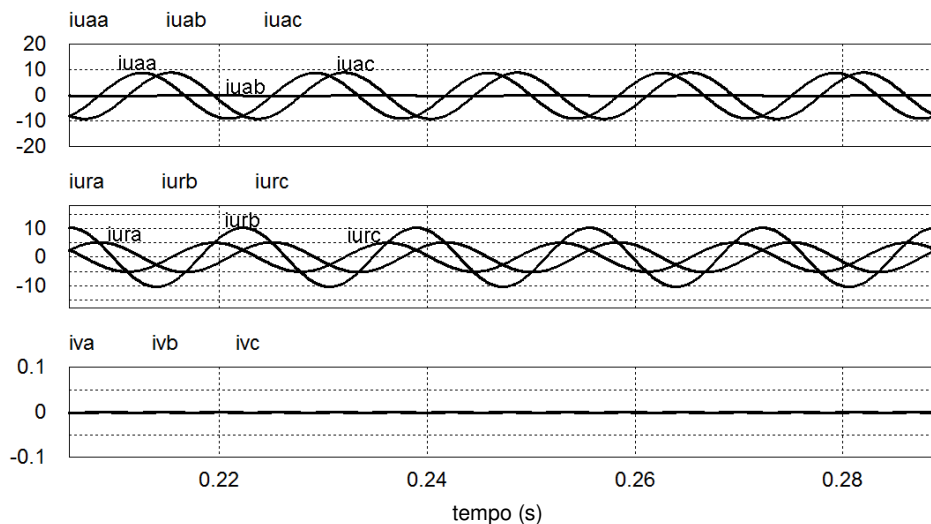


Figura 4.65 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga resistiva-indutiva desbalanceada.

A Tabela 4.15 indica a presença de potência ativa, reativa e de desbalanço, por se tratar de um circuito RL desbalanceado.

Tabela 4.15 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva-indutiva desbalanceada.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
60,20	53,12	63,27	33,93	33,92	33,94	48,35	48,28	48,20
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
6,33	1,01	6,35	3,70	7,32	3,62	0	0	0
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
22,68k	12,96k	0	18,38k	2,79k	1,97k	1,97k	48,87	
Fatores								
λ	FP	$THDv$	$THDi_a$	$THDi_b$	$THDi_c$			
0,571	0,576	0,8%	0,8%	0,8%	0,8%			

4.3.6. Carga Não Linear Desbalanceada de 30 kVA

A figura 4.67 apresenta o circuito utilizado para simular este caso, com os respectivos valores de impedância.

A figura 4.68 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que as tensões são senoidais e equilibradas, porém as correntes estão distorcidas e desbalanceadas, visto se tratar de uma carga não linear desbalanceada

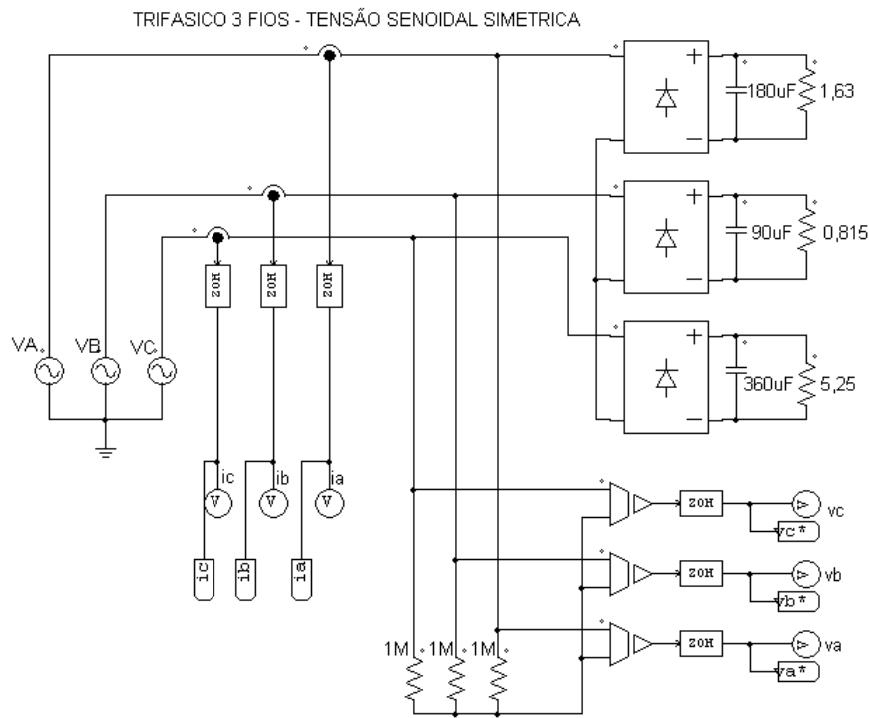


Figura 4.66 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga não linear desbalanceada..

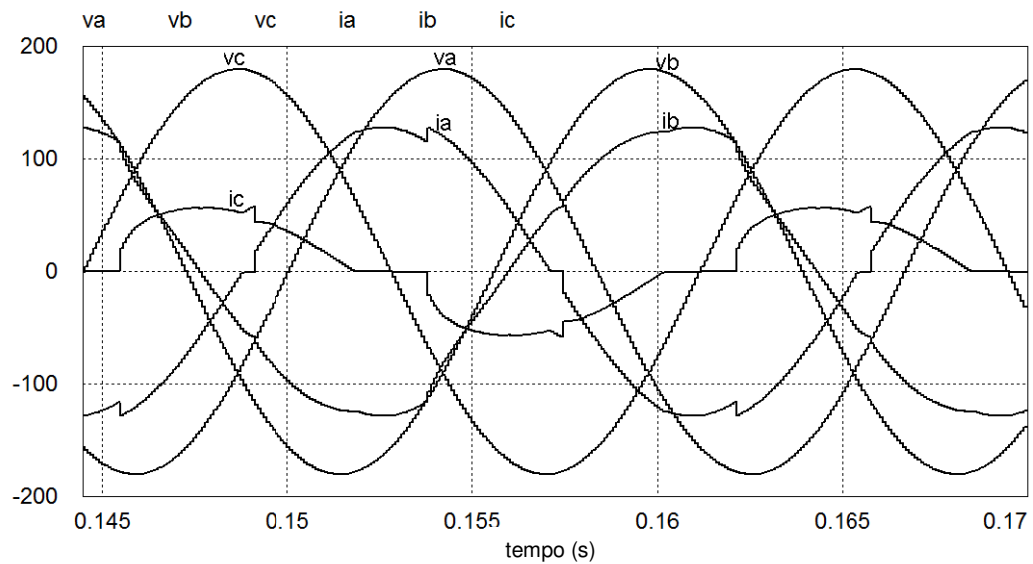


Figura 4.67 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga não linear desbalanceada.

A Figura 4.68 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes ativas balanceadas da carga.

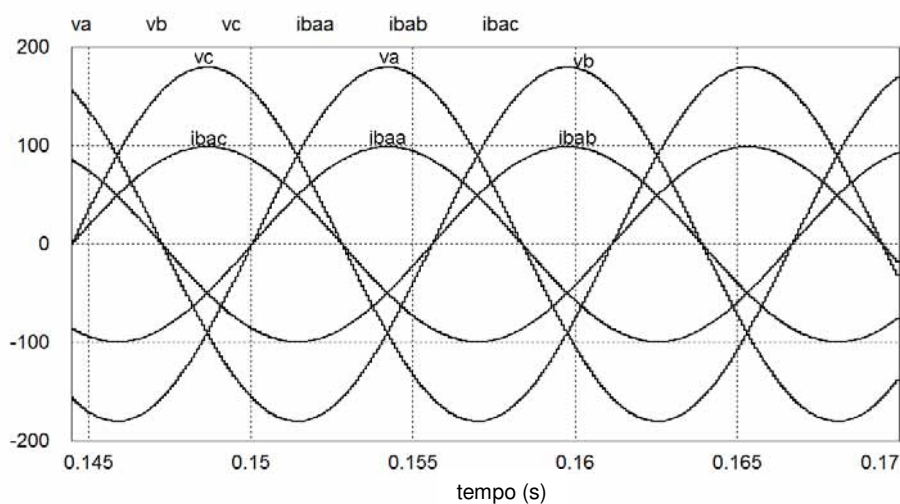


Figura 4.68 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga não linear desbalanceada.

A Figura 4.69 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas.

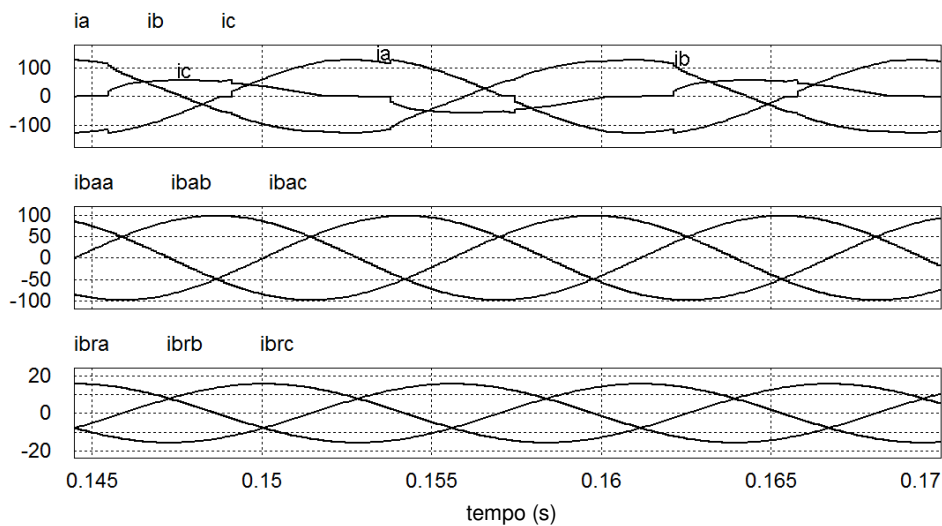


Figura 4.69 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga não linear desbalanceada.

A Figura 4.70 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas desbalanceadas nas três fases, bem como a presença de corrente nula, devido a não linearidade dos retificadores.

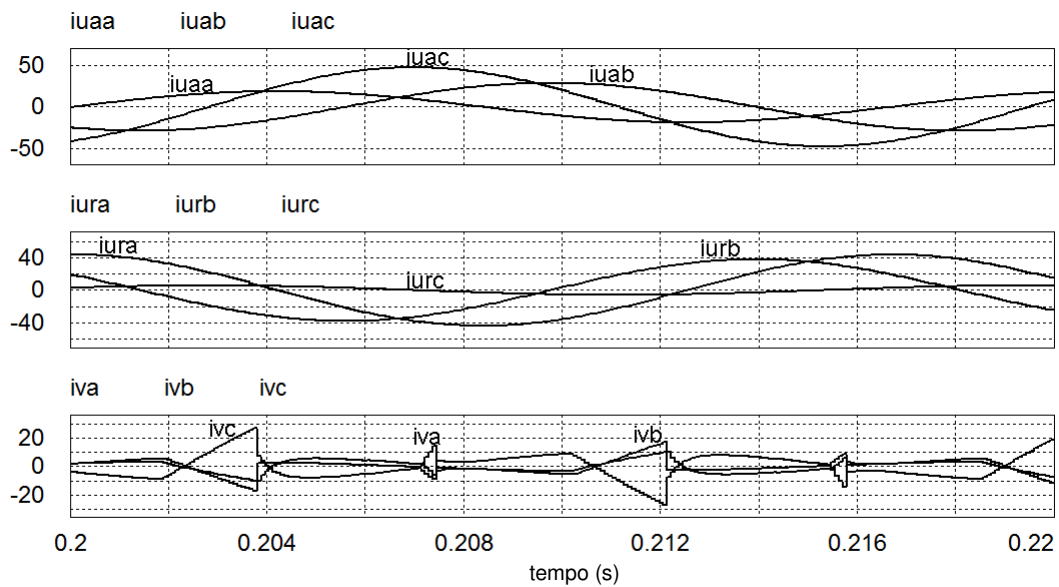


Figura 4.70 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nula na carga não linear desbalanceada.

Tabela 4.16 apresenta os valores eficazes das correntes nas três fases, as parcelas de potências, os fatores de potência e as distorções harmônicas totais de tensão e corrente obtidas na simulação deste caso.

Observa-se a presença de todas as componentes da decomposição das correntes da TPC, ativas e reativas balanceadas e desbalanceadas nas três fases. Verifica-se também a ocorrência de todas as potências da Teoria TPC, potência ativa, reativa, de desbalanço ativa e reativa e nula.

Tabela 4.16 - Trifásico 3 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear desbalanceada.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
93,01	92,24	37,85	70,15	70,15	70,15	11,11	11,11	11,11
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
13,10	20,56	33,80	31,58	26,88	4,10	3,75	5,56	8,63
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
30,09k	26,72k	2,42k	42,29k	12,95k	9,15k	9,15k	-11,21	
Fatores								
λ	FP	THD_v	THD_{i_a}	THD_{i_b}	THD_{i_c}			
0,887	0,534	0,8%	4,1%	6,1%	23,5%			

4.4. Trifásico 4 condutores com tensão senoidal equilibrada e simétrica (sem impedância de rede).

Nas próximas seções serão analisados circuitos trifásicos com condutor de retorno (neutro), desconsiderando-se o efeito da impedância de rede, de forma que os efeitos da decomposição da TPC sejam analisados no contexto apenas da corrente da carga e da presença de retorno.

Destaca-se que no caso da existência de condutor de retorno, as tensões de fase são medidas com relação ao mesmo e não mais com relação a um ponto virtual como no caso dos circuitos com apenas três condutores.

4.4.1. Carga Resistiva Desbalanceada

A Figura 4.71 mostra o circuito utilizado para simular a carga resistiva desbalanceada. Observar a presença do condutor de retorno, conectando o centro do Y da carga com o centro do Y da fonte.

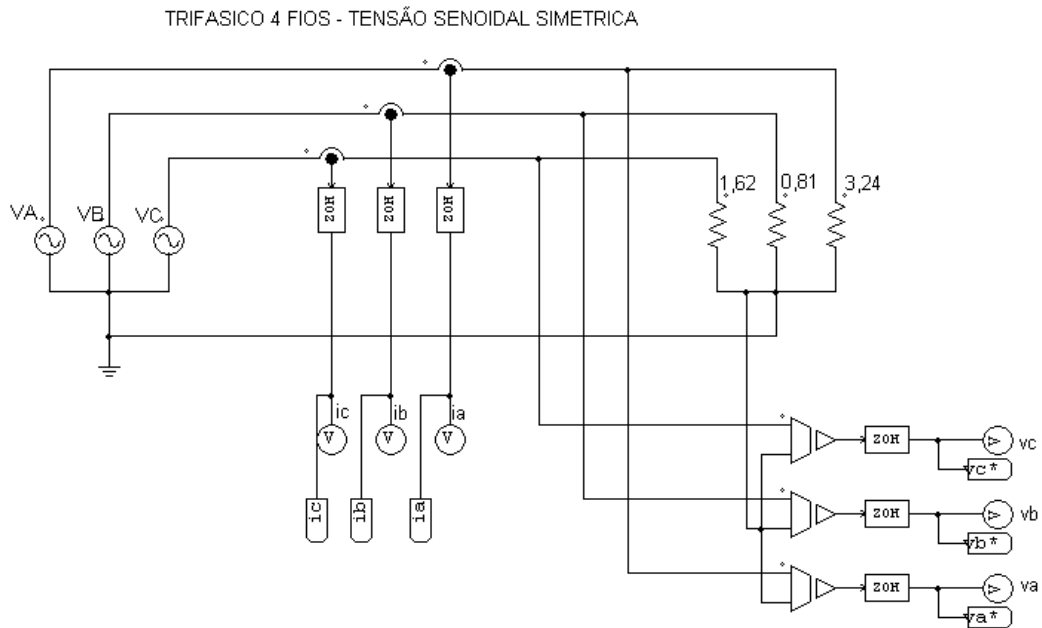


Figura 4.71 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga resistiva desbalanceada.

A Figura 4.72 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que apesar de desequilibradas em amplitude, neste caso, as correntes estão em fase com as tensões medidas. Isto se deve ao fato de que neste caso, a tensão medida com relação ao condutor de retorno representa exatamente as tensões sobre as impedâncias por fase da carga.

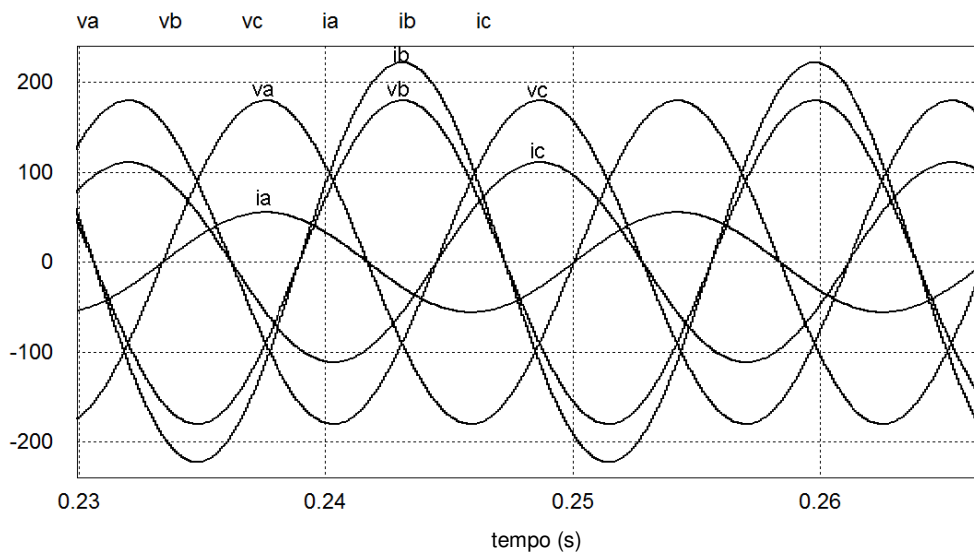


Figura 4.72 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga resistiva desbalanceada.

A Figura 4.73 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas. Observa-se a ausência de correntes reativas, visto se tratar de um circuito puramente resistivo, com o ponto central da carga em Y conectado ao da fonte (diferença de potencial nula).

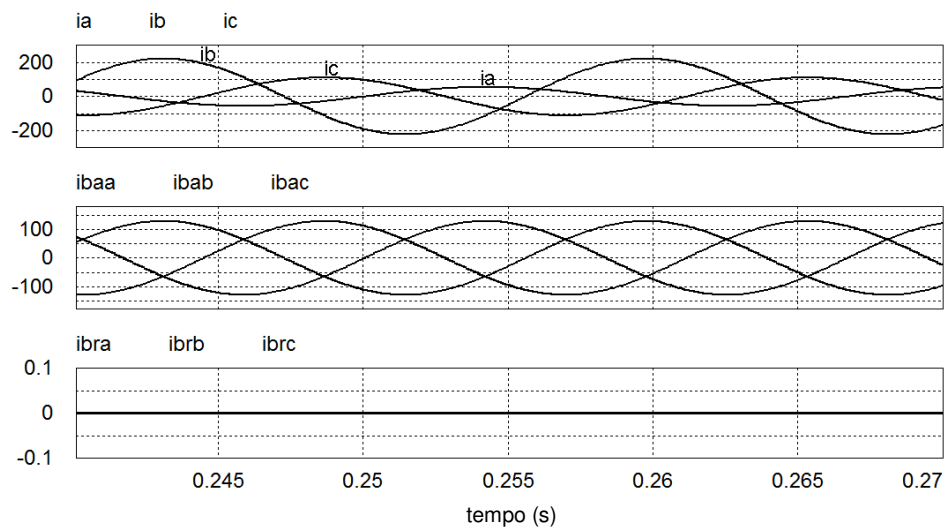


Figura 4.73 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga resistiva desbalanceada.

A Figura 4.74 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas desbalanceadas. Diferentemente do caso com três condutores, observa-se apenas a presença de correntes ativas desbalanceadas, uma vez que não há defasagem entre as tensões e correntes na carga.

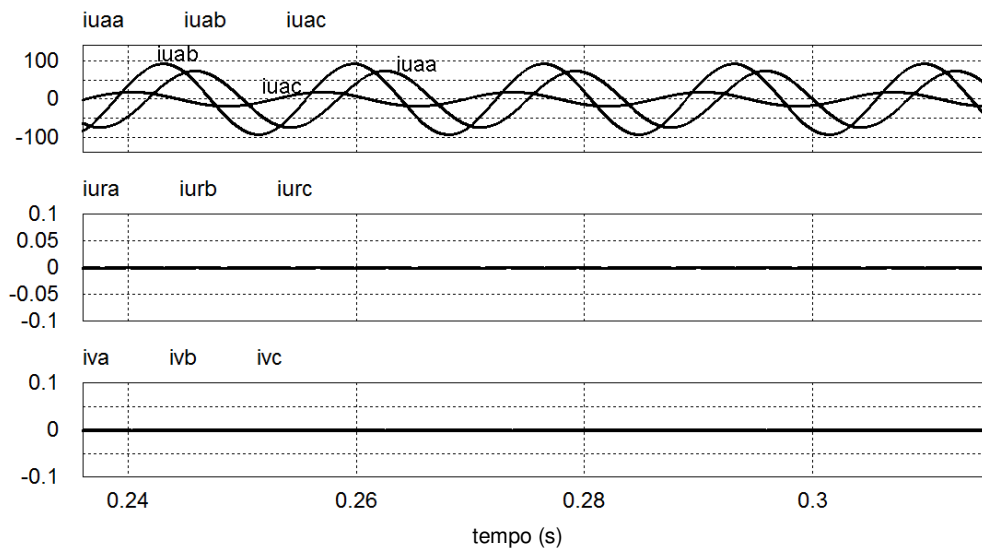


Figura 4.74 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga resistiva desbalanceada.

A Tabela 4.17 indica a presença apenas de correntes e potências ativas balanceadas e de desbalanço.

A diferença entre os fatores de potência indica que na nova definição da TPC, (λ) incorpora os efeitos do desbalanço da carga resistiva no cálculo do fator de potência total. Observar que a diferença pode ser bastante significativa, mesmo em um caso linear.

Tabela 4.17 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga resistiva desbalanceada.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
39,13	157,73	78,56	91,77	91,77	91,77	0	0	0
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
52,18	65,72	13,09	0	0	0	0	0	0
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
39,68k	34,99k	0	0	18,70 k	0	18,70 k	0	
Fatores								
λ	FP	$THDv$	$THDi_a$	$THDi_b$	$THDi_c$			
0,881	1	8%	8%	8%	8%			

4.4.2. Carga Não Linear Desbalanceada de 30 kVA

O circuito simulado pode ser visualizado na Figura 4.75.

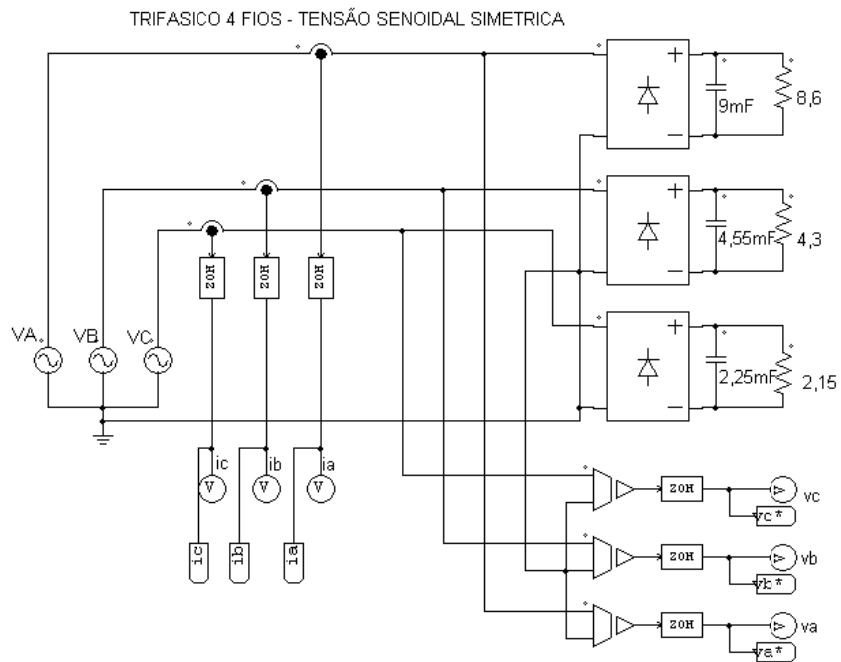


Figura 4.75 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga não linear desbalanceada.

A Figura 4.76 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que as tensões são senoidais e equilibradas, porém as correntes estão distorcidas e desbalanceadas por se tratar de uma carga totalmente não linear e desbalanceada.

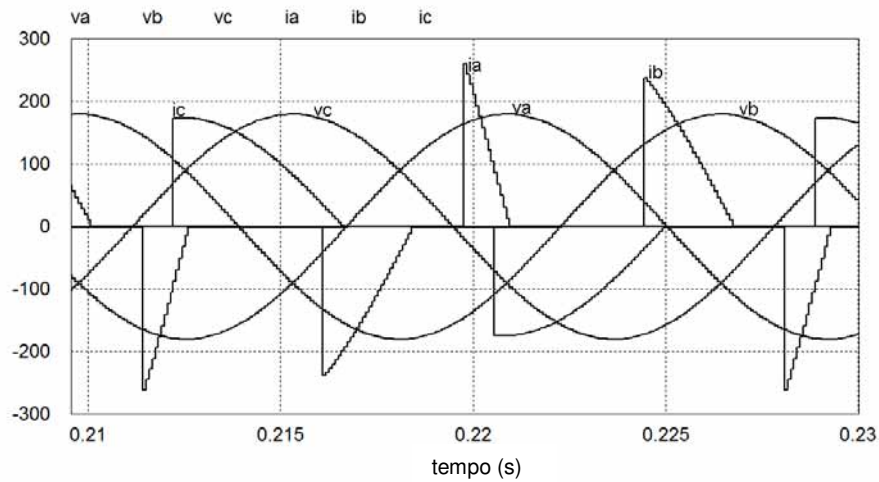


Figura 4.76 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes na carga não linear desbalanceada.

A Figura 4.77 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas.

Observa-se que as correntes balanceadas são senoidais, equilibradas e simétricas, uma vez que dependem da condutância e susceptância equivalente e da tensão. A Figura 4.78 mostra as formas de onda das correntes ativas e reativas desbalanceadas, bem como da componente nula, a qual é bastante significativa para este caso.

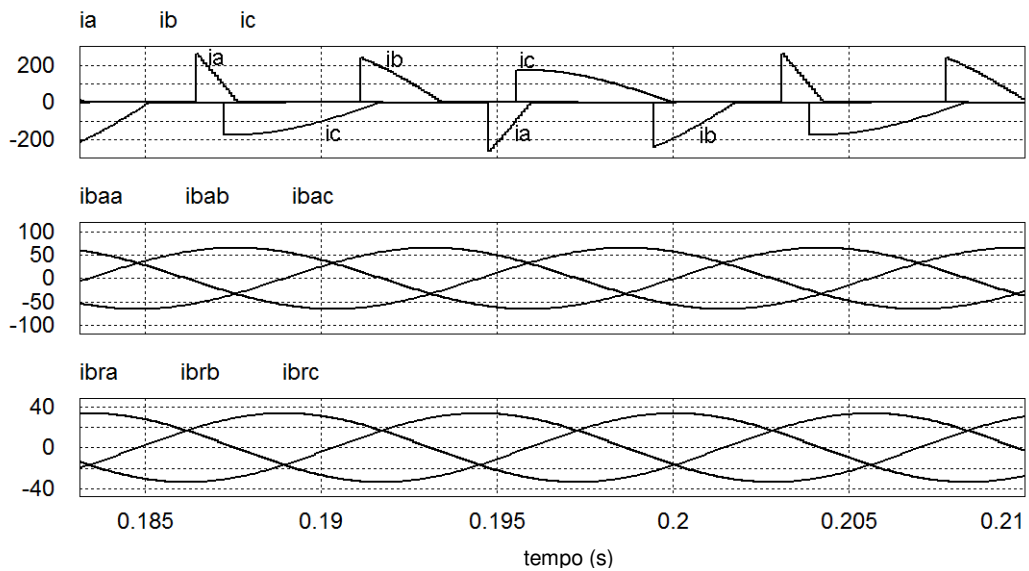


Figura 4.77 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga não linear desbalanceada.

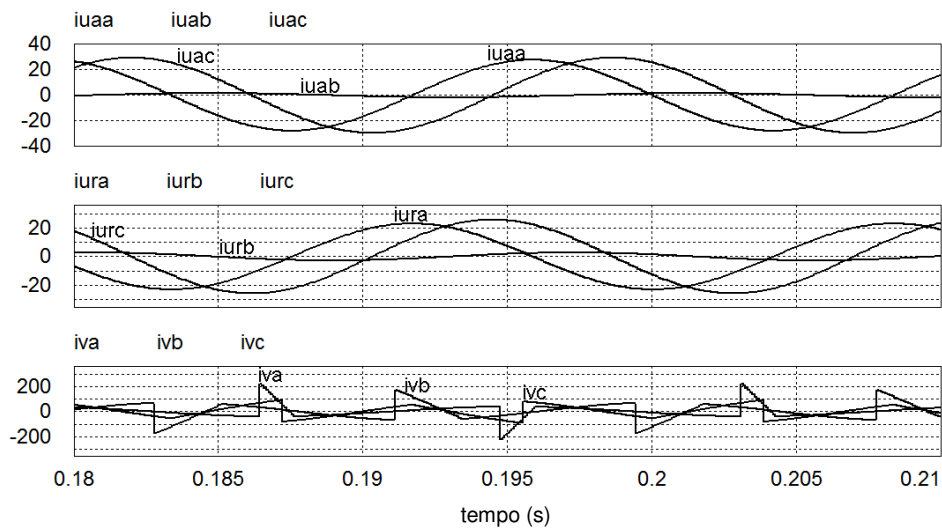


Figura 4.78 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga não linear desbalanceada.

Por se tratar de um caso bastante complexo, a Tabela 4.18 indica a presença de correntes e potências ativa, reativa, nula e de desbalanço. Destaca-se a influência das potências nulas e de desbalanço no fator de potência total (λ) e conseqüentemente, na interpretação destes fenômenos do ponto de vista da eficiência global do circuito elétrico polifásico.

Tabela 4.18 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga não linear desbalanceada.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
64,16	78,17	92,45	46,84	46,84	46,84	24,46	24,48	24,46
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
19,62	2,42	20,70	17,12	4,33	18,33	57,10	59,79	47,14
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
30,20k	17,88k	20,98k	9,347k	8,44k	5,61k	6,31k	-24,12	
Fatores								
λ	FP	$THDv$	$THDi_a$	$THDi_b$	$THDi_c$			
0,595	0,886	0,8%	190%	118%	59,32%			

4.4.3. Caso Típico Residencial - Cargas Bifásicas e Monofásicas

Para a modelagem de um circuito tipicamente residencial foi considerado um sistema trifásico com quatro condutores, composto por cargas que representassem alguns tipos de eletrodomésticos residenciais, tais como:

- carga resistiva bifásica de 5,4 kW representando um chuveiro elétrico;
- carga resistiva-indutiva monofásica de 500 W, com fator de potência de 0,8 representando uma geladeira;
- retificador monofásico de 500 VA com fator de crista de 3, representando um computador;
- carga resistiva monofásica de 400 W, representando as lâmpadas incandescentes;
- retificador monofásico de 100 VA com fator de crista de 3, representando as demais cargas não lineares (radio relógio, lâmpadas fluorescentes compactas, etc.);
- retificador bifásico de 1200 VA com fator de crista de 3 representando um microondas.

Os valores foram definidos com base em dados de catálogos de fabricantes.

A figura 4.80 mostra o circuito utilizado para simular este caso.

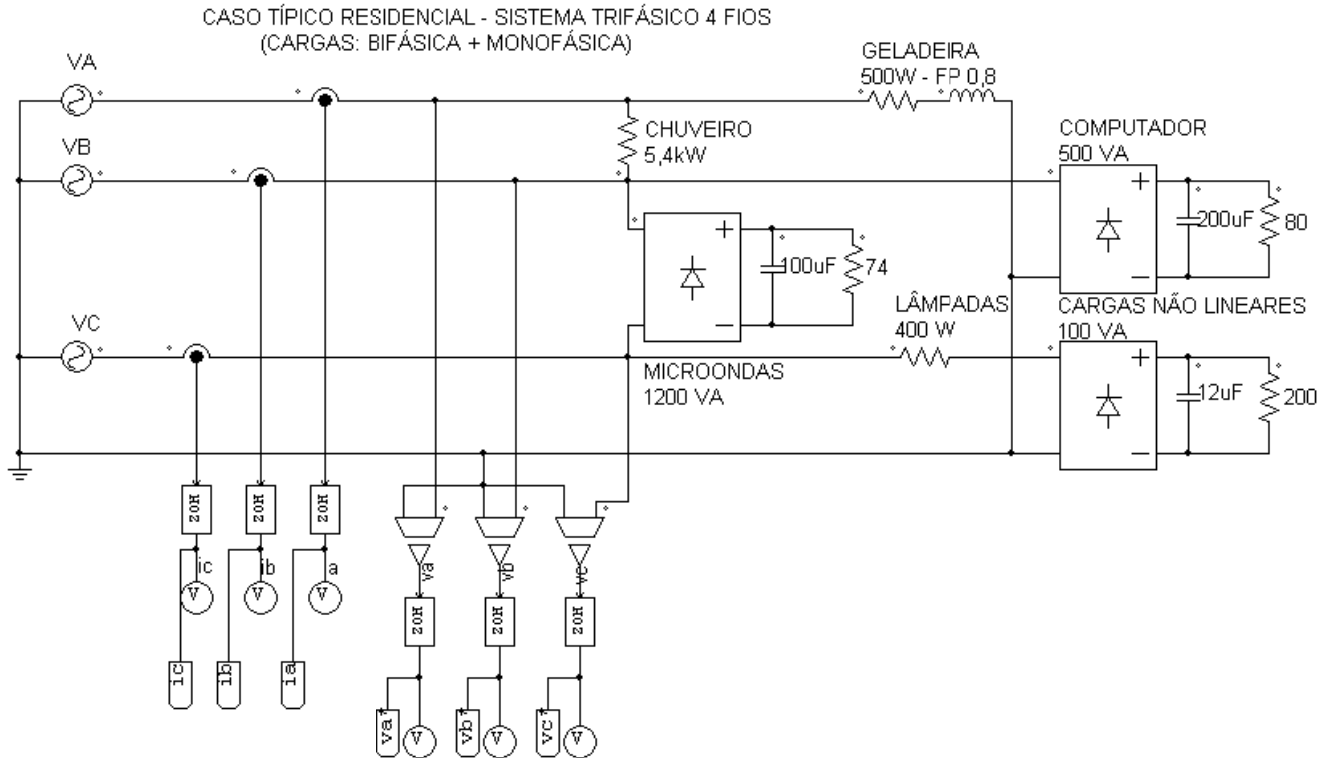


Figura 4.79 - Trifásico 4 fios com tensão senoidal sem impedância de linha: carga mista - carga típica residencial.

A figura 4.81 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes da carga. A corrente está multiplicada por 10 (dez) para melhorar sua visualização. Em relação às tensões observa-se que são senoidais, simétricas e equilibradas. Já as correntes totais, com exceção da fase A, estão desequilibradas, assimétricas e distorcidas, devido aos desequilíbrios das diferentes cargas e não linearidade dos retificadores.

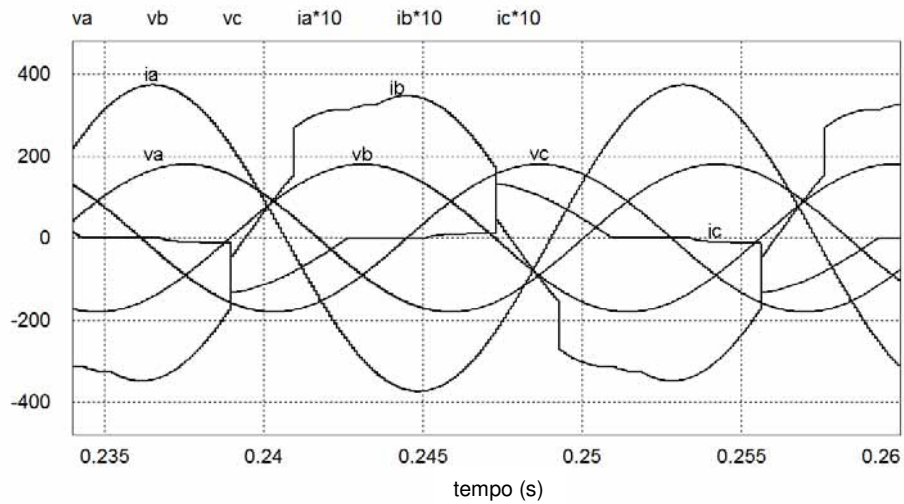


Figura 4.80 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: tensões e correntes (multiplicadas por 10) na carga típica residencial.

A figura 4.82 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente ativa balanceada da carga. A corrente ativa balanceada está multiplicada por 10 para melhorar sua visualização. Observar que as correntes ativas balanceadas estão em fase com a tensão, são senoidais e estão equilibradas, conforme esperado através da equação (3.28).

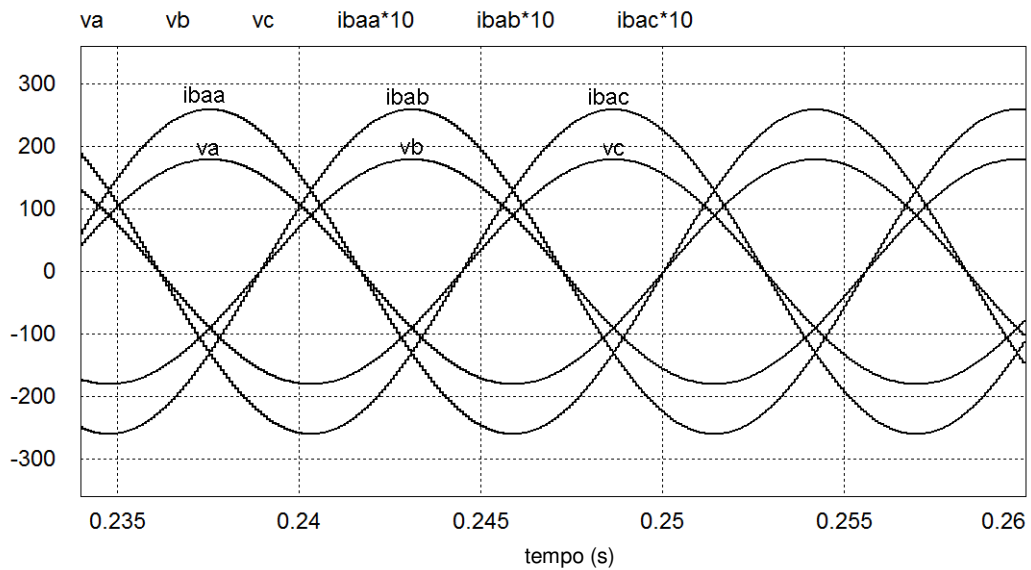


Figura 4.81 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: tensões e correntes (multiplicadas por 10) ativas balanceadas na carga típica residencial.

A figura 4.83 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas. A corrente total nas fases a e b tem amplitude maior em relação a c, devido a alta potência da carga resistiva que representa o chuveiro (fase ab). Já nas fases b e c as mesmas encontram-se distorcidas devido à influência da não linearidade dos retificadores das cargas.

As correntes balanceadas são senoidais e estão equilibradas. Observa-se que as correntes ativas balanceadas se apresentam ortogonais em relação às correntes reativas balanceadas (vide fase “b” no instante $t=0,185$ segundos).

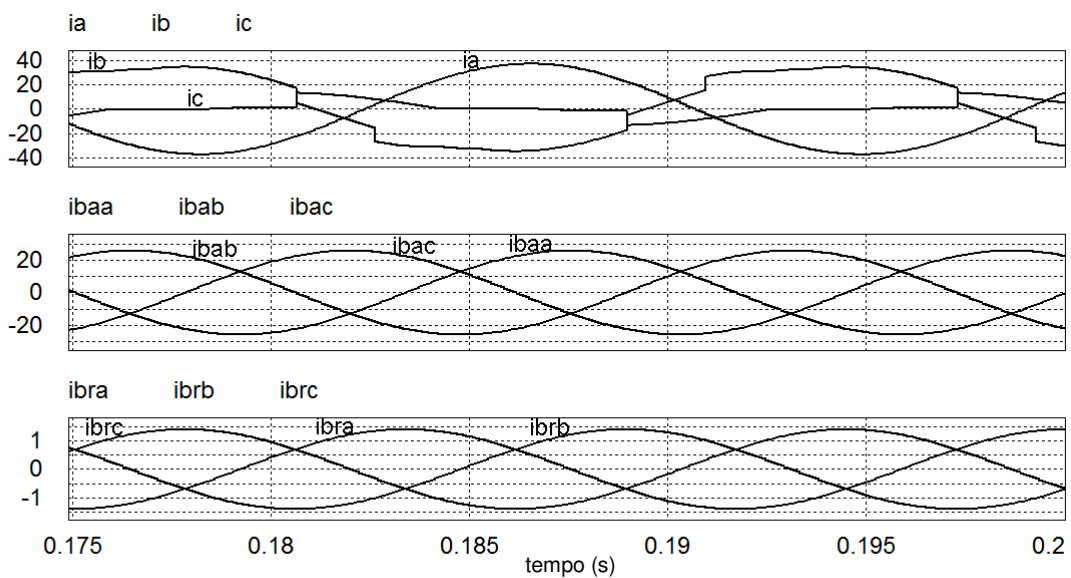


Figura 4.82 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga típica residencial.

A figura 4.84 mostra as formas de ondas decompostas em corrente ativa desbalanceada (3.30), corrente reativa desbalanceada (3.31) e corrente nula (3.32).

Com relação às correntes nulas, observam-se uma pequena parcela nas fases b e c causada pelas não linearidades das cargas, porém praticamente nula na fase a, devido a predominância de cargas lineares nesta fase.

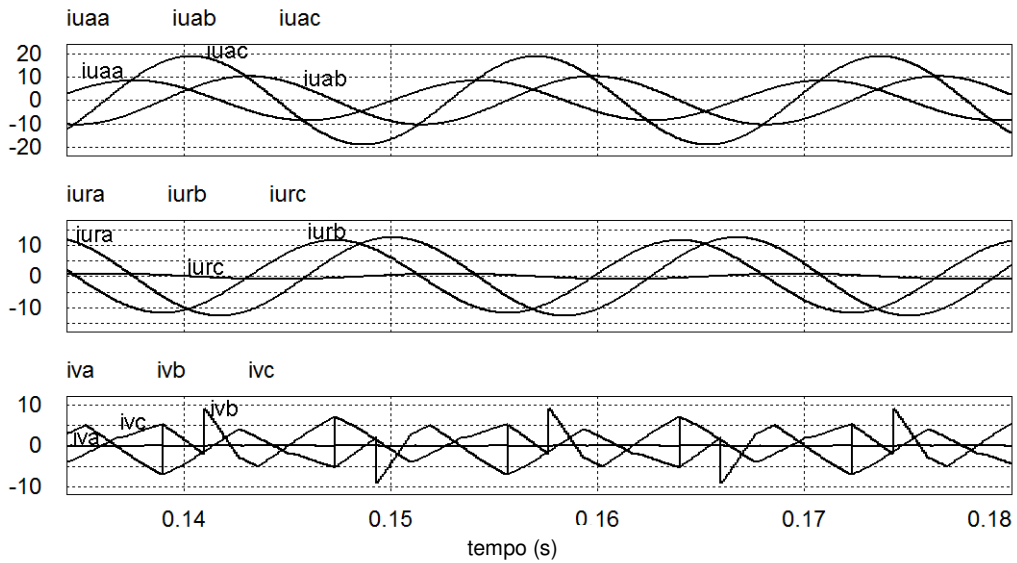


Figura 4.83 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga típica residencial.

A tabela 4.19 indica a presença de todas as parcelas de corrente e potência neste circuito. Vale destacar que neste caso, as correntes reativas balanceadas são pouco significativas, o que resulta uma potência (e energia) reativa pequena e um fator de potência (FP) praticamente unitário.

Por outro lado, a influência da potência nula e da potência de desbalanço é interpretada pelo fator de potência total (λ), o qual apresenta um valor bem menor do que (FP). Vale destacar que a influência da carga RL monofásica (geladeira) é contabilizada na potência reativa de desbalanço (N_r) e não na reativa total (Q).

Portanto, a análise deste caso indica que se o fator de potência fosse calculado apenas considerando a influência da potência reativa, o circuito da carga (residência) seria visto como de fator de potência praticamente unitário. No entanto, considerando os efeitos dos desbalanços entre fases, bem como as cargas não lineares, o fator de potência total (λ) indica um circuito com eficiência reduzida para em torno de 0,83.

Tabela 4.19 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e sem impedância de linha: valores eficazes das correntes, parcelas de potência, fatores de potência e distorções harmônicas totais na carga típica residencial.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
26,40	27,02	5,94	18,37	18,37	18,37	0,99	0,99	0,99
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
6,09	7,35	13,45	8,94	8,29	0,64	0,12	3,86	3,33
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
8,43k	7,01k	1,12 k	378,86	4,52k	2,69k	3,63k	1,0	
Fatores								
λ	FP	$THDv$	$THDi_a$	$THDi_b$	$THDi_c$			
0,831	0,999	0,8%	14,4 %	51,6%	67,5 %			

4.5. Trifásico 4 condutores com tensão desequilibrada e assimétrica (com impedância de rede).

Neste caso, além da impedância da rede, as tensões também foram definidas distorcidas, desequilibradas e assimétricas, para representar um caso crítico de fornecimento fora dos padrões esperados de qualidade de tensão, conforme proposto em (Tenti, P, H K M Paredes, F P Marafao, e P Mattavelli 2010).

4.5.1. Carga Mista: Resistiva-Indutiva + Não Linear Desbalanceada

A Figura 4.84 ilustra o circuito simulado e analisado.

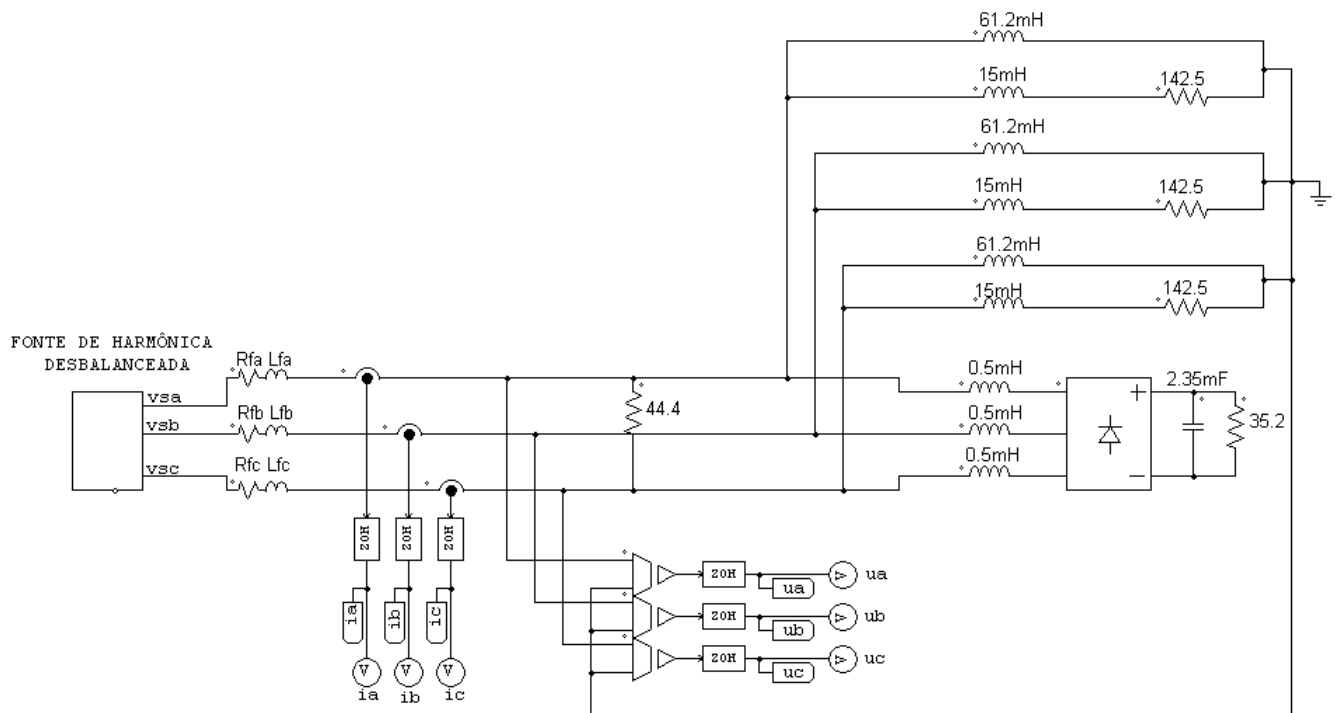


Figura 4.84 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: carga mista desbalanceada.

A Figura 4.85 mostra as formas de ondas da tensão e da corrente da carga. Observa-se que as tensões e as correntes (multiplicadas por 4 para facilitar a visualização) estão distorcidas e desbalanceadas, por se tratar de carga não linear e desbalanceada e de fonte não senoidal e desequilibrada.

A Figura 4.86 mostra as formas de ondas das tensões e das correntes ativas balanceadas da carga. Verifica-se que as correntes ativas balanceadas têm o mesmo formato das tensões, resultando distorcidas e desequilibradas, conforme esperado por (3.28).

Nesta figura fica evidente que o termo “balanceado” na TPC refere-se a um equivalente de carga balanceada e não especificamente, às formas de onda das correntes.

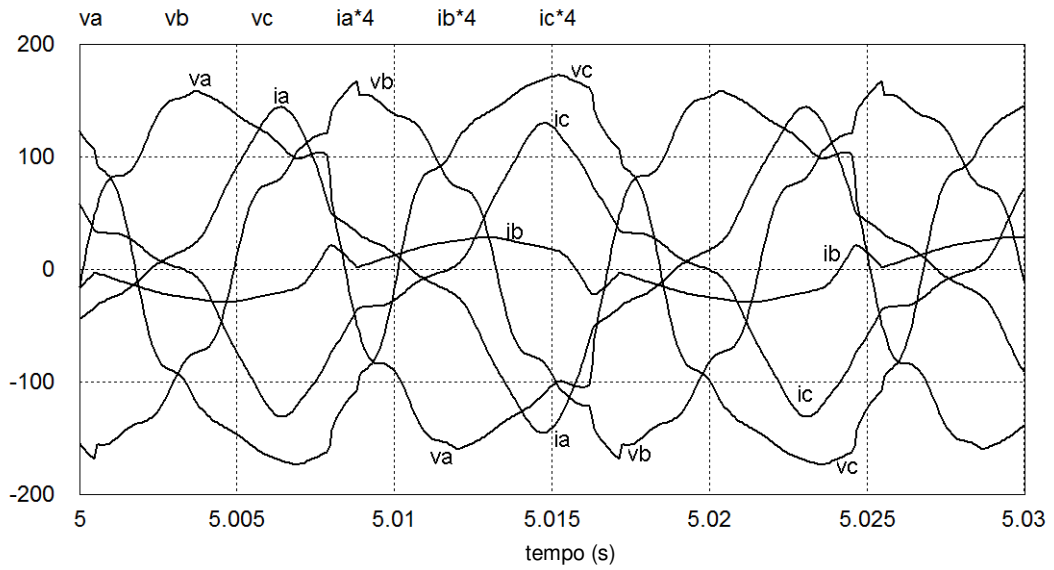


Figura 4.85 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: tensões e correntes na carga mista desbalanceada.

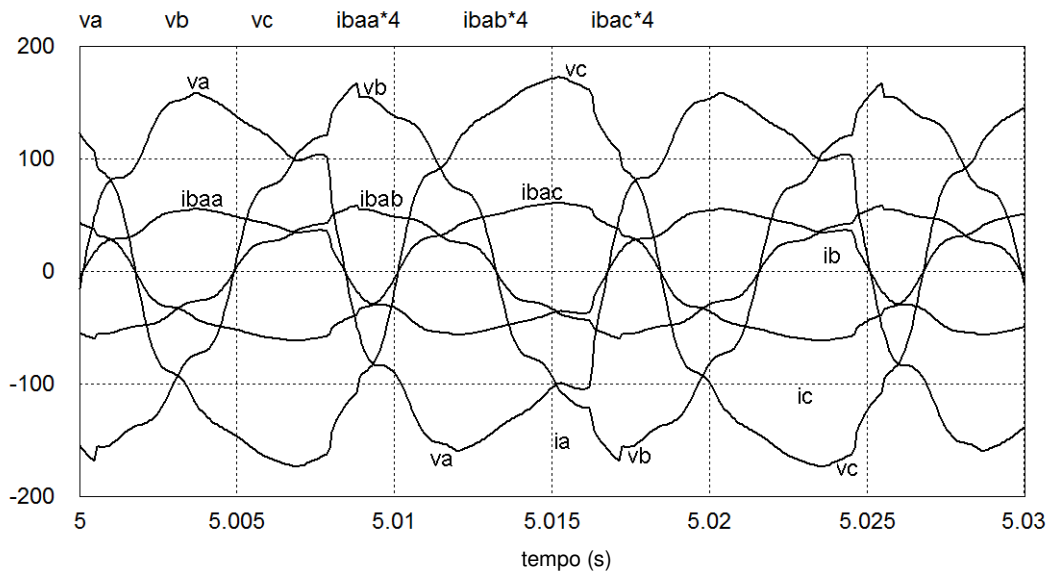


Figura 4.86 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: tensões e correntes ativas balanceadas na carga mista desbalanceada.

A Figura 4.87 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas balanceadas. Além do comentário já extraído com relação às correntes ativas, pode-se observar que as correntes reativas também são distorcidas e desequilibradas, mas tem forma diferente das tensões de

fase, uma vez que são calculadas através da integral das tensões (3.29), o que conseqüentemente, atenua as componentes harmônicas presentes na tensão.

A Figura 4.88 mostra as formas de ondas decompostas em correntes ativas e reativas desbalanceadas, bem como das nulas, proporcionais as não linearidades da carga.

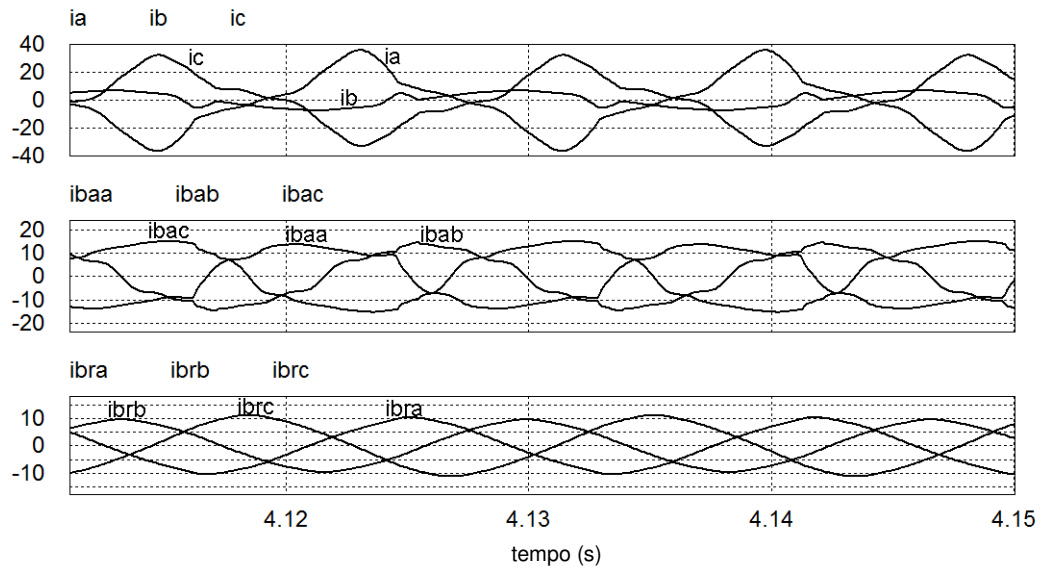


Figura 4.87 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes totais, ativas balanceadas e reativas balanceadas na carga mista desbalanceada.

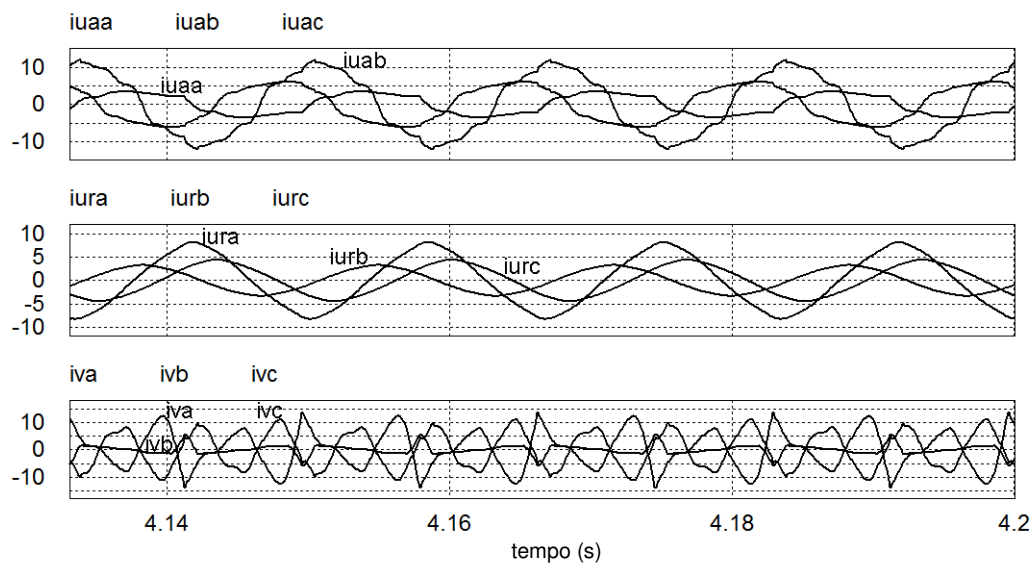


Figura 4.88 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: correntes ativas desbalanceadas, reativas desbalanceadas e nulas na carga mista desbalanceada.

A tabela 4.20 indica que novamente, todas as parcelas de corrente e potência decompostas se fazem presentes. Destaca-se a diferença entre as duas definições de fator de potência, novamente, bastante significativa.

É importante destacar, que apesar da TPC possibilitar a interpretação de diversos tipos de cargas e efeitos dos circuitos elétricos, neste caso, onde a impedância da rede é elevada e as tensões de fornecimento estão naturalmente deterioradas, a responsabilidade das cargas e das fontes está misturada nas parcelas de corrente e potência propostas.

Este assunto vem sendo tratado em artigos recentes (Tenti, Paredes, et al. 2010) e deve representar um dos grandes desafios na continuidade dos trabalhos relacionados ao tema.

Tabela 4.20 - Trifásico 4 fios com tensão distorcida e com impedância de linha: Valores eficazes das Correntes, Parcelas de Potência, Fatores de Potência e Distorções Harmônicas Totais na carga mista desbalanceada.

Correntes								
I_a	I_b	I_c	I_{aa}^b	I_{ab}^b	I_{ac}^b	I_{ra}^b	I_{rb}^b	I_{rc}^b
19,19	4,98	17,70	10,33	9,77	11,27	7,03	6,40	7,95
I_{aa}^u	I_{ab}^u	I_{ac}^u	I_{ra}^u	I_{rb}^u	I_{rc}^u	I_{va}	I_{vb}	I_{vc}
2,59	8,20	4,38	5,57	2,20	3,16	6,62	1,76	6,34
Potências								
A	P	V	Q	N	N_r	N_a	W	
5,46k	3,73k	1,97k	2,51k	2,39k	1,36k	1,96k	6,59	
Fatores								
λ	FP	DHT_v	DHT_{i_a}	DHT_{i_b}	DHT_{i_c}			
0,682	0,908	18,21%	31,98%	35,64%	31,22%			

4.6. Conclusões preliminares

Neste capítulo foram avaliados diversos casos de simulação, considerando diferentes tipos de circuitos elétricos. Foram considerados circuitos monofásicos e trifásicos, sob diferentes condições de tensão de fornecimento e carga.

A análise dos resultados indica que a Teoria de Potência Conservativa representa uma alternativa interessante para análise dos circuitos elétricos modernos. A TPC mostrou-se capaz de identificar

características particulares dos circuitos, tais como a presença de armazenadores de energia, o desbalanço das cargas (em circuitos polifásicos), a presença de cargas não lineares ou de não linearidades provocadas por distorções na tensão de alimentação, dentre outras.

Vale destacar que os cálculos e análises baseados na TPC podem ser realizados completamente no domínio do tempo, sem a necessidade de ferramentas matemáticas complexas, tais como a Transformada de Fourier.

Destaca-se ainda que na TPC, o cálculo das subparcelas de potência que compõem a potência aparente, bem como o cálculo do fator de potência, são realizados através de variáveis vetoriais, as quais representam o sistema polifásico como um todo e não como uma soma algébrica ou geométrica das partes por fase. Isto equivale a dizer que a abordagem proposta é bastante inovadora no cenário internacional, onde tais associações de fase ainda têm sido utilizadas. Conforme demonstrado, neste caso, o desbalanço das cargas ou assimetria das tensões de fornecimento pode afetar significativamente o cálculo do fator de potência total de um circuito polifásico.

No próximo capítulo serão apresentados e discutidos alguns resultados experimentais, baseados em um sistema de medição e aquisição de dados, construído no Laboratório de Automação e Sistemas Integráveis.

5. Análise de Caso Experimental

Considerando o último caso simulado no capítulo anterior, buscou-se validar experimentalmente os resultados através de um sistema de testes, no laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI), do Campus de Sorocaba da UNESP.

Uma vez que o desenvolvimento deste sistema não é parte integrante deste trabalho de mestrado, não se entrará em detalhamento específico quanto ao hardware e software utilizados. Apenas vale observar que o sistema foi configurado com as seguintes características:

- Fonte de tensão alternada trifásica programável;
- Sistema de Medição e Aquisição de Dados: as medições são realizadas utilizando sensores conectados a um computador, no qual um software realiza os cálculos e exibe os resultados. No caso desta aplicação, foi utilizado um computador Core 2 Duo, com uma placa de aquisição de dados com 8 entradas analógicas (DAQmx PCI-6143-S, da National Instruments). Estas entradas analógicas foram conectadas a um circuito condicionador de sinais, de forma a adaptar o range do sinal medido às entradas da placa de aquisição. Para as medições no circuito foram utilizados sensores de efeito Hall de tensão e corrente (LV-25P e LA-55P, da LEM). As rotinas de aquisição de software do instrumento virtual foram implementadas utilizando a linguagem gráfica de programação do ambiente Labview, enquanto que as rotinas de cálculo da TPC foram escritas em linguagem C e compiladas em uma DLL (Dynamic Link Library), a qual é utilizada pelo software de medição;
- Cargas resistivas, indutivas, capacitivas e um retificador trifásico, configurados de maneira a se obter valores próximos aos da carga simulada na Seção 4.6.

As figuras 4.90, 4.91 e 4.92 mostram as telas do medidor implementado, no momento em que as medições estavam sendo realizadas no circuito. São apresentadas as formas de onda das tensões, correntes totais e as parcelas de corrente ativa balanceada, reativa balanceada, ativa desbalanceada, reativa desbalanceada e nula. São mostrados também os valores eficazes das tensões e correntes totais, e os valores das componentes de potência, do fator de potência λ e da Distorção Harmônica total de tensão por fase.

Comparando os valores e formas de onda apresentados nas figuras 4.90 a 4.92 com os resultados da simulação verifica-se que são semelhantes. As diferenças encontradas baseiam-se fundamentalmente na precisão dos componentes reais utilizados (aproximadamente 10%).

Observar pelas figuras 4.91 e 4.92 que as correntes ativas balanceadas resultam proporcionais às tensões de alimentação, ou seja, distorcidas e desequilibradas, o que pode causar estranheza do ponto de vista do adjetivo “balanceadas”. Entretanto, vale lembrar que tal termo faz referência a uma carga equivalente com impedâncias (resistências) balanceadas e não as formas de onda resultantes da corrente decomposta.

Da figura 4.92, destaca-se a presença significativa de potência nula (V) e de desbalanço (N), as quais influenciam consideravelmente o fator de potência total que resulta em 0,69, bem abaixo do que seria permitido em uma instalação industrial no Brasil.

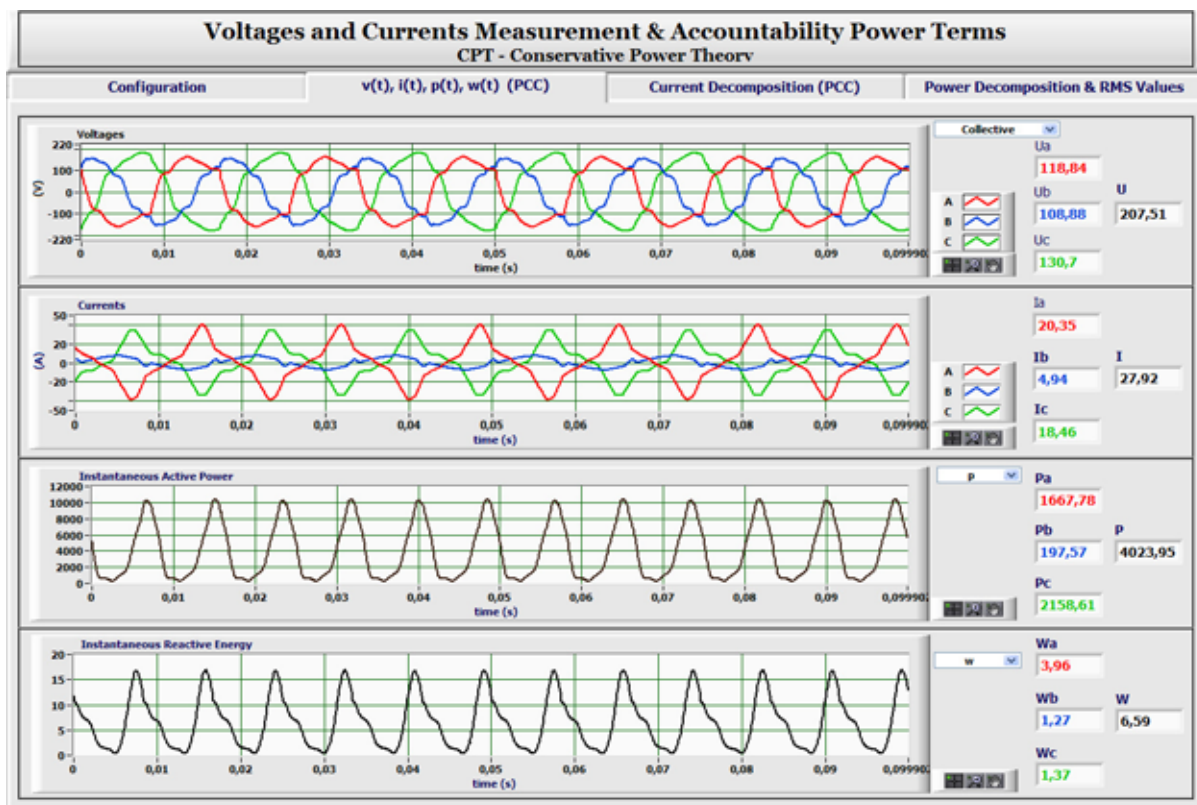


Figura 4.90 - Tela do software do instrumento virtual capturada durante as medições do caso experimental. São mostradas as formas de onda e valores eficazes das tensões e correntes medidas, bem como os valores instantâneos e médios da potência ativa e da energia reativa.

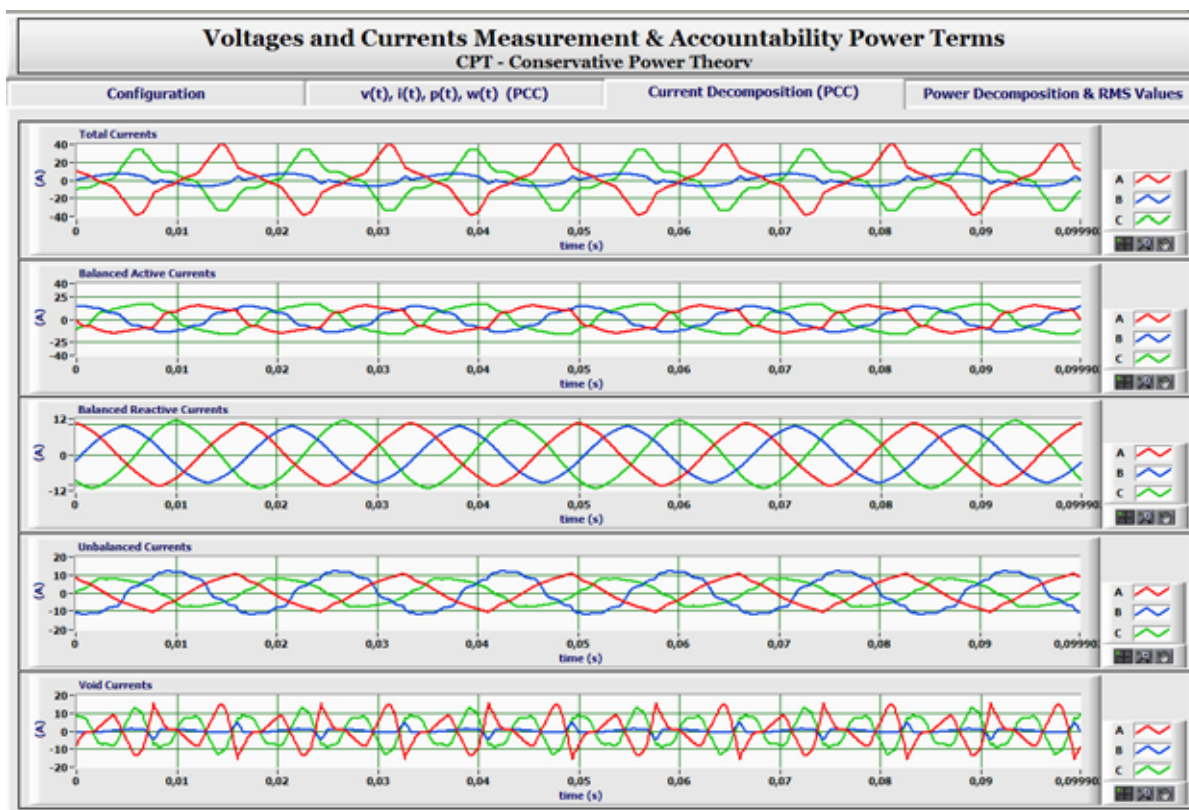


Figura 4.91 - Tela do software do instrumento virtual que mostra as formas de onda da corrente total e suas parcelas: ativa balanceada, reativa balanceada, corrente desbalanceada e a corrente nula, para o caso experimental.

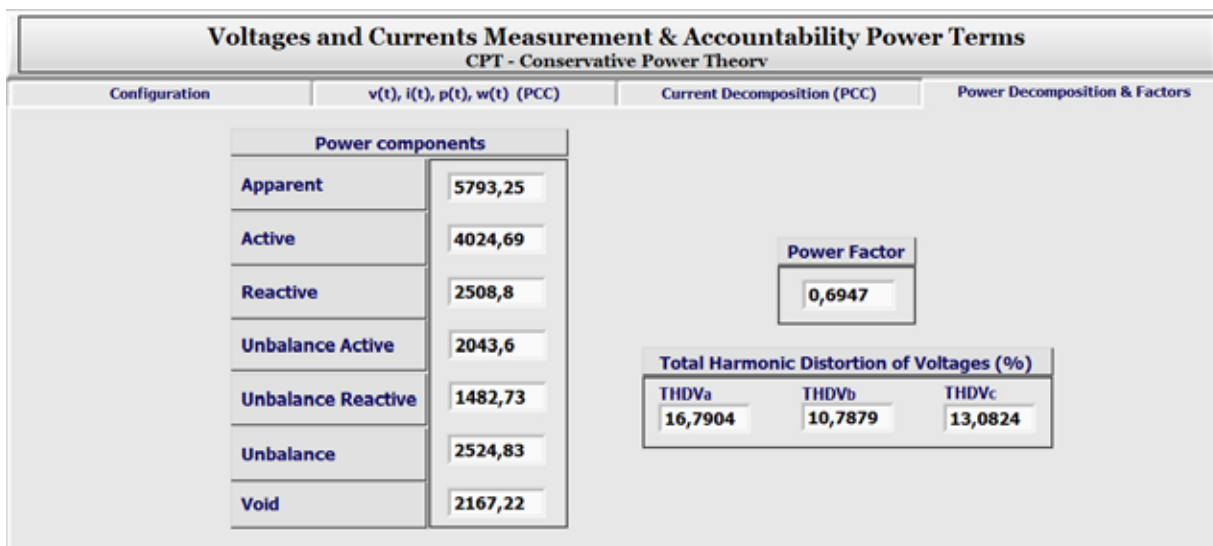


Figura 4.92 - Tela do software do instrumento virtual que mostra os valores das parcelas de potência, o fator de potência λ e as DHTs para as tensões, durante as medições do caso experimental.

Com isto, acredita-se ter demonstrado a viabilidade da implementação da TPC em sistemas de aquisição de dados reais, o que pode ser extremamente útil em diversas aplicações, tais como tarifação de energia, monitoração da qualidade de energia, compensação de distúrbios, dentre outras.

6. Conclusões

Se considerarmos os trabalhos de vários autores e suas definições de potência para o sistema elétrico, tanto no domínio do tempo como da frequência, há que se considerar que existem semelhanças significativas nos dois domínios de abordagem.

O ideal seria que uma teoria de potências geral, sem nenhum tipo de restrição, pudesse ser aplicada em todas as situações. Porém, fica claro que existe uma grande confusão a respeito dos objetivos para quais os autores desenvolveram suas teorias, visto que algumas teorias com desempenho considerado satisfatório para tarifação, não podem ser aplicadas em compensação e vice-versa.

Outra questão, fonte de dúvidas, é em relação às nomenclaturas, onde variáveis com significados físicos ou matemáticos distintos possuem nomes similares. Por exemplo, correntes ativas, podem ser encontradas como: real, ativa instantânea, ativa média; e correntes reativas como: fictícia, não-ativa, imaginária, reativa instantânea, etc.

Além disto, considerando a modernização dos últimos anos e as promessas de inovações para o sistema elétrico do futuro, uma reformulação dos conceitos e definições dos termos de potência faz-se necessária. Seja para utilização em diferentes aplicações do sistema elétrico, seja para interpretação ou mesmo ensino de circuitos elétricos sob condições de operação não ideais, é necessário definir qual será a formulação a ser adotada para os circuitos atuais.

Neste sentido, a Teoria de Potência Conservativa foi considerada neste trabalho. Para avaliar seu desempenho frente a diferentes circuitos e condições de operação dos mesmos, diversos casos de simulação foram analisados. Além disto, um caso experimental, semelhante a um dos simulados, foi apresentado para comparação.

Os resultados obtidos a partir das decomposições de correntes e potências propostas pela TPC indicaram que as parcelas de corrente e potência resultantes podem ser diretamente associadas a diferentes fenômenos físicos do circuito elétrico em análise. Neste texto, entendeu-se por fenômenos físicos a presença de armazenadores de energia (indutores e capacitores), a transferência de energia útil em resistores, desbalanços das cargas, não linearidades das cargas, etc.

Além da definição de várias parcelas de potência, a TPC também apresentou uma definição de fator de potência total (válido para sistemas polifásicos), a qual leva em consideração as não linearidades e desequilíbrios do sistema. Por exemplo, no caso de um circuito puramente resistivo, mas com diferentes valores de resistência por fase, o fator de potência (λ) resulta menor do que 1. Tal definição representa um avanço significativo no caso da análise dos circuitos polifásicos por não utilizar médias aritméticas ou geométricas para o cálculo do fator de potência total.

Vale também destacar que a TPC, conforme comprovado através dos casos estudados apresenta uma proposta de cálculo da energia e potência reativas que é válido para sinais não senoidais, assunto controverso na literatura internacional.

Assim, concluiu-se que as diversas parcelas decompostas podem ser de extrema valia no que diz respeito a diversas aplicações dos sistemas elétricos, tais como: tarifação de energia; monitoramento da qualidade de energia (através das parcelas de potência não ativas), compensação de distúrbios de corrente, seja através de dispositivos passivos ou ativos (através das parcelas de corrente decompostas), controle e condicionamento de energia, dentre outras.

Considerando a seletividade das decomposições de corrente e potência propostas na TPC e a ortogonalidade das parcelas resultantes, acredita-se que esta seja uma proposta bastante interessante do ponto de vista de uma teoria generalizada para análise dos sistemas elétricos modernos, diferentemente de várias outras propostas estudadas e brevemente resumidas no Capítulo 2.

6.1. Sugestões para trabalhos futuros

Com base nos estudos realizados neste trabalho, dentre as várias vertentes possíveis para continuação, destaca-se a possibilidade de estudos relacionados à:

- tarifação de energia e atribuição de responsabilidades, tanto para redes convencionais de energia, quanto para micro-redes inteligentes de energia;
- compensação seletiva de distúrbios, visando maximizar a relação custo e benefício dos compensadores;
- controle cooperativo de compensadores, localizados próximos as cargas ou distribuídos pelas redes de distribuição de energia, visando maximizar a capacidade de compensação de diferentes compensadores instalados na mesma rede.

Referências Bibliográficas

ABNT. "NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão." novembro 1997.

Akagi, H, Y Kanazawa, e A Nabae. "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits." International Power Electronics Conference (IPEC). Tokyo, Japan, 1983. 1375-1386.

Amin, S M, e B F Wollenberg. "Toward a smart grid." IEEE Power & Energy Magazine, 2005: 34-41.

Aneel. 2010. <http://www.aneel.gov.br/>.

Aneel. "Resolução Nº 505." 26 de novembro de 2001.

Bollen, M H J. Understanding Power Quality Problems. Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press, 2000.

Budeanu, C I. Reactive and fictitious power. Instituto Romeno de Energia, 1927.

Cristaldi, L, e A Ferrero. "A digital method for the identification of the source of distortion in electric power systems." IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, February de 1994: 14-18.

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, march de 1988: 30-34.

Czarnecki, L S. "What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned?" IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1987: 834-837.

Czarnecki, L S. "On some misinterpretations of the instantaneous reactive power pq theory." IEEE Transaction on Power Electronics, May de 2004: 828-836.

Czarnecki, L S. "Currents Physical Components (CPC) Concept: a Fundamental of Power Theory." Przegląd Elektrotechniczny, 2008: 28-37.

Depenbrock, M. "Investigations of the voltage and power conditions at converters without energy storage." Phd thesis. Hannover: Thecnical University of Hannover, 1962.

Depenbrock, M. "The FBD-method, a generally applicable tool for analyzing power relations." IEEE International Conference on Harmonics and Power Systems. 1992. 135-141.

Dugan, R C, M F McGranaghan, e H W Beaty. Electrical Power Systems Quality. New York: McGraw Hill, 2000.

Emanuel, A E. "The buchholz-goodhue apparent power definition: The practical approach for nonsinusoidal and unbalanced systems." IEEE Transactions on Power Delivery, 1998: 344-350.

Fryze, S. "Active, reactive and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current." Przegląd Elektrotechniczny, 1932.

Ha, B N, S W Lee, C H Shin, S C Kwon, S Y Park, e M H Park. "Development of intelligent distribution automation system." Proc. of the Transmission and Distribution Conference & Exposition. Asia and Pacific, 2009. 1-4.

IEEE. "Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions." IEEE Standard 1459. March 2010.

IEEE Working Group, on Nonsinusoidal Situations. "A survey of north american electric utility concerns regarding nonsinusoidal waveforms." IEEE Transaction on Power Delivery, January de 1996: 73-78.

IEEE Working Group, on Nonsinusoidal Situations. "Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: A discussion." IEEE Transaction on Power Delivery, January 1996: 79-101.

Kimbark, E W. Direct Current Transmission. Vol. 1. Wiley-Interscience, 1971.

Marafão, F P. "Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais." Tese de Doutorado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2004.

Marafão, F P. "Contribuições para a teoria de potências instantâneas e aplicações em qualidade de energia." Dissertação de mestrado. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2000.

Marafao, F P, E V Liberado, H K M Paredes, e L C P da Silva. "Three-Phase Four-Wire Circuits Interpretation by means of Different Power Theories." Proc. of International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation. Poland, 2010. 104-109.

Marafão, F P, S M Deckmann, e H K M Paredes. "A Influência da Referência de Tensão na Avaliação de Indicadores de Qualidade de Energia." IEEE Latin America Transactions, março de 2008.

Mattavelli, P, e P Tenti. "A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions." Proc. of the Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions. Italy, 2003.

Mohan, Undeland and Robins. Power Electronics Converters Applications and Design. U.S.A: Jonh Wiley and Sons.Inc, 1995.

Monti, A, F Ponci, A Benigni, e J Liu. "Distributed Intelligence for Smart Grid Control." Przegląd Elektrotechniczny, 2010: 38-47.

Paredes, H K M, F P Marafão, D I Brandão, e I S Diniz. "Conservative Power Theory Discussion and Evaluation by Means of Virtual Instrumentation." Proceedings of the Brazilian Power Electronics Conference. Bonito, 2009. 423-430.

Paredes, H K M, F P Marafão, e L C P da Silva. "A Comparative Analysis of FBD, PQ and TPC Current Decompositions - Part I: Three-Phase Three-Wire Systems." Proceedings of the IEEE Power Tech. Bucharest, Romania, 2009.

- Paredes, H K M, F P Marafão, e L C P da Silva. "A Comparative Analysis of FBD, PQ and TPC Current Decompositions - Part II: Three-Phase Four-Wire Systems." Proceedings of the IEEE Power Tech. Bucharest, Romania, 2009.
- Paredes, H K M, F P Marafão, T M Terrazas, e P J A Serni. "Harmonic, reactive and unbalance compensation by means of TPC framework." Proc. of the Brazilian Power Electronics Conference. Bonito, Brasil, 2009.
- Paredes, H. K. M. "Influência do referencial de tensão na avaliação da qualidade da energia elétrica." Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Julho de 2006.
- Pavas, A, V Staudt, e H Torres-Sánchez. "Discussion on existing methodologies for the responsibilities assignment problem." International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation. Lagow, Poland, 2008.
- Peng, F, e J-S Lai. "Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems." IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, 1996: 293-297.
- Staudt, V. "Fryze-Buchholz-Depenbrock: a time-domain power theory." Przegląd Elektrotechniczny, 2008: 1-11.
- Tedeschi, E, P Tenti, P Mattavelli, e D Trombetti. "Cooperative control of electronic power processors in micro-grids." Proc. of the Brazilian Power Electronics Conference. Bonito, Brazil, 2009. 1-8.
- Tenti, P, e L Rosseto. "Using ac-fed pwm converts as instantaneous reactive power compensators." IEEE Transactions on Power Electronics, January de 1992: 224-230.
- Tenti, P, e P Mattavelli. "A time-domain approach to power term definitions under non-sinusoidal conditions." Proc. of the Sixth International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions. Milan, 2003.
- Tenti, P, H K M Paredes, F P Marafao, e P Mattavelli. "Accountability and Revenue Metering in Smart Micro-Grids." Proc. of the IEEE International Workshop of Applied Measurements for Power Systems. Achen, 2010. 22-24.
- Tenti, P, P Mattavelli, e H K M Paredes. "Conservative Power Theory, Sequence Components and Accountability in Smart Grids." Przegląd Elektrotechniczny, 2010: 30-37.
- Terrazas, T M, P J A Serni, E V Liberado, F B Fraissat, e F P Marafão. "Observação sobre Compensação Reativa em Sistemas com Cargas Não Lineares." Prof. of the IEEE International Conference on Industry Applications. São Paulo, Brazil, 2010.
- Venkataramann, G, e C Marnay. "A Large Role for Microgrids: Are Microgrids a Viable Paradigm for Electricity Supply Expansion?" IEEE power & Energy Magazine, May/June 2008: 78-82.
- Watanabe, E H, H Akagi, e M Aredes. "Instantaneous p-q Power Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems." (Przegląd Elektrotechniczny) 6 (2008): 12-21.
- Willems, J L. "A new interpretation of the akagi-nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations." IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, august de 1992: 523-527.
- Willems, J L. "Reflections on Power Theories for Poly-Phase Nonsinusoidal Voltages and Currents." Przegląd Elektrotechniczny, 2010: 11-21.

Zakikhani, W, e P Shepherd. "Suggested definitions of reactive power for nonsinusoidal systems." IEEE Proceedings, September de 1972: 1361-1362.