

TESE

921

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

*FORNECIMENTO ELÉTRICO: UMA CONCEITUAÇÃO
DIDÁTICA ORIENTADA À QUALIDADE TÉCNICA*

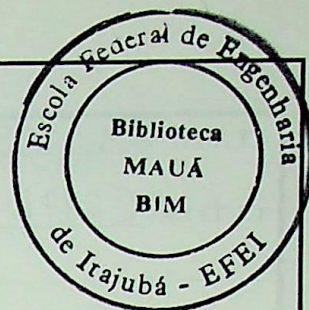
ADALBERTO CANDIDO

ITAJUBÁ - MG

Março - 1997



E F E I



ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**FORNECIMENTO ELÉTRICO: UMA
CONCEITUAÇÃO DIDÁTICA ORIENTADA À
QUALIDADE TÉCNICA.**

por

Adalberto Candido

Dissertação de Mestrado submetida à
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
como requisito para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Hector Arango

Co-Orientador: Prof. Dr. José Policarpo G. Abreu

Itajubá, 25 de Março de 1997

CLASS. 621.3:658.56(043.2)

CUTTER. C217P

TOMBO. 921



FEEL

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

FORMECIMENTO ELÉTRICO: UMA
CONCEPÇÃO DIDÁTICA ORIENTADA À
QUALIDADE TÉCNICA

por
Albérico Cardozo

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
Departamento de Engenharia de Energia e Eletrônica

Orientador: Prof. Dr. Ilseir Arrigo
Co-Orientador: Prof. Dr. José Lourenço G. Azevedo

Itajubá, 25 de Março de 1997



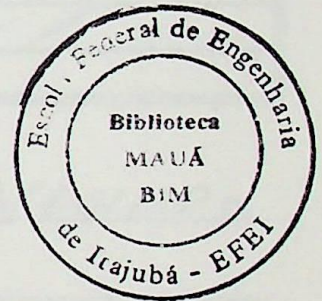
Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

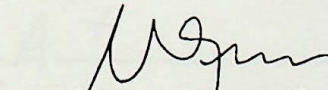
ANEXO I

PRONUNCIAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

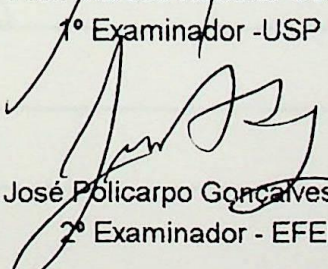
A Banca Examinadora, abaixo assinada, nomeada pela Portaria nº 083 de 31 de março de 1997, considerando o resultado do Julgamento da Prova de Defesa Pública da Dissertação de Mestrado intitulada: **"Fornecimento Elétrico: Uma Conceituação Didática Orientada à Qualidade Técnica"** apresenta pronunciamento no sentido de que o Coordenador dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá solicite ao DRA (Departamento de Registro Acadêmico) a expedição do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica, na Área de Automação e Sistemas Elétricos Industriais**, satisfeitas as demais exigências regimentais, a Adalberto Cândido.

Itajubá, 14 de abril de 1997.

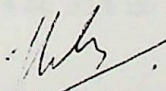



Prof. Marcos Roberto Gouvêa

1º Examinador - USP


Prof. José Policarpo Gonçalves de Abreu

2º Examinador - EFEI


Prof. Héctor Arango

3º Examinador (Orientador) - EFEI



Ministério da Educação e do Desporto
ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
Reconhecida Lei 3232 - 05/01/1917

ANEXO II

FOLHA DE JULGAMENTO DA BANCA EXAMINADORA

Título da Dissertação: "Fornecimento Elétrico: Uma Conceituação Didática Orientada à Qualidade Técnica".

Autor: Adalberto Cândido

JULGAMENTO

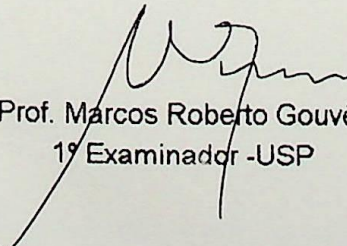
Examinadores	Conceito	Rubrica
1º	A+	
2º	A+	
3º	A+	

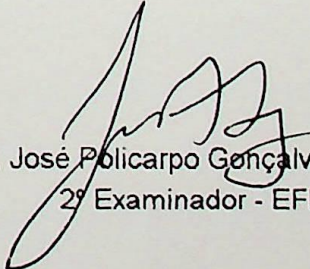
Resultado Médio: Conceito A+, ou seja, APROVADO

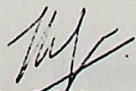
COM DISTINÇÃO

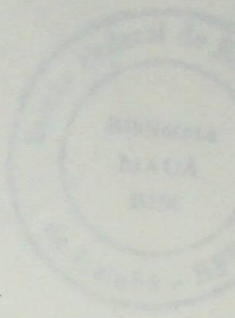
Observações: _____

Itajubá, 14 de abril de 1997


Prof. Marcos Roberto Gouvêa
1º Examinador - USP

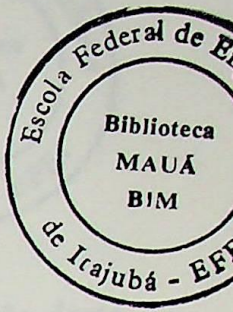

Prof. José Policarpo Gonçalves de Abreu
2º Examinador - EFEI


Prof. Héctor Arango
3º Examinador (Orientador) - EFEI



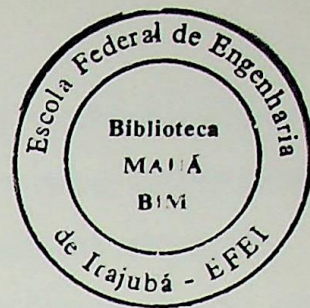
À minha mãe Neuza e minha irmã Angela
À minha noiva Saionara
Ao meu primeiro Sobrinho que esta a caminho

Agradecimentos



EFEI

Agradecimentos



À Escola Federal de Engenharia de Itajubá, pela oportunidade de realização deste trabalho. Aos Departamentos, DET - Departamento de Eletrotécnica e PPG - Pró-Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação, seus funcionários, e principalmente ao Prof. Paulo S. Waki, pela grande ajuda e atenção dispensada em momentos de necessidade.

Ao Professor Dr. Héctor Arango pela atenciosa, atuante e competente orientação e principalmente pela amizade, ajuda e incentivo, transmitindo conhecimentos ao longo desta pesquisa e apoiando sempre e proporcionando o desenvolvimento deste trabalho de Dissertação de Mestrado.

Ao Professor Dr. José Policarpo G. de Abreu, pela co-orientação e apoio e amizade.

Ao Professor Marcos Roberto Gouveia, do DPEA da Escola Politécnica da USP, pelo apoio incentivo e por proporcionar um maior conhecimento na linguagem de programação Visual Basic, junto ao CED - Centro de Excelência em Distribuição de Energia da USP.

À minha mãe Neuza dos Santos Candido, minha irmã Mary Angela e seu filho que ainda esta por chegar, mas já é muito amado; por serem mais amor e compreensão acima de tudo.

À minha noiva Saionara Vilas Boas por estar sempre presente comigo, em todos os momentos, pelo amor, carinho e principalmente pela palavra de ânimo e estímulo, muitas vezes o principal reforço para realização deste trabalho.

À todos, os meus sinceros agradecimentos, pois sem a ajuda de todos este trabalho não poderia ser realizado.

Resumo

A energia elétrica, uma das principais fontes de energia, é amplamente utilizada pela sociedade moderna. Vários consumidores, tanto industriais quanto comerciais e residenciais usam a energia elétrica em processos mais ou menos sofisticados que fazem parte do nosso dia a dia. Intensamente utilizada, a energia elétrica, fez com que a sociedade se torna-se cada vez mais vulnerável ao mau funcionamento do sistema elétrico, devido a fenômenos de natureza variada que se traduzem, genericamente, no que se descreve como perdas na Qualidade de Energia.

Dessa forma, a Qualidade da Energia é o foco de uma preocupação crescente, comum às concessionárias, que produzem, transmitem e distribuem a energia elétrica, quanto ao próprio consumidor e aos fabricantes dos dispositivos de utilização.

Visto o intenso aumento da tecnologia na área de eletrônica como um todo, multiplicam-se os clientes possuidores de um número extremamente elevado de equipamentos eletrônicos dos mais variados tipos e finalidades originados nessa tecnologia.

Observa-se que os equipamentos e dispositivos modernos, são instalados geralmente sem considerar alguns aspectos importantes dos sistemas elétricos, sendo que tais equipamentos são normalmente mais sensíveis as variações de tensão decorrentes de defeitos ou mesmo manobras normais do cotidiano da operação do sistema supridor. Eleva-se deste modo, o número de interrupções do processo produtivo, atribuíveis a uma qualidade da energia insatisfatória. Em muitos casos, as ações das empresas para evitar variações transitórias de tensão, são muito limitadas e quando possíveis, representam investimentos inviáveis economicamente.

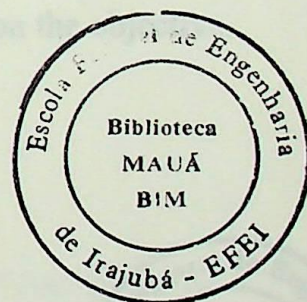
Assim o consumidor moderno requer da concessionária níveis de qualidade de fornecimento de energia mais elevados, e que são, muitas vezes difíceis de se obter face às dificuldades técnicas e os custos envolvidos.

Vários especialistas no setor elétrico vêm desenvolvendo teorias baseadas na modelagem e análise das distorções nos sistemas elétricos para explicar os processos que incidem na Qualidade e, destarte, identificar procedimentos para sua mitigação.

Sendo assim, é imbuído deste ideal que o presente trabalho desenvolve um enfoque, com finalidade principalmente didática, orientado a qualidade técnica do serviço elétrico.

Serão apresentadas ainda, as bases de um software educativo para análise de sistemas trifásicos distorcidos em apoio das atividades de ensino. Espera-se contribuir assim à difusão e entendimento da nova realidade do setor elétrico, e desta forma priorizar os conceitos da qualidade de energia nos curricula correspondentes.

Por fim, resumindo: a finalidade deste trabalho é fornecer uma contribuição para a análise de sistemas elétricos distorcidos pela presença de harmônicos, apoiar as atividades de ensino, focadas na área de qualidade de energia elétrica, e desta forma, contribuir um pouco com entendimento da nova realidade do setor elétrico.



Abstract

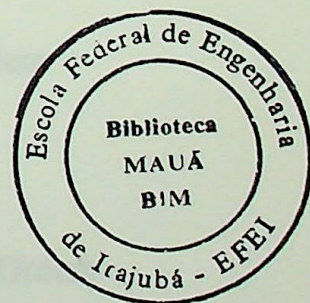
Power Quality is a matter of ever-increasing importance in our days. Considering the advances in electronic power technology, and on-line control process in the context of a globalized economy, it is not surprising that unexpectedly high levels of pollution were circulating along the supply networks.

As the equipments already mentioned are also very sensitive to such disturbance, the productive output is affected and a high costs are being associated with the loss of Power Quality.

It's then comprehensible that an industry with high technology, and therefore internationally competitive were require an electric supply of a corresponding quality.

This leads to the analysis of three-phase systems where a distorted flux of energy takes place. Unfortunately, even the basic concepts and definitions of non-sinusoidal assymmetric networks are yet being a subject of polemic.

Nevertheless, it is imperative to introduce in the graduate curricula some enlightenment on distorted systems behavior. Such is the main purpose of the dissertation, wich includes also the basics for a didactic software on the objective.



Identificação dos Principais Símbolos Utilizados

Ao longo deste trabalho, os principais parâmetros ou variáveis dos sistemas elétricos, serão referenciados por símbolos, os quais definidos neste glossário. São eles:

$\underline{i}(t) \Rightarrow$ Vetor Instantâneo das Correntes de Fase

$\underline{v}_{\text{vr}}(t) \Rightarrow$ Vetor Instantâneo das Tensões de Fase

$p(t) \Rightarrow$ Potência Instantânea

$P \Rightarrow$ Potência Média

$\tilde{p}(t) \Rightarrow$ Potência Oscilante

$\tilde{p}_3(t) \Rightarrow$ Potência Oscilante da Componente Harmônica de 3^a Ordem

$\tilde{p}_1(t) \Rightarrow$ Potência Oscilante da Componente Fundamental

FP \Rightarrow Fator de Potência

$s(t) \Rightarrow$ Potência Instantânea Aparente

S \Rightarrow Potência Aparente

N \Rightarrow Potência Não-Ativa

$N_c \Rightarrow$ Potência Não-Ativa da Carga

$N_3 \Rightarrow$ Potência Não-Ativa da Componente Harmônica de 3^a Ordem

Q \Rightarrow Potência Reativa

A \Rightarrow Potência de Assimetria

$A_3 \Rightarrow$ Potência de Assimetria da Componente Harmônica de 3^a Ordem

$A_1 \Rightarrow$ Potência de Assimetria da Componente Fundamental

$i_p \Rightarrow$ Corrente de Fryze

$i_g \Rightarrow$ Corrente Supérflua de Akagi

$i_k \Rightarrow$ Corrente do Compensador de Akagi

$i_{qa} \Rightarrow$ Corrente Supérflua de Akagi na fase a

$i_{ka} \Rightarrow$ Corrente do Compensador de Akagi na fase a

$q \Rightarrow$ Potência Fictícia Instantânea

$i_p \Rightarrow$ Corrente de Tenti

$i_Q \Rightarrow$ Corrente Supérflua de Tenti

$i_k \Rightarrow$ Corrente do Compensador de Tenti

$i_{Qa} \Rightarrow$ Corrente Supérflua de Tenti na fase a

$i_{ka} \Rightarrow$ Corrente do Compensador de Tenti na fase a

$v \Rightarrow$ Valor Eficaz Instantâneo da Tensão

$v_a \Rightarrow$ Valor Eficaz Instantâneo da Tensão na fase a

$i \Rightarrow$ Valor Eficaz Instantâneo da Corrente

$i_a \Rightarrow$ Valor Eficaz Instantâneo da Corrente na fase a

$v_+ \Rightarrow$ Tensão Instantânea da Componente de Sequência Positiva

$v_- \Rightarrow$ Tensão Instantânea da Componente de Sequência Negativa

$v_0 \Rightarrow$ Tensão Instantânea da Componente de Sequência Zero

$V \Rightarrow$ Valor Eficaz da Tensão Trifásica

$I \Rightarrow$ Valor Eficaz da Corrente Trifásica

$\dot{\underline{V}} \Rightarrow$ Vetor Fasorial das Tensões de Fase

$\dot{\underline{I}} \Rightarrow$ Vetor Fasorial das Correntes de Fase

$\dot{\underline{V}}_h \Rightarrow$ Vetor Fasorial Harmônico da Tensão de Ordem h

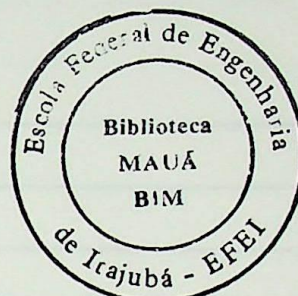
$\dot{\underline{I}}_h \Rightarrow$ Vetor Fasorial Harmônico da Corrente de Ordem h

FORNECIMENTO ELÉTRICO: Uma Conceituação

Didática Orientada à Qualidade Técnica

Por: Adalberto Candido

Sumário

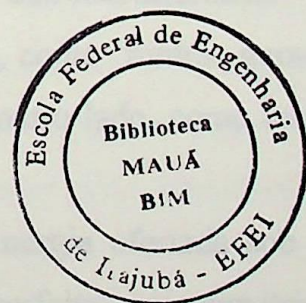


	Página
Agradecimentos _____	iv
Abstract _____	vi
Resumo _____	vii
Identificação dos Principais Símbolos Utilizados _____	viii
Sumário _____	x
Capítulo 1 - Introdução _____	1
1.1 - Considerações Iniciais _____	1
1.2 - Motivação desta Dissertação _____	5
1.3 - Objetivo e Escopo _____	5
1.4 - Descrição do Texto _____	7
Capítulo 2 - Análise dos Sistemas Trifásicos no Domínio do Tempo _____	9
2.1 - Introdução _____	9
2.2 - Valores Instantâneos _____	9
2.2.1 - Conceitos Introdutórios _____	9
2.2.2 - Representação Gráfica dos Valores Instantâneos _____	13
2.2.3 - Transformações de Coordenadas _____	19

2.3 - Decomposições da Corrente	24
2.3.1 - Conceitos Introdutórios	24
2.3.2 - A Corrente de Fryze	25
2.3.3 - A Corrente de Tenti	32
2.3.4 - Valores Eficazes	36
Capítulo 3 - Análise dos Sistemas Trifásicos no Domínio da Frequência	37
3.1 - Representação das Magnitudes Senoidais	37
3.1.1 - Conceitos Introdutórios	37
3.1.2 - O Caso Simétrico	38
3.1.3 - O Caso Não Simétrico	39
3.2 - O Caso Periódico Não Senoidal	41
3.2.1 - Conceitos Introdutórios	41
3.2.2 - Componentes Harmônicas	42
3.2.3 - Valores Eficazes	43
Capítulo 4 - Representação das Potências nos Domínios do Tempo e da Frequência	45
4.1 - Análise das Potências nos Sistemas Trifásicos no Domínio do Tempo	45
4.1.1 - Conceitos Introdutórios	45
4.1.2 - Potências Média, Aparente e Fictícia	47
4.2 - Análise das Potências nos Sistemas Trifásicos no Domínio da Frequência	48
4.2.1 - A Potência nos Sistemas Senoidais	48
4.2.2 - Potência em Coordenadas Simétricas	49
4.3 - A Potência em Sistemas Não Senoidais	52
4.3.1 - Conceitos Introdutórios	52
4.3.2 - A Potência Instantânea a Partir das Componentes Harmônicas	52

Capítulo 5 - Definições Práticas Orientadas ao Diagnóstico e Tarifação da	
Qualidade	55
5.1 - Conceituação das Potências Desde o Ponto de Vista do Transporte de	
Energia	55
5.1.1 - Conceitos Introdutórios	55
5.1.2 - A Energia Transportada	56
5.1.3 - O Fator de Potência	58
5.2 - O Caso dos Sistemas Não Senoidais	60
5.2.1 - Conceitos Introdutórios	60
5.2.2 - O Fator de Potência Harmônico	61
5.2.3 - Potências de Assimetria e de Harmônico	64
- Um Exemplo	69
 Capítulo 6 - Exemplos	 71
 6.1 - Exemplo 1 - Carga Resistiva	 71
6.1.1 - Cálculo das Correntes	73
6.1.2 - Cálculo das Potências	77
6.1.3 - Cálculo de i_p e i_P	78
6.1.4 - Compensadores	79
 6.2 - Exemplo 2 - Carga com Componente Reativa	 83
6.2.1 - Cálculo das Correntes	83
6.2.2 - Cálculo das Potências	89
6.2.3 - Cálculo de i_p e i_P	90
6.2.4 - Compensadores	92
 6.3 - Exemplo 3 - Carga Resistiva	 97
6.3.1 - Cálculo das Correntes	98
6.3.2 - Cálculo das Potências	104
6.3.3 - Cálculo de i_p e i_P	106

6.3.4 - Compensadores	111
Capítulo 7 - Software	124
7.1 - Considerações Iniciais	124
7.2 - Estrutura do Software	124
7.3 - Aplicação do Software	128
Capítulo 8 - Conclusões	129
Bibliografia	131
Apêndice A	134
Apêndice B	143
Apêndice C	152



Capítulo 1

Introdução



1.1 - Considerações Iniciais

Nas últimas décadas vêm se observando uma mudança no perfil das cargas alimentadas pelo sistema elétrico. Tais alterações, verificam-se principalmente em razão do grande avanço da tecnologia dos semicondutores de potência e da eletrônica como um todo, implicando assim no aumento do uso de cargas eletro-eletrônicas. Em paralelo, a queda nos preços da eletrônica de potência, verificada ao longo dos últimos anos, multiplicou a sua utilização nos diferentes ramos da engenharia elétrica. Atualmente, pode-se citar exemplos da aplicação da eletrônica de potência desde simples equipamentos domésticos até equipamentos bastante complexos utilizados em grandes sistemas elétricos. Entre a família dos conversores estáticos, os inversores representam uma classe com aplicações industriais importantes, como por exemplo, nos sistemas de alimentação e acionamento de motores de corrente alternada.

Estes tipos de carga apresentam-se por um lado, como fontes geradoras de perturbações e de desarranjos no sistema elétrico e, por outro lado, como muito mais sensíveis a flutuações e/ou distúrbios da energia.

Considera-se que o *desideratum* da qualidade da energia ofertada sob a forma trifásica deve conter, ondas de tensão senoidais puras e perfeitamente simétricas, sem alterações na amplitude ou frequência, emanadas de uma fonte de impedância zero, e capacidade de potência infinita. A realidade é, entretanto, diferente já que a “pureza” da energia é afetada por conexões e operações de equipamentos diversos tanto do consumidor quanto da concessionária, e ainda pelo aumento das distorções provocadas por equipamentos eletrônicos. Assim as formas de onda de tensão e corrente estão

tornando-se mais distorcidas e qualidade da energia está deteriorando-se. Em consequência, os constantes problemas relacionados às formas de onda da tensão e corrente não senoidais são cada vez maiores.

As ondas periódicas não senoidais podem ser decompostas num somatório de componentes senoidais constituídas de uma componente à frequência fundamental mais componentes de frequências múltiplas da fundamental que são chamadas harmônicas. Com a decomposição desta onda, é possível analisar um sistema não linear, como se o mesmo fosse um conjunto de subsistemas lineares, através do estudo de cada componente harmônico separadamente e no fim encontrar a distorção final pela superposição dos vários componentes. Muitos dos equipamentos com características não lineares operam de tal modo que podem ser modelados como uma fonte de correntes harmônicas, que dependem apenas do comportamento da corrente fundamental. Deve-se observar que esta análise se aplica para ondas periódicas, excetuando-se, portanto as ondas que se diferenciam muito de um ciclo para outro, indicativo de um fenômeno transitório. Estas ondas não periódicas podem ser analisadas por outros métodos, como o de Wavelets [1], o que foge do escopo deste trabalho.

Os maiores níveis de harmônicos são comumente causados pelos vários tipos de cargas conversoras, principalmente as utilizadas em processos eletroquímicos e acionamentos eletromecânicos. Para um retificador de determinado valor as correntes harmônicas são influenciadas pelo número de pulsos e pela possível aplicação de controle do ângulo de disparo. Outros equipamentos causadores de harmônicos são: quaisquer equipamentos eletrônicos de potência, tais como, choppers, cicloconversores e inversores; fornos a indução, fornos a arco e, em menor grau, transformadores e máquinas.

Uma significativa quantidade de harmônicos pode aparecer não só devido a grandes equipamentos mas, também devido ao efeito conjugado de um grande número de pequenas cargas monofásicas, tais como, eletrodomésticos em geral, microcomputadores, etc. Chamadas de PNL's, *Proliferating Nonlinear Loads* [3], [4].

Quando correntes harmônicas circulam no sistema de potência, elas podem causar problemas tais como distorção de tensão, ressonâncias paralela no capacitor para

correção do fator de potência, aquecimento e sobrecarga nos transformadores de potência, erros nos medidores elétricos, mau funcionamento do sistema de proteção, defeitos nos condutores de energia, interferência nas linhas de comunicação e sistemas de controle, telefone e redução da eficiência dos motores pelo aquecimento dos enrolamentos do circuito do estator e do rotor e torques mecânicos pulsantes, principalmente os resultantes da indução de harmônicos de tensão de sequência negativa.

As tensões harmônicas, são o produto das correntes harmônicas injetadas na rede pela impedância apresentada pela rede para cada harmônico. A composição destas tensões harmônicas com a tensão do sistema resulta numa tensão total distorcida.

A distorção harmônica de tensão é susceptível de alcançar altos valores quando as correntes harmônicas encontram um circuito de ressonância série ou paralela. Uma ressonância paralela apresenta uma alta impedância para a corrente levando a valores elevados de distorção harmônica. Um circuito ressonante série proporciona um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas as quais, por seu lado, causarão elevadas distorções nos ramos indutivos e capacitivos. A distorção máxima de tensão em um sistema de potência não necessariamente ocorre no ponto de conexão da carga perturbadora. Amplificações podem ser causadas em pontos relativamente distantes na rede, e isto deve sempre ser levado em consideração ao se conectar cargas não lineares.

Os efeitos da distorção de tensão podem ser divididos em três categorias: esforços nos isolamentos devidos ao efeito da tensão, esforços térmicos devidos ao fluxo de corrente e perturbações nas cargas. Os esforços nos isolamentos estão associados à taxa de crescimento da onda e o seu valor de pico, portanto ao ângulo de fase entre os harmônicos e a fundamental, enquanto que os esforços térmicos e as perturbações nas cargas estão associados ao valor eficaz dos harmônicos e da fundamental.

Como já foi dito, as tensões em cada fase de um sistema de potência equilibrado devem ter a mesma amplitude e serem defasadas uma em relação a outra de 120 graus. No entanto alguns fatores provenientes do sistema causam diferenças de amplitude e dos ângulos de defasamento da tensão de suprimento; em outras palavras, causam desequilíbrios. Este desequilíbrio é normalmente avaliado através das componentes

simétricas que transformam um sistema desequilibrado num somatório de sistemas equilibrados.

Os principais problemas relacionados com o desequilíbrio são: aquecimentos adicionais em máquinas síncronas e assíncronas; modulação da tensão de saída dc dos retificadores; surgimentos de harmônicos não característicos.

Com base no exposto, a necessidade de maiores informações sobre distúrbios envolvendo a qualidade da energia elétrica, tem se tornado maior nos últimos anos, principalmente para se determinar a extensão e natureza dos distúrbios, sua origem e a sua área de influência, e para identificar soluções em potencial.

Opções técnicas são analisadas para correção do problema, entretanto o enfoque de onde atuar, se no sistema da concessionária ou do consumidor dependerá largamente das circunstâncias específicas, do custo final da solução e da análise dos dados, resultados das medições.

Entretanto, uma boa parte dos problemas poderá ser solucionado no melhoramento das instalações elétricas do consumidor como aterramentos, conexões, distribuição dos circuitos, etc.

Cargas sensíveis e fontes de poluição, por exemplo, podem ser isoladas através de projeto adequado para minimizar as interferências. Da mesma forma deve-se tomar a precaução para estes circuitos especiais que podem introduzir poluição no sistema elétrico: tanto o neutro quanto as malhas de aterramento das instalações dos consumidores, serão fontes de distúrbios. Assim, o monitoramento da qualidade de energia é uma tarefa complexa que exige a integração de campos específicos e diversos da Engenharia: Eletrônica, Eletrotécnica, Controle de Processos, Telecomunicações. O desenvolvimento dessas atividades exigem, portanto, pessoal especializado, pesquisas, estudos, intensa interação com outras áreas do conhecimento da Engenharia, instrumentação especial e íntima interação com outros clientes, além de um imprescindível planejamento para enfrentar cada situação.

É dentro deste cenário que o desenvolvimento do presente trabalho representa um passo em direção à busca de uma conceituação didática orientada à qualidade técnica.

1.2 - *Motivação desta Dissertação*

A necessidade de se garantir, o perfeito funcionamento de um sem número de equipamentos eletro-eletrônicos, e ter soluções para questões, tais como; se esses equipamentos não estão atuando corretamente, identificar o problema real, procurar a melhor solução tecno-econômica para estes problemas, monitorar a qualidade da energia recebida, e medi-la corretamente, torna-se hoje uma preocupação não só do consumidor e concessionária, mas também é um desafio para campos específicos e diversos da engenharia.

Ao destacar a necessidade de se garantir a qualidade da energia elétrica, através de mudanças, nos sistemas e conceitos, e ainda, a necessidade de um envolvimento maior entre a concessionária, os consumidores, os fabricantes, consultores e pesquisadores, é que nos sentimos motivados e envolvidos no sentido de dar uma contribuição a um tema tão preocupante, face as exigências e necessidades, dos vários setores envolvidos no negócio elétrico como um todo.

1.3 - *Objetivo e Escopo*

Os objetivos principais deste trabalho são o desenvolvimento de uma conceituação didática orientada a qualidade técnica da energia elétrica, apresentando ainda a idealização de um software educacional, com base na nova realidade do sistema elétrico. Juntos, eles tem a finalidade de ajudar as atividades de ensino nesta área, inicialmente em nível de graduação, e assim contribuir na abordagem de alguns dos fenômenos que afetam a qualidade e no possível desenvolvimento de tecnologia.

O software lidará com a análise dos seguintes sistemas:

- Sistemas Simétricos Senoidais
- Sistemas Assimétricos Senoidais

- Sistemas Simétricos Não Senoidais
- Sistemas Assimétricos Não Senoidais

Neste trabalho são sugeridos alguns caminhos através dos quais é possível analisar sistemas trifásicos com distorção e, eventualmente propor uma solução para correção.

A medida que se visualizam os efeitos da nova geração de cargas no serviço elétrico, os especialistas começaram a preocupar-se com a teoria geralmente aceita dos sistemas trifásicos, em especial os conceitos básicos que descrevem as condições de transporte e entrega de energia - potência aparente, ativa, e reativa, fator de potência, etc.

É hoje reconhecido que muitas das definições trifásicas normativas destas magnitudes [5], foram extensões um pouco ingênuas dos conceitos monofásicos, e dão lugar a erros quando aplicadas ao uso trifásico distorcido. Estes erros não tem apenas consequências teóricas, mas também econômicas, porque a estrutura tarifária se baseia em uma pactuação sobre a base de definições que, se for questionáveis, dão origem a uma reação em cadeia de protestos, discussões e ações jurídicas, estremecendo as próprias bases da comercialização de eletricidade.

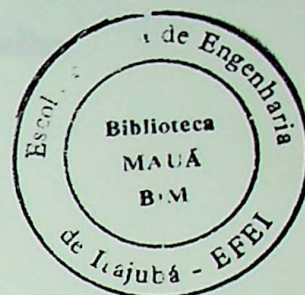
Assim, uma vertente desta “nova era” do serviço elétrico consiste em uma revisão profunda da teoria dos sistemas trifásicos distorcidos. Poder-se-ia dizer que a mais radical das conclusões desta revisão se refere as limitações dos conceitos fasoriais para investigar os fenômenos e apontar os métodos de restauração da qualidade.

Ainda que a natureza destas circunstâncias críticas sejam muito diferentes, seus esforços e consequências apontam para uma direção: a necessidade de uma reengenharia do setor elétrico baseada no correto equacionamento dos Custos da empresa, as Imperfeições do produto e a Preferência do cliente.

Na busca de uma harmonia entre os fatores em jogo, é mister cuidar simultaneamente da ferramenta analítica, revisando velhas teorias e criando outras novas, e das tecnologias disponíveis para solucionar os conflitos através do aumento da qualidade e a diminuição dos custos. Neste trabalho se mostra um pequeno exemplo desta atividade, relacionando com a formulação de novas técnicas para a compensação de imperfeições das mesmas. Ponto a parte de tudo isto, uma reflexão nos conforta: longe de ser imobilista, o setor elétrico mostra sua capacidade de inovar, tanto nas

linguagens, e descrição dos fenômenos, como nos aproveitamentos dos avanços tecnológicos da eletrônica, da informática e do controle para atravessar as mais graves crises e continuar sendo uma alavanca fundamental de nosso sistema produtivo e do bem estar social.

1.4 - Descrição do Texto



Um resumo da evolução do tema sobre qualidade de energia elétrica e suas implicações foi apresentado no capítulo 1, onde também foram estabelecidas as razões que motivaram a pesquisa deste tema de dissertação de mestrado, bem como as metas e ações para seu desenvolvimento.

No capítulo seguinte, capítulo 2, é discutida a análise dos sistemas trifásicos no domínio do tempo. Onde será discutido a representação dos valores instantâneos das grandezas envolvidas no sistema, a representação gráfica destas grandezas, a transformação de coordenadas, e a decomposição das correntes, a corrente de **Fryze** e de **Tenti**, e os valores eficazes.

Analogamente, no capítulo 3 será apresentada a análise dos sistemas trifásicos no domínio da frequência. Contendo a representação das magnitudes senoidais, e não senoidais, as componentes harmônicas e os valores eficazes.

O capítulo 4, apresentará a representação das potências, no domínio do tempo e da frequência, as potências, Média, Aparente e Fictícia, as potências em coordenadas simétricas, as potências em sistemas não senoidais e apartir das componentes harmônicas.

O capítulo 5, discutirá as definições práticas orientadas ao diagnóstico e tarifação da qualidade. A conceituação das potências desde o ponto de vista do transporte de energia, os sistemas não senoidais, o fator de potência harmônico, as potências assimétricas e harmônicas.

No capítulo 6, será visto alguns exemplos que envolverão as condições das cargas nos sistemas elétricos, afim de ilustrar a teoria apresentada.

O capítulo 7, apresentará o software desenvolvido. Apresentando as telas gráficas para os casos simulados, contidas nos apêndices no final deste trabalho.

Por último, o capítulo que tratará das conclusões desta pesquisa é designado por capítulo 8, o qual se deterá em consolidar as principais orientações, análises e contribuições apresentadas ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

2.1 - Introdução

Como foi dito no princípio, a análise de Sistemas Trilíneos distorcidos possui de uma visão instantânea das variáveis envolvidas. Apesar de ser esta a maneira natural de estudar fenômenos que evoluem no tempo, a dita facilidade encontra de tal modo a imaginação dos analistas que os modelos no domínio do tempo tornam-se cada vez mais complexos e mais difíceis de manejar. Por este motivo, inclui-se nesta seção um resumo da chamada "Teoria Vetorial Instantânea" dos Sistemas Trilíneos. Baseado na chamada "Teoria FBD" (Fryer, Bach e Deppenhook [13]).

2.2 - Valores Instantâneos

2.2.1 - Conceitos Introdutórios

Considerando os três condutores de fase (a, b, c), além de um eventual condutor neutro (n) (figura 2.1), as correntes instantâneas por eles expressam-se mediante o

Capítulo 2

Análise dos Sistemas Trifásicos no Domínio do Tempo

2.1 - Introdução

Como foi dito ao princípio, a análise de Sistemas Trifásicos distorcidos precisa de uma visão instantânea das variáveis envolvidas. Apesar de ser esta a maneira natural de estudar fenômenos que envolvem no tempo, a ótica fasorial permeou de tal modo a imaginação dos analistas que os modelos no domínio do tempo resultam pouco familiares e escassamente difundidos. Por este motivo, inclui-se nesta exposição um resumo da chamada “Teoria Vetorial Instantânea” dos Sistemas Trifásicos. Baseados na chamada “Teoria FBD” (Fryze, Buch e Depenbrock) [13]

2.2 - Valores Instantâneos

2.2.1 - Conceitos Introdutórios

Considerando os três condutores de fase (a, b, c), além de um eventual condutor neutro (n), (figura 2.1), as correntes circulando por eles expressam-se mediante o

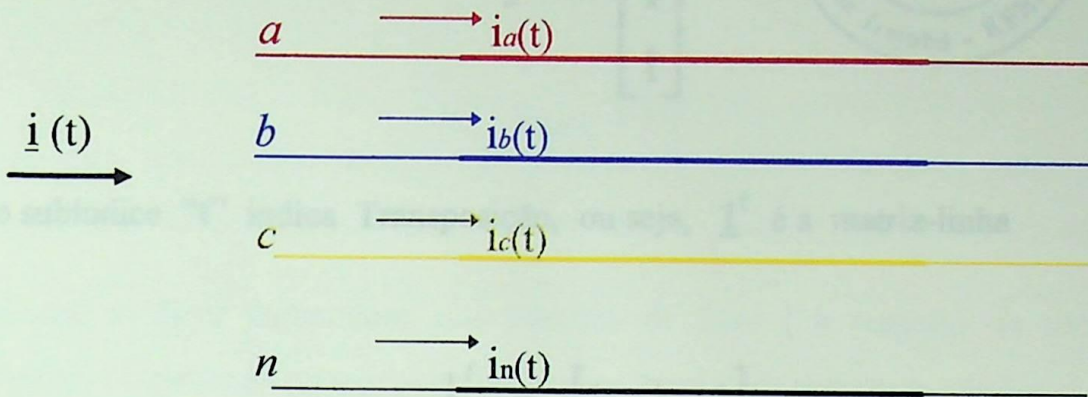


Figura 2.1 - Correntes Instantâneas nos condutores a, b, c.

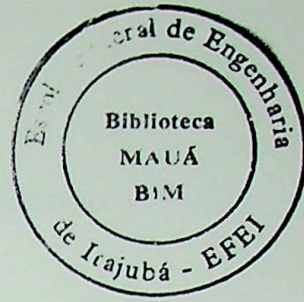
Vetor Instantâneo das Correntes de Fase:

$$\underline{i} = \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (2.01)$$

A corrente resultante no Neutro, dada como:

$$i_n(t) = \underline{1}^t \cdot \underline{i}(t) \quad (2.02)$$

onde $\underline{1}$ é o vetor (matriz-coluna):



$$\underline{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.03)$$

e o subíndice "t" indica Transposição, ou seja, $\underline{1}^t$ é a matriz-linha

$$\underline{1}^t = [1 \quad 1 \quad 1] \quad (2.04)$$

Assim, a expressão (2) é obviamente igual a

$$i_n(t) = i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) \quad (2.05)$$

Se

$$\underline{1}^t \cdot \underline{i} = [1 \quad 1 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.06)$$

o resíduo de corrente circulando pelo neutro é zero. Obviamente, em sistemas sem neutro esta condição é verificada sempre.

O símbolo

$$\underline{v}_{\psi r}(t)$$

indicará o Vetor Instantâneo das Tensões de Fase (a respeito de um ponto de referência indefinido (r) que pode ser neutro, terra, uma das fases, etc.).

Ou seja,

$$\underline{v}_{\psi r}(t) = \begin{bmatrix} v_{ar}(t) \\ v_{br}(t) \\ v_{cr}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_r \\ v_r \\ v_r \end{bmatrix} \quad (2.07)$$

Onde a explicitação da dependência temporal (t) pode, como se vê, ser omitida desde que não gere confusão. Assim se pode escrever ainda que;

$$\underline{v}_{\psi r}(t) = \underline{v}_{\psi} - \underline{v}_r = \underline{v}_{\psi} - v_r \cdot \underline{1} \quad (2.08)$$

O subíndice ψ pode também ser abandonado quando convir. Não perder de vista que o carácter vetorial de uma grandeza é ressaltado pelo sublinhado na letra indicativa.

2.2.2 - Representação Gráfica dos Valores Instantâneos

A Figura 2.2(a e b) ilustra a representação geométrica do vetor $\underline{\dot{\mathbf{i}}}(t)$, que representa um ponto variável no espaço de três dimensões, para os Valores Instantâneos assumidos. O extremo deste vetor geométrico, desloca-se, ao longo do tempo, sobre uma *Trajétória*. Note-se que o caráter vetorial de uma grandeza é ressaltado pelo sublinhado (*barra horizontal debaixo da letra indicativa*). Em particular, os vetores base, unitários (versores) terão uma barra curva debaixo da letra indicativa.

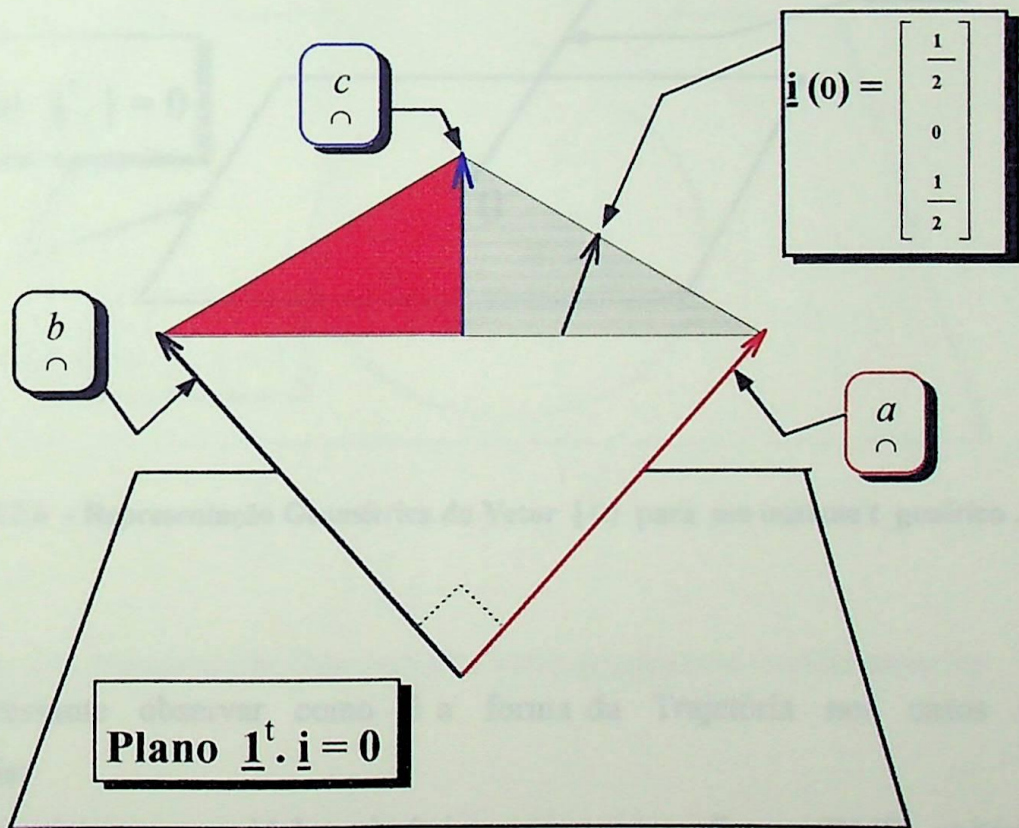


Figura 2.2 a - Representação Geométrica do Vetor $\underline{\dot{\mathbf{i}}}(t)$ para , $\underline{\dot{\mathbf{i}}}(0)$, Valor do Vetor $\underline{\dot{\mathbf{i}}}(t)$ no Instante $t = 0$.

Quando o fenômeno é periódico, a trajetória se inscreve sob uma curva fechada que o ponto percorre repetitivamente.

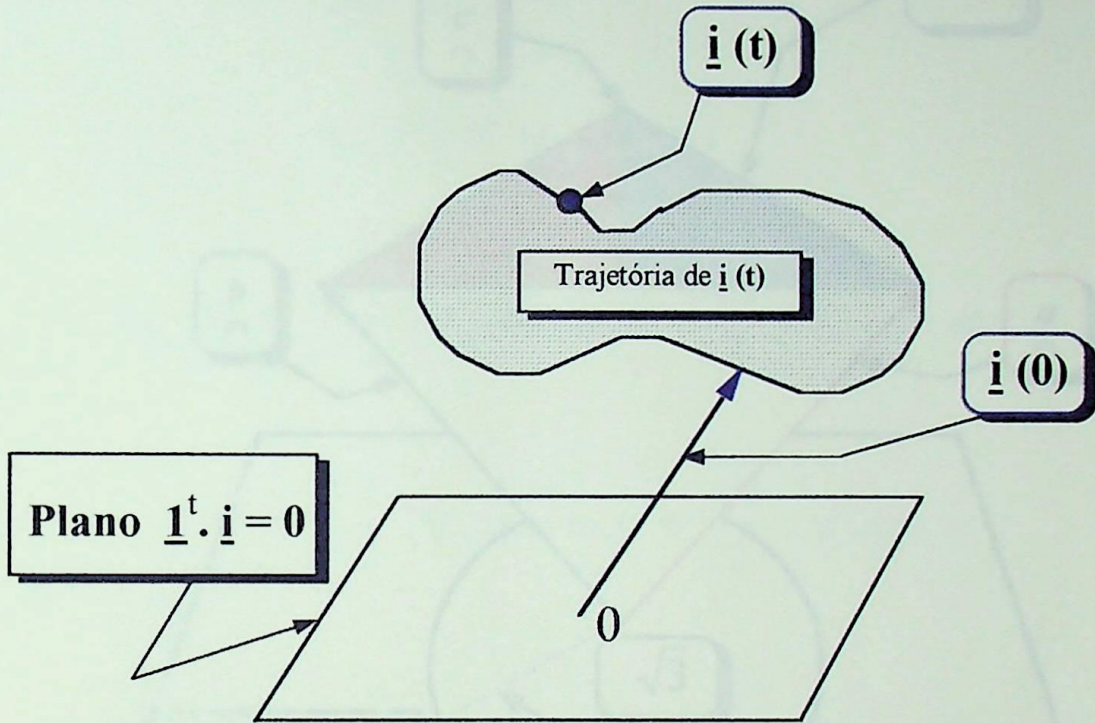


Figura 2.2 b - Representação Geométrica do Vetor $\underline{i}(t)$ para um instante t genérico .

É interessante observar como é a forma da Trajetória nos casos mais convencionais:

Para um sistema senoidal e simétrico com valor eficaz (RMS) unitário, a Trajetória (Figura 2.3), é um círculo no plano $\underline{1}^t \cdot \underline{i} = 0$, com centro na origem e raio $\sqrt{3}$.

O ponto percorre o círculo uniformemente com frequência ω , mostrando o paralelismo (e ao mesmo tempo, a diferença) com a interpretação fasorial de um

vetor complexo girante, cuja “fotografia” em $t = 0$ associa-se ao *Fasor* cujo extremo percorre, também, um círculo.

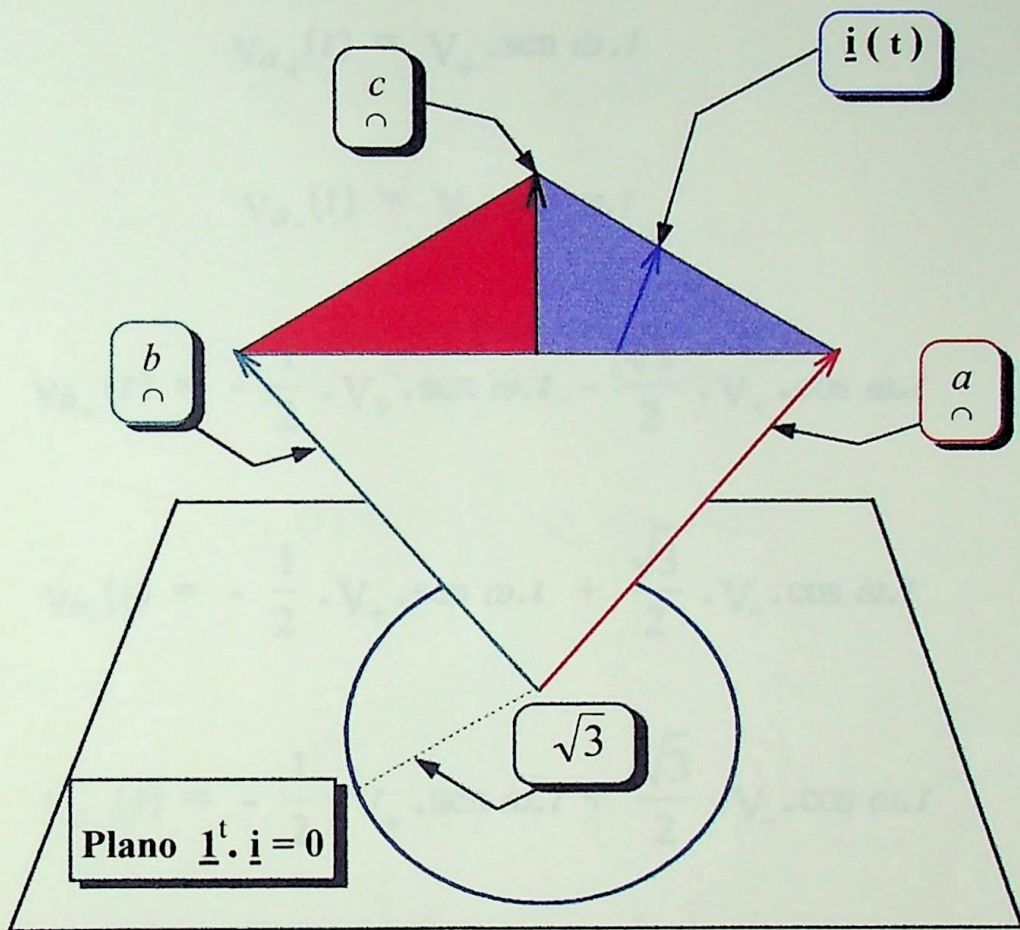


Figura 2.3 - Representação Geométrica do Vetor $\underline{i}(t)$ para caso senoidal simétrico.

Já no caso de existir uma componente adicional de sequência negativa (assimetria), a trajetória se deforma para uma elipse cujo eixo maior é a soma dos módulos das componentes positiva e negativa, e o eixo menor a diferença. Uma sequência zero inclina o plano da elipse, “descolando-o” do plano $\underline{1}^t \cdot \underline{i} = 0$.

Todas as afirmações sobre a forma das trajetórias podem ser demonstradas matematicamente. Apenas com um propósito didático, isto será feito para um sistema senoidal que possui componentes de sequência positiva e negativa:

$$V_{a_+}(t) = V_+ \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.09)$$

$$V_{a_-}(t) = V_- \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.10)$$

$$V_{b_+}(t) = -\frac{1}{2} \cdot V_+ \cdot \text{sen } \omega \cdot t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_+ \cdot \text{cos } \omega \cdot t \quad (2.11)$$

$$V_{b_-}(t) = -\frac{1}{2} \cdot V_+ \cdot \text{sen } \omega \cdot t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_- \cdot \text{cos } \omega \cdot t \quad (2.12)$$

$$V_{c_+}(t) = -\frac{1}{2} \cdot V_+ \cdot \text{sen } \omega \cdot t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_- \cdot \text{cos } \omega \cdot t \quad (2.13)$$

$$V_{c_-}(t) = -\frac{1}{2} \cdot V_- \cdot \text{sen } \omega \cdot t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_+ \cdot \text{cos } \omega \cdot t \quad (2.14)$$

Transformando para Coordenadas de Park por meio da matriz

$$\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$



Chega-se aos valores :

$$v_{0+}(t) = 0 \quad (2.15)$$

$$v_{0-}(t) = 0 \quad (2.16)$$

$$v_{\alpha+}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_+ \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.17)$$

$$v_{\alpha-}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_- \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.18)$$

$$v_{\beta+}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_+ \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.19)$$

$$v_{\beta-}(t) = - \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_- \cdot \text{cos } \omega \cdot t \quad (2.20)$$

A resultante é :

$$v_o(t) = 0 \quad (2.21)$$

$$v_{\alpha}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot (V_+ + V_-) \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.22)$$

$$v_{\beta}(t) = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot (V_+ - V_-) \cdot \text{cos } \omega \cdot t \quad (2.23)$$

E portanto:

$$\frac{v_{\alpha}}{V_+ + V_-} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.24)$$

$$\frac{v_{\beta}}{V_+ - V_-} = \frac{3}{2} \cdot \text{sen } \omega \cdot t \quad (2.25)$$

logo;

$$\frac{(V_{\alpha})^2}{(V_+ + V_-)^2} + \frac{(V_{\beta})^2}{(V_+ - V_-)^2} = \frac{3}{2} \quad (2.26)$$

Que é a equação de uma elipse com centro na origem e semi eixos $\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot (V_+ + V_-)$, $\sqrt{\frac{3}{2}} \cdot (V_+ - V_-)$. (Figura 2.4).

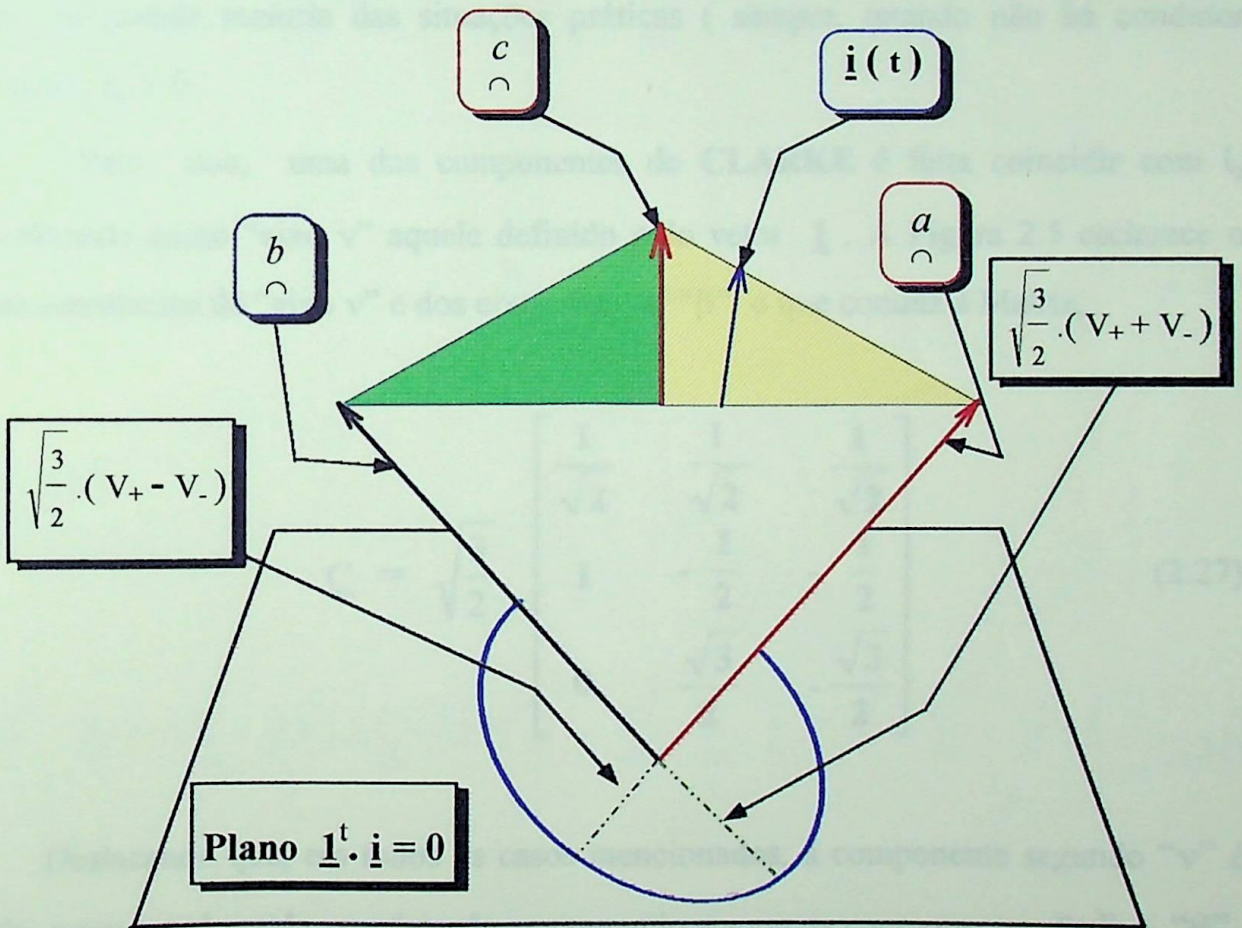


Figura 2.4 - Representação Geométrica para o caso assimétrico.

2.2.3 - Transformações de Coordenadas

Quando se interpreta a $\underline{i}(t)$ como um vetor geométrico, as correntes de fase representam as componentes de $\underline{i}(t)$ em um sistema de coordenadas ortogonal, o Sistema Fásico, a respeito do qual, cada corrente é uma coordenada de fase.

O mesmo vetor $\underline{i}(t)$ pode ser representado em outros sistemas ortogonais. Em certos casos, esta mudança de coordenadas pode trazer consigo simplificações que facilitem os cálculos e a compreensão dos fenômenos.

A Transformada de **CLARKE - PARK** constitui-se na mais relevante destas mudanças de coordenadas com propriedades simplificadoras. Ela explora o fato de que, na grande maioria das situações práticas (sempre, quando não há condutor neutro), $i_n = 0$.

Para isso, uma das componentes de **CLARKE** é feita coincidir com i_n escolhendo como “eixo v” aquele definido pelo vetor $\underline{1}$. A Figura 2.5 esclarece o posicionamento do “eixo v” e dos eixos “ α ” e “ β ” o que conduz à Matriz;

$$\underline{C} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Destacando que, em todos os casos mencionados, a componente segundo “v” é nula, e seu estudo pode ser efetuado empregando apenas as componentes “ α ” e “ β ”.

É fácil verificar que \underline{C} é ortogonal, isto é;

$$\underline{C}^{-1} = \underline{C}^t \quad (2.28)$$

Uma consequência prática deste fato é que a potência $p(t)$ pode ser calculada a partir das componentes de **CLARKE** pela mesma expressão usada com a representação física.

Com efeito, sejam a tensão \underline{e} e a corrente \underline{h} de **CLARKE** ; ter-se-à :

$$\underline{e} = \underline{\underline{C}} \cdot \underline{v} \quad (2.29)$$

$$\underline{h} = \underline{\underline{C}} \cdot \underline{i} \quad (2.30)$$

e portanto,

$$\underline{e}^t \cdot \underline{h} = (\underline{\underline{C}} \cdot \underline{v})^t \cdot (\underline{\underline{C}} \cdot \underline{i}) = \underline{v}^t \cdot \underline{\underline{C}}^t \cdot \underline{\underline{C}} \cdot \underline{i} = \underline{v}^t \cdot \underline{\underline{C}}^{-1} \cdot \underline{\underline{C}} \cdot \underline{i} \quad (2.31)$$

$$\underline{e}^t \cdot \underline{h} = \underline{v}^t \cdot \underline{i} = p \quad (2.32)$$

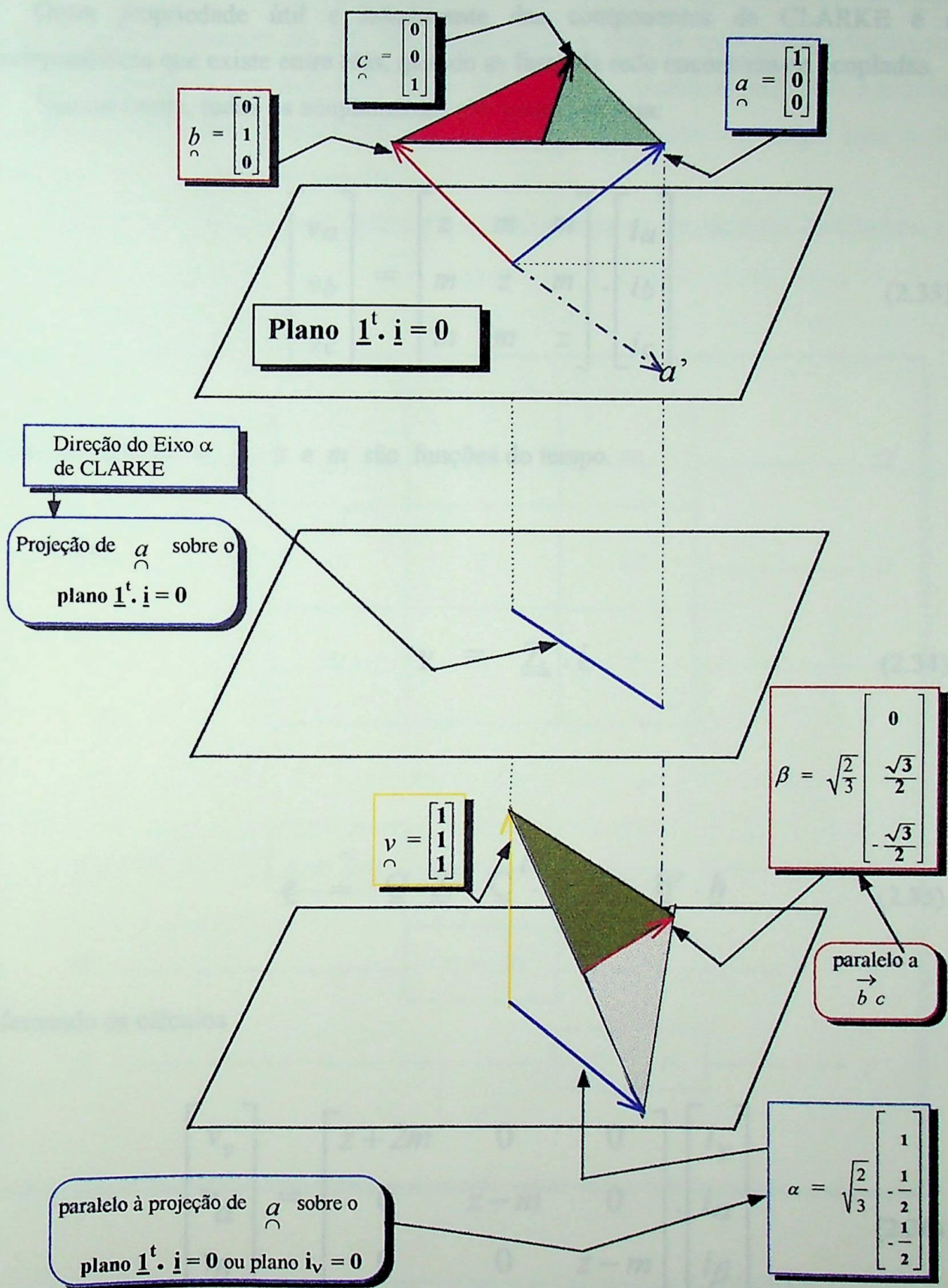


Figura 2.5 - Representação Geométrica do Vetor $\underline{i}(t)$ para as Coordenadas de CLARKE.

Outra propriedade útil e interessante das componentes de CLARKE é a independência que existe entre elas, quando as fases da rede encontram-se acopladas.

Normalmente, todos os acoplamentos são iguais, ou seja:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z & m & m \\ m & z & m \\ m & m & z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

onde, é claro, as v , i , z e m são funções do tempo.

Assim,

$$\underline{v} = \underline{Z} \cdot \underline{i} \quad (2.34)$$

e

$$\underline{e} = \underline{C} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{C}^t \cdot \underline{h} = \underline{W} \cdot \underline{h} \quad (2.35)$$

efetuando os cálculos

$$\begin{bmatrix} v_v \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z+2m & 0 & 0 \\ 0 & z-m & 0 \\ 0 & 0 & z-m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_v \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Isto é, \underline{W} é uma matriz diagonal e por consequência as componentes de CLARKE circulam individualmente por três redes desacopladas, com as conseguintes vantagens de ordem conceitual e prático. *Last but not least*, esta circunstância prenuncia a estreita ligação existente entre a transformação de Clarke no domínio do tempo com a de Fortescue no domínio da frequência.

A Figura 2.6 ilustra o desacoplamento existente entre as coordenadas de Clarke.

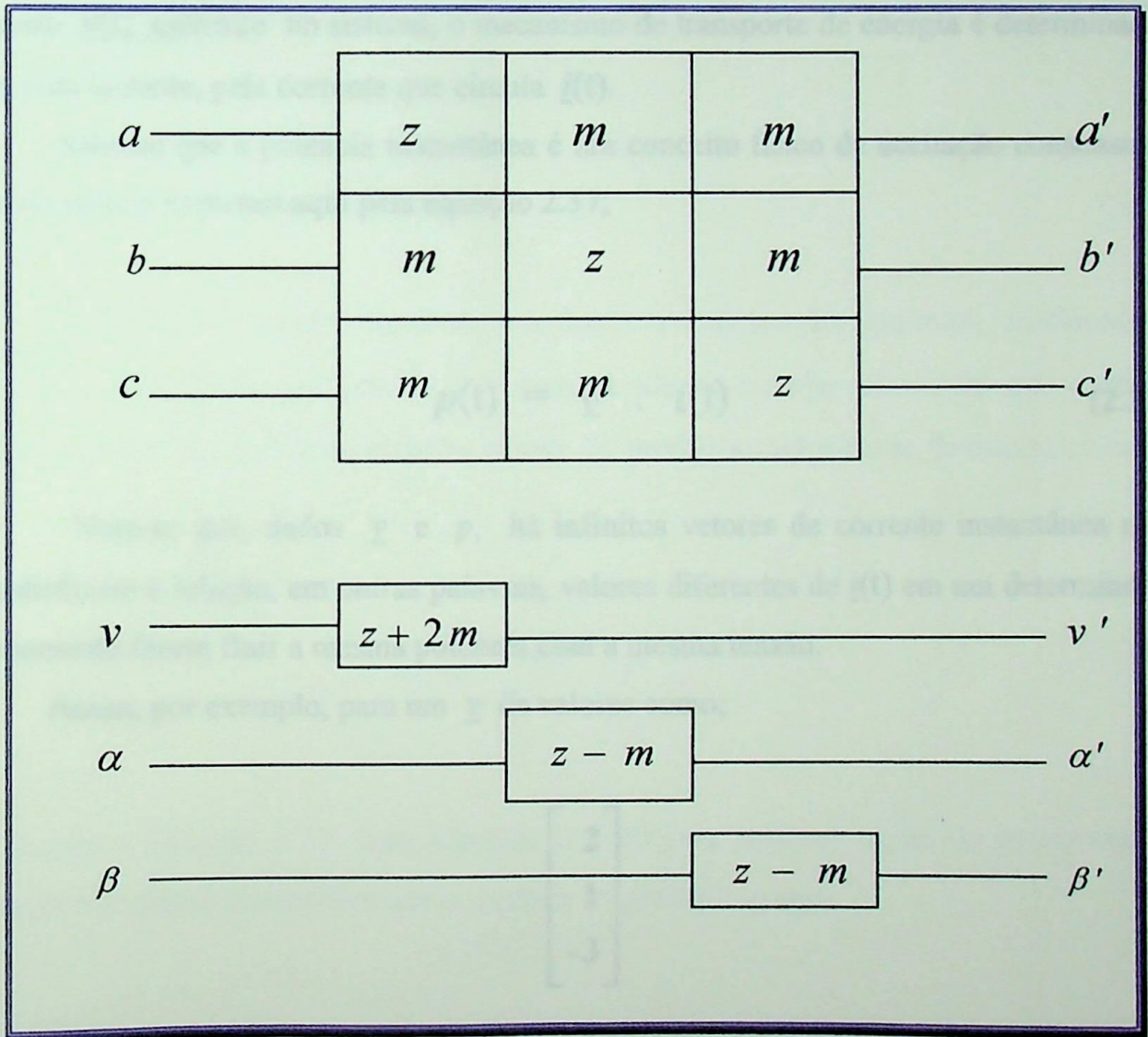


Figura 2.6 - Deslocamento existente entre as Coordenadas de CLARKE.

2.3 - Decomposições da Corrente

2.3.1 - Conceitos Introdutórios

Potência Aparente, Fator de Potência e Potência Não Ativa são conceitos bastante arbitrários, e suas definições parecem impostas manu-militare. Estas artificialidades podem ser debeladas ao menos parcialmente, levando em consideração que para um certo $\underline{v}(t)$ aplicado no sistema, o mecanismo de transporte de energia é determinado, a cada instante, pela corrente que circula $\underline{i}(t)$.

Sabe-se que a potência instantânea é um conceito físico de aceitação consensual, cujo valor é expresso aqui pela equação 2.37;

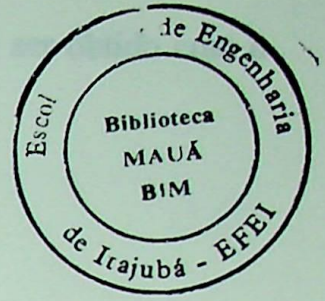
$$p(t) = \underline{v}^t \cdot \underline{i}(t) \quad (2.37)$$

Note-se que, dados \underline{v} e p , há infinitos vetores de corrente instantânea que satisfazem a relação, em outras palavras, valores diferentes de $\underline{i}(t)$ em um determinado momento fazem fluir a mesma potência com a mesma tensão.

Assim, por exemplo, para um \underline{v} de valores como;

$$\begin{bmatrix} 2 \\ 1 \\ -3 \end{bmatrix}$$

as duas correntes distintas;



$$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 4 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -2 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}$$

determinam a circulação de -9 unidades de potência.

Perante esta multiplicidade de correntes conduzindo idêntica potência, cabe se perguntar se, entre elas, existe alguma com características que a fazem “preferível” a todas as outras.

2.3.2 - A Corrente de FRYZE

Em 1932, S. Fryze [6] observou que, dentre o conjunto das correntes, verificando a com \underline{v} e \underline{p} dadas, há uma (\underline{i}_p) e uma só que, ao circular através de uma rede de transmissão cuja matriz de resistência seja \underline{R} produz a menor perda de energia, isto é,

$$\underline{i}_p^t \cdot \underline{R} \cdot \underline{i}_p = \min \quad (2.38)$$

sujeita à equação 2.37. Esta corrente é a mínima possível capaz de transportar a mesma Potência Instantânea que a corrente original \underline{i} , ou seja;

$$\underline{v}^t \cdot \underline{i}_p = \underline{v}^t \cdot \underline{i} = p \quad (2.39)$$

A solução para o cálculo desta *corrente de FRYZE*, (\underline{i}_p) pode ser obtido com o método de Lagrange.

Assim, define-se;

$$\mathcal{L}(t) = \underline{i}^t \cdot \underline{\underline{R}}_R \cdot \underline{i} - \lambda \cdot (\underline{v}^t \cdot \underline{i} - p) \quad (2.40)$$

onde \mathcal{L} é a função Lagrangiano e λ o multiplicador de Lagrange.

Então;

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \underline{i}} = 2 \cdot \underline{\underline{R}}_R \cdot \underline{i} - \lambda \cdot \underline{v} = 0 \quad (2.41)$$

implica,

$$\underline{i} = \frac{\lambda}{2} \cdot \underline{\underline{R}}_R^{-1} \cdot \underline{v} \quad (2.42)$$

e também,

$$\underline{v}^t \cdot \underline{i} = p = \frac{\lambda}{2} \cdot \underline{v}^t \cdot \underline{\underline{R}}_R^{-1} \cdot \underline{v} \quad (2.43)$$

então desta,

$$\lambda = \frac{2 \cdot p}{\underline{v}^t \cdot \underline{\underline{R}}_R^{-1} \cdot \underline{v}} \quad (2.44)$$

e substituindo 2.44 em 2.42, teremos;

$$i_p = \frac{p}{v^t \cdot \underline{\underline{G}}_R \cdot v} \cdot \underline{\underline{G}}_R \cdot v \quad (2.45)$$

onde,

$$\underline{\underline{G}}_R = \underline{\underline{R}}^{-1} \quad (2.46)$$

Geralmente as redes Trifásicas satisfazem a relação:

$$\underline{\underline{G}}_R = g_R \cdot \underline{\underline{U}} \quad (2.47)$$

onde $\underline{\underline{U}}$ é a matriz unidade, e

$$i_p = \frac{p}{v^2} \cdot v = g \cdot v \quad (2.48)$$

onde,

$$g = \frac{p}{v^2} \quad (2.49)$$

e

$$v^2 = \underline{v}^t \cdot \underline{v} \quad (2.50)$$

v é chamado de valor eficaz do vetor \underline{v} .

Em virtude da análise anterior, toda corrente \underline{i} circulando, impulsionada pela tensão \underline{v} , decompõe-se na forma,

$$\underline{i} = \underline{i}_p + \underline{i}_q \quad (2.51)$$

$$\underline{i}_q = \underline{i} - \underline{i}_p \quad (2.52)$$

E como \underline{i}_p é paralelo a \underline{v} , o vetor \underline{i}_q é normal a \underline{v} . A eq. 2.52, é chamada de **CORRENTE SUPÉRFLUA**, desde que;

$$\underline{v}^t \cdot \underline{i}_q = \underline{v}^t \cdot \underline{i} - \underline{v}^t \cdot \underline{i}_p = p - p = 0 \quad (2.53)$$

Apoiado neste conceito, um Elemento Compensador desenvolvido por **AKAGI** [7] que injete $-\underline{i}_q$ localmente na carga, isto é \underline{i}_k possibilita que, pelo sistema alimentador circule apenas a corrente de Fryze, e o que é muito importante, o compensador não estará criando potência instantânea em qualquer instante imaginável. Isto permite corrigir sem necessidade de armazenar energia (como é o caso da compensação convencional com capacitores).

Assim, a fonte alimentadora precisando apenas introduzir \underline{i}_p , minimiza, desta forma, as perdas na transmissão. O importante é que se, se tem uma corrente \underline{i} "imperfeita" é possível calcular \underline{i}_p por medição (que hoje já pode ser efetuada com transdutores ópticos e micro computadores).

A figura 2.7 ilustra esta situação:

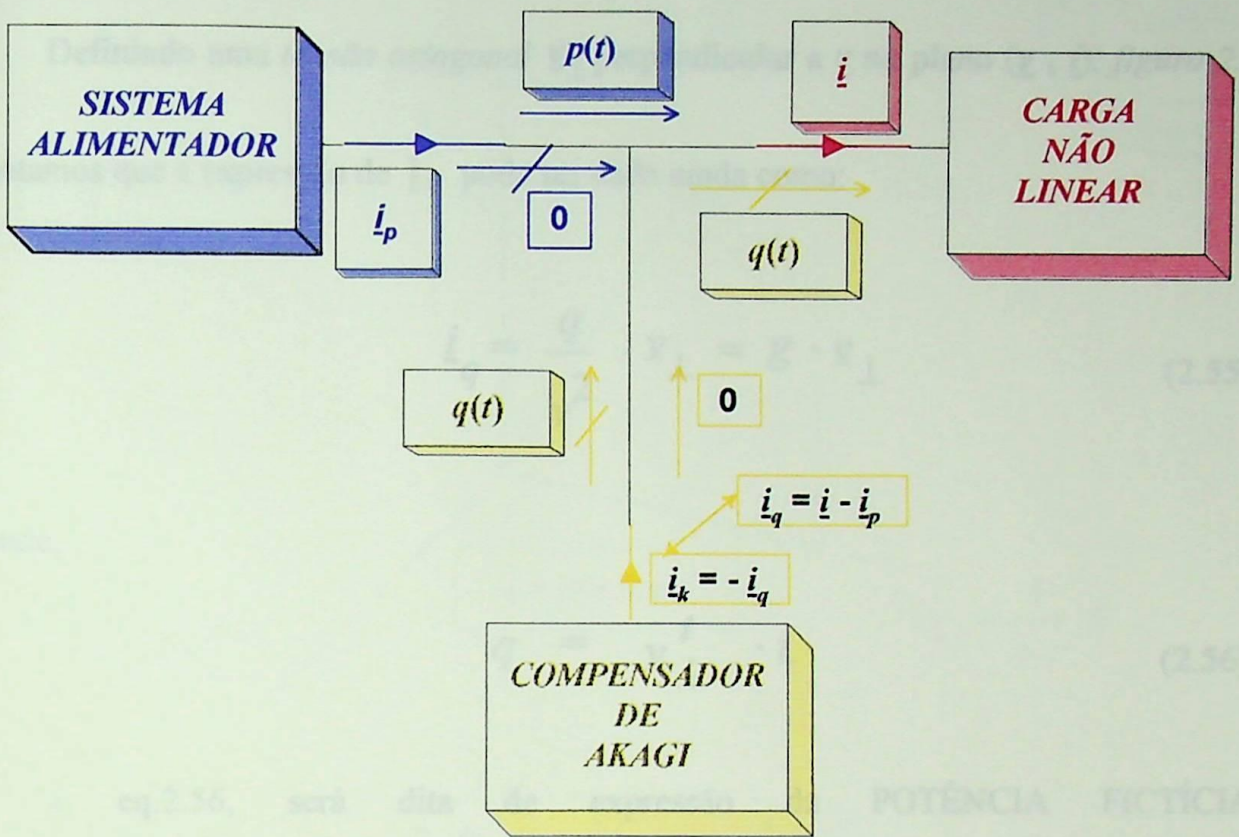


Figura 2.7 - Compensador de AKAGI .

Se a diferença \underline{i}_q é injetada com sinal negativo, ou seja \underline{i}_k , a corrente que deve entregar à fonte, é apenas a componente de Fryze, conseguindo-se assim, um efeito equivalente a da compensação tradicional, só que aqui se corrige “tudo”, ou seja, além de se compensar a potência reativa, se cancelam desequilíbrios, flicker, harmônicos, transitórios, etc. Assim, \underline{i}_k será denominada por corrente injetada pelo compensador de AKAGI e \underline{i}_q corrente supérflua de AKAGI.

Dado que \underline{i}_q não transporta potência instantânea, então;

$$\dot{i}_q = \underline{v}^t \cdot \underline{i}_q = 0 \quad (2.54)$$

Definindo uma *tensão ortogonal* \underline{v}_\perp perpendicular a \underline{v} no plano $(\underline{v}, \underline{i})$, figura 2.8

notamos que a expressão de \underline{i}_q pode ser dada ainda como:

$$\underline{i}_q = \frac{q}{v^2} \cdot \underline{v}_\perp = g \cdot \underline{v}_\perp \quad (2.55)$$

onde,

$$q = \underline{v}_\perp^t \cdot \underline{i} \quad (2.56)$$

e a eq.2.56, será dita de expressão da POTÊNCIA FICTÍCIA INSTANTÂNEA (P.F.I.).

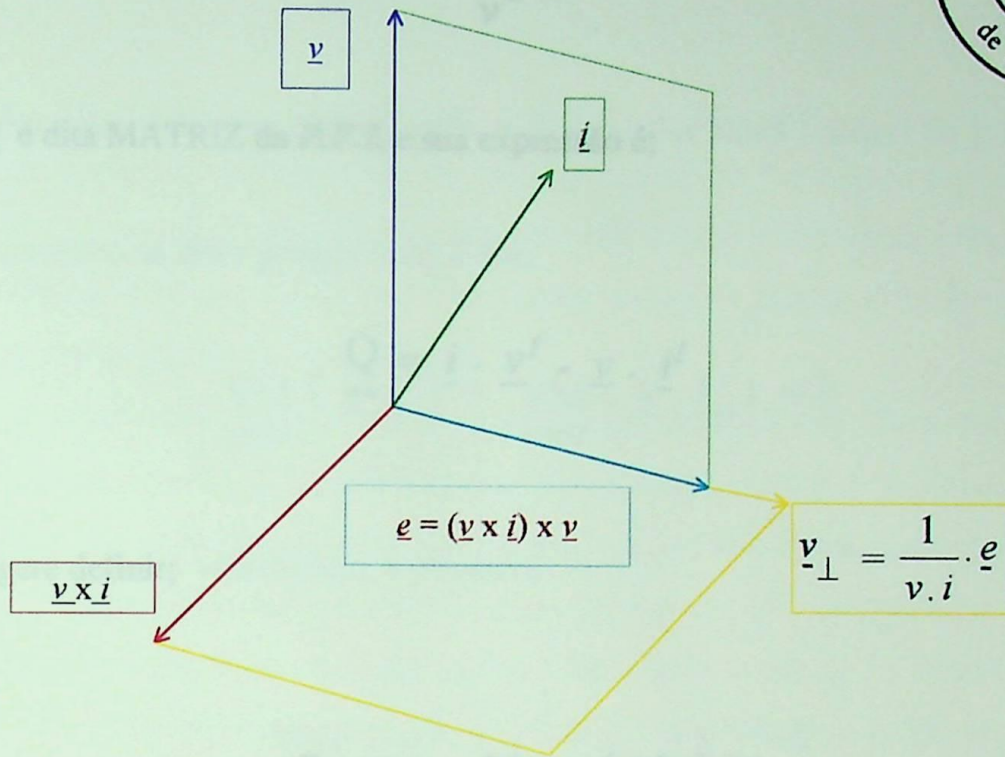


Figura 2.8 - Decomposição da corrente \underline{i} .

Também se pode escrever,

$$i_q = \frac{i \cdot v^t - v \cdot i^t}{v^2} \cdot v \quad (2.57)$$

ou,

$$i_q = \frac{1}{v^2} \cdot \underline{\underline{Q}} \cdot v \quad (2.58)$$

onde $\underline{\underline{Q}}$ é dita MATRIZ da *P.F.I.* e sua expressão é;

$$\underline{\underline{Q}} = \underline{\underline{i}} \cdot \underline{\underline{v}}^t - \underline{\underline{v}} \cdot \underline{\underline{i}}^t \quad (2.59)$$

o que sugere definir;

$$\underline{\underline{P}} = p \cdot \underline{\underline{U}} = (\underline{\underline{v}}^t \cdot \underline{\underline{i}}) \cdot \underline{\underline{U}} \quad (2.60)$$

como MATRIZ da *P.I.*.

2.3.3 - A Corrente de TENTI

Anos após aos trabalhos de Fryze, P. Tenti [2], observou que, existe outra corrente importante $\underline{\underline{i}}_p$ que aqui denomina-se de *corrente de TENTI*, que é a mínima possível capaz de transportar a mesma *energia por ciclo* que a corrente original. Deste modo, análogo ao caso anterior, a *corrente de TENTI* pode ser expressa por;

$$\underline{i}_P = \frac{P}{V^2} \cdot \underline{v} \quad (2.61)$$

onde P é o valor médio de $p(t)$ no ciclo, e V é o valor RMS (eficaz) de \underline{v} no mesmo período.

A consequência desta propriedade, é que,

$$\text{VM}_{\text{ciclo}} (\underline{v}^t \cdot \underline{i}) = \text{VM}_{\text{ciclo}} (\underline{v}^t \cdot \underline{i}_P) = P \quad (2.62)$$

de onde VM indica o valor médio, e portanto;

$$\text{VM}_{\text{ciclo}} (\underline{v}^t \cdot (\underline{i} - \underline{i}_P)) = 0 \quad (2.63)$$

Enquanto, em geral

$$\underline{v}^t \cdot (\underline{i} - \underline{i}_P) \neq 0 \quad (2.64)$$

O que quer dizer, que o compensador que injeta a diferença entre as correntes da carga e a corrente de Tenti não transporta potência média mas sim, precisa trocar energia com o sistema, entregando-a em certos momentos do ciclo e recebendo-a de volta em outros.

Esta potência de troca, com valor médio evidentemente nulo, corresponde a expressão;

$$\tilde{p}(t) = v^t \cdot (i_p - i_P) \quad (2.65)$$

e a energia trocada entre o compensador e o sistema é flutuante, e seu valor máximo define o tamanho do armazenador de energia. Como já foi dito um compensador baseado na corrente de Fryze, têm esta energia igual a zero, e não precisa de elementos para armazenar energia. Como estes elementos possuem custos elevados, pareceria haver uma vantagem a favor desta técnica.

Mas se observando as correntes de compensação de Fryze e de Tenti nota-se que a segunda, contém apenas, as harmônicas que estão presentes em \underline{v} e \underline{i} , enquanto que a primeira têm um espectro que inclui, além delas, outras harmônicas de ordem superior.

Assim, a velocidade dos circuitos de chaveamento em um compensador de Fryze-Akagi têm que ser muito maior. Tecnicamente isto significa perdas de comutação mais elevadas, elementos de armazenagem para provelas e circuitos de recarga, porque estas perdas são flutuantes, senão irreversíveis.

No aspecto teórico a decomposição, efetuada na potência instantânea como soma de uma parte constante P e de outra flutuante $\tilde{p}(t)$, pode ser efetuada também sobre a corrente total; que será dividida em corrente de Tenti e mais uma componente,

$$\underline{i}_p = \underline{i}_P + \tilde{i}_p \quad (2.66)$$

que é justamente, a diferença entre as injeções de compensação nos modelos de Akagi e Tenti.

A figura 2.9 mostra o compensador de Tenti. Assim, o compensador injetará \underline{i}_K denominada por *corrente injetada pelo compensador de TENTI*, que terá sinal oposto a corrente \underline{i}_Q , ou seja, *corrente Supérflua de TENTI*, definida por;

$$\underline{i}_Q = \underline{i} - \underline{i}_P \quad (2.67)$$

2.2.4 - Valores Efetivos

O valor eficaz instantâneo das grandezas tensão e corrente, são representados aqui por:

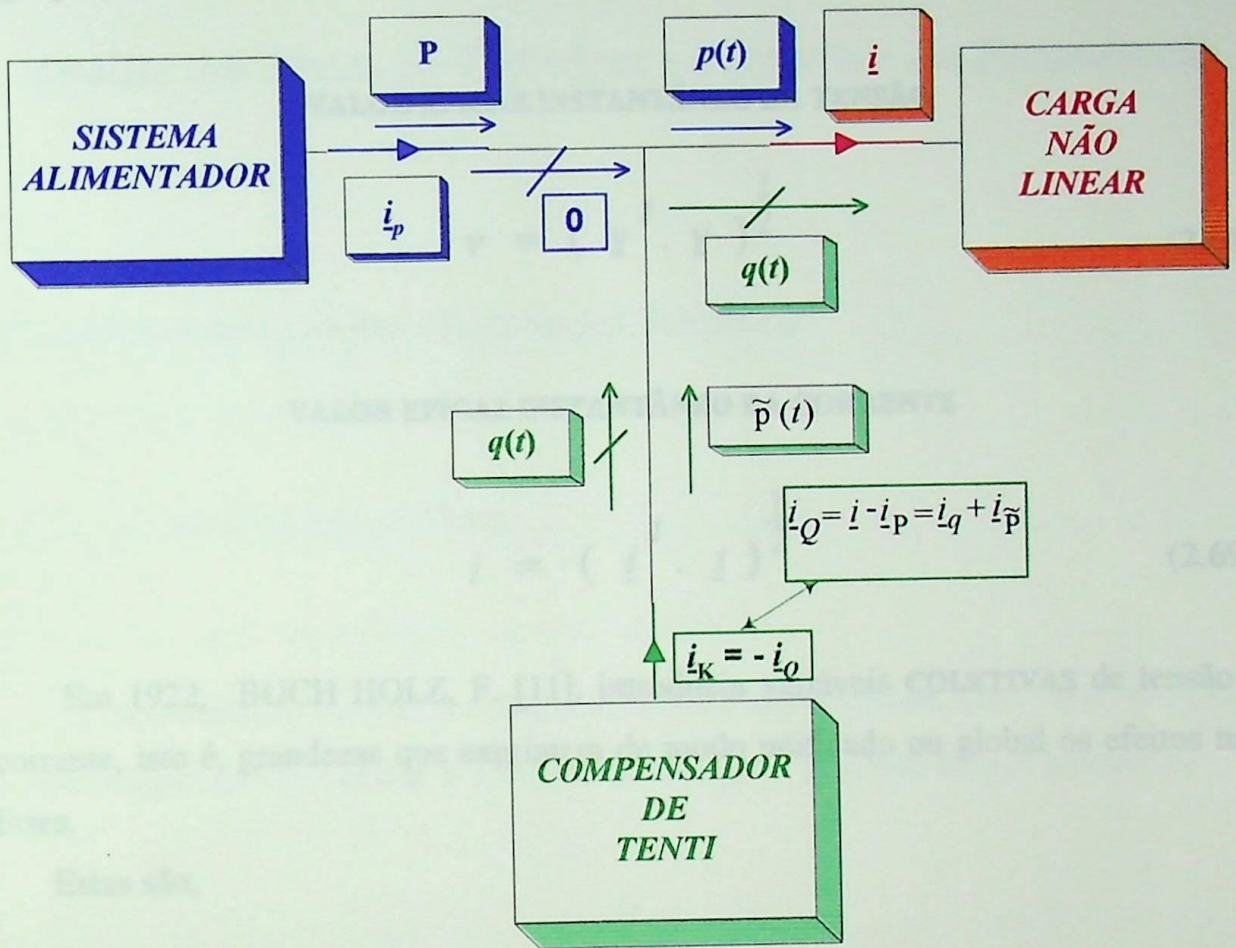


Figura 2.9 - Compensador de TENTI .

2.2.4 - Valores Eficazes

Capítulo 3

O valor eficaz instantâneo das grandezas tensão e corrente, serão representados aqui por;

VALOR EFICAZ INSTANTÂNEO DA TENSÃO

$$v = (\underline{v}^t \cdot \underline{v})^{\frac{1}{2}} \quad (2.68)$$

VALOR EFICAZ INSTANTÂNEO DA CORRENTE

$$i = (\underline{i}^t \cdot \underline{i})^{\frac{1}{2}} \quad (2.69)$$

Em 1922, BUCH HOLZ, F. [11], introduziu variáveis **COLETIVAS** de tensão e corrente, isto é, grandezas que exprimem de modo unificado ou global os efeitos nas fases.

Estas são,

VALOR EFICAZ DA TENSÃO TRIFÁSICA

$$V = (\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \underline{v}^t \cdot \underline{v} dt)^{\frac{1}{2}} \quad (2.70)$$

VALOR EFICAZ DA CORRENTE TRIFÁSICA

$$I = (\frac{1}{T} \cdot \int_0^T \underline{i}^t \cdot \underline{i} dt)^{\frac{1}{2}} \quad (2.71)$$

Capítulo 3

Análise dos Sistemas Trifásicos no Domínio da Frequência

3.1 - Representação das Magnitudes Senoidais

3.1.1 - Conceitos Introdutórios

Na representação fasorial das magnitudes trifásicas senoidais, cada variável de fase é uma senóide de valor eficaz V e ângulo φ na origem, de modo tal que a notação;

$$\underline{\dot{V}}$$

designará o **VETOR FASORIAL DAS TENSÕES DE FASE**, que é um vetor de componentes complexas, isto é, omitindo-se o subíndice de referência temos,

$$\underline{\dot{V}} = \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (3.01)$$

onde \dot{V}_a , \dot{V}_b , \dot{V}_c são números complexos.

É válida a relação básica,

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot \text{Im} (\underline{\dot{V}} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}) \quad (3.02)$$

\dot{V} é abreviado quando conveniente como FASOR TRIFÁSICO DE TENSÃO ou, simplesmente, FASOR DE TENSÃO.

As mesmas considerações valem para as correntes $\underline{\dot{I}}$. Note-se o ponto acima do símbolo indicando que se trata de um valor complexo.

3.1.2 - O Caso Simétrico

Seja,

$$\dot{\alpha} = e^{j120^\circ} \quad (3.03)$$

por definição, uma Tensão Trifásica Idel tem um fasor do tipo,

$$\underline{\dot{V}} = \dot{V} \cdot \underline{\dot{\alpha}} \quad (3.04)$$

onde

$$\dot{\underline{a}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{\alpha}^* \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (3.05)$$

Diz-se que a Variável Trifásica goza de **SIMETRIA POSITIVA** baseando-se no fato de que o vetor $\dot{\underline{a}}$ corresponde, no plano complexo, a uma triade de fasores formando um desenho simétrico, em que a sequência a, b, c das fases vale por um deslocamento angular de 120° de cada vez no Sentido do Relógio.

3.1.3 - O Caso Não Simétrico

Uma variável trifásica senoidal qualquer pode sempre ser expressa como uma soma de três *componentes* na forma mostrada a seguir :

$$\dot{V}_{\psi r} = \dot{V}_0 \cdot \underline{1} + \dot{V}_+ \cdot \dot{\underline{a}} + \dot{V}_- \cdot \dot{\underline{a}}^* \quad (3.06)$$

onde,

$$\underline{1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{\alpha}^* & \dot{\alpha} \\ 1 & \dot{\alpha} & \dot{\alpha}^* \end{bmatrix} \quad (3.08)$$

$$\underline{1} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

note-se que a componente central tem *simetria positiva*. Às outras componentes são atribuíveis, também, simetrias. Assim o termo à direita forma uma triada simétrica análoga à anterior, exceto que a sequência de fases *a, b, c*, vale um deslocamento no sentido contrário ao sentido dos ponteiros do relógio; trata-se então de uma **SIMETRIA NEGATIVA**.

Finalmente, o primeiro termo representa três fasores superpostos; a mudança de fases não provoca deslocamento angular e por este motivo diz-se que tem **SIMETRIA ZERO**.

Ainda, pode-se escrever;

$$\underline{\dot{V}} = \underline{\underline{\dot{F}}} \cdot \underline{\dot{V}}_{\sigma} \quad (3.07)$$

onde a matriz $\underline{\underline{\dot{F}}}$ (DITA MATRIZ DE FORTESCUE) tem a forma;

$$\underline{\underline{\dot{F}}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^* & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^* \end{bmatrix} \quad (3.08)$$

daí resulta;

$$\underline{\dot{V}}_{\sigma} = \underline{\dot{F}}^* \cdot \underline{\dot{V}} \quad (3.09)$$

o que permite o cálculo explícito das **COMPONENTES SIMÉTRICAS** $\underline{\dot{V}}_{\sigma}$ a partir das componentes básicas $\underline{\dot{V}}$.

3.2 - O Caso Periódico Não Senoidal

3.2.1 - Conceitos Introdutórios

Uma variável trifásica, por exemplo, um **VETOR TENSÃO** expresso no tempo, por $\underline{v}(t)$, pode ser convertido ao domínio da frequência, obtendo-se o vetor transformado;

$$\underline{v}(\omega) = \frac{\sqrt{2} \cdot j}{T} \cdot \int_0^{\infty} \underline{v}(t) e^{-j \cdot \omega \cdot t} dt \quad (3.10)$$

a conversão é reversível, sendo;

$$\underline{y}(t) = \sqrt{2} \cdot \text{Im} \left(\int_0^{\infty} \underline{y}(\omega) \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} dt \right) \quad (3.11)$$

estas transformações clássicas são devidas ao matemático **FOURIER**, sendo conhecidas desta forma, por este nome.

3.2.2 - Componentes Harmônicas

A importância prática da representação no domínio da frequência surge no caso de $\underline{y}(t)$ ser periódico. Ou seja, toda variável trifásica periódica em T, como no caso, cada componente de $\underline{y}(t)$ é expressável como um somatório de **COMPONENTES HARMÔNICOS**, assim o vetor temporal poderá ser escrito na forma,

$$\underline{y}(t) = \sqrt{2} \cdot \text{Im} \left(\sum_{h=1}^{\infty} \dot{\underline{V}}_h \cdot e^{j \cdot h \cdot \omega \cdot t} \right) \quad (3.12)$$

onde **Im** significa “*parte imaginária*”, **h** é a “*ordem do harmônico*” e, ω é um valor fixo dito de “*frequência angular fundamental*”, e está ligado ao período **T** pela relação;

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \quad (3.13)$$

O ponto acima de $\dot{\underline{V}}_h$ apenas enfatiza que se trata de um *vetor complexo*, e é denominado de **VETOR (FASORIAL) HARMÔNICO DE ORDEM h**, podendo ser calculado a partir de $v(t)$ pela expressão;

$$\dot{\underline{V}}_h = \frac{\sqrt{2} \cdot j}{T} \cdot \text{Im} \cdot \int_0^T v(t) \cdot e^{-j \cdot h \cdot \omega \cdot t} dt \quad (3.14)$$

e $\dot{\underline{V}}_h$ representa o *fasor harmônico de ordem h*.

Obviamente, se $\underline{v}(t)$ é senoidal, só existe a *componente fundamental* $\dot{\underline{V}}_1$.

3.2.3 - Valores Efícazes

O valor de $i^2(t)$ pode ser calculado se utilizando o raciocínio a seguir;

$$i^2(t) = \sum_{h=1}^{\infty} |\dot{\underline{I}}_h|^2 + \text{Re} \sum_{m=1}^{\infty} \dot{\underline{H}}_m \cdot e^{j \cdot m \cdot \omega \cdot t} \quad (3.15)$$

onde,

$$\dot{\underline{H}}_m = \sum_{h=1}^{\infty} \dot{\underline{I}}_h^t \cdot \dot{\underline{I}}_{h-m}^* + \dot{\underline{I}}_h^t \cdot \dot{\underline{I}}_{m-h} \quad (3.16)$$

Capítulo 4

e

$$|\dot{i}_h|^2 = |\dot{i}_h|^t \cdot |\dot{i}_h| \quad (3.17)$$

Daí que,

$$AV(i^2(t)) = I^2 = \sum_{h=1}^{\infty} |\dot{i}_h|^2 \quad (3.18)$$

Capítulo 4

Representação das Potências nos Domínios do Tempo e da Frequência

Afim de complementar a análise de Sistemas Trifásicos Distorcidos, é apresentado neste capítulo, a exposição das potências, a chamada “Teoria Vetorial Instantânea”.

4.1 - Análise das Potências nos Sistemas Trifásicos no Domínio do Tempo

4.1.1 - Conceitos Introdutórios

Levando-se em consideração, o item 2.2, sobre o *Valor Instantâneo das Magnitudes Trifásicas*, encontrado no capítulo 2, será desenvolvida a análise das potências no domínio do tempo, determinando assim, as expressões para a, potência instantânea, potência média, potência instantânea aparente, e potência fictícia instantânea.

A *Potência Instantânea (P.I.)*, ou simplesmente *Potência* quando não houver risco de engano, considerando as representações dos vetores instantâneos das tensões e correntes, discutidos anteriormente, assume a forma;

$$p(t) = \underline{v}'_{\psi} \cdot i_{\psi} = \underline{v}'_{\psi} \cdot i_{\psi} + v_n \cdot 1^t \cdot i_{\psi} \quad (4.01)$$

Ainda,

$$1^t \cdot i_{\psi} = i_n \quad (4.02)$$

representa a Corrente do Neutro. Portanto,

$$p = \underline{v}'^t \cdot i + v_n \cdot i_n \quad (4.03)$$

e obviamente, em sistemas sem neutro, ou com i_n nula,

$$p = \underline{v}'^t \cdot i \quad (4.04)$$

Note-se que p é a única “Potência” com sentido físico, ou seja, com existência real.

4.1.2 - Potências Média, Aparente e Fictícia

Entretanto, é muito interessante considerar a *Potência Média* ao longo de um período de tempo;

$$P = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) \cdot dt \quad (4.05)$$

portanto o produto

$$E = P \cdot T \quad (4.06)$$

indica a *Energia* que fluiu através do sistema durante este lapso de tempo.

A função escalar do tempo

$$s(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (4.07)$$

é dimensionalmente análoga de p . Ela será dita de *POTÊNCIA INSTANTÂNEA APARENTE*.

Ter-se-á ainda a definição;

$$q^2 = s^2 - p^2 \quad (4.08)$$

Onde q será chamada de *POTÊNCIA FICTICIA INSTANTÂNEA (P.F.I.)*. Esta, já mencionada anteriormente, segundo a seção 2.3 sobre a *decomposição da corrente trifásica*, no capítulo 2, onde se descreveu também, a matriz \underline{Q} da P.F.I.

4.2 - Análise das Potências nos Sistemas Trifásicos no Domínio da Frequência

4.2.1 - A Potência nos Sistemas Senoidais

Considerando o que foi visto no item 3.1, no capítulo 3, sobre a *representação fasorial das magnitudes trifásicas senoidais*, e aqui, levando-se em conta a relação fundamental entre valores instantâneos e fasores, pode-se escrever a expressão da potência na forma;

$$p(t) = 2 \cdot \text{Im} \dot{V}_{\psi}^t \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \cdot \text{Im} \dot{I}_{\psi} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} + 2 \cdot \text{Im} \dot{V}_n \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \cdot \text{Im} \dot{I}_n \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \quad (4.09)$$

entretanto, a relação entre complexos:

$$\text{Im} \dot{a} \cdot \text{Im} \dot{b} = \frac{1}{2} \cdot (\text{Re} \dot{a} \cdot \dot{b}^* - \text{Re} \dot{a} \cdot \dot{b}) \quad (4.10)$$

permite chegar a;

$$p(t) = \operatorname{Re}(\underline{\dot{V}}^t \cdot \underline{\dot{I}}^* - \underline{\dot{V}}^t \cdot \underline{\dot{I}} \cdot e^{2j\omega t}) + \operatorname{Re}(\underline{\dot{V}}_n \cdot \underline{\dot{I}}_n^* - \underline{\dot{V}}_n \cdot \underline{\dot{I}}_n \cdot e^{2j\omega t}) \quad (4.11)$$

onde o subíndice ψ foi abandonado por razões de simplicidade.

Nota-se então que a **POTÊNCIA MÉDIA** nos *sistemas senoidais* vale;

$$P = \operatorname{Re}(\underline{\dot{V}}^t \cdot \underline{\dot{I}}^* + \underline{\dot{V}}_n \cdot \underline{\dot{I}}_n^*) \quad (4.12)$$

4.2.2 - Potência em Coordenadas Simétricas

A potência pode ser expressa empregando a decomposição das variáveis trifásicas em componentes simétricas e observando que,

$$\underline{\dot{1}}^t \cdot \underline{\dot{1}} = \underline{\dot{a}}^t \cdot \underline{\dot{a}}^* = 3 \quad (4.13)$$

assim, chega-se a;

$$\underline{\dot{V}}^t \cdot \underline{\dot{I}}^* = 3 \cdot (\underline{\dot{V}}_0 \cdot \underline{\dot{I}}_0^* + \underline{\dot{V}}_+ \cdot \underline{\dot{I}}_+^* + \underline{\dot{V}}_- \cdot \underline{\dot{I}}_-^*) = \underline{\dot{V}}_\sigma^t \cdot \underline{\dot{I}}_\sigma^* \quad (4.14)$$

onde,

$$\dot{\underline{v}}_{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} \dot{v}_0 \\ \dot{v}_+ \\ \dot{v}_- \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

e

$$\dot{\underline{i}}_{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_0 \\ \dot{i}_+ \\ \dot{i}_- \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

continuando este manuseio algébrico, teremos;

$$p(t) = \text{Re}(\dot{\underline{v}}_{\sigma}^t \cdot \dot{\underline{i}}_{\sigma}^* - \dot{\underline{v}}_{\sigma}^t \cdot \underline{\underline{D}} \cdot \dot{\underline{i}}_{\sigma} \cdot e^{2 \cdot j \cdot \omega \cdot t}) \quad (4.17)$$

onde,

$$\underline{\underline{D}} = \underline{\underline{F}} \cdot \underline{\underline{F}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

e também

$$P = \operatorname{Re} \left(\dot{\underline{V}}_{\sigma}^t \cdot \dot{\underline{I}}_{\sigma}^* \right) \quad (4.19)$$

A **POTÊNCIA APARENTE** circulando pelo sistema trifásico é definida como:

$$S = V \cdot I = V_{\sigma} \cdot I_{\sigma} \quad (4.20)$$

Deste modo, fica definido um **FATOR DE POTÊNCIA**;

$$F = \frac{P}{S} \quad (4.21)$$

e uma **POTÊNCIA NÃO - ATIVA**;

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4.22)$$

4.3 - A Potência em Sistemas Não Senoidais

4.3.1 - Conceitos Introdutórios

Para calcular o valor de $p(t)$, da potência instantânea a partir da representação de Fourier das tensões e correntes trifásicas, basta substituir mediante a expressão 3.04 e aplicar algumas propriedades da álgebra complexa:

4.3.2 - A Potência Instantânea a Partir das Componentes Harmônicas

$$\begin{aligned}
 p(t) &= \underline{v}^t \cdot \underline{i} = [\sqrt{2} \cdot \text{Im} \cdot (\sum_{h=1}^{\infty} \dot{\underline{V}}_h^t \cdot e^{j \cdot h \cdot \omega \cdot t})] \cdot [\sqrt{2} \cdot \text{Im} \cdot (\sum_{\ell=1}^{\infty} \dot{\underline{I}}_{\ell} \cdot e^{j \cdot \ell \cdot \omega \cdot t})] = \\
 &= \text{Re} (\sum_{h, \ell=1}^{\infty} \dot{\underline{V}}_h^t \cdot \dot{\underline{I}}_{\ell}^* \cdot e^{j \cdot (h - \ell) \cdot \omega \cdot t} + \sum_{h, \ell=1}^{\infty} \dot{\underline{V}}_h^t \cdot \dot{\underline{I}}_{\ell} \cdot e^{j \cdot (h + \ell) \cdot \omega \cdot t}) = \\
 &= \text{Re} (\sum_{h=1}^{\infty} \dot{\underline{V}}_h^t \cdot \dot{\underline{I}}_h^*) + \text{Re} [\sum_{m=2}^{\infty} (\sum_{h=1}^{\infty} (\dot{\underline{V}}_h^t \cdot \dot{\underline{I}}_{h-m}^* + \dot{\underline{V}}_h^t \cdot \dot{\underline{I}}_{m-h})) \cdot e^{j \cdot m \cdot \omega \cdot t}] = \\
 &= \text{Re} (\sum_{h=1}^{\infty} \dot{\underline{S}}_h) + \text{Re} (\sum_{m=2}^{\infty} \dot{\underline{K}}_m \cdot e^{j \cdot m \cdot \omega \cdot t}) \quad (4.23)
 \end{aligned}$$

onde

$$\dot{S}_h = \dot{V}_h^t \cdot \dot{I}_h^* \quad (4.24)$$

e

$$\dot{K}_m = \sum_{h=1}^{\infty} (\dot{V}_h^t \cdot \dot{I}_{h-m}^* + \dot{V}_{h-m}^{t*} \cdot \dot{I}_h + \dot{V}_h^t \cdot \dot{I}_{m-h}) \quad (4.25)$$

Nestas últimas equações, $h-m$ ou $m-h < 0$ implicam \dot{I}_{h-m}^* ou $\dot{I}_{m-h} = 0$.

Destarte,

$$P = \text{Re} \sum \dot{S}_h \quad (4.26)$$

onde P é a potência média e;

$$\tilde{p}(t) = \text{Re} \sum \dot{K}_m \cdot e^{j \cdot m \cdot \omega \cdot t} \quad (4.27)$$

onde \tilde{p} é dita de potência oscilante.

Capítulo 5

Em Coordenadas Simétricas \underline{E} , \underline{J} , onde E é a tensão e J a corrente, temos;

$$\dot{S}_h = \underline{\dot{E}}_h^t \cdot \underline{\dot{J}}_h^* \quad (4.28)$$

$$\dot{K}_m = \sum_{h=1}^{\infty} \underline{\dot{E}}_h^t \cdot \underline{\dot{J}}_{h-m}^* + \underline{\dot{E}}_h^t \cdot \underline{\underline{D}} \cdot \underline{\dot{J}}_{m-h} \quad (4.29)$$

5.1.1 - Conceitos Introdutórios

A grandeza economicamente mensurável no comércio elétrico é a ENERGIA. Ela é primordial, portanto nas considerações relativas aos sistemas trifásicos que servem de veículo para seu transporte até os consumidores.

O fenômeno de transferência da Energia Elétrica em corrente alternada deve ser analisado como o resultado de seu fluxo a cada instante, ou seja, da potência instantânea associada $p(t)$.

Por sua vez, $p(t)$ é determinada pelos valores assumidos, no instante t , das tensões e correntes envolvidas. Os eixos transmissores projetados para um determinado nível de tensão, tem um valor limite de energia transferível ao longo de um intervalo de tempo, e este limite é fixado por sua capacidade de dissipar as perdas ocorridas.

Para o nível de tensão presabelecido, as perdas dependem das correntes circulantes. Assim, a capacidade de transporte de energia associada a um eixo, se corresponde a um Valor Equivalente I_e das correntes circulantes.

Capítulo 5

Definições Práticas Orientadas ao Diagnóstico e Tarifação da Qualidade

5.1 - Conceituação das Potências Desde o Ponto de Vista do Transporte de Energia

5.1.1 - Conceitos Introdutórios

A grandeza economicamente mensurável no comércio elétrico é a **ENERGIA**. Ela é primacial, portanto nas considerações relativas aos sistemas trifásicos que servem de veículo para seu transporte até os consumidores.

O fenômeno de transferência da Energia Elétrica em corrente alternada deve ser analisado como a resultante do seu fluxo a cada instante, ou seja, da potência instantânea associada $p(t)$.

Por sua vez, $p(t)$ é determinada pelos valores assumidos, no instante t , das tensões e correntes envolvidas. Os elos transmissores projetados para um determinado nível de tensão, tem um valor limite de energia transferível ao longo de um intervalo de tempo, e este limite é fixado por sua capacidade de dissipar as perdas ocorridas.

Para o nível de tensão preestabelecido, as perdas dependem das correntes circulantes. Assim, a capacidade de transporte de energia associado a um elo, se corresponde a um Valor Equivalente I_c das correntes circulantes.

5.1.2 - A Energia Transportada

Dentre deste raciocínio, o passo seguinte é indagar quanta energia E pode ser transportada em virtude de I_c . Aqui se depara com uma característica peculiar à transmissão elétrica em CA.; dependendo da carga alimentada, as energias associadas a um mesmo valor I_c podem ser completamente diferentes

Há, entretanto, um valor máximo E^* expressável como;

$$E^* = V \cdot I_c \cdot H \quad (5.01)$$

onde H é a duração do intervalo, e V a tensão equivalente de transmissão.

Ou seja:

$$P^* = V \cdot I_c \quad (5.02)$$

onde P^* é a potência média transmitida ao longo do intervalo.

A carga para a qual $E = E^*$ diz-se de, *Carga Adaptada*. Qualquer outra carga associada à mesma I_c absorve uma energia menor.

Diz-se ainda, que uma carga capturando $E < E^*$ tem um **FATOR DE POTÊNCIA**;

$$FP = \frac{E}{E^*} = \frac{P}{P^*} < 1 \quad (5.03)$$

Note-se que, embora esta carga induza o transporte de uma energia E menor que a da carga adaptada, precisa da mesma Capacidade do Elo de Transmissão, e portanto, está associada ao mesmo investimento monetário no sistema de transporte.

Destarte, o fator de potência aparece como um Índice da Eficiência de Transmissão. Valores maiores de **FP**, revelam cargas onde a energia efetivamente consumida é mais próxima à “*capacidade ocupada*” de transmissão, e conseqüentemente, os investimentos por **Wh** absorvido são menores. O decideratum de **FP** é o valor 1, e todos os esforços devem ser feitos para utilizar cargas com **FP**'s próximos a este valor.

Ao mesmo tempo, a capacidade ocupada por uma carga, indicativa dos custos de investimentos necessários para atendê-la, é expressa como a potência P^* absorvida pela carga adaptada à tensão **V**, que é uma grandeza fisicamente interpretável. Dir-se-á assim, que $S = P^*$ é a Potência Aparente da carga não adaptada.

Em um retrospecto abreviado, constata-se que, a toda carga conectada a uma alimentação com tensão **V** podem-se vincular duas potências, ambas das quais tem uma significação física tangível;

1. A potência efetiva **P** absorvida
2. A potência aparente **S**, que é a potência efetiva P^* da *Carga Adaptada*.

A relação,

$$\frac{P}{S} = FP \quad (5.04)$$

é o fator de potência, que assinala a eficiência da carga em quanto o custo de fazer-lhe chegar cada unidade da energia que consome.

É importante ter sempre em mente o significado de **S** de uma carga que é, como foi repetido, uma medida da capacidade de transmissão necessária para atendê-la.

5.1.3 - O Fator de Potência

Desde que o fator de potência **FP**, é um índice da “*eficiência transmissiva*” do processo de alimentação das cargas, é da maior importância investigar as causas que reduzem o fator de potência **FP**, especialmente no intuito de eliminá-las ou mitigá-las.

Parte-se de uma tensão de atendimento trifásica senoidal e simétrica (**SS**). Cargas lineares equilibradas, reagem a esta tensão absorvendo correntes senoidais simétricas. No caso, o fator de potência **FP** resulta igual ao cosseno do ângulo de defasagem entre as, tríades de tensão e corrente (revelando um comportamento análogo ao caso monofásico).

Em particular, a *Carga Adaptada* a uma tríade senoidal - simétrica de tensões **V**, correspondente a uma potência **P**, é resistiva e equilibrada, podendo ser representada por uma estrela de resistências de valor,

$$R = \frac{3 \cdot V^2}{P} \quad (5.05)$$

cada uma. Neste caso, obviamente, **S = P**, e **FP = 1**.

Quando as cargas não são equilibradas, a reação à tensão senoidal e simétrica (**SS**) é uma tríade de correntes não-simétricas, que pode ser resolvida como uma soma de tríades de sequência \dot{I}_+ , \dot{I}_- , \dot{I}_0 .

Nestas condições, a Potência Ativa transferida é;

$$P = \text{Re}(\dot{V} \cdot \dot{I}_+^*) \quad (5.06)$$

enquanto a Potência Aparente é,

$$S = V \cdot (I_+^2 + I_-^2 + I_0^2)^{\frac{1}{2}} \quad (5.07)$$

e portanto,

$$\frac{P}{S} = \frac{V \cdot I_+ \cdot \cos \varphi_+}{V \cdot (I_+^2 + I_-^2 + I_0^2)^{\frac{1}{2}}} = \cos \varphi_+ \cdot \frac{1}{(1 + \frac{I_-^2 + I_0^2}{I_+^2})^{\frac{1}{2}}} \quad (5.08)$$

Em sistemas sem neutro, $I_0 = 0$ e resulta

$$FP = \cos \varphi_+ \cdot \frac{1}{(1 + (IFUD)^2)^{\frac{1}{2}}} = dFP \cdot uFP \quad (5.09)$$

onde, **IFUD** (**CURRENT FUNDAMENTAL UNBALANCE DEFORMATION**) [10], igual a;

$$IFUD = \frac{I_-}{I_+} \quad (5.10)$$

é uma medida da assimetria (*unbalance*) das correntes. E, **dFP** (**DISPLACEMENT POWER FACTOR**) igual a;

$$dFP = \cos \varphi_+ \quad (5.11)$$

é a componente do fator de potência atribuível à defasagem angular. E ainda, uFP (UNBALANCE DISPLACEMENT FACTOR) igual a;

$$uFP = \frac{1}{(1 + (IFUD)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.12)$$

é a componente devida à assimetria.

5.2 - O Caso dos Sistemas Não Senoidais

5.2.1 - Conceitos Introdutórios

Quando um sistema de energia elétrica opera sob condições não senoidais, as expressões das potências e fator de potência devem ser convenientemente adaptadas. Este é um tema polêmico sujeito ainda hoje a discussão. A proposta a seguir está mais sintonizada com as conclusões do *IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations* e do Grupo análogo do *VDE* alemão.

5.2.2 - O Fator de Potência Harmônico

Quando a carga é não-linear e assimétrica, a corrente contém, além da parcela fundamental, \dot{I}_{1+} e \dot{I}_{1-} , um conjunto de harmônicos, \dot{I}_{h+} , \dot{I}_{h-} ($h = 2, 3, \dots$).

Nestas condições de tensão os harmônicos de corrente não contribuem à potência ativa; entretanto, acrescem a potência aparente fundamental S_1 através da potência aparente harmônica.

$$S_H = V_1 \cdot \sum_{h=1}^{\infty} (\dot{I}_{h+}^2 + \dot{I}_{h-}^2) = I_1 \cdot I_H \quad (5.13)$$

de modo tal que a potência aparente total será;

$$S = (S_1^2 + S_H^2)^{\frac{1}{2}} = S_1 \cdot \left(1 + \left(\frac{S_H}{S_1}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} = S_1 \cdot \left(1 + \left(\frac{I_H}{I_1}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.14)$$

Em consequência,

$$FP = dFP \cdot uFP \cdot hFP \quad (5.15)$$

onde,

$$hFP = \frac{1}{(1 + (ITHD)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.16)$$

e $\cos \phi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$ permanecendo igual ao caso anterior, portanto,

$$\text{ITHD} = \frac{I_H}{I_1} \quad (5.17)$$

é a **CURRENT TOTAL HARMONIC DISTORTION** [10] é uma medida da poluição harmônica que existe na corrente.

hFP, por sua vez, é a componente do fator de potência atribuível a esta poluição.

É importante perceber que as expressões obtidas dependem apenas das potências ativa e aparente, às quais, como mostrado na seção 4.1 e 4.2, são conceitos com significação física bem clara ainda em condições distorcidas arbitrárias.

Ora, no caso de tensões e correntes senoidais e simétricas (**SS**), é possível definir um outro conceito de potência: a potência reativa **Q** (uma extensão direta do caso monofásico senoidal).

Define-se,

$$Q = \text{Im} (V \cdot I_+^*) \quad (5.18)$$

e portanto,

$$P^2 + Q^2 = V^2 \cdot I_{1+}^2 \quad (5.19)$$

Esta última expressão é a famosa “*lei triangular*” que associa as potências ativa, reativa e aparente.

Em função da popularidade desta lei, há uma tentação muito grande para afirmar que ela é válida em condições diferentes das senoidais-simétricas. Vã esperança!

Com efeito, neste caso P e Q permanecem iguais ao caso anterior; entretanto,

$$S^2 = V^2 \cdot I_+^2 + V^2 \cdot I_-^2 = P^2 + Q^2 + V^2 \cdot I_-^2 \quad (5.20)$$

então,

$$S^2 > P^2 + Q^2 \quad (5.21)$$

Uma investigação mais ampla nos levaria a constatar que a potência ativa devida à I_- quando V é assimétrica (ou seja, $\dot{V}_- \neq 0$) é dada como,

$$P_- = \text{Re}(\dot{V}_- \cdot \dot{I}_-^*) \quad (5.22)$$

o que induz a uma definição de “reativa de sequência negativa”,

$$Q_- = \text{Im}(\dot{V}_- \cdot \dot{I}_-^*) \quad (5.23)$$

Sendo assim,

$$P = P_+ + P_- = \text{Re}(\dot{V}_+ \cdot \dot{I}_+^* + \dot{V}_- \cdot \dot{I}_-^*) \quad (5.24)$$

$$Q = Q_+ + Q_- = \text{Im} (\dot{V}_+ \cdot \dot{I}_+^* + \dot{V}_- \cdot \dot{I}_-^*) \quad (5.25)$$

e portanto,

$$P^2 + Q^2 = | \dot{V}_+ \cdot \dot{I}_+^* + \dot{V}_- \cdot \dot{I}_-^* |^2 \quad (5.26)$$

Por outro lado,

$$S^2 - (P^2 + Q^2) = | \dot{V}_+ \cdot \dot{I}_- - \dot{V}_- \cdot \dot{I}_+ |^2 \quad (5.27)$$

Nota-se que, em todos os casos em que $\dot{V}_+ \cdot \dot{I}_- \neq \dot{V}_- \cdot \dot{I}_+$

$$S^2 > P^2 + Q^2 \quad (5.28)$$

Em outras palavras, a lei triangular não se verifica quando uma ou ambas das variáveis trifásicas (tensão, corrente), são assimétricas.

5.2.3 - Potências de Assimetria e de Harmônicos

Para preservar a idéia central de que a potência aparente é composta geometricamente por “*parcelas*” ativa e reativa, considera-se o resíduo,

$$A^2 = | \dot{V}_+ \cdot \dot{I}_- - \dot{V}_- \cdot \dot{I}_+ |^2 \quad (5.29)$$

como uma parcela a mais, que pode ser interpretada no caso como “parcela devida à assimetria” da potência aparente, sendo então,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + A^2 \quad (5.30)$$

onde **A** é dito de “**POTÊNCIA DE ASSIMETRIA**” da transmissão.

Quando há também componentes harmônicas (no caso geral, elas estarão presentes tanto em **V** como em **I**), podem-se distinguir as potências fundamentais **P₁**, **Q₁**, **A₁** e as resultantes da presença das harmônicas,

$$S^2 = S_1^2 + S_{\bar{1}}^2 \quad (5.31)$$

onde,

$$\begin{aligned} S_{\bar{1}}^2 &= V_1^2 \cdot I_H^2 + V_H^2 \cdot I_1^2 + V_H^2 \cdot I_H^2 = \\ &= S_{1H}^2 + S_{H1}^2 + S_{HH}^2 \end{aligned} \quad (5.32)$$

é a “**POTÊNCIA APARENTE NÃO FUNDAMENTAL**”.

Neste caso geral, a parcela S_{HH}^2 contém uma pequena contribuição **P_H** à potência ativa total.

Assim, a potência ativa total **P** é composta das parcelas,

$$P = P_{1+} + P_{1-} + P_H = P_1 + P_H \quad (5.33)$$

Destas, P_{1+} é o termo em geral dominante, e associado ao que costuma ser chamado de “*fluxo incorrupto*” da energia, isto é, a potência ativa correspondente às sequências positivas nas ondas fundamentais de tensão e corrente.

No computo do fator de potência, considera-se a relação,

$$FP = \frac{P}{S} \quad (5.34)$$

então,

$$FP = \frac{P_1}{S} \cdot \left(1 + \frac{P_H}{P_1} \right) \quad (5.35)$$

Por outro lado,

$$S = (V_1^2 + V_H^2) \cdot (I_1^2 + I_H^2) \quad (5.36)$$

daí vem,

$$FP = \frac{P_1}{S_1} \cdot \frac{\left(1 + \frac{P_H}{P_1} \right)}{\left(1 + \left(\frac{V_H}{V_1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1 + \left(\frac{I_H}{I_1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.37)$$

Por sua vez,

$$\frac{P_1}{S_1} = \frac{P_{1+}}{V_{1+} \cdot I_{1+}} \cdot \frac{(1 + \frac{P_{1-}}{P_{1+}})}{(1 + (\frac{V_{1-}}{V_{1+}})^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + (\frac{I_{1-}}{I_{1+}})^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.38)$$

Sendo

$$dFP = \frac{P_{1+}}{V_{1+} \cdot I_{1+}} = \cos \varphi_{1+} \quad (5.39)$$

e os fatores nas expressões representam *hFP* e *uFP*.

Assim, chega-se a expressão geral do fator de potência como,

$$FP = dFP \cdot uFP \cdot hFP \quad (5.40)$$

onde,

$$dFP = \frac{P_{1+}}{V_{1+} \cdot I_{1+}} \quad (5.41)$$

e

$$uFP = \frac{(1 + \frac{P_{1-}}{P_{1+}})}{(1 + (\frac{V_{1-}}{V_{1+}})^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + (\frac{I_{1-}}{I_{1+}})^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.42)$$

e,

$$h_{FP} = \frac{(1 + \frac{P_H}{P_1})}{(1 + (\frac{V_H}{V_1})^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + (\frac{I_H}{I_1})^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.43)$$

ou também,

$$u_{FP} = \frac{1 + PFUD}{(1 + (VFUD)^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + (IFUD)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.44)$$

e,

$$h_{FP} = \frac{1 + PTHD}{(1 + (VTHD)^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + (ITHD)^2)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.44)$$

onde, PFUD é a **POWER FUNDAMENTAL UNBALANCE DEFORMATION** [10], e VFUD é a **VOLTAGE FUNDAMENTAL UNBALANCE DEFORMATION**, e PTHD é a **POWER TOTAL HARMONIC DISTORTION**, e VTHD e ITHD são as respectivamente, **VOLTAGE TOTAL HARMONIC DISTORTION** e **CURRENT TOTAL HARMONIC DISTORTION**.

- Um Exemplo

Considerando um sistema com o seguinte perfil, descrito abaixo, teremos;

• Perfil do Sistema:

$P_{1+} = 19,37 \text{ MW}$	$V_{1+} = 13,8 \text{ KV}$	$I_{1+} = 2,10 \text{ KA}$
$P_{1-} = -0,25 \text{ MW}$	$V_{1-} = 0,17 \text{ KV}$	$I_{1-} = 0,36 \text{ KA}$
$P_H = -0,04 \text{ MW}$	$V_H = 0,40 \text{ KV}$	$I_H = 1,08 \text{ KA}$

Daí resulta em,

$P_1 = 19,12$	$S = 32,98073$	$I_1 = 2,130634$
$P = 19,08$	$V = 13,806843$	$I = 2,388724$
$S_1 = 29,404980$	$V_1 = 13,801047$	

$PFUD = -0,012907$	$VFUD = 0,012319$	$VTHD = 0,028983$
$PTHD = -0,002092$	$IFUD = 0,171429$	$ITHD = 0,506891$

$$dFP = \frac{19,37}{13,8 \times 2,1306} = 0,668392$$

$$uFP = \frac{0,987093}{(1 + (0,012319)^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + (0,171429)^2)^{\frac{1}{2}}} = 0,972827$$

Capítulo 6

$$h_{FP} = \frac{0,997908}{(1 + (0,028983)^2)^{\frac{1}{2}} \cdot (1 + (0,506891)^2)^{\frac{1}{2}}} = 0,889716$$

Exemplos

Daí resulta em,

$$FP = 0,578520$$

que é igual a;

$$FP = \frac{P}{V.I} = 0,578520$$

6.1 - Exemplo 1

- Carga Resistiva

Neste exercício, será apresentado a situação de um sistema senoidal na condição onde a tensão aplicada a carga é senoidal e a carga, é equilibrada e resistiva, como ilustrado pela figura 6.1.1. Nessas condições, será calculada as grandezas envolvidas para este sistema.

Capítulo 6

Exemplos

No intuito de exemplificar a teoria desenvolvida, são apresentados neste capítulo, alguns exemplos, os que serão mais tarde ilustrados através do software presente neste trabalho.

6.1 - Exemplo 1

- Carga Resistiva

Neste exercício, será apresentado a situação de um sistema senoidal na condição onde a tensão aplicada a carga é simétrica e a carga, é equilibrada e resistiva, como ilustrado pela figura 6.1.1. Nestas condições, será calculada as grandezas envolvidas para este sistema.

6.1.1 - Cálculo das Correntes

Supondo que a carga é representada por impedâncias puramente resistivas.

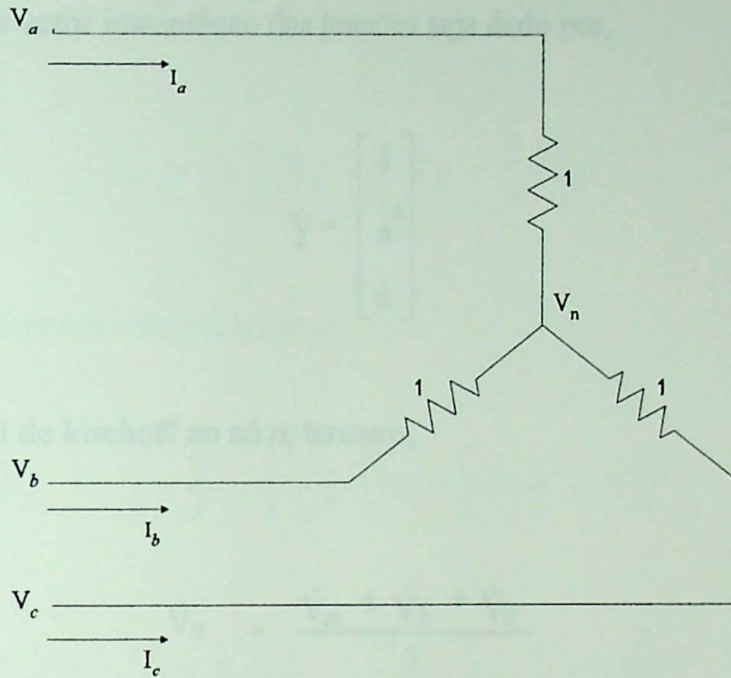


Figura 6.1.1 - Representação da Carga Equilibrada Resistiva.

Solução:

Neste exercício, será realizada a determinação das seguintes grandezas;

- 6.1.1 - Cálculo das Correntes
- 6.1.2 - Cálculo das Potências
- 6.1.3 - Cálculo de i_p e i_P
- 6.1.4 - Compensadores

6.1.1 - Cálculo das Correntes

Supondo que o vetor instantâneo das tensões seja dado por,

$$\underline{\dot{V}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix}$$

e aplicando a 1ª lei de kirchoff no nó n , teremos,

$$\dot{V}_n = \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{3}$$

E assim, as expressões das correntes serão dadas como;

$$\dot{I}_a = \dot{V}_a - \dot{V}_n = \dot{V}_a - \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{3}$$

$$\dot{I}_a = \frac{2}{3} \cdot \dot{V}_a - \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_b - \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_c$$

$$\dot{I}_b = \dot{V}_b - \dot{V}_n = \dot{V}_b - \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{3}$$

$$\dot{I}_b = -\frac{1}{3} \cdot \dot{V}_a + \frac{2}{3} \cdot \dot{V}_b - \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_c$$

$$\dot{I}_c = \dot{V}_c - \dot{V}_n = \dot{V}_c - \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{3}$$

$$\dot{I}_c = -\frac{1}{3} \cdot \dot{V}_a - \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_b + \frac{2}{3} \cdot \dot{V}_c$$

Considerando o vetor das tensões, teremos;

$$\dot{I}_a = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$\dot{I}_b = -\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$\dot{I}_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \frac{2}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

resultando em,

$$\dot{I}_a = 1$$

$$\dot{I}_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \dot{a}^*$$

$$\dot{I}_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \dot{a}$$

- Cálculo das componentes de sequência;

Como,

$$\dot{I}_a = \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{3} \cdot \dot{a}$$

$$\dot{I}_b = -\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{3} \cdot \dot{a}$$

$$\dot{I}_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} \cdot \dot{a}^* + \frac{2}{3} \cdot \dot{a}$$

então,

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_a + \dot{a} \cdot \dot{I}_b + \dot{a}^* \cdot \dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(1 + \left(-\frac{1}{3} \cdot \dot{a} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \cdot \dot{a}^* \right) + \left(-\frac{1}{3} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{3} \cdot \dot{a} + \frac{2}{3} \right) \right)$$

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{7}{3} - \frac{2}{3} \cdot \dot{a} - \frac{2}{3} \dot{a}^* \right)$$

$$\dot{I}_+ = \sqrt{3}$$

e,

$$\dot{I}_- = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_a + \dot{a}^* \cdot \dot{I}_b + \dot{a} \cdot \dot{I}_c)$$

desenvolvendo como acima, obtêm-se,

$$\dot{I}_- = 0$$

e como pode ser visto, pela própria topologia do circuito, temos;

$$\dot{I}_0 = 0$$

Assim com efeito,

$$\dot{I}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_+ + \dot{I}_-) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} + 0) = 1 \quad (\text{OK!})$$

$$\dot{I}_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_+ \cdot \dot{a}^* + \dot{I}_- \cdot \dot{a}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} \cdot \dot{a}^* + 0 \cdot \dot{a}) = \dot{a}^*$$

$$\dot{I}_b = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{OK!})$$

$$\dot{I}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_+ \cdot \dot{a} + \dot{I}_- \cdot \dot{a}^*) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} \cdot \dot{a} + 0 \cdot \dot{a}^*) = \dot{a}$$

$$\dot{I}_c = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (\text{OK!})$$

onde V_+ pode ser obtida por,

$$\dot{V}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{V}_a + \dot{a} \cdot \dot{V}_b + \dot{a}^* \cdot \dot{V}_c) = \sqrt{3}$$

então,

$$S^2 = (\sqrt{3})^2 \cdot ((\sqrt{3})^2 + 0) \Rightarrow S = 3$$

6.1.3 - Cálculo de i_p e i_P

- A Corrente de Fryze

Obtêm-se a corrente de Fryze a partir da expressão;

$$i_p = \frac{P}{V^2} \cdot \dot{v}$$

onde,

$$V^2 = \dot{v}^t \cdot \dot{v}^* = 3$$

então,

$$i_p = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left[\frac{3}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right] = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left[\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right] = i$$

- A Corrente de Tenti

Obtêm-se a corrente de Tenti a partir da expressão;

$$\underline{i}_P = \frac{p}{V^2} \cdot \underline{\dot{v}}$$

onde,

$$V^2 = \underline{\dot{v}}^t \cdot \underline{\dot{v}}^* = 3$$

então,

$$\underline{i}_p = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left[\frac{3}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \underline{\dot{a}}^* \\ \underline{\dot{a}} \end{bmatrix} \right] = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left[\begin{bmatrix} 1 \\ \underline{\dot{a}}^* \\ \underline{\dot{a}} \end{bmatrix} \right] = \underline{i}$$

6.1.4 - Compensadores

- Os Compensadores de Akagi e Tenti

Como neste exemplo, as correntes de Fryze e Tenti são iguais a corrente da carga, logicamente, por se tratar de uma carga equilibrada resistiva, as correntes injetadas por estes compensadores, neste caso, serão iguais a zero, isto é;

$$\underline{\dot{i}}_q = \underline{\dot{i}} - \underline{\dot{i}}_p = 0$$

$$\underline{\dot{i}}_k = -\underline{\dot{i}}_q = 0$$

Esta situação é ilustrada, pelas figuras abaixo.

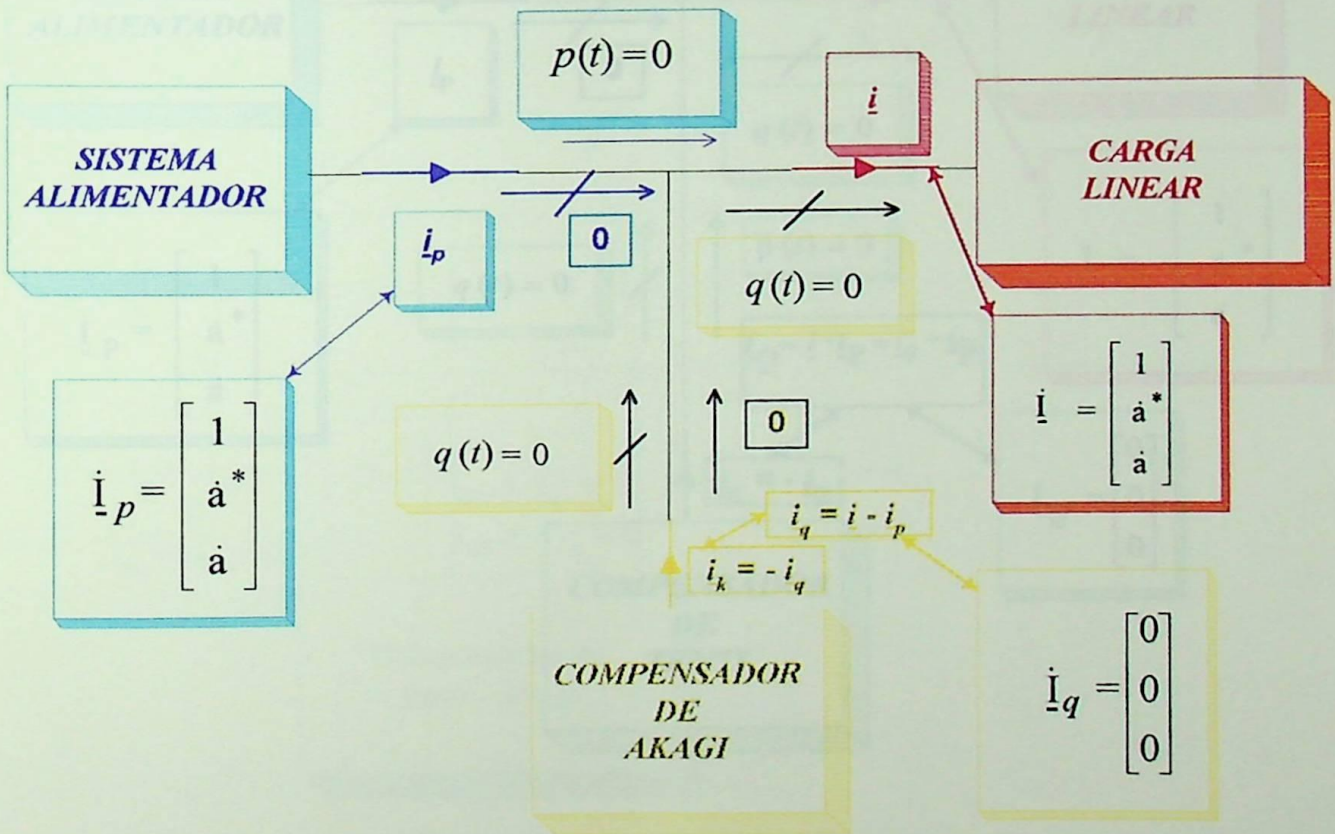


Figura 6.1.2 - Compensador de AKAGI.

Assim o compensador de Akagi, como exibido acima, e o compensador de Tenti, exibido abaixo, não exercem seus papéis, por ser a carga equilibrada e resistiva.

Simplesmente coloca-se esta representação em caráter ilustrativo, afim de padronizar os exemplos seguintes.

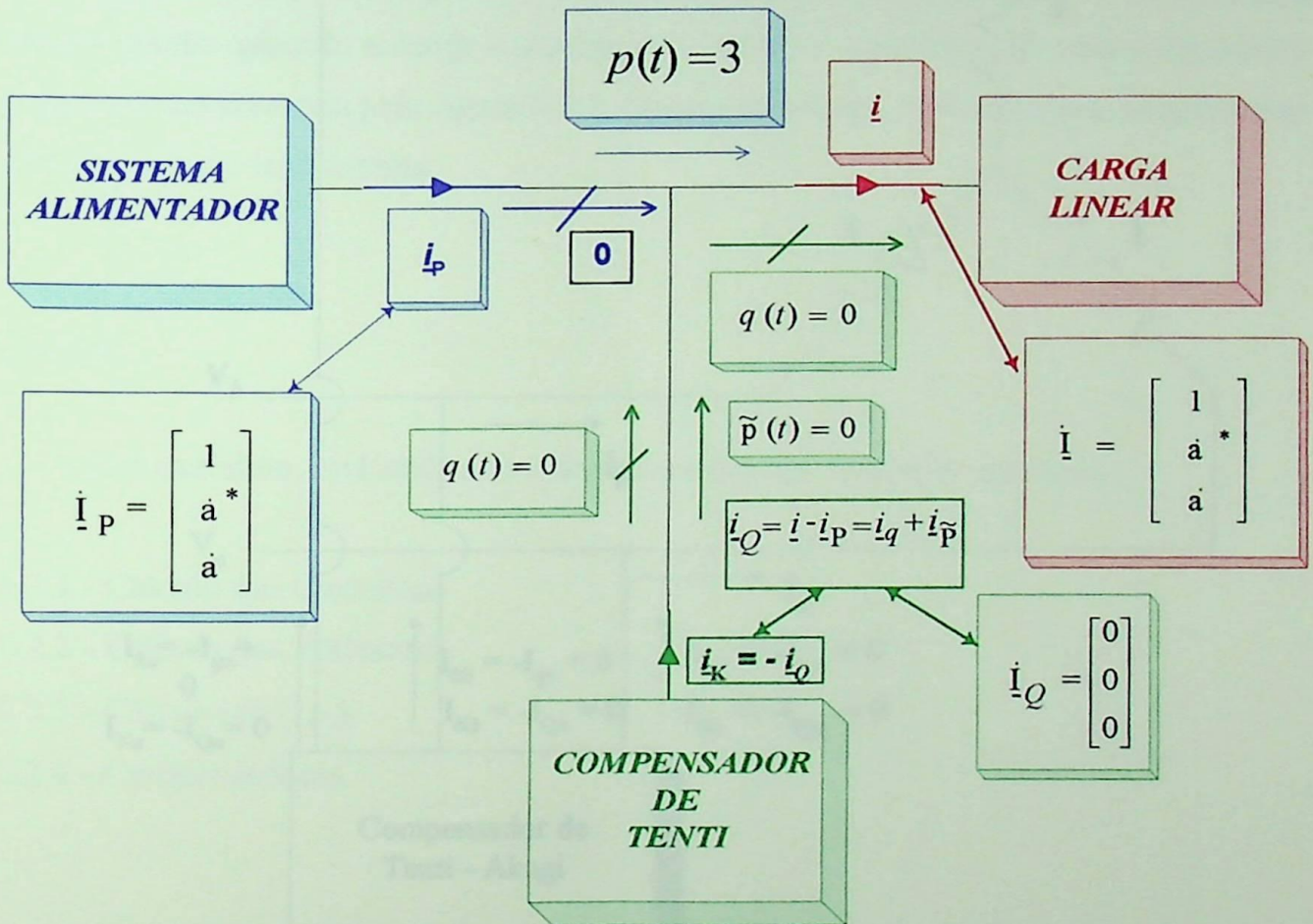


Figura 6.1.3 - Compensador de TENTI .

6.2 - Representando em função do circuito, teremos a figura 6.1.4, onde as correntes injetadas no sistema pelo compensador, são iguais a zero.

Carga Equilibrada com Compensação Positiva

Neste exercício será apresentado a situação de um sistema de potência onde a tensão aplicada a carga é simétrica e a carga é resistiva equilibrada, como ilustrado pela figura 6.1.4. Neste caso, não há correntes injetadas para este sistema.

Solução

Neste exercício, será realizada a análise de um sistema de potência

6.2.1 - Cálculo das Correntes

6.2.2 - Cálculo das Tensões

6.2.3 - Cálculo das Potências

6.2.4 - Compensadores

6.2.1 - Cálculo das Correntes

Supondo que o vetor instantâneo da tensão de referência

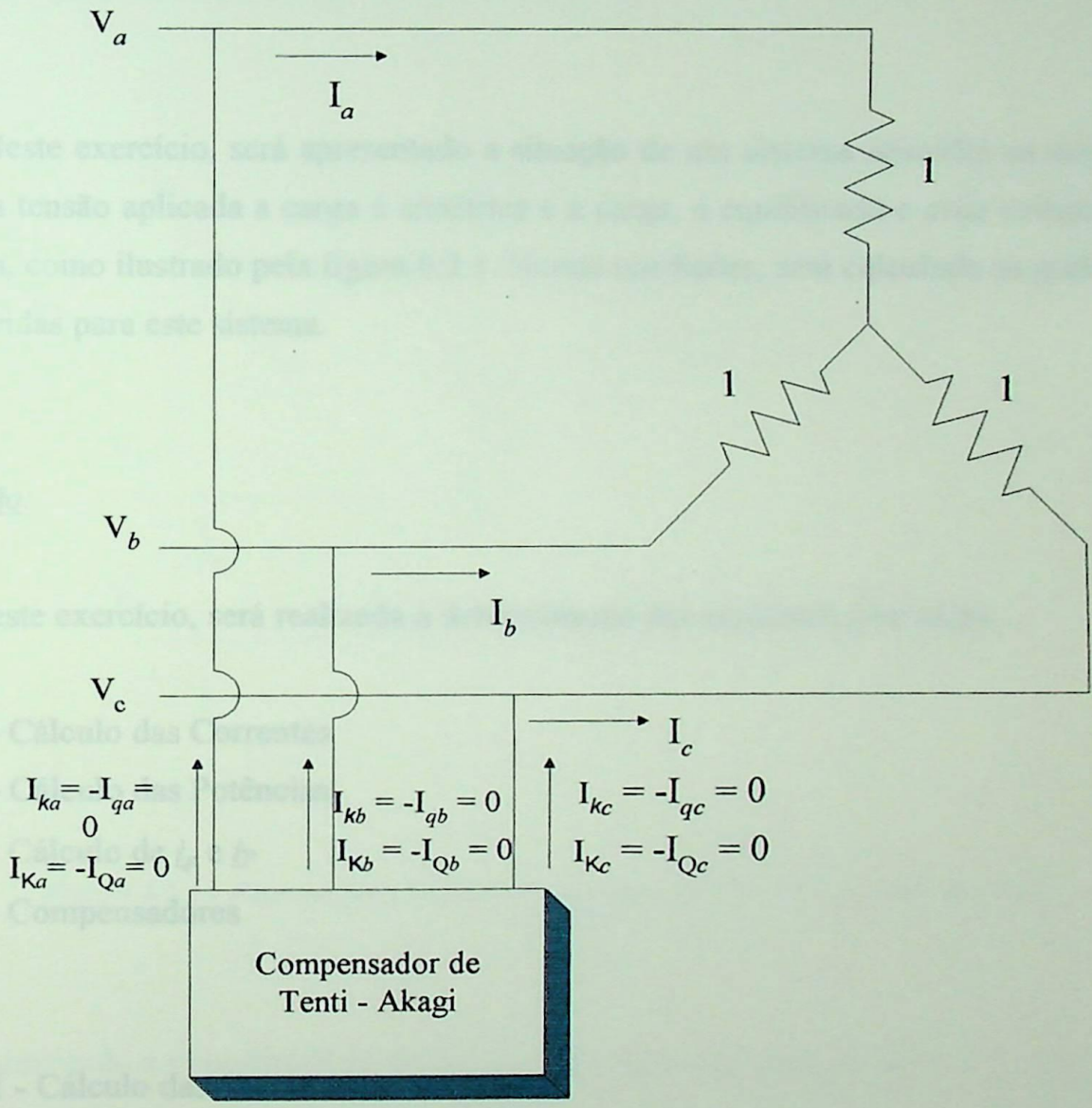


Figura 6.1.4 - Representação da Carga Equilibrada Resistiva.

6.2- Exemplo 2

- Carga Equilibrada com Componente Reativa

Neste exercício, será apresentado a situação de um sistema senoidal na condição onde a tensão aplicada a carga é simétrica e a carga, é equilibrada e com componente reativa, como ilustrado pela figura 6.2.1. Nestas condições, será calculada as grandezas envolvidas para este sistema.

Solução:

Neste exercício, será realizada a determinação das seguintes grandezas;

6.2.1 - Cálculo das Correntes

6.2.2 - Cálculo das Potências

6.2.3 - Cálculo de i_p e i_P

6.2.4 - Compensadores

6.2.1 - Cálculo das Correntes

Supondo que o vetor instantâneo das tensões seja dado por,

$$\dot{V} = \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix}$$

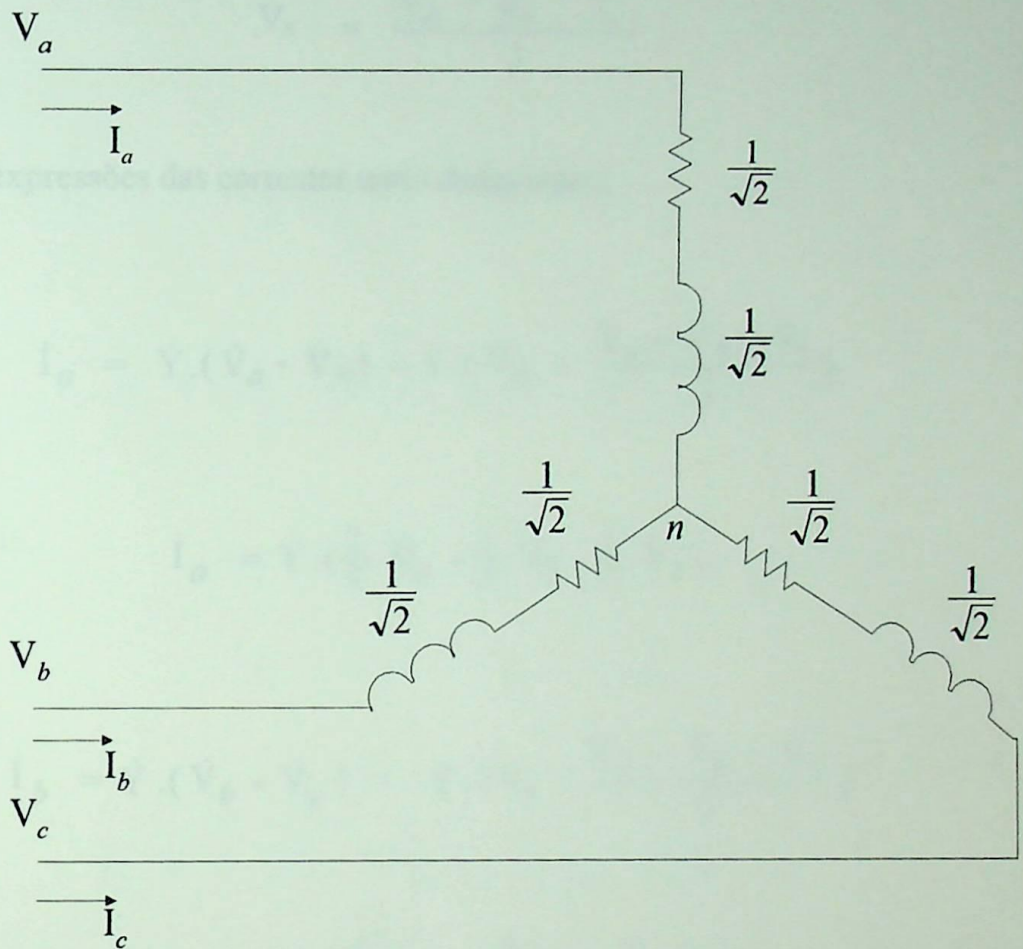


Figura 6.2.1 - Representação da Carga Equilibrada com Componente Reativa.

e considerando a impedância do circuito, como observado pela figura 6.2.1, dada por;

$$Z = \frac{1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

e admitância dada por;

$$Y = \frac{1}{\sqrt{2}} - j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

e aplicando a 1ª lei de kirchoff no nó n , teremos,

$$\dot{V}_n = \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{3}$$

E assim, as expressões das correntes serão dadas como;

$$\dot{I}_a = \dot{Y} \cdot (\dot{V}_a - \dot{V}_n) = \dot{Y} \cdot \left(\dot{V}_a - \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{3} \right)$$

$$\dot{I}_a = \dot{Y} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot \dot{V}_a - \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_b - \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_c \right)$$

$$\dot{I}_b = \dot{Y} \cdot (\dot{V}_b - \dot{V}_n) = \dot{Y} \cdot \left(\dot{V}_b - \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{3} \right)$$

$$\dot{I}_b = \dot{Y} \cdot \left(-\frac{1}{3} \cdot \dot{V}_a + \frac{2}{3} \cdot \dot{V}_b - \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_c \right)$$

$$\dot{I}_c = \dot{Y} \cdot (\dot{V}_c - \dot{V}_n) = \dot{Y} \cdot \left(\dot{V}_c - \frac{\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{3} \right)$$

$$\dot{I}_c = \dot{Y} \cdot \left(-\frac{1}{3} \cdot \dot{V}_a - \frac{1}{3} \cdot \dot{V}_b + \frac{2}{3} \cdot \dot{V}_c \right)$$

Considerando o vetor das tensões, teremos;

$$\dot{I}_a = \dot{Y} \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right)$$

$$\dot{I}_b = \dot{Y} \cdot \left(-\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - \frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right)$$

$$\dot{I}_c = \dot{Y} \cdot \left(-\frac{1}{3} - \frac{1}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \frac{2}{3} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right)$$

resultando em,

$$\dot{I}_a = \dot{Y} \cdot 1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

$$\dot{I}_b = \dot{Y} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \dot{a}^*$$

$$\dot{I}_c = \dot{Y} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \dot{a}$$

e, assim teremos o vetor das correntes, dado por;

$$\dot{\underline{I}} = \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix}$$

- Cálculo das componentes de sequência;

Como,

$$\dot{I}_a = \dot{Y} \cdot \left(\frac{2}{3} - \frac{1}{3} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{3} \cdot \dot{a} \right)$$

$$\dot{I}_b = \dot{Y} \cdot \left(-\frac{1}{3} + \frac{2}{3} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{3} \cdot \dot{a} \right)$$

$$\dot{I}_c = \dot{Y} \cdot \left(-\frac{1}{3} - \frac{1}{3} \cdot \dot{a}^* + \frac{2}{3} \cdot \dot{a} \right)$$

então,

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \dot{Y} \cdot (\dot{I}_a + \dot{a} \cdot \dot{I}_b + \dot{a}^* \cdot \dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \dot{Y} \cdot \left(1 + \left(-\frac{1}{3} \cdot \dot{a} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} \cdot \dot{a}^* \right) + \left(-\frac{1}{3} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{3} \cdot \dot{a} + \frac{2}{3} \right) \right)$$

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \dot{Y} \cdot \left(\frac{7}{3} - \frac{2}{3} \cdot \dot{a} - \frac{2}{3} \dot{a}^* \right)$$

$$\dot{I}_+ = \sqrt{3} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} - j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

e,

$$\dot{I}_- = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \dot{Y} \cdot (\dot{I}_a + \dot{a}^* \cdot \dot{I}_b + \dot{a} \cdot \dot{I}_c)$$

desenvolvendo como acima, obtêm-se,

$$\dot{I}_- = 0$$

e como pode ser visto, pela própria topologia do circuito, temos;

$$\dot{I}_0 = 0$$

Assim com efeito,

$$\dot{I}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_+ + \dot{I}_-) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} \cdot \dot{Y} + 0) = \dot{Y} \quad (\text{OK!})$$

$$\dot{I}_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_+ \cdot \dot{a}^* + \dot{I}_- \cdot \dot{a}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} \cdot \dot{Y} \cdot \dot{a}^* + 0 \cdot \dot{a}) = \dot{Y} \cdot \dot{a}^*$$

$$\dot{I}_b = \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \dot{Y} \quad (\text{OK!})$$

$$\dot{I}_c = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_+ \cdot \dot{a} + \dot{I}_- \cdot \dot{a}^*) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\sqrt{3} \cdot \dot{Y} \cdot \dot{a} + 0 \cdot \dot{a}^*) = \dot{Y} \cdot \dot{a}$$

$$\dot{I}_c = \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) \cdot \dot{Y} \quad (\text{OK!})$$

6.2.2 - Cálculo das Potências

- A potência Instantânea

Obtém-se a potência instantânea a partir de;

$$p = \text{Re}(\underline{\dot{V}}^t \cdot \underline{\dot{I}}^* - \underline{\dot{V}}^t \cdot \underline{\dot{I}} \cdot e^{2 \cdot j \cdot \omega \cdot t})$$

onde,

$$\underline{\dot{V}}^t \cdot \underline{\dot{I}}^* = [1 \quad \dot{a}^* \quad \dot{a}] \cdot \underline{\dot{Z}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} = 3 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

e,

$$\underline{\dot{V}}^t \cdot \underline{\dot{I}} = [1 \quad \dot{a}^* \quad \dot{a}] \cdot \underline{\dot{Y}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} = 0$$

Assim conclui-se que,

$$p = \frac{3}{\sqrt{2}} = P$$

- A potência Aparente

Obtém-se a Potência Aparente a partir de;

$$S^2 = V_+^2 \cdot (I_+^2 + I_-^2)$$

onde V_+ pode ser obtida por,

$$\dot{V}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{V}_a + \dot{a} \cdot \dot{V}_b + \dot{a}^* \cdot \dot{V}_c) = \sqrt{3}$$

então,

$$S^2 = (\sqrt{3})^2 \cdot ((\sqrt{3} \cdot \dot{Y})^2 + 0) \Rightarrow S = 3 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{2}} + j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right)$$

6.2.3 - Cálculo de \dot{i}_p e \dot{I}_P

- A Corrente de Fryze

Obtém-se a corrente de Fryze a partir da expressão;

$$\dot{i}_p = \frac{P}{V^2} \cdot \dot{v}$$

onde,

$$V^2 = \dot{v}^t \cdot \dot{v}^* = 3$$

e considerando o vetor instantâneo da corrente;

$$\underline{i} = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2}} - j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right] = \sqrt{2} \operatorname{Im}(\underline{\dot{I}})$$

então,

$$\underline{i}_p = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left(\frac{\sqrt[3]{2}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right) = \operatorname{Im} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right)$$

e assim,

$$\underline{i}_p = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right)$$

- A Corrente de Tenti

Obtêm-se a corrente de Tenti a partir da expressão;

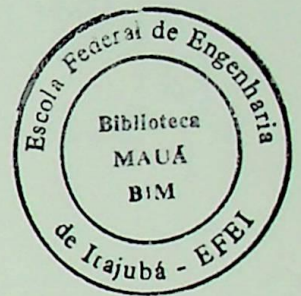
$$\underline{i}_P = \frac{P}{V^2} \cdot \dot{y}$$

onde,

$$V^2 = \dot{Y}^t \cdot \dot{Y}^* = 3$$

e considerando a mesma análise feita para a corrente de Fryze, conclui-se que;

$$\dot{i}_p = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right)$$



6.2.4 - Compensadores

- Os Compensadores de Akagi e Tenti

Neste exemplo, com base nas correntes de Fryze e Tenti, analisadas acima, chega-se as correntes injetadas por estes compensadores, dadas pelas expressões abaixo, isto é;

$$\dot{i}_q = \dot{i} - \dot{i}_p \Rightarrow \dot{i}_k = -\dot{i}_q$$

$$\dot{i}_Q = \dot{i} - \dot{i}_p \Rightarrow \dot{i}_K = -\dot{i}_Q$$

deste modo,

$$\underline{i}_q = \underline{i} - \underline{i}_p = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left[\left(\frac{1}{\sqrt{2}} - j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} \right) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right]$$

$$\underline{i}_q = \underline{i} - \underline{i}_p = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left(-j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right)$$

e assim obtem-se a expressão da corrente injetada pelo compensador de Akagi.

Como a corrente de Fryze é igual a corrente Tenti, neste exemplo, o compensador de Tenti injeta a mesma corrente que o compensador de Akagi. Assim,

$$\underline{i}_q = \underline{i} - \underline{i}_p = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left(-j \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \right) \Rightarrow \underline{i}_k = \underline{i}_K$$

Esta situação é ilustrada, pelas figuras abaixo.

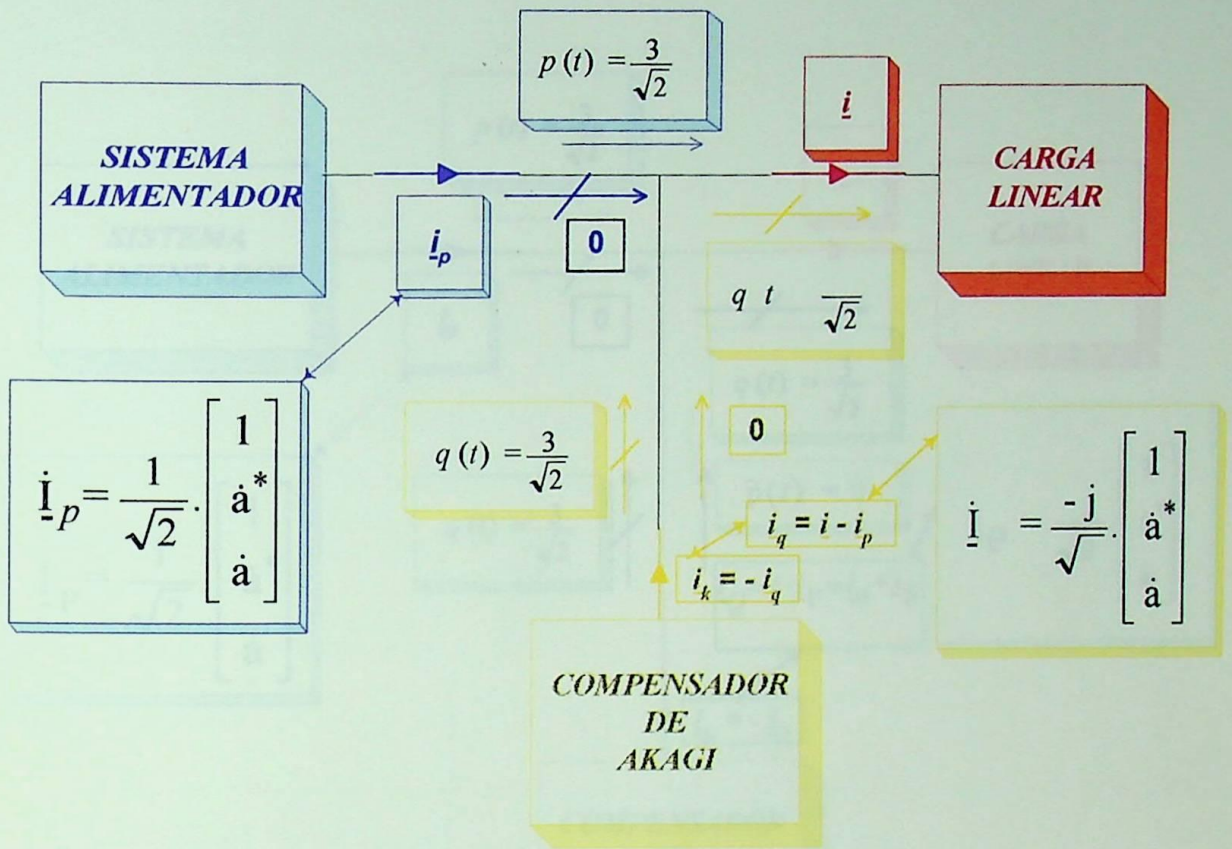


Figura 6.2.2 - Compensador de AKAGI.

Assim o compensador de Akagi, como exibido acima, figura 6.2.2, e o compensador de Tenti, exibido abaixo, figura 6.2.3, exercem seus papéis, injetando a mesma corrente, em virtude da carga considerada. Simplesmente, colocamos esta representação em caráter ilustrativo, afim de poder visualizar esta situação.

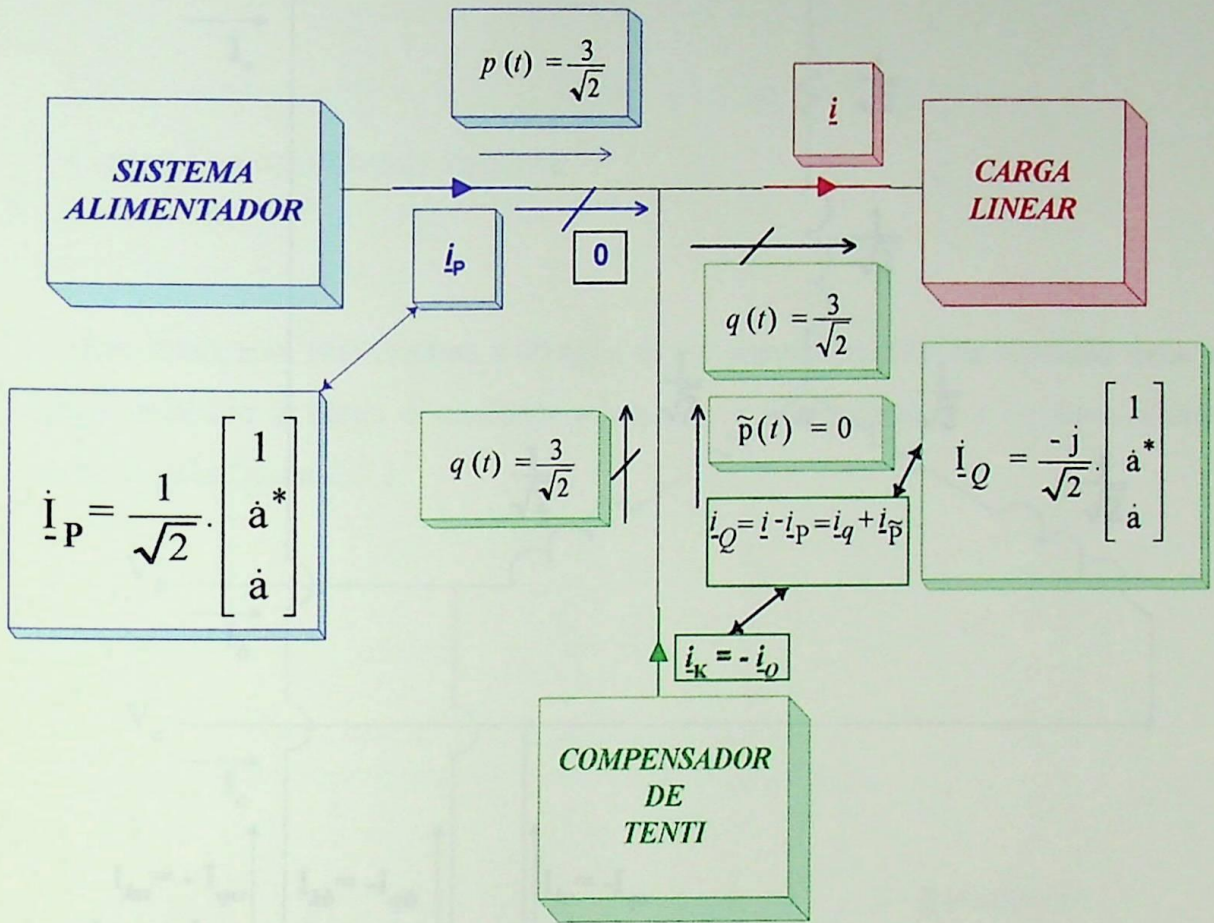


Figura 6.2.3 - Compensador de TENTI.

Representando em função do circuito, tem-se a figura 6.2.4, onde as correntes injetadas no sistema pelos compensadores, são iguais nos dois casos, assim as correntes injetadas representadas são as mesmas.

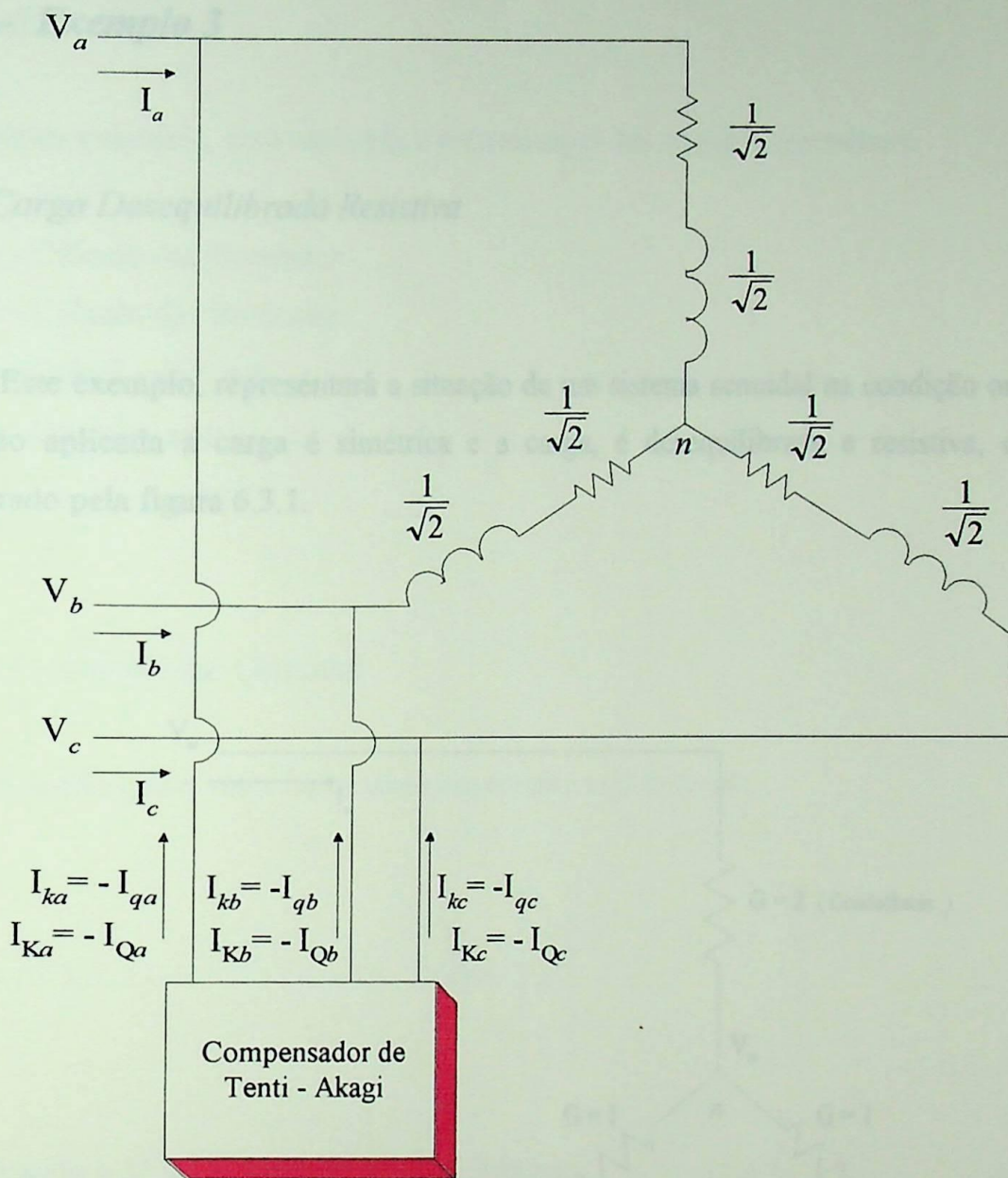


Figura 6.2.4 - Representação da Carga Equilibrada com Componente Reativa.

6.3 - Exemplo 3

- Carga Desequilibrada Resistiva

6.3.1 - Cálculo das Correntes

6.3.2 - Cálculo das Potências

Este exemplo, representará a situação de um sistema senoidal na condição onde a tensão aplicada a carga é simétrica e a carga, é desequilibrada e resistiva, como ilustrado pela figura 6.3.1.

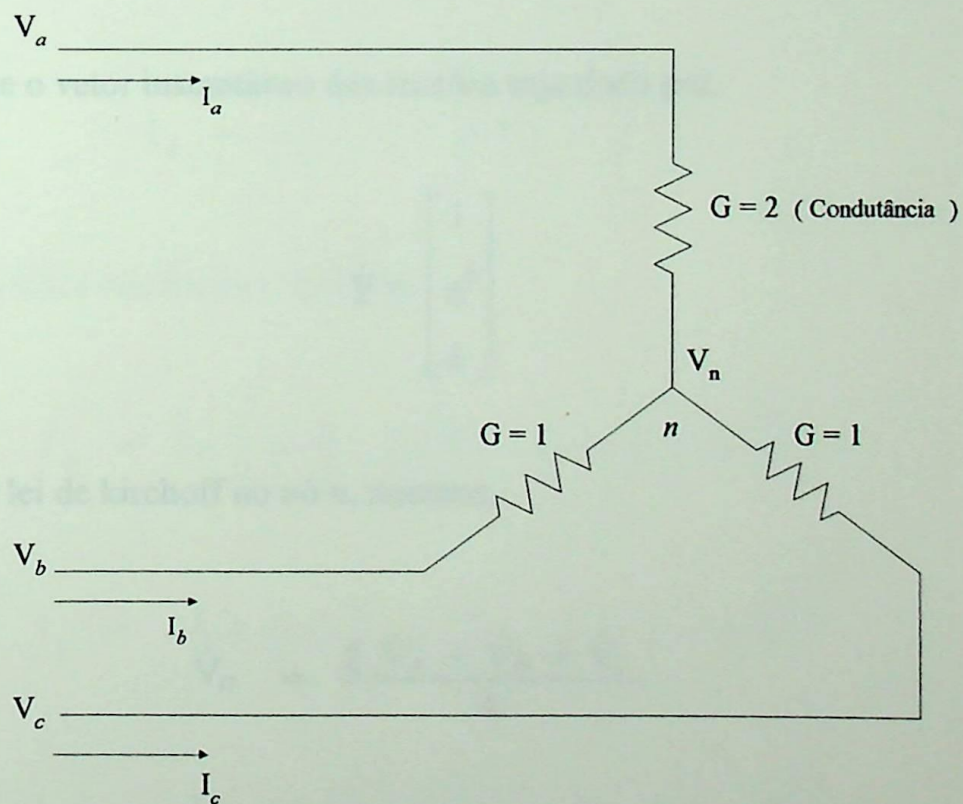


Figura 6.3.1 - Representação da Carga Desequilibrada Resistiva.

Solução:

Neste exercício, será realizada a determinação das seguintes grandezas;

6.3.1 - Cálculo das Correntes

6.3.2 - Cálculo das Potências

6.3.3 - Cálculo de i_p e i_P

6.3.4 - Compensadores

6.3.1 - Cálculo das Correntes

Supondo que o vetor instantâneo das tensões seja dado por,

$$\dot{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{\mathbf{a}}^* \\ \dot{\mathbf{a}} \end{bmatrix}$$

e aplicando a 1ª lei de kirchoff no nó n , teremos,

$$\dot{V}_n = \frac{2 \cdot \dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{4}$$

E assim,

$$\dot{I}_a = 2 \cdot \dot{V}_a - \dot{V}_n = 2 \cdot \dot{V}_a - \frac{2 \cdot \dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{4}$$

$$\dot{i}_a = \dot{V}_a - \frac{1}{2} \cdot \dot{V}_b - \frac{1}{2} \cdot \dot{V}_c$$

$$\dot{i}_b = \dot{V}_b - \dot{V}_n = \dot{V}_b - \frac{2 \cdot \dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{4}$$

$$\dot{i}_b = -\frac{1}{2} \dot{V}_a + \frac{3}{4} \cdot \dot{V}_b - \frac{1}{4} \cdot \dot{V}_c$$

$$\dot{i}_c = \dot{V}_c - \dot{V}_n = \dot{V}_c - \frac{2 \cdot \dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c}{4}$$

$$\dot{i}_c = -\frac{1}{2} \cdot \dot{V}_a - \frac{1}{4} \cdot \dot{V}_b + \frac{3}{4} \cdot \dot{V}_c$$

Considerando o vetor das tensões, teremos;

$$\dot{i}_a = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$\dot{i}_b = -\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) - \frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$\dot{i}_c = -\frac{1}{2} - \frac{1}{4} \cdot \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) + \frac{3}{4} \cdot \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)$$

resultando em,

$$\dot{I}_a = \frac{3}{2}$$

$$\dot{I}_b = -\frac{3}{4} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\dot{I}_c = -\frac{3}{4} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

Assim,

$$\dot{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} + j \cdot 0 \\ -\frac{3}{4} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{3}{4} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

- Cálculo das componentes de sequência;

Como,

$$\dot{I}_a = 1 - \frac{1}{2} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{2} \cdot \dot{a}$$

$$\dot{I}_b = -\frac{1}{2} + \frac{3}{4} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{4} \cdot \dot{a}$$

$$\dot{I}_c = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cdot \dot{a}^* + \frac{3}{4} \cdot \dot{a}$$

então,

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_a + \dot{a} \cdot \dot{I}_b + \dot{a}^* \cdot \dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{3}{2} + \left(-\frac{1}{2} \cdot \dot{a} + \frac{3}{4} - \frac{1}{4} \cdot \dot{a}^* \right) + \left(-\frac{1}{2} \cdot \dot{a}^* - \frac{1}{4} \cdot \dot{a} + \frac{3}{4} \right) \right)$$

e, V_+ pode ser obtida por:

$$\dot{I}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(3 - \frac{3}{4} \cdot \dot{a} - \frac{3}{4} \dot{a}^* \right)$$

$$\dot{I}_+ = \frac{5}{4} \cdot \sqrt{3}$$

e,

$$\dot{I}_- = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_a + \dot{a}^* \cdot \dot{I}_b + \dot{a} \cdot \dot{I}_c)$$

desenvolvendo como acima, obtêm-se,

seqüências,

$$\dot{I}_- = \frac{1}{4} \cdot \sqrt{3}$$

Assim com efeito,

$$\dot{I}_a = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_+ + \dot{I}_-) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{5}{4} \cdot \sqrt{3} + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{3} \right) = \frac{3}{2}$$

$$\dot{I}_b = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{I}_+ \cdot \dot{a}^* + \dot{I}_- \cdot \dot{a}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{5}{4} \cdot \sqrt{3} \cdot \dot{a}^* + \frac{1}{4} \cdot \sqrt{3} \right) = \frac{1}{4} \cdot (5 \cdot \dot{a}^* + \dot{a})$$

$$\dot{I}_b = \frac{1}{4} \cdot (-3 - j4 \frac{\sqrt{3}}{2}) = -\frac{3}{4} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\dot{I}_c = \frac{1}{4} \cdot (-3 + j4 \frac{\sqrt{3}}{2}) = -\frac{3}{4} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

e, V_+ pode ser obtida por,

$$\dot{V}_+ = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{V}_a + \dot{a} \cdot \dot{V}_b + \dot{a}^* \cdot \dot{V}_c) = \sqrt{3}$$

e V_- por,

$$\dot{V}_- = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (\dot{V}_a + \dot{a}^* \cdot \dot{V}_b + \dot{a} \cdot \dot{V}_c) = 0$$

Finalmente obtém-se, os vetores de tensão e corrente das componentes de seqüências,

$$\underline{\dot{E}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} 0 \\ + \\ - \end{matrix}$$

e,

$$\underline{\dot{I}} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{5}{4} \cdot \sqrt{3} \\ \frac{1}{4} \cdot \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{matrix} 0 \\ + \\ - \end{matrix}$$

e obtem-se ainda, visto que;

$$\underline{i}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \left[\text{Im}(\dot{I}_+ \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}) + \text{Im}(\dot{I}_- \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}) \right]$$

e que,

$$\underline{v}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \text{Im}(\dot{V}_+ \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t})$$



as expressões da tensão e corrente instantâneas dadas por;

$$\underline{i}(t) = \sqrt{2} \cdot \left[\text{Im}\left(\frac{5}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\right) + \text{Im}\left(\frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\right) \right]$$

e

$$\underline{v}(t) = \sqrt{2} \cdot \text{Im}\left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}\right)$$

6.3.2 - Cálculo das Potências

- A potência Instantânea

Obtém-se a potência instantânea a partir de;

$$p = \operatorname{Re}(\dot{\underline{V}}^t \cdot \dot{\underline{I}}^* - \dot{\underline{V}}^t \cdot \dot{\underline{I}} \cdot e^{2 \cdot j \cdot \omega \cdot t})$$

onde,

$$\dot{\underline{V}}^t \cdot \dot{\underline{I}}^* = [1 \quad \dot{a}^* \quad \dot{a}] \cdot \begin{bmatrix} \frac{3}{2} \\ -\frac{3}{4} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{3}{4} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} = \frac{15}{4}$$

e,

$$\dot{\underline{V}}^t \cdot \dot{\underline{I}} = [1 \quad \dot{a}^* \quad \dot{a}] \cdot \begin{bmatrix} \frac{3}{2} \\ -\frac{3}{4} - j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{3}{4} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

considerando que, a potência Média é,

$$P = \operatorname{Re}(\dot{V}_+ \cdot \dot{I}_+^*) = \sqrt{3} \cdot \left(\frac{5}{4} \cdot \sqrt{3}\right) = \frac{15}{4} = \operatorname{Re}(\dot{\underline{V}}^t \cdot \dot{\underline{I}}^*)$$

e que, a Potência Oscilante é,

$$\tilde{p} = \text{Re} (\dot{V}_+ \cdot \dot{I}_- (\cos (2.\omega.t) + j.\text{sen} (2.\omega.t))) = \text{Re}(\dot{V}^t \cdot \dot{I} \cdot e^{2.j.\omega.t})$$

ou seja,

$$\tilde{p} = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{4} \cdot \sqrt{3} \cdot \cos (2.\omega.t) = \frac{3}{4} \cdot \cos (2.\omega.t)$$

Assim conclui-se que,

$$p = \frac{15 - 3 \cdot \cos (2.\omega.t)}{4}$$

- A potência Reativa

Obtém-se a Potência Reativa através de;

$$Q = \text{Im} (\dot{V}_+ \cdot \dot{I}_+^*) = \text{Im}\left(\frac{15}{4}\right) = 0$$

- A potência Aparente

Obtém-se a Potência Aparente a partir de;

$$S^2 = \dot{V}_+^2 \cdot (\dot{V}_+^2 + \dot{I}_-^2)$$

então,

$$S^2 = (\sqrt{3})^2 \cdot \left(\frac{25}{16} \cdot 3\right)^2 + \frac{1}{16} \cdot 3 \Rightarrow S = 9 \cdot \frac{26}{16} = \frac{234}{16}$$

- A potência de Assimetria

Obtém-se a Potência de Assimetria a partir de;

$$A = \dot{V}_+ \cdot \dot{I}_- = \sqrt{3} \cdot \frac{\sqrt{3}}{4} = \frac{3}{4}$$

6.3.3 - Cálculo de \dot{i}_p e \dot{i}_P

- A Corrente de Fryze

Obtém-se a corrente de Fryze a partir da expressão;

$$\dot{i}_P = \frac{P}{V^2} \cdot \dot{v}$$

onde,

$$V^2 = \dot{v}^t \cdot \dot{v}^* = 3$$

e assim;

$$\underline{i}_p = \frac{15 - 3 \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t}{4 \cdot 3} \cdot \underline{\dot{y}}$$

então,

$$\underline{i}_p = \frac{15 - 3 \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t}{12} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen } \omega \cdot t \\ \text{sen}(\omega \cdot t - 120^\circ) \\ \text{sen}(\omega \cdot t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

e assim,

$$\underline{i}_p = \frac{15}{12} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen } \omega \cdot t + 0 \cdot \cos \omega \cdot t \\ -\frac{1}{2} \text{sen } \omega \cdot t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega \cdot t \\ -\frac{1}{2} \text{sen } \omega \cdot t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega \cdot t \end{bmatrix} - \frac{3}{12} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) \cdot \begin{bmatrix} \text{sen } \omega \cdot t + 0 \cdot \cos \omega \cdot t \\ -\frac{1}{2} \text{sen } \omega \cdot t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega \cdot t \\ -\frac{1}{2} \text{sen } \omega \cdot t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega \cdot t \end{bmatrix}$$

pode se expressar a corrente de Fryze na fase a , como;

$$\underline{i}_{pa} = \frac{15}{12} \cdot \text{sen } \omega \cdot t - \frac{3}{12} \cdot \text{sen } \omega \cdot t \cdot \cos 2 \cdot \omega \cdot t$$

levando em consideração que,

$$\text{sen } \omega \cdot t = \frac{e^{j \cdot \omega \cdot t} - e^{-j \cdot \omega \cdot t}}{2 \cdot j}$$

e

$$\cos 2.\omega.t = \frac{e^{2.j.\omega.t} - e^{-2.j.\omega.t}}{2}$$

vem que,

$$\text{sen } \omega.t . \cos 2.\omega.t = \frac{e^{3.j.\omega.t} + e^{-j.\omega.t} - e^{j.\omega.t} - e^{-3.j.\omega.t}}{4.j}$$

e

$$\text{sen } \omega.t . \cos 2.\omega.t = \frac{1}{2} . \left(\frac{e^{3.j.\omega.t} - e^{-3.j.\omega.t}}{2.j} - \frac{e^{j.\omega.t} - e^{-j.\omega.t}}{2.j} \right)$$

ou seja,

$$\text{sen } \omega.t . \cos 2.\omega.t = \frac{1}{2} . (\text{sen } 3.\omega.t - \text{sen } \omega.t)$$

então, chegar dessa forma a,

$$i_{pa} = \frac{15}{12} . \text{sen } \omega.t - \frac{1}{2} . \left(\frac{3}{12} . \text{sen } 3.\omega.t - \frac{3}{12} . \text{sen } \omega.t \right)$$

e concluindo,

$$i_{pa} = \frac{33}{24} . \text{sen } \omega.t - \frac{3}{24} . \text{sen } 3.\omega.t$$

e finalmente concluir-se que,

observando assim, que a corrente de Fryze apresenta uma componente harmônica de 3ª ordem, cuja grandeza é (1/11) da fundamental.

Desenvolvendo como acima, para todas as fases, conclui-se que,

$$i_p = \frac{15}{12} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen } \omega.t + 0 \cdot \cos \omega.t \\ -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \omega.t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega.t \\ -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \omega.t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega.t \end{bmatrix} - \frac{3}{12} \cdot \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \omega.t + 0 \cdot \cos \omega.t \\ \frac{1}{4} \cdot \text{sen } \omega.t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \cos \omega.t \\ \frac{1}{4} \cdot \text{sen } \omega.t + \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \cos \omega.t \end{bmatrix} - \frac{3}{12} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cdot \text{sen } 3 \cdot \omega.t + 0 \cdot \cos 3 \cdot \omega.t \\ -\frac{1}{4} \cdot \text{sen } 3 \cdot \omega.t - \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \cos 3 \cdot \omega.t \\ -\frac{1}{4} \cdot \text{sen } 3 \cdot \omega.t + \frac{\sqrt{3}}{4} \cdot \cos 3 \cdot \omega.t \end{bmatrix}$$

e,

$$i_p = \frac{15}{12} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen } \omega.t + 0 \cdot \cos \omega.t \\ -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \omega.t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega.t \\ -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \omega.t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega.t \end{bmatrix} + \frac{3}{24} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen } \omega.t + 0 \cdot \cos \omega.t \\ -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \omega.t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega.t \\ -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } \omega.t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos \omega.t \end{bmatrix} - \frac{3}{24} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen } 3 \cdot \omega.t + 0 \cdot \cos 3 \cdot \omega.t \\ -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } 3 \cdot \omega.t - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos 3 \cdot \omega.t \\ -\frac{1}{2} \cdot \text{sen } 3 \cdot \omega.t + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \cos 3 \cdot \omega.t \end{bmatrix}$$

pode-se chegar, dessa forma a,

$$i_p = \frac{30}{24} \cdot \text{Im} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega.t} \right) + \frac{3}{24} \cdot \text{Im} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega.t} \right) - \frac{3}{24} \cdot \text{Im} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \cdot e^{3j \cdot \omega.t} \right)$$

e finalmente conclui-se que,

$$i_p = i_{1+} + i_{1-} - i_{3+}$$

- A Corrente de Tenti

Obtêm-se a corrente de Tenti a partir da expressão;

$$\underline{i}_P = \frac{P}{V^2} \cdot \underline{\dot{v}}$$

onde,

$$V^2 = \underline{\dot{v}}^t \cdot \underline{\dot{v}}^* = 3$$

e considerando a mesma análise feita para a corrente de Fryze, conclui-se que;

$$\underline{i}_P = \frac{15}{4 \cdot 3} \cdot \underline{\dot{v}}$$

e,

$$\underline{i}_P = \frac{15}{12} \cdot \begin{bmatrix} \text{sen } \omega \cdot t \\ \text{sen}(\omega \cdot t - 120^\circ) \\ \text{sen}(\omega \cdot t + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

Assim, pode se expressar a corrente de Tenti na fase a , como;

$$\underline{i}_{Pa} = \frac{5}{4} \cdot \text{sen } \omega \cdot t$$

observando assim, a inexistência de componentes harmônicos nesta corrente.

6.3.4 - Compensadores

- O Compensador de Akagi

Neste exemplo, com base nas correntes de Fryze, analisadas acima, chega-se as correntes injetadas por este compensador, dada pela expressão abaixo, isto é;

$$\underline{i}_q = \underline{i} - \underline{i}_p$$

$$\underline{i}_k = -\underline{i}_q$$

Desenvolvendo esta análise para todas as fases, tem-se;

$$i_q = \frac{5}{4} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} e^{j \cdot \omega \cdot t} + \frac{1}{4} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} e^{j \cdot \omega \cdot t} - \frac{5}{4} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} e^{j \cdot \omega \cdot t} - \frac{1}{8} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} e^{j \cdot \omega \cdot t} + \frac{1}{8} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} e^{3 \cdot j \cdot \omega \cdot t}$$

assim,

$$i_q = \frac{1}{8} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} e^{j \cdot \omega \cdot t} + \frac{1}{8} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} e^{3 \cdot j \cdot \omega \cdot t}$$

Finalmente tem-se as correntes injetadas pelo compensador que será,

$$\underline{i}_k = -\underline{i}_q$$

Deste modo, por exemplo, a corrente de compensação na fase α para o compensador de Akagi, $i_{k\alpha}$, será representada por,

$$i_{k\alpha} = -\frac{1}{8} \cdot \text{sen} \omega \cdot t - \frac{1}{8} \cdot \text{sen} 3 \cdot \omega \cdot t$$

Assim, observa-se que, esta corrente se compõe na forma já mencionada anteriormente, isto é, ela se compõe em uma soma de uma componente fundamental de sequência negativa e uma componente harmônica de 3ª ordem de sequência positiva dada por;

$$\underline{i}_k = \underline{i}_{k1-} + \underline{i}_{k3+}$$

Abaixo na *figura 6.3.2* esta ilustrado o compensador de Akagi e as correntes injetadas no sistema.

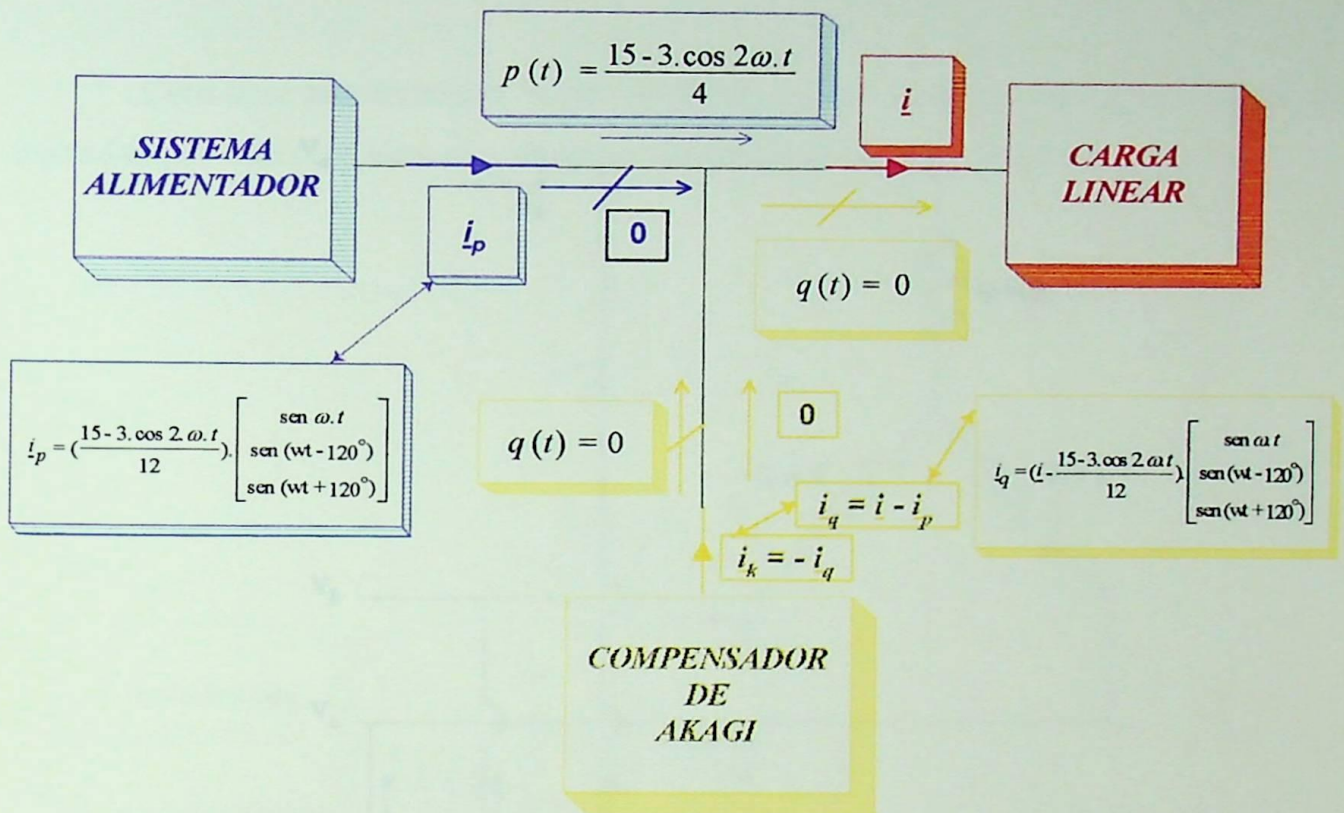


Figura 6.3.2 - Compensador de AKAGI .

Representando em função da topologia do circuito, teremos a figura 6.3.3, onde as correntes injetadas no sistema pelo compensador, são ilustradas nesta figura.

• O Compensador de Testó

Com base nas expressões (1) e (2), analisando a expressão (3) de corrente injetada por este

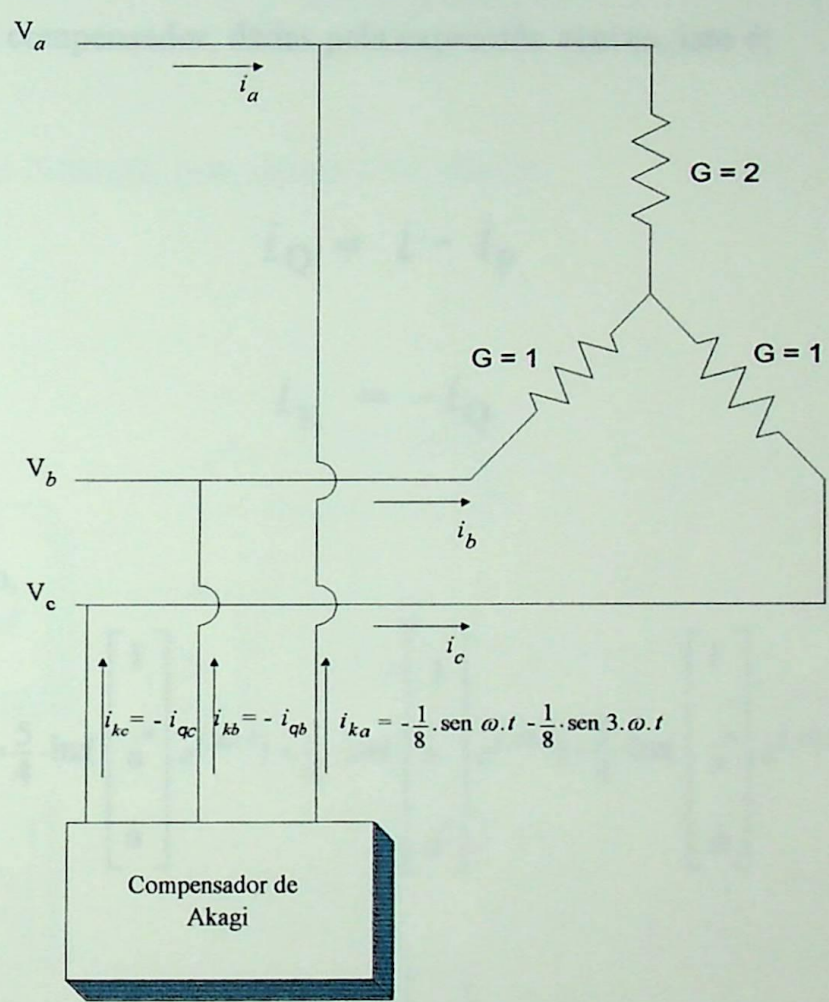


Figura 6.3.3 - Representação do Compensador de Akagi para Carga Desequilibrada Resistiva.

Como a corrente de Freq. Fundamental de cada fase, não está balanceada, o compensador de Testó injeta uma corrente, através dos capacitores de compensação de Akagi. E ainda, observa-se que, a expressão (3) contém duas componentes harmônicas, correspondentes ao conteúdo de terceira e quinta

- O Compensador de Tenti

i_Q é dada por:

Com base nas correntes Tenti, analisadas anteriormente, chega-se as correntes injetadas por este compensador, dadas pela expressão abaixo, isto é;

Esta situação é ilustrada, pela figura 5.10 abaixo

$$\underline{i}_Q = \underline{i} - \underline{i}_p$$

$$\underline{i}_K = -\underline{i}_Q$$

Deste modo,

$$i_Q = \frac{5}{4} \cdot \text{Im} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \right) + \frac{1}{4} \cdot \text{Im} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \right) - \frac{5}{4} \cdot \text{Im} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a}^* \\ \dot{a} \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \right)$$

e assim,

$$i_K = -\frac{1}{4} \cdot \text{Im} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ \dot{a} \\ \dot{a}^* \end{bmatrix} \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t} \right)$$

Como a corrente de Fryze é diferente da corrente Tenti, neste exemplo, o compensador de Tenti injeta uma corrente, também diferente a do compensador de Akagi. E ainda, observa-se que, a corrente do compensador de Tenti, não possui componentes harmônicas comparada as correntes do compensador de Akagi.

Por exemplo, a corrente de compensação na fase a para o compensador de Tenti, i_{Ka} , é dada por,

$$i_{Ka} = -\frac{1}{4} \cdot \text{sen } \omega \cdot t$$

Esta situação é ilustrada, pela figura 6.3.4 abaixo.

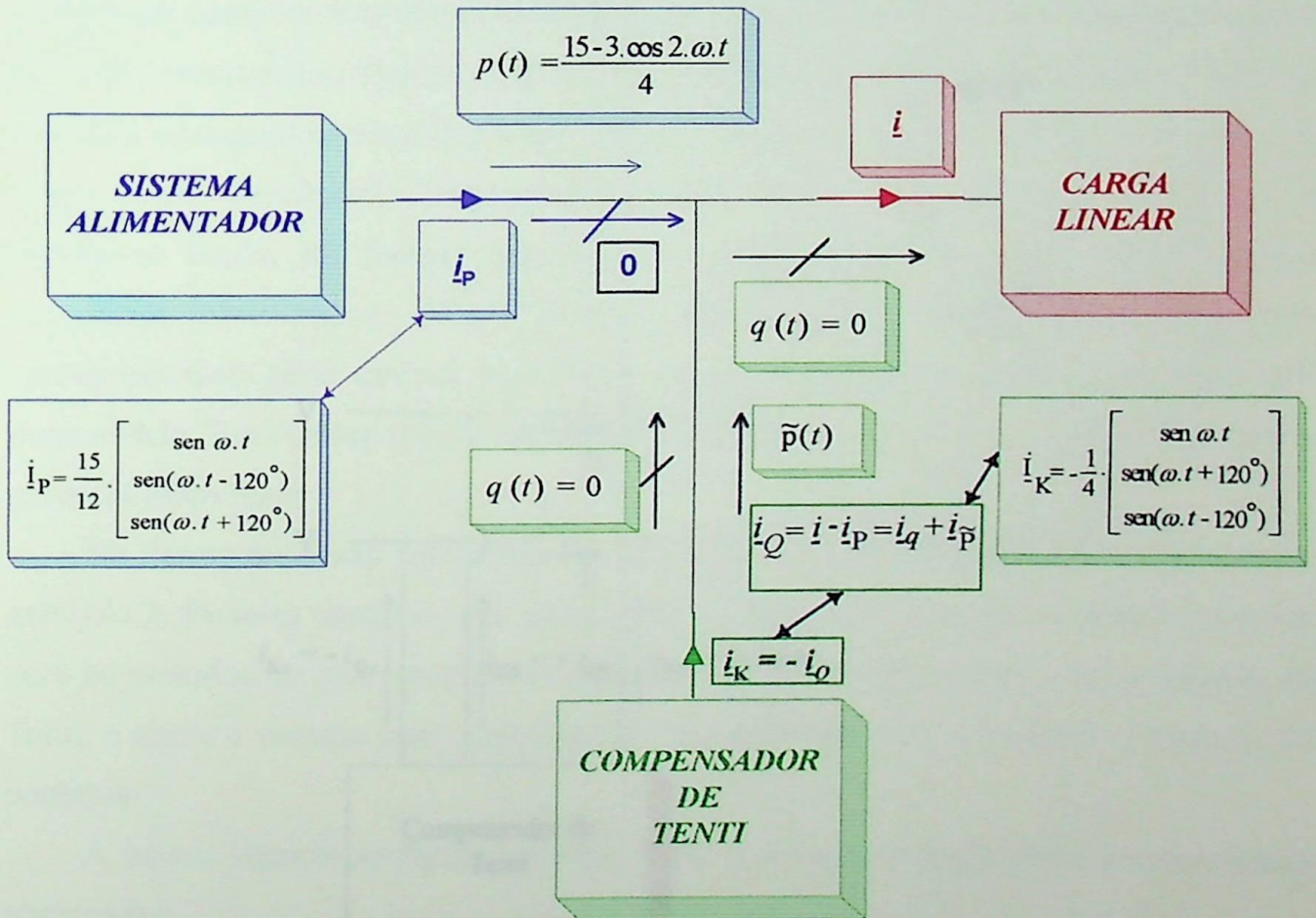


Figura 6.3.4 - Compensador de TENTI .

Assim o compensador de Akagi, como exibido anteriormente, *figura 6.3.2*, e o compensador de Tenti, exibido acima, *figura 6.3.4*, exercem seus papéis, injetando as correntes, necessárias em virtude da carga considerada. Simplesmente, colocamos a representação do compensador de Tenti em função da topologia do circuito, *figura 6.3.5* em caráter ilustrativo, afim de poder visualizar esta situação.

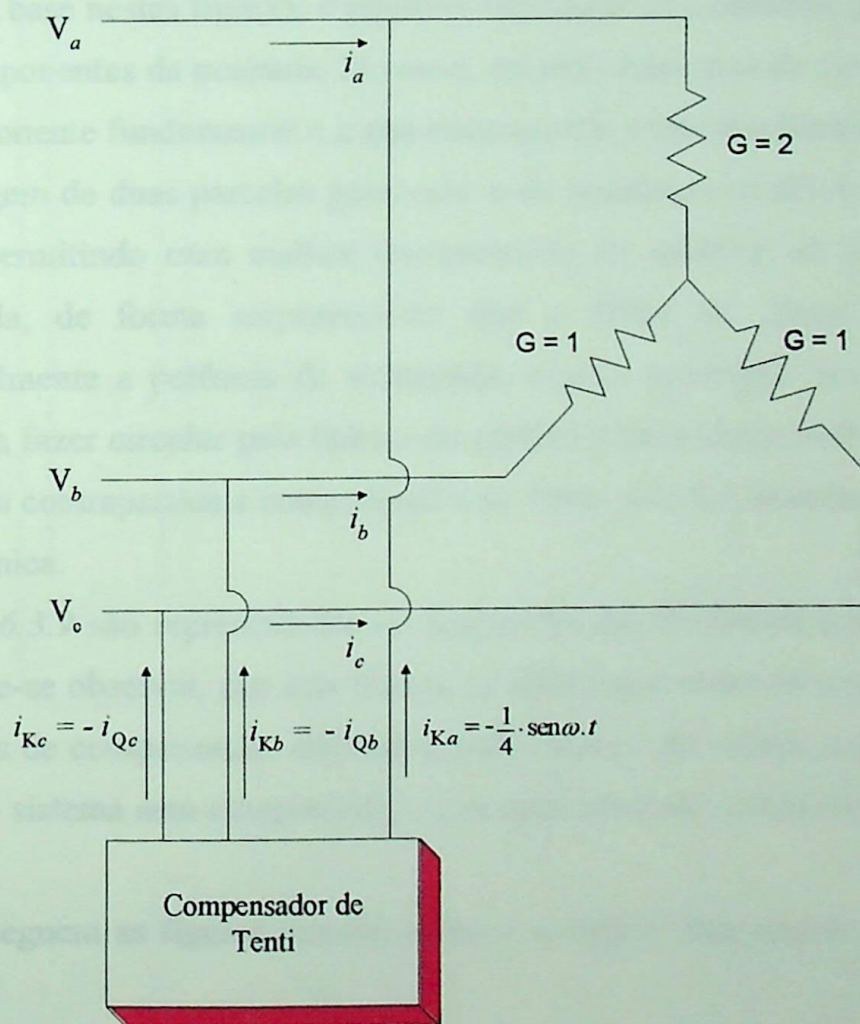


Figura 6.3.5 - Representação do Compensador de Tenti para Carga Desequilibrada Resistiva.

Como pode ser observado pelo desenvolvido acima, as diferenças entre as características dos compensadores de Akagi e Tenti são evidenciadas pelo fato de que, o compensador de Akagi, embora não necessite de elementos armazenadores de energia, injeta corrente harmônica de sequência positiva, que não é absorvida pela carga, e assim propaga-se para o sistema. Já o compensador de Tenti embora necessite de elementos armazenadores de energia, não injeta corrente harmônica no sistema.

Estas considerações podem ser melhor visualizadas através das *figuras 6.3.6 e 6.3.7 e 6.3.8* as quais ilustram comparações entre os métodos de compensação de Tenti e de Akagi e sem compensação.

Ainda com base nestas figuras, é possível visualizar os caminhos pelos que fluem as diversas componentes da potência. No caso, existem duas vias de circulação: aquela relativa a componente fundamental e a que corresponde a terceira harmônica. Cada via admite a passagem de duas parcelas possíveis: a de sequência positiva e a negativa. E dessa forma, permitindo uma melhor compreensão do sistema de compensação, e conclui-se ainda, de forma surpreendente que o filtro de Akagi não consegue compensar totalmente a potência de assimetria, e para conseguir uma compensação parcial necessita fazer circular pela linha uma potência harmônica embora a carga não precise dela. Em contrapartida a compensação de Tenti, não faz circular pelo circuito a potência harmônica.

Na *figura 6.3.9* são representados os diagramas das Potências para o sistema do *exemplo 3*. Pode-se observar, por esta figura, as diferenças entre os resultados obtidos para os métodos de compensação utilizados, pelo método de Akagi, e pelo método de Tenti, e ainda o sistema sem compensação. Em cada caso são calculados os fatores de potência.

A baixo, seguem as figuras citadas acima e a seguir uma análise dos resultados observados.

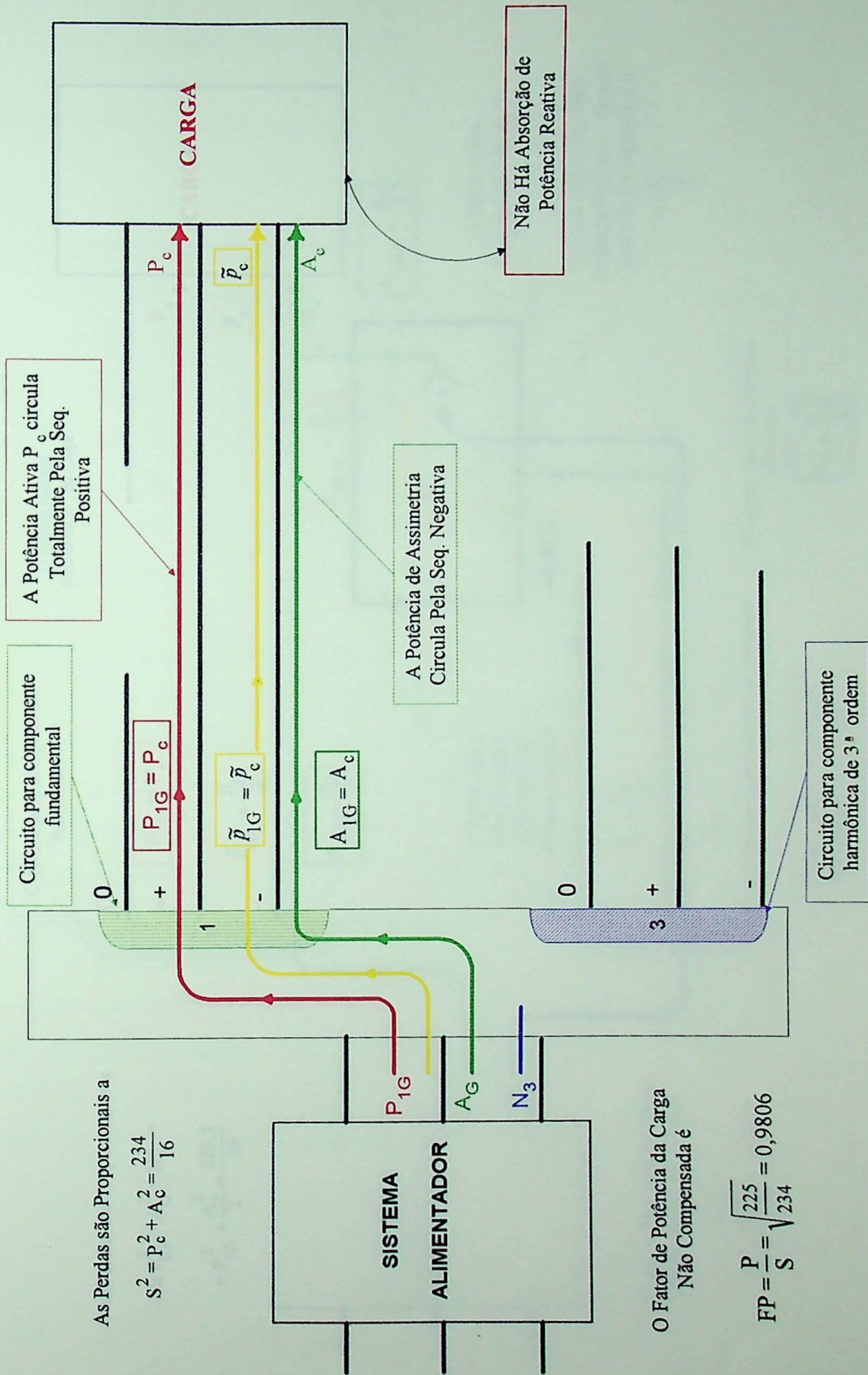
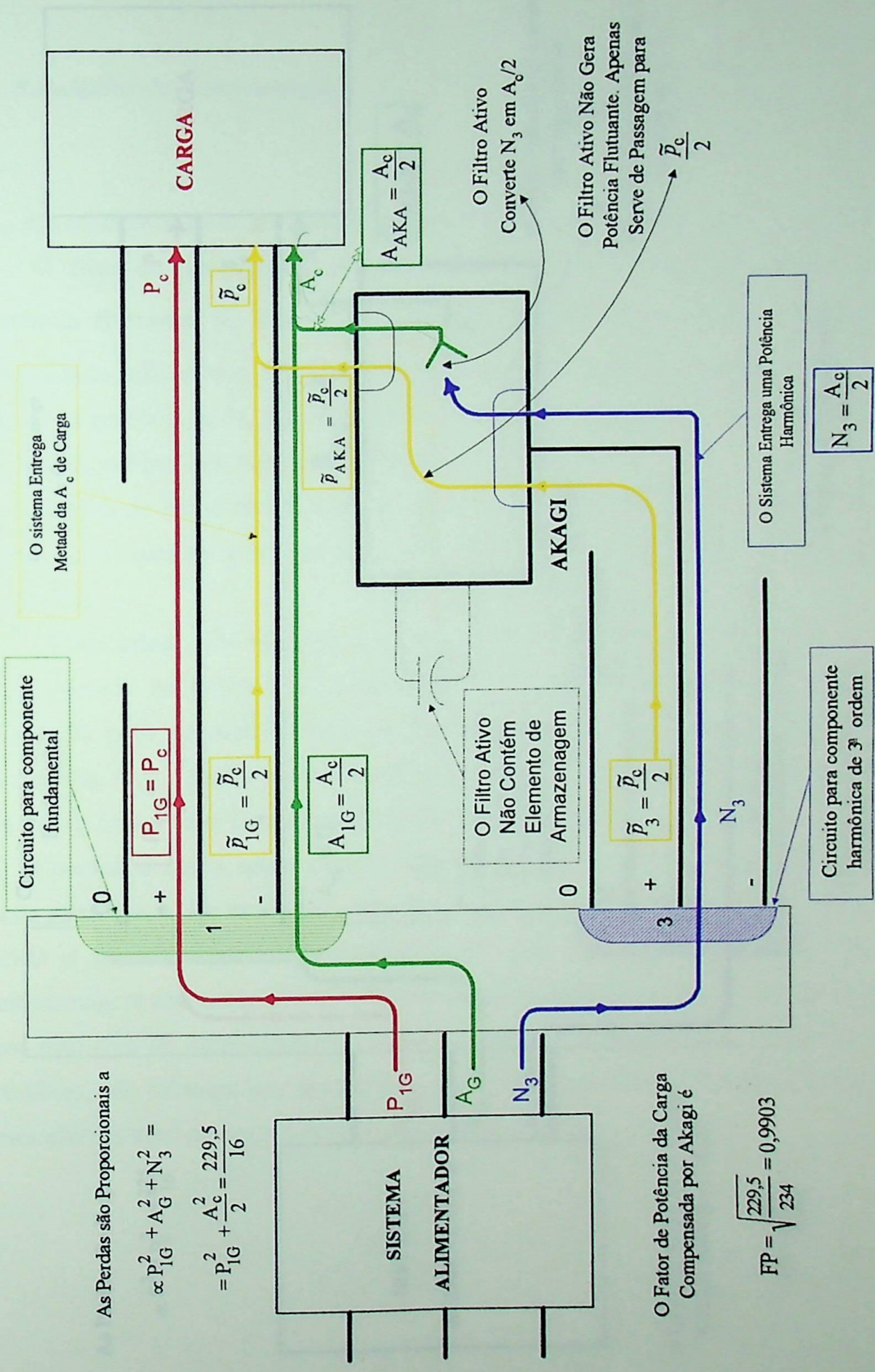


Figura 6.3.6 - O Sistema do Exemplo 6.3 Sem Compensação.



As Perdas são Proporcionais a

$$\propto P_{1G}^2 + A_G^2 + N_3^2 =$$

$$= P_{1G}^2 + \frac{A_c^2}{2} = \frac{229,5}{16}$$

O Fator de Potência da Carga Compensada por Akagi é

$$FP = \sqrt{\frac{229,5}{234}} = 0,9903$$

Figura 6.3.7 - O Sistema do Exemplo 6.3 com Compensação de AKAGI.

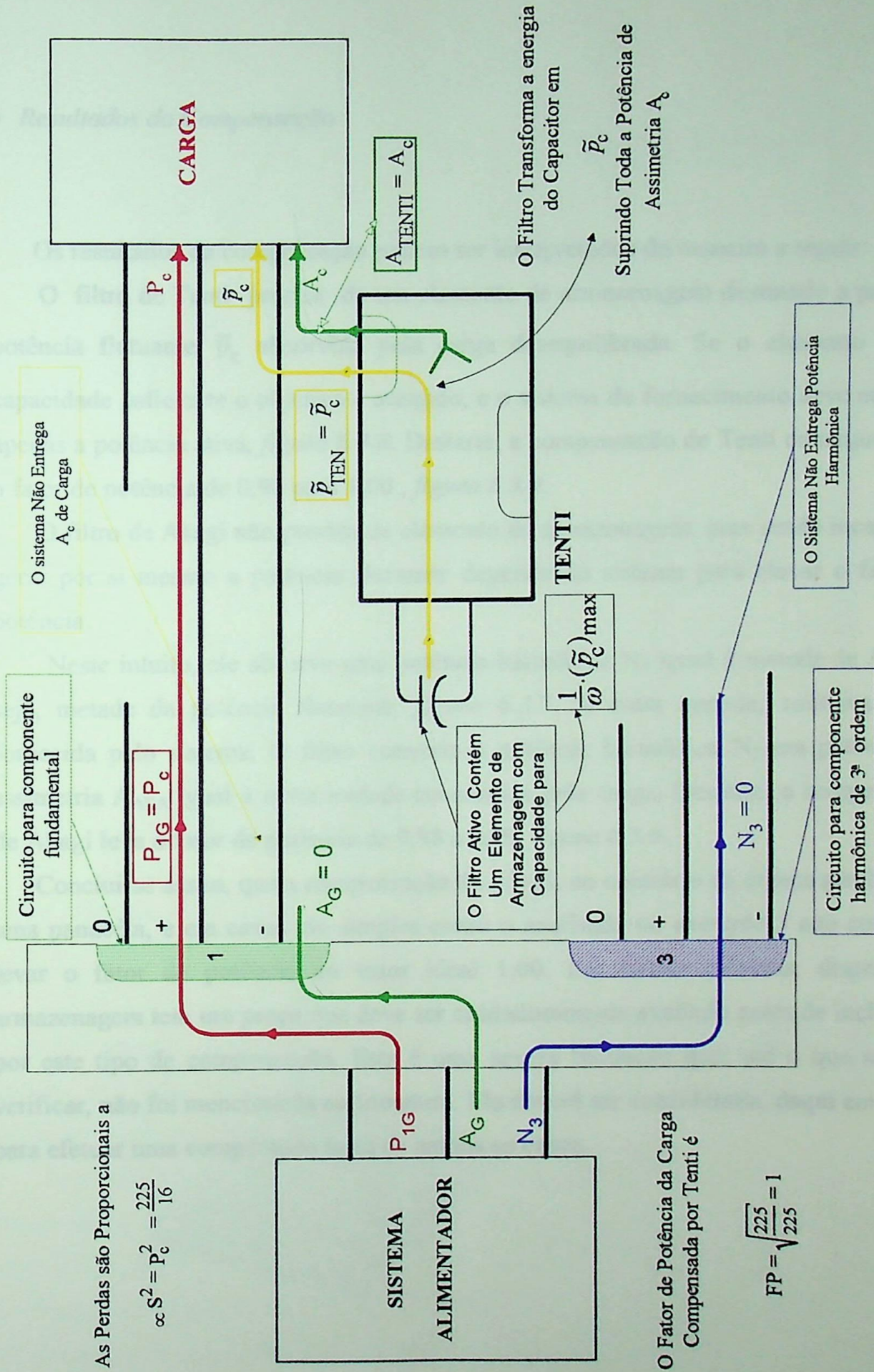


Figura 6.3.8 - O Sistema do Exemplo 6.3 com Compensação de TENTI.

- *Resultados da Compensação*

Os resultados da compensação podem ser interpretados da maneira a seguir:

O filtro de Tenti precisa de um elemento de armazenagem destinado a prover a potência flutuante \tilde{p}_c absorvida pela carga desequilibrada. Se o elemento tem a capacidade suficiente o objetivo é atingido, e o sistema de fornecimento deve entregar apenas a potência ativa, *figura 6.3.8*. Destarte, a compensação de Tenti consegue levar o fator de potência de 0,98 para 1,00, *figura 6.3.9*.

O filtro de Akagi não precisa de elemento de armazenagem, mas sendo incapaz de gerar por si mesmo a potência flutuante depende do sistema para elevar o fator de potência.

Neste intuito, ele absorve uma potência harmônica N_3 igual à metade de A_c , ou seja, metade da potência flutuante, *figura 6.3.7*. A outra metade, continua a ser fornecida pelo sistema. O filtro converte a potência harmônica N_3 em potência de assimetria A_{AKA} igual à outra metade consumida pela carga. Destarte, a compensação de Akagi leva o fator de potência de 0,98 a 0,99, *figura 6.3.9*.

Conclui-se assim, que a compensação de Akagi, ao contrário da crença geral, não é uma panacéia, e em casos tão simples como o analisado no *exemplo 3* não consegue levar o fator de potência ao valor ideal 1,00. Em outras palavras, dispensar a armazenagem tem um preço que deve ser cuidadosamente avaliado antes de inclinar-se por este tipo de compensação. Esta é uma severa limitação que, até o que se pode verificar, não foi mencionada na literatura. Ela deverá ser considerada, daqui em diante para efetuar uma comparação justa de ambos os casos.

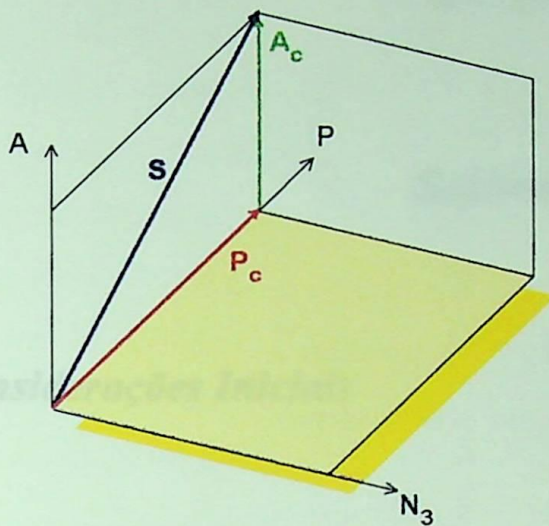


Diagrama das Potências para o Sistema Sem Compensação

O Fator de Potência é:

$$FP = \frac{P_c}{S} = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + A_c^2}} \rightarrow FP = \frac{\frac{15}{4}}{\sqrt{\frac{234}{16}}} = 0,9806$$

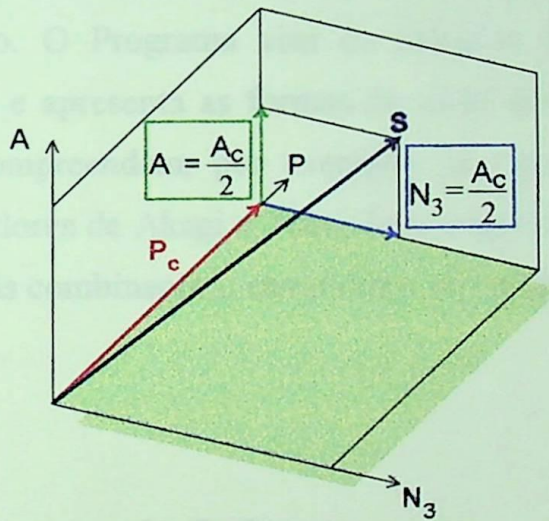


Diagrama das Potências para o Sistema Com Compensação de AKAGI.

O Fator de Potência é:

$$FP = \frac{P_c}{S} = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + \left(\frac{A_c}{2}\right)^2 + \left(\frac{A_c}{2}\right)^2}}$$

$$\Rightarrow FP = \frac{P_c}{\sqrt{P_c^2 + \frac{A_c^2}{2}}} = \sqrt{\frac{229,5}{234}} = 0,9903$$

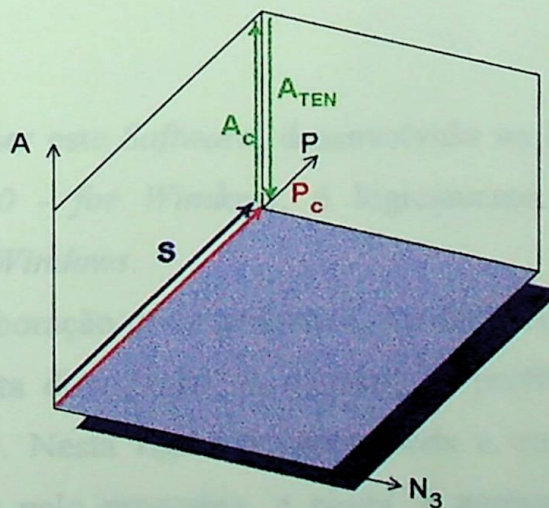


Diagrama das Potências para o Sistema Com Compensação de TENTI.

O Fator de Potência é:

$$FP = \frac{P_c}{S} = \frac{P_c}{P_c} = 1$$

Figura 6.3.9 - Diagrama das Potências para o Sistema do Exemplo 6.3

Capítulo 7

Software



7.1 - Considerações Iniciais

O objetivo deste programa é contribuir com as análises desenvolvidas nesta dissertação. O Programa visa os cálculos das grandezas envolvidas nos sistemas simulados e apresenta as formas de onda das curvas das grandezas envolvidas. Tais curvas, compreendem, por exemplo, as curvas das correntes de compensação dos compensadores de Akagi e Tenti, bem como as curvas das potências, corrente, tensão, e as demais combinações, envolvidas no circuito.

7.2 - Estrutura do Software

Por ser este *Software*, desenvolvido na linguagem de Programação *Visual Basic versão 3.0 - for Windows*, é logicamente, desenvolvido para ser executado em ambiente *Windows*.

A elaboração deste programa, foi desenvolvida com base na teoria apresentada ao longo desta dissertação. A estrutura e perfil deste *Software* é ilustrado através da *figura 7.1*. Nesta figura é apresentada a entrada de dados, a serem computados e analisados pelo programa, e ainda, é apresentado a forma pela qual os dados são analisados, e os resultados, apresentados em forma de tabelas e curvas.

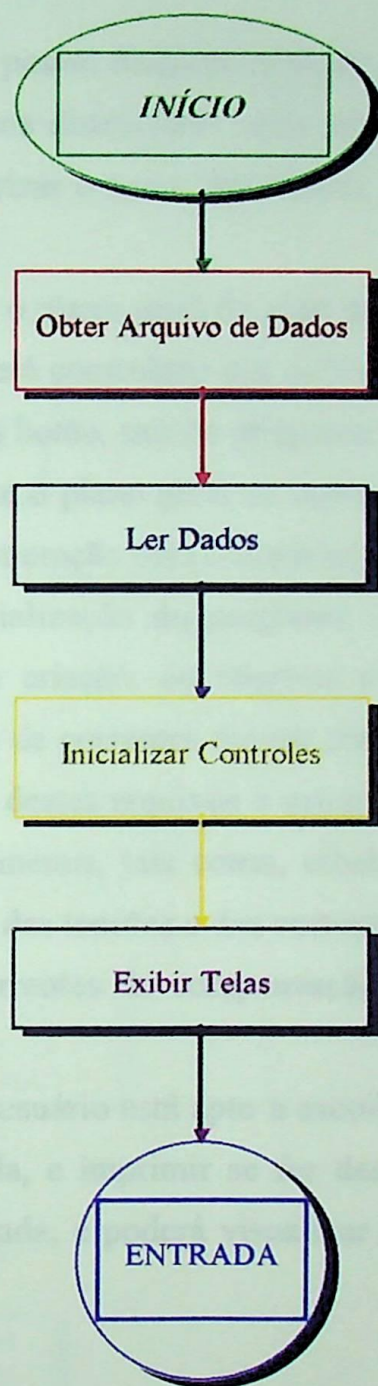


Figura 7.1 - Plano para o Processamento Inicial do Programa.

Este *Software*, também possui finalidades didáticas. Cujas contribuições se baseiam na análise de sistemas trifásicos distorcidos, afim de focar a nova realidade do setor elétrico e dessa forma priorizar o tema “*Qualidade da Energia*” e abordar alguns dos fenômenos que o afetam.

A *figura 7.1* apresenta o plano geral de ação para o processamento inicial. Após a inicialização, o programa será controlado por ações do usuário: selecionar um item de menu, dar um clique em um botão, sair do programa.

A *figura 7.2* apresenta o plano geral de ação para o processamento do menu de opções, o qual responde a interação com o usuário, de acordo com o arquivo, aberto ou criado. Isto é, após a inicialização do programa é aberta a tela principal, então o usuário, poderá optar pela criação, ou abertura de um arquivo já existente. Estes arquivos de tensões e outro de correntes devem conter os dados do circuito analisado. Após a abertura ou criação destes arquivos o programa armazena esses dados, e então habilita os itens dos seus menus, tais como, tabela de componentes harmônicas da tensão e da corrente, tabela das tensões e das correntes instantâneas, curvas das tensões e correntes, curvas das correntes de compensação, potências e combinações destas curvas.

Assim, dessa forma, o usuário está apto a escolher, por exemplo, pela exibição de determinada curva ou tabela, e imprimir se for desejável, poderá ainda visualizar as distorções das formas de onda, e poderá visualizar as formas de onda da corrente de compensação.

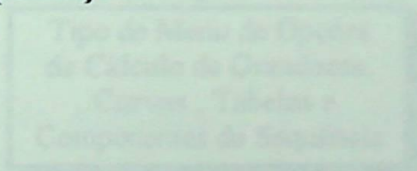


Figura 7.2 Plano para o Processamento do Menu de Opções do Programa.

7.3 - Aplicação de Software

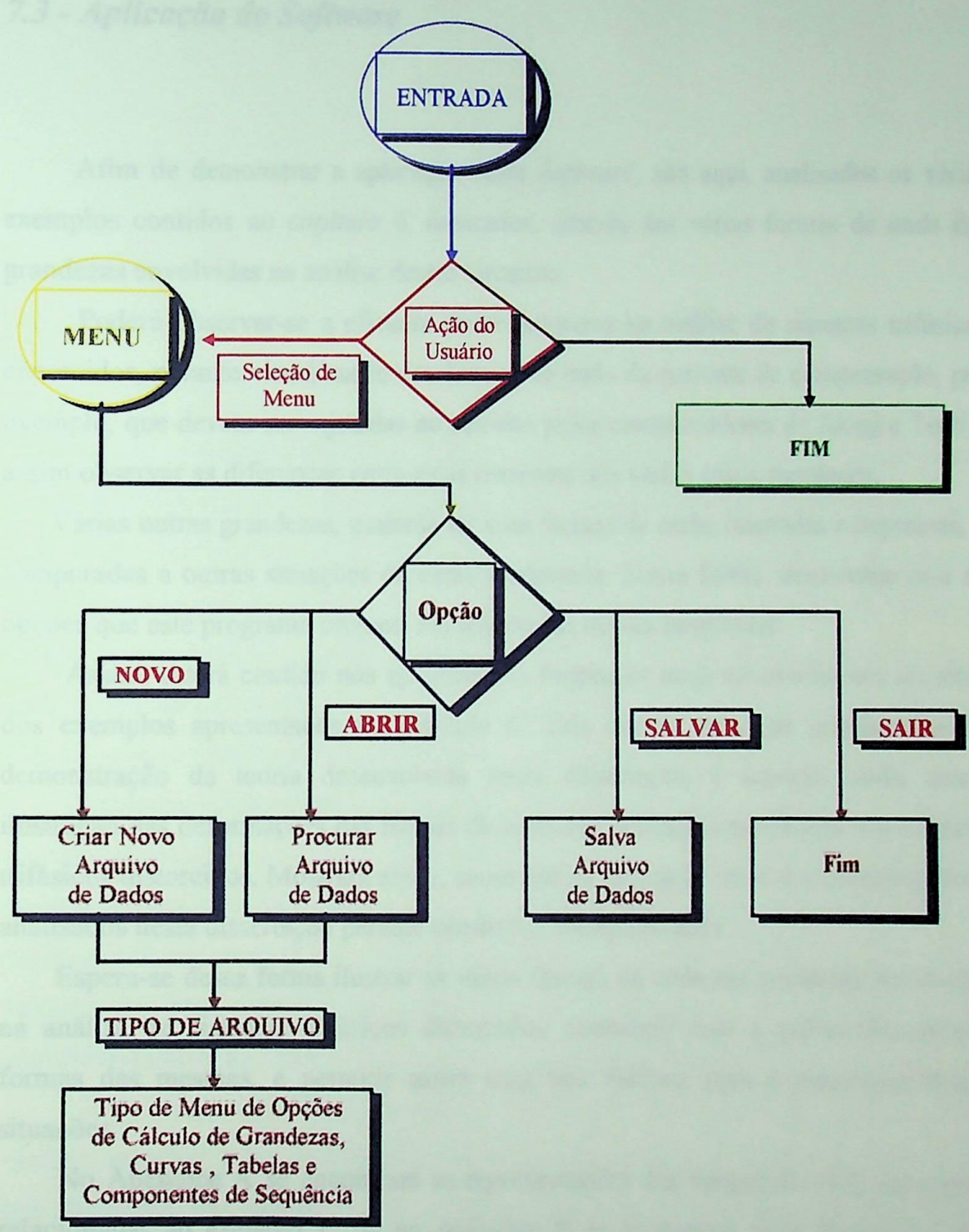


Figura 7.2 - Plano para o Processamento do Menu de Opções do Programa.

7.3 - Aplicação do Software

Afim de demonstrar a aplicação deste *Software*, são aqui, analisados os vários exemplos contidos no *capítulo 6*, ilustrados, através das várias formas de onda das grandezas envolvidas na análise destes circuitos.

Poderá observar-se a eficácia deste programa na análise de sistemas trifásicos distorcidos, perante visualização das formas de onda da corrente de compensação, por exemplo, que devem ser injetadas no circuito pelos compensadores de Akagi e Tenti e assim observar as diferenças entre estas correntes nos vários casos simulados.

Várias outras grandezas, poderão ter suas formas de onda, ilustradas e impressas, e comparadas a outras situações de carácter relevante. Dessa forma, demonstrar-se-á as opções que este programa oferece, em termos das curvas envolvidas.

Assim, estará contido nos apêndices as formas de onda envolvidas nos circuitos dos exemplos apresentados no *capítulo 6*. Tais curvas, serão de grande valia na demonstração da teoria desenvolvida nesta dissertação, e servirão ainda, como ilustração das deformações das formas de onda das grandezas envolvidas nos sistemas trifásicos distorcidos. Mostrará ainda, como são as formas de onda dos compensadores analisados nesta dissertação perante condições desequilibradas.

Espera-se dessa forma ilustrar as várias formas de onda das grandezas envolvidas na análise de sistemas trifásicos distorcidos, contribuir com o esclarecimento das formas das mesmas, e permitir assim uma boa didática para o tratamento destas situações.

No Apêndice A se encontram as representações das formas de onda das curvas relacionadas ao *exemplo 1*, já no Apêndice B se encontram as representações das formas de onda das curvas relacionadas ao *exemplo 2*, e no Apêndice C se encontram as representações das formas de onda das curvas relacionadas ao *exemplo 3*.

Capítulo 8

Conclusões

Este capítulo consolida as principais orientações, análises e contribuições apresentadas ao longo do desenvolvimento desta dissertação de mestrado, a qual tratou da aplicação de técnicas para análise dos sistemas trifásicos distorcidos. Cujo produto foi o desenvolvimento de um *software* que vêm contribuir com a análise dos sistemas trifásicos distorcidos, e assim contribuir com as atividades de ensino, e resaltar a necessidade de enfoque na área de Qualidade de Energia, ilustrando a necessidade da compreensão e estudos aprofundados nesta área.

O motivo concreto para elaboração deste trabalho foi a constatação, no cenário mundial, do número crescente, de cargas “poluidoras”, que deterioram a qualidade da energia, e com isso, trás perturbações e anomalias indesejáveis a perfeita operação do sistema elétrico como um todo. Tais preocupações, vêm se ilustrando pelo um sem número de Publicações Técnicas, Congressos, Seminários, etc., por parte dos especialistas no setor elétrico não só no Brasil como no Mundo todo.

Vivendo esmagadora realidade, que se torna a principal preocupação do setor elétrico mundial, a *Power Quality*, é que nos vemos não só entusiasmados, mas quase que obrigados, por sermos mais um estudante de tal tema, impulsionados a dar nossa pequena contribuição.

O desenvolvimento deste *Software*, foi elaborado afim de ilustrar as distorções nos sistemas elétricos trifásicos provocadas por cargas “poluidoras” que acarretam em perturbações ao sistema. Simulando tais cargas através de suas grandezas de fase é que conseguimos através do *software* representar as formas de onda das várias grandezas

envolvidas no sistema em questão. Através das análises das formas de onda, observa-se a necessidade da compensação em vista da ocorrência de harmônicos e/ou assimetrias nas ondas de corrente e tensão.

Observando os exemplos analisados no capítulo 6 e as curvas plotadas, obtidas pela simulação destas cargas no *software*, contidas nos apêndices A, B, e C, vemos que este programa alcança não só seus objetivos, como também abre a possibilidade de se transformar, em parte de um programa maior, que vise a atender as novas diretrizes de análise de sistemas trifásicos em vista dos perfis das novas cargas encontradas hoje.

International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, Bologna, Italy, September 1994.

[2] Rossetto, L.; Tenti, P., "Evaluation of Instantaneous Power in Three-Phase Systems" *ETEP* 4 (1994), nº 6, pp. 409-412.

[3] JARDÓN, J.A.; ARAGO, H., "Análisis de potencia instantánea para la mejora de la calidad de tensión en la energía eléctrica" *II Congreso Latinoamericano de Generación y Transporte de Energía Eléctrica*, Mar del Plata, Argentina, Nov. 1995.

[4] IMANIEL, A. E.; VANCZAK, J. P. S. D., "Power Distortion in Nonlinear Loads with Non Linear Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9, nº 1, pp. 23-27, 1994.

[5] Standard 100 (Diccionario IEC), 1992.

[6] ARAGO, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A., "Controlled source of the instantaneous reactive power in three-phase systems" *International Power Electronics Conference (IPEC 1993)*, 1993, pp. 25-28.

[7] ARAGO, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A., "Controlled Three-Phase Instantaneous Compensating Switching Device with a Large Storage Capacitor", *IEEE Trans. Ind. Appl.* IA-20 (1984), nº 1, pp. 403-405.

[8] ARAGO, H.; NABAE, A.; SATOH, H., "Controlled Three-Phase Instantaneous Filter using Multiple Voltage Sources", *IEEE Transactions on Ind. Appl.* IA-22 (1986), nº 3, pp. 407-411.

[9] ARAGO, H.; NABAE, A., "Three-Phase Instantaneous Power Compensation with a Switched Capacitor", *ETEP* 1994, nº 4, pp. 233-237.

[10] IEEE WORKING GROUP ON HARMONIC CURRENTS AND VOLTAGES, "IEEE Recommended Practice and Test Procedures for Harmonic Current Measurements on Power Systems", IEEE Std. 519-1992, 1992.

Bibliografia

ARTIGOS E PUBLICAÇÕES CONSULTADAS:

- [1] Ribeiro, P.F. **“Wavelets Transform; an advanced tool for analyzing non-stationary harmonic distortions in power systems”**, Proceedings of the IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems, Bologna, Italy, September 1994.
- [2] Rosetto, L.; Tenti, P., - **“Evaluation of Instantaneous Power terms in Multi-Phase Systems”** ETEP 4 (1994) n° 6, pp. 469-475.
- [3] JARDINI, J.A.; ARANGO H., - **“ Uso de filtros activos para la mejora de la calidad de tensión en la energia eléctrica”** II Congreso Latino Americano de Generacion Y Transporte de Energia Eléctrica, Mar Del Plata, Argentina, Nov. 1995;
- [4] EMANUEL, A. E.; VANCZAK, J. ET ALÍÍ, - **“Voltage Distortion in Distribution Feeders with Non Linear Loads”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, n° 1, pp. 79-87, 1994;
- [5] **Standard 100** (Dicionário IEEE) 1992
- [6] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A., - **“Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits”** International Power Electronics Conference (JIEE IPEC), Tokyo / Japan, 1983 Proc., pp. 1375-86;
- [7] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A., - **“Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components”**, IEEE Trans. Ind. Appl. IA-20 (1984), N° 3, pp. 625-30;
- [8] AKAGI, H.; NABAE, A.; SATOSHI, A., - **“Control Strategy of Active Power Filter using Multiple Voltage-Source PWM Converters”** IEEE Trans. Ind. Appl. IA-22 (1986), N° 3, pp. 460-5;
- [9] AKAGI, H.; NABAE, A., - **“The p-q Theory of Three-Phase Systems under Non-Sinusoidal Conditions”**, ETEP (1993), Vol. 3, N°1, pp.27-31;
- [10] IEEE WORKING GROUP ON NONSINUSOIDAL SITUATIONS: EFFECTS ON METER

- PERFORMANCE AND DEFINITIONS OF POWER, **“Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, n° 1, pp. 79-87, Jan/1996;
- [11] JARDINI, J.A.; ARANGO H., - **“Voltage Compensation: A Means to Improve Quality of Energy Supply”**, POWER QUALITY-95 INTERNATIONAL CONFERENCE Nürenberg, Alemania, Nov. 1995;
- [12] BLASZCZAK, G.; BOAKE, I.; VAN WYK, J.D., - **“Cost effectiveness of hybrid and unified compensators of power networks”**, IEE Proc. Electric Power Appl. Vol. 141 N° 2 pp. 39-44, March 1994.;
- [13] DEPENBROCK, M.; SKUDELNY, CH., **“Dynamic Compensation of Non-Active Power using the FBD Method - Basic Properties demonstrated...”**, ETEP Vol.4 N° 5 Sep./Oct. 1994 pp 381/87.
- [14] CZARNECKI, L.S., - **“Dynamic Power-Quality oriented approach to Power Theory and Compensation of Assymetrical Systems under Non-Sinusoidal Conditions”**, ETEP, Vol.4, N° 5, Sept./Oct. 1994, pp. 347-57.;
- [15] EMANUEL, A. E., **“Powers in Nonsinusoidal Situations. A Review of Definitions and Phifical Meaning”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, n° 3, pp. 1377-89;
- [16] EMANUEL, A. E., **“The Need of a Simple and Practical Resolution of the Apparent Power”**, ETEP (1993), Vol. 3, n° 1, pp. 103-6;
- [17] EMANUEL, A. E., **“On the definition of Power Factor and Apparent Power in Balanced Poliphase Circuits with sinusoidal Voltages and Currents”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, n° 3, 1993, pp. 841-47;
- [18] FERRERO, A.; SUPERTI-FUGA, G., - **“A New Approach to the Definition of Power Components in Three-Phase Systems under Non-Sinusoidal Conditions”**, IEEE Transactions Instr. And Measurements IM 40 (1991), pp.568-77;
- [19] FILIPSKI, P.S., - **“Polyphase Apparent Power and Power Factor under Distorted Waveform Conditions”** IEEE Transactions on Power Delivery, V.P.WRD-6(1991), pp. 1161-65, April/1954;
- [20] IEEE WORKING GROUP ON NONSINUSOIDAL SITUATIONS, **“A Survey of North American Electric Utility Concerns Regarding Nonsinusoidal Waveforms”**, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, n° 1, pp. 73-78, Jan/1996;
- [21] **“IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems**

for Industrial and Commercial Applications - Orange Book", Std. 446/1995;

- [22] GUREWICH, N.; GUREWICH, O., - **"Visual Basic 3.0 for Windows"**, McGraw-Hill do Brasil, Brasil, 1995;
- [23] NELSON, R., - **"Visual Basic 3.0 for Windows Guia autorizado Microsoft"**, McGraw-Hill do Brasil, Brasil, 1995;
- [24] ADAMS, L., - **"Visualização e Realidade Virtual - Programação 3D com Visual Basic for Windows"**, McGraw-Hill do Brasil, Brasil, 1995;
- [25] GRAIG, J.C., - **"Microsoft Visual Basic"**, McGraw-Hill do Brasil, Brasil, 1995;

Curvas Relacionadas ao Integral + 1


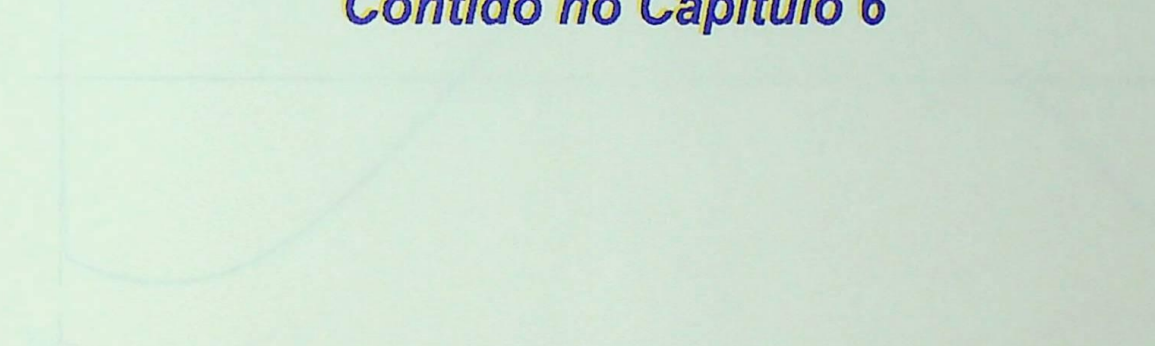
Contido no Capítulo 6

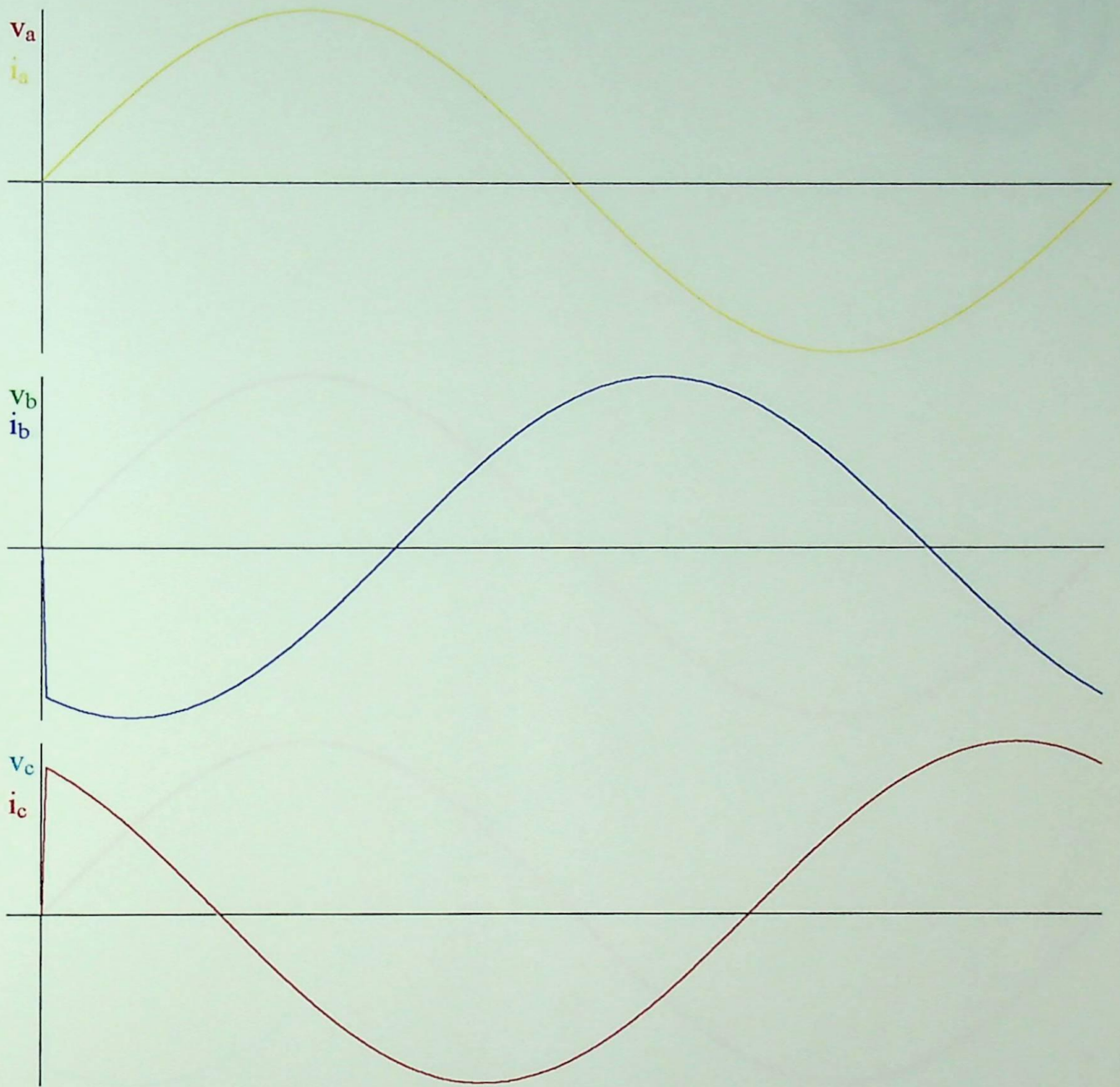
Apêndice A



Curvas Relacionadas ao Exemplo - 1

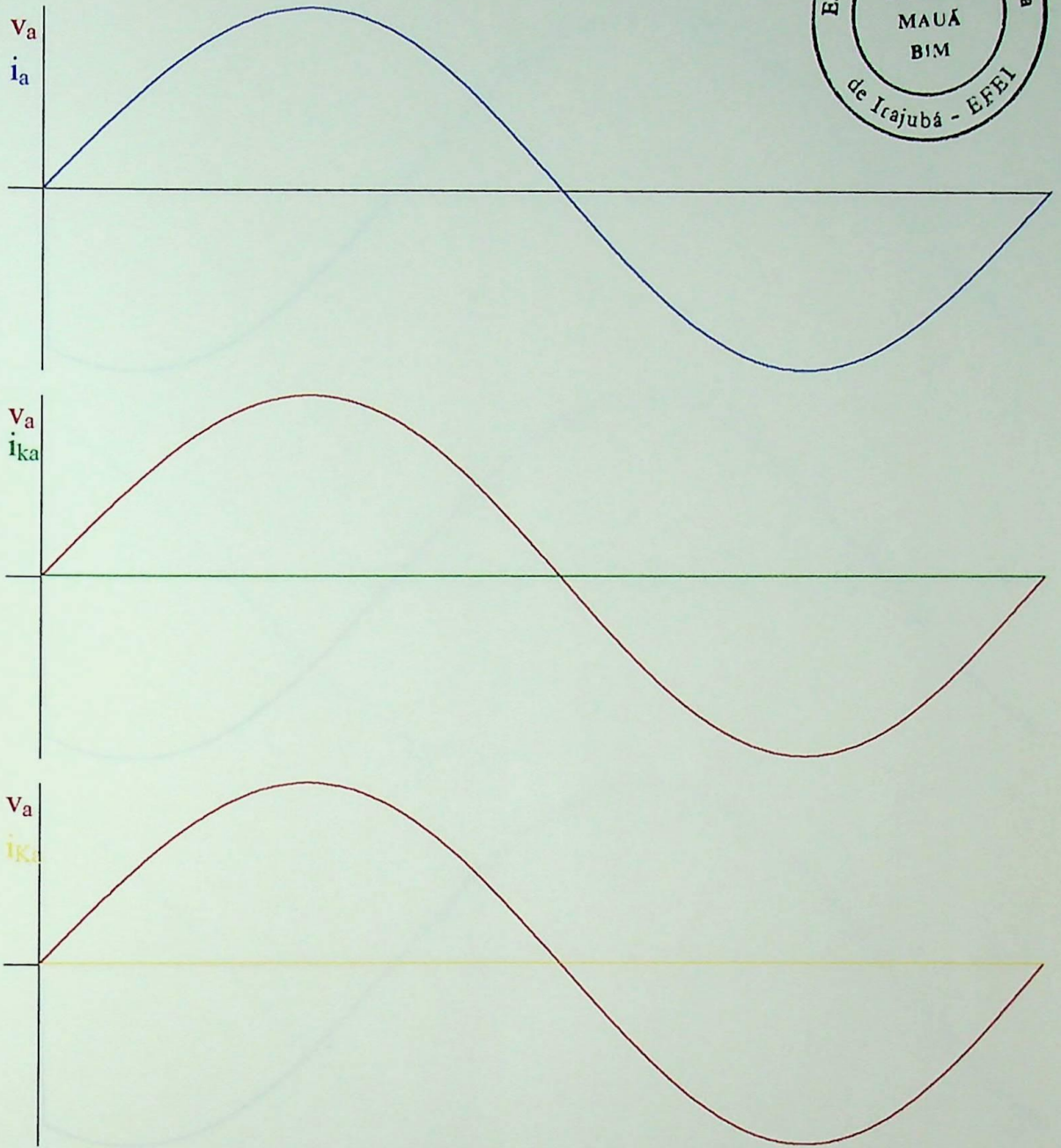
Contido no Capítulo 6





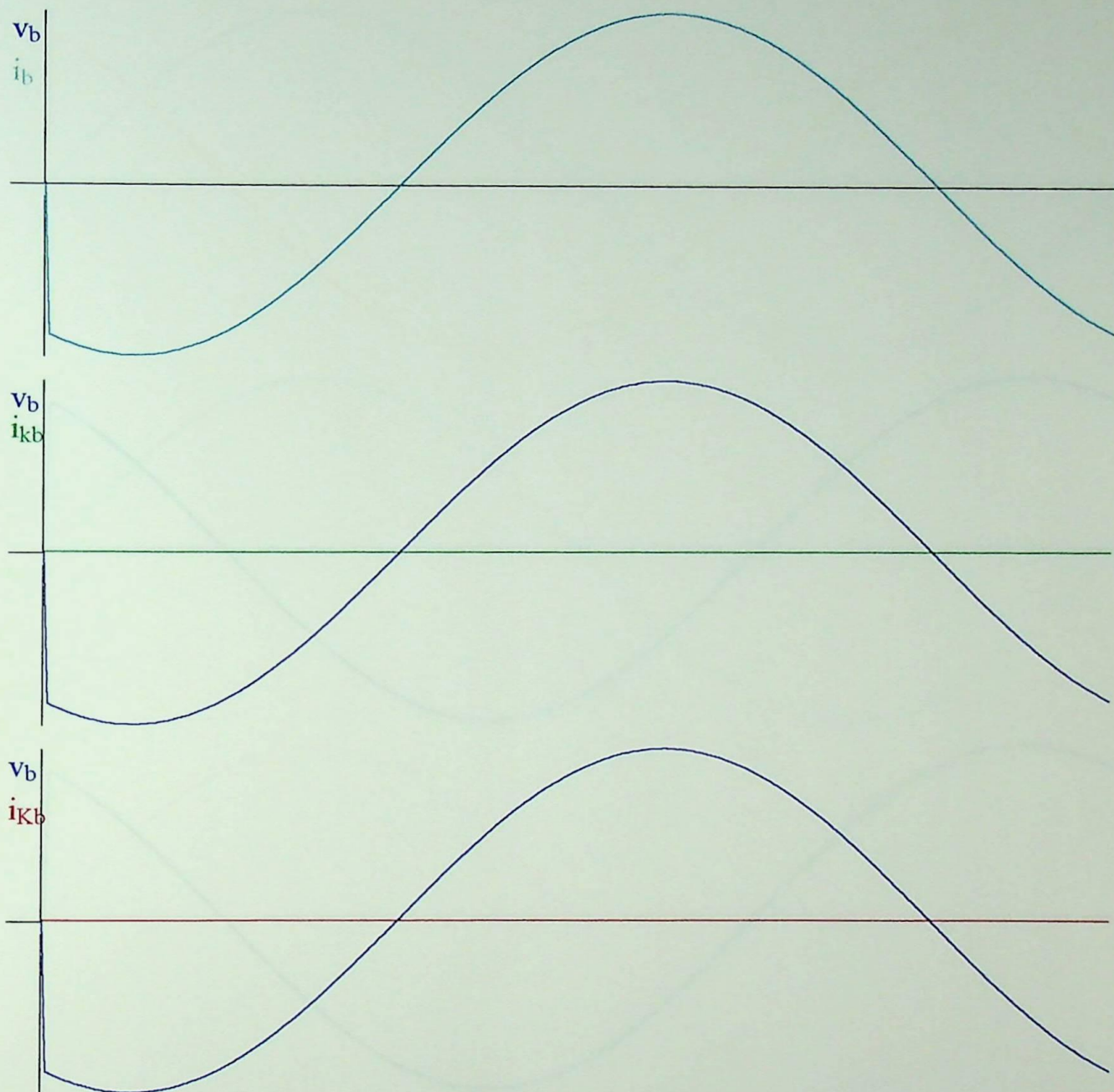
CURVAS DAS TENSÕES E CORRENTES INSTANTÂNEAS NAS FASES ABC

Apêndice A
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.1



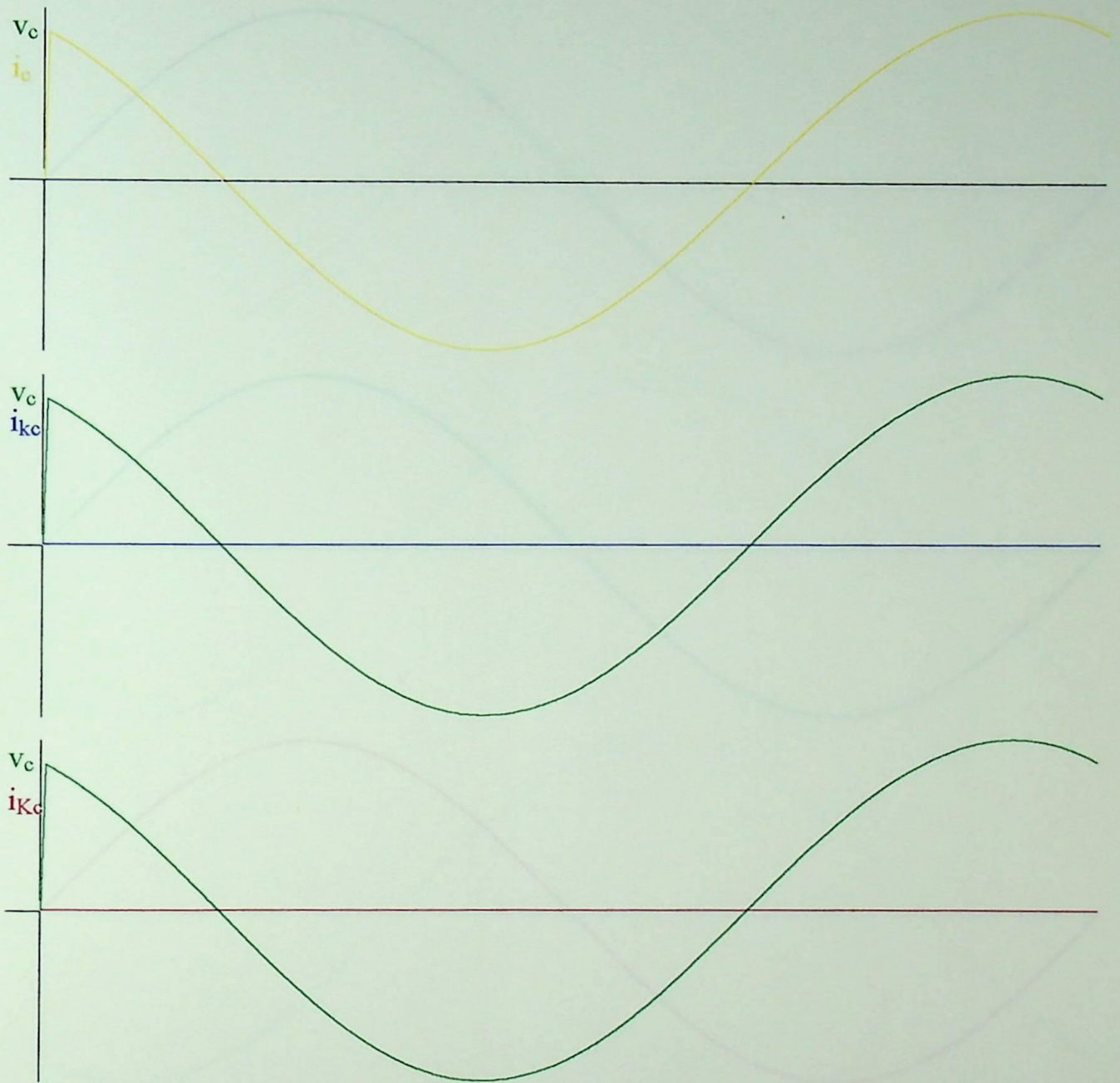
CURVAS das CORRENTES - INSTANTÂNEA de COMP. de TENTI e AKAGI na FASE A

Apêndice A
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.1



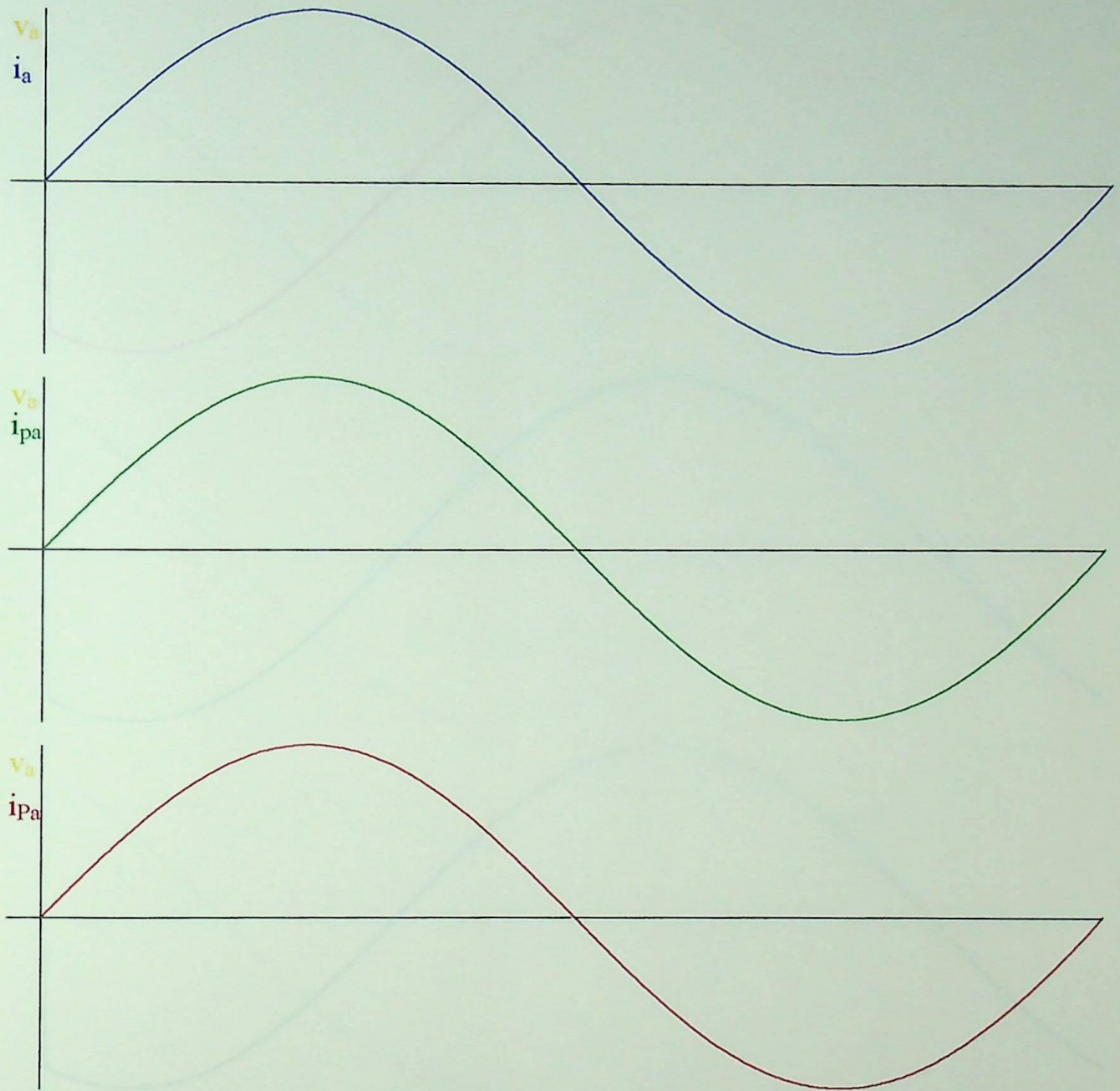
CURVAS das CORRENTES - INSTANTÂNEA de COMP. de TENTI e AKAGI na FASE B

Apêndice A
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.1



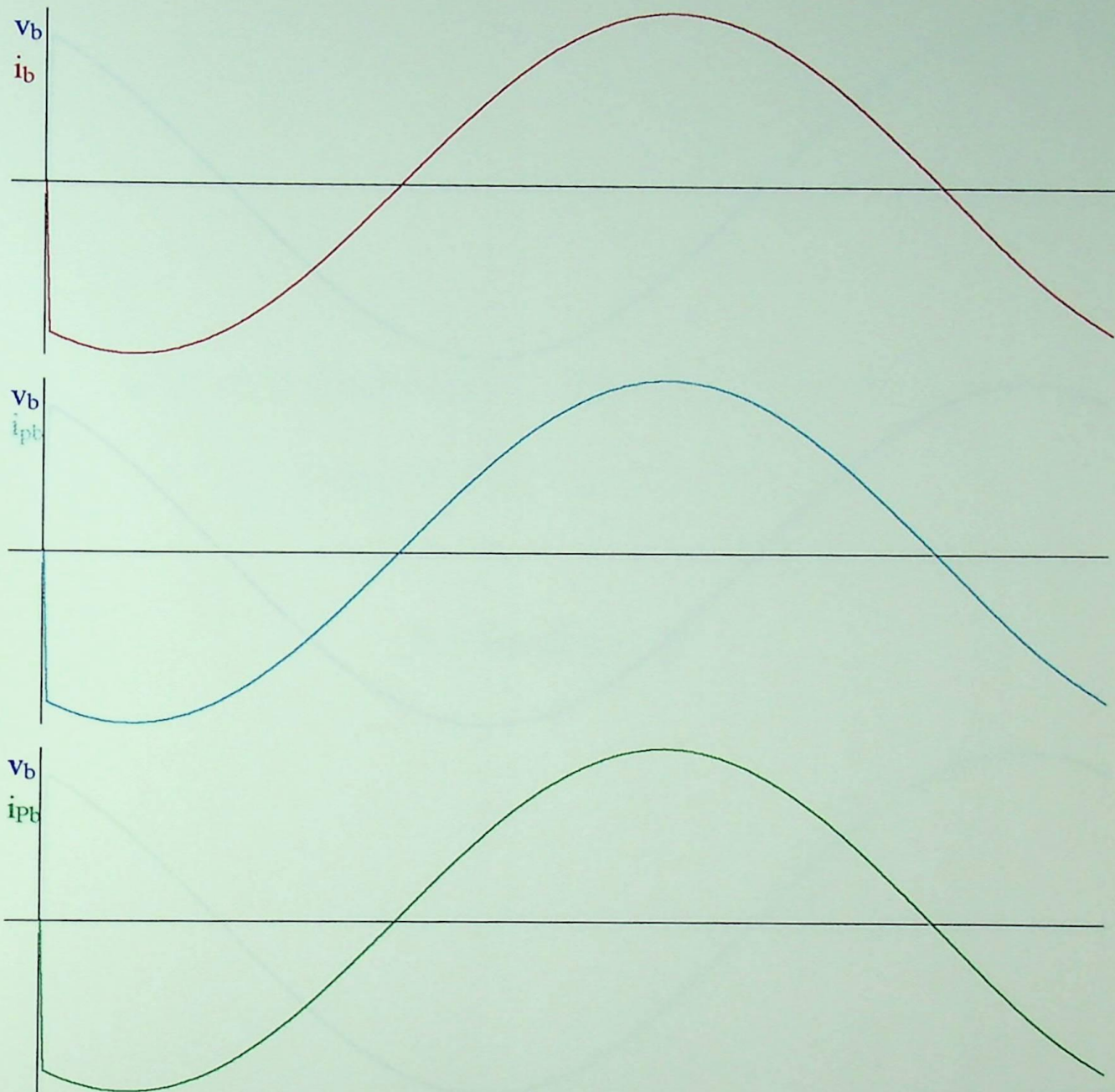
CURVAS das CORRENTES - INSTANTÂNEA de COMP. de TENTI e AKAGI na FASE C

Apêndice A
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.1



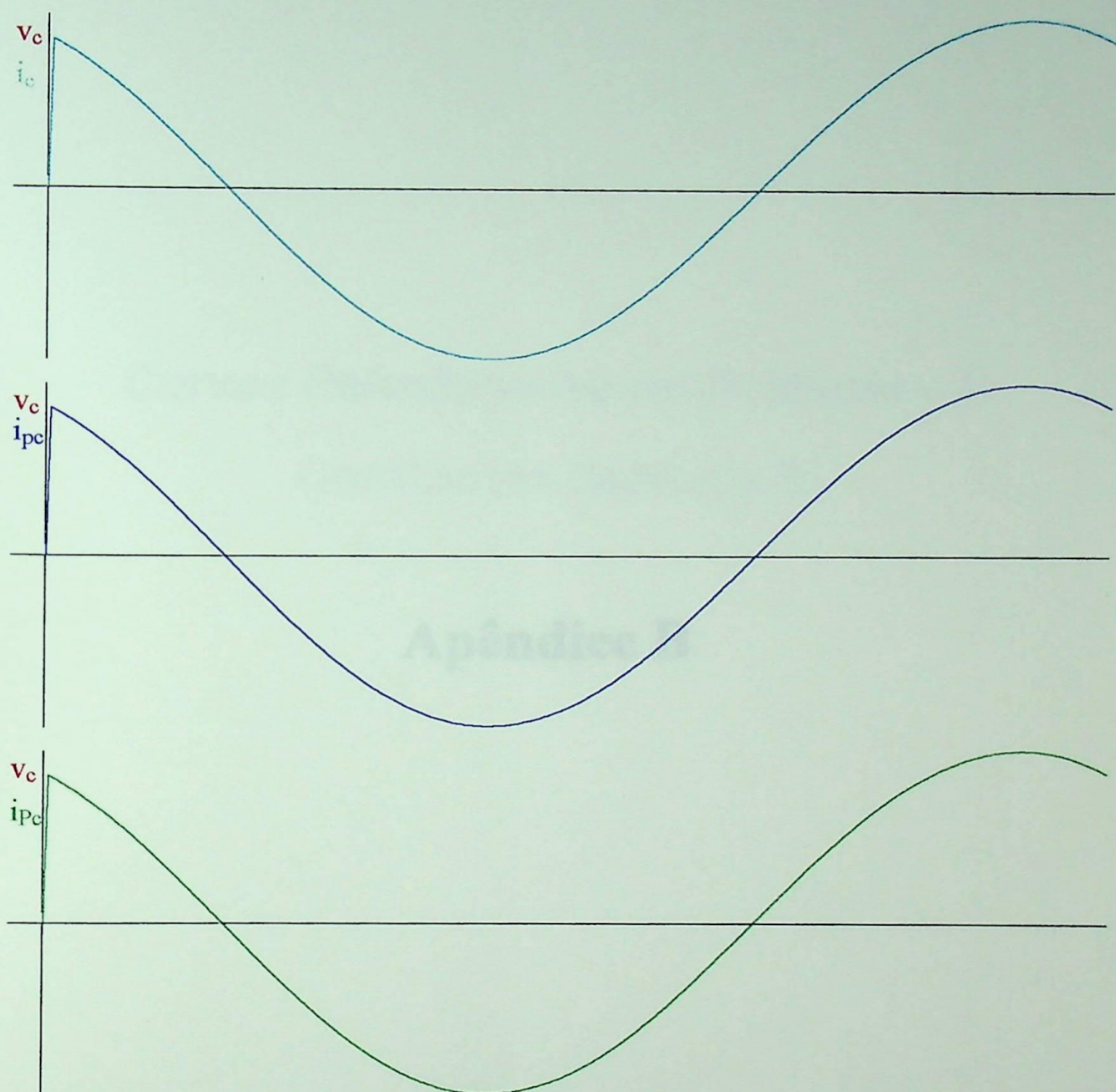
CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE A

Apêndice A
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.1



CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE B

Apêndice A
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.1



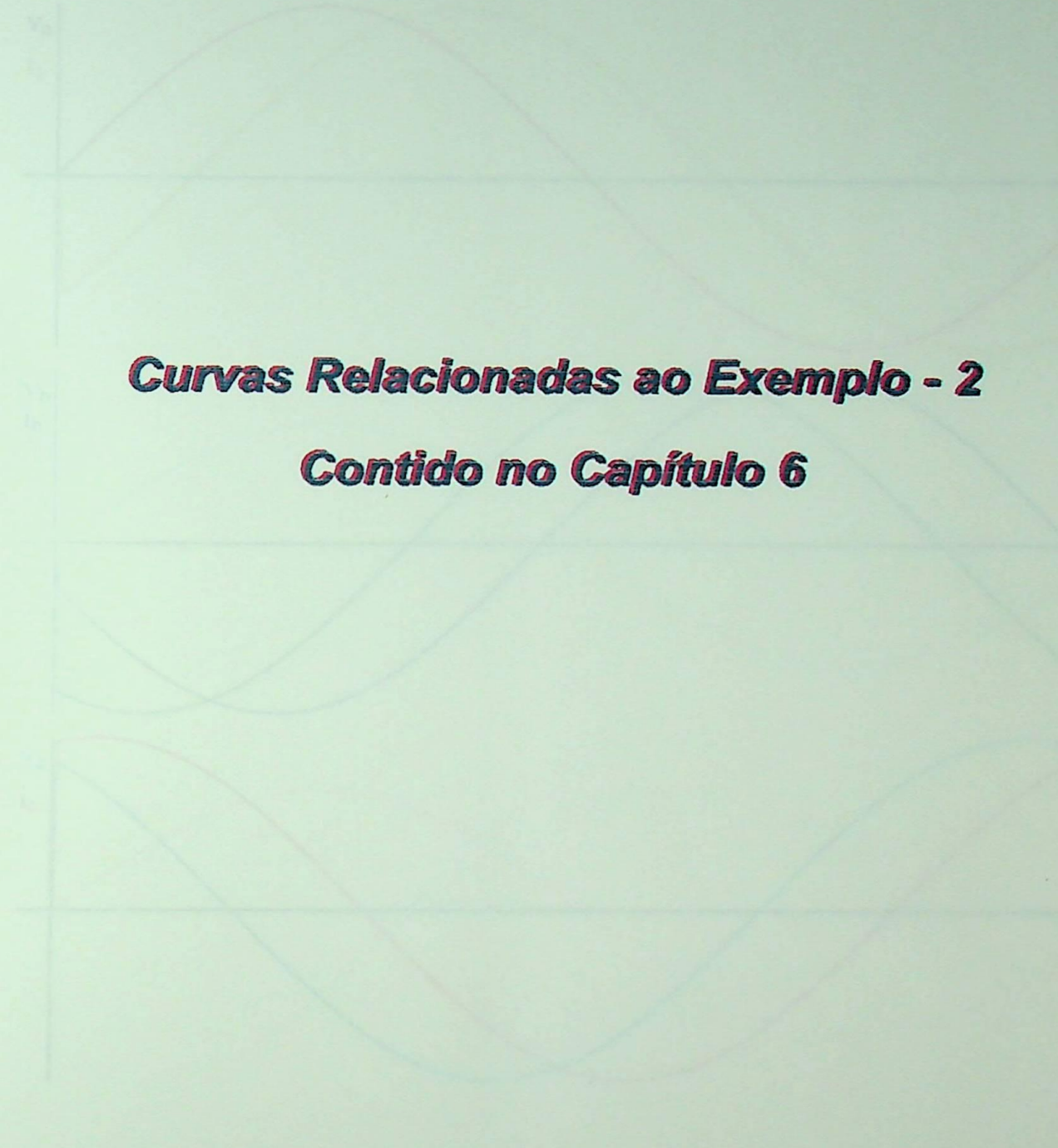
CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE C

Apêndice A
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.1

Curvas Relacionais de Exemplos - 2

Contida no Capítulo 4

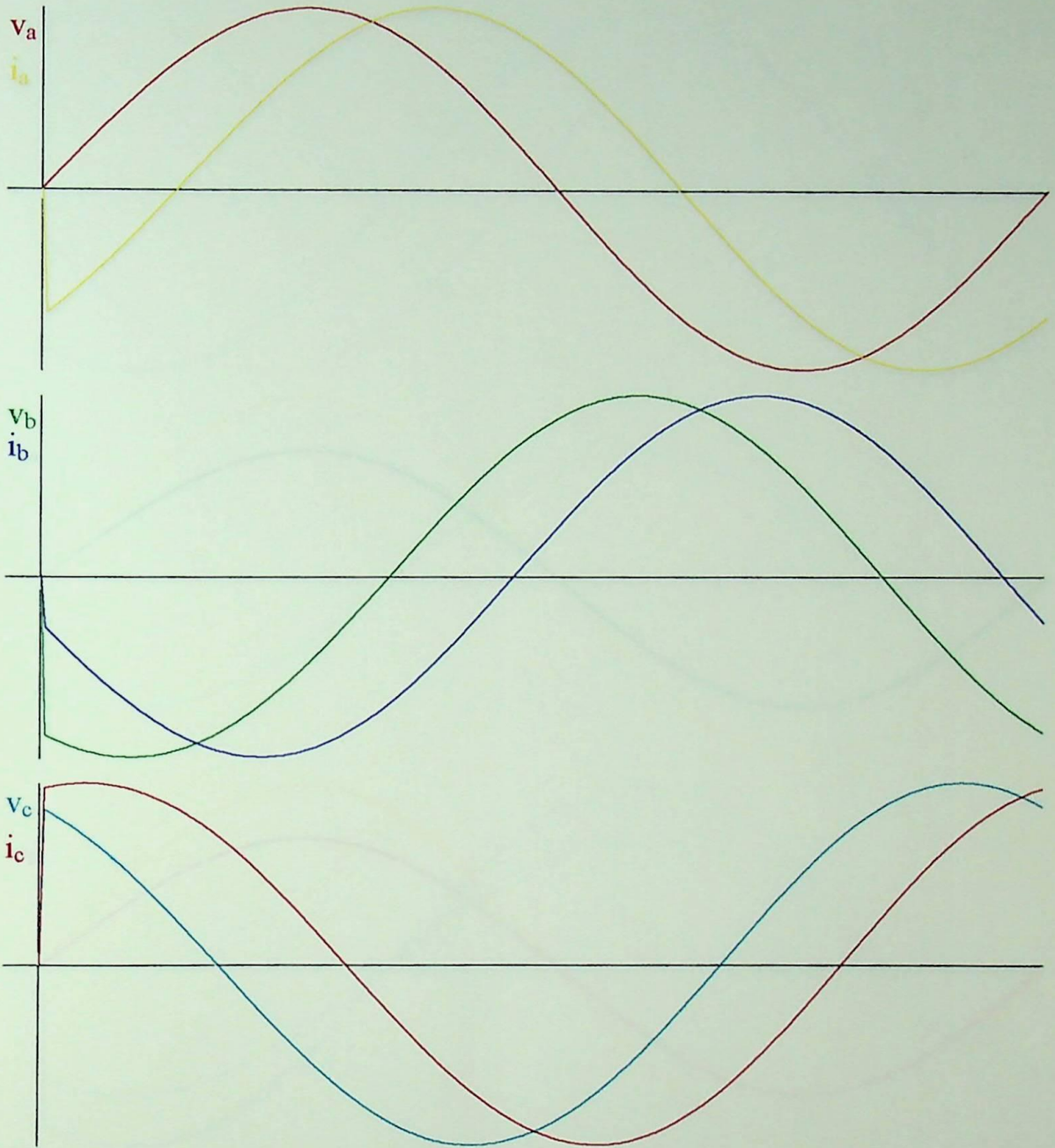
Apêndice B



Curvas Relacionadas ao Exemplo - 2
Contido no Capítulo 6

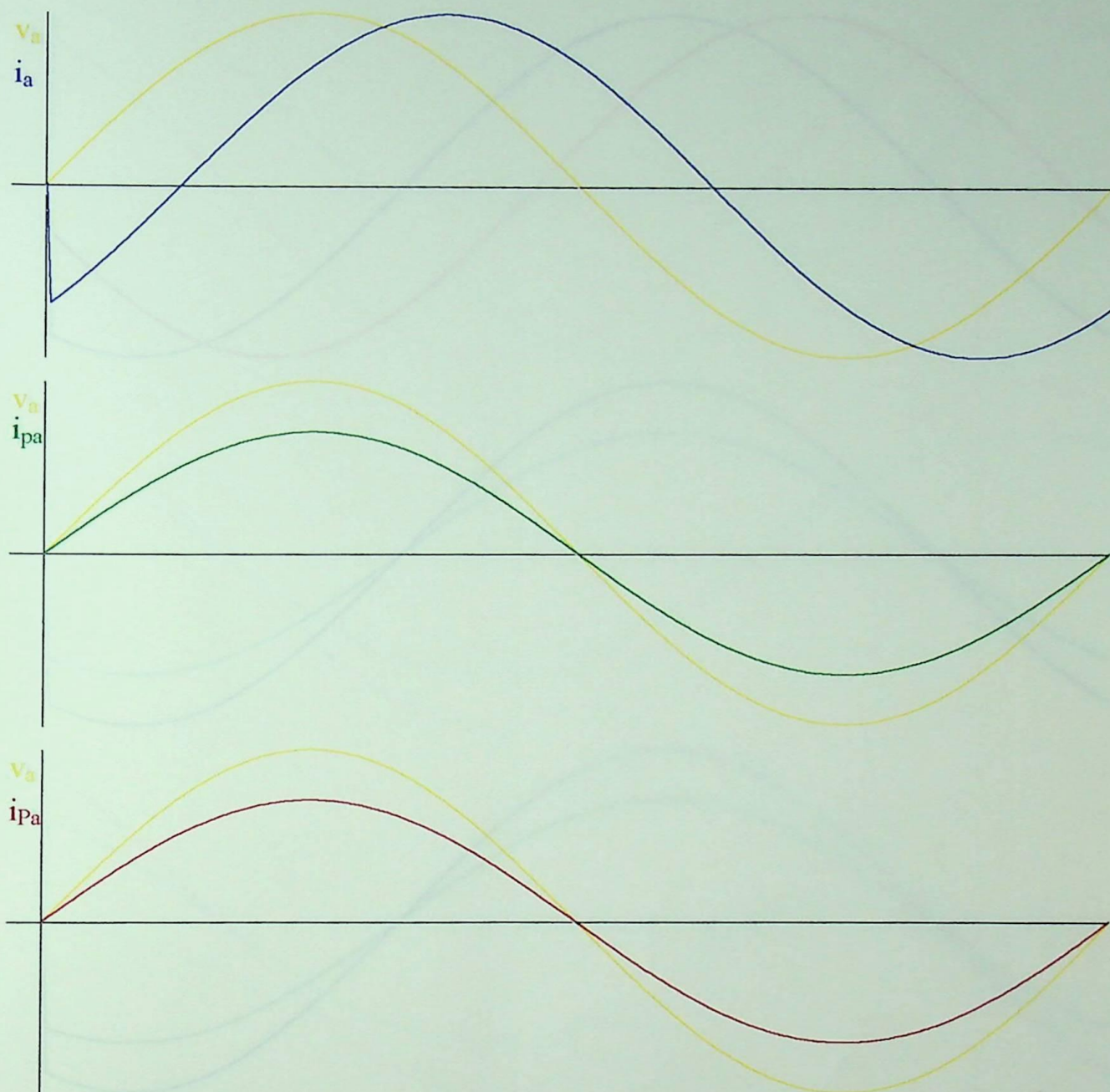
CURVAS DAS TENSÕES E DEFORMAÇÕES EM UM MATERIAL ELÁSTICO LINEAR

Apêndice
Curvas Relacionadas
para o Exemplo 2



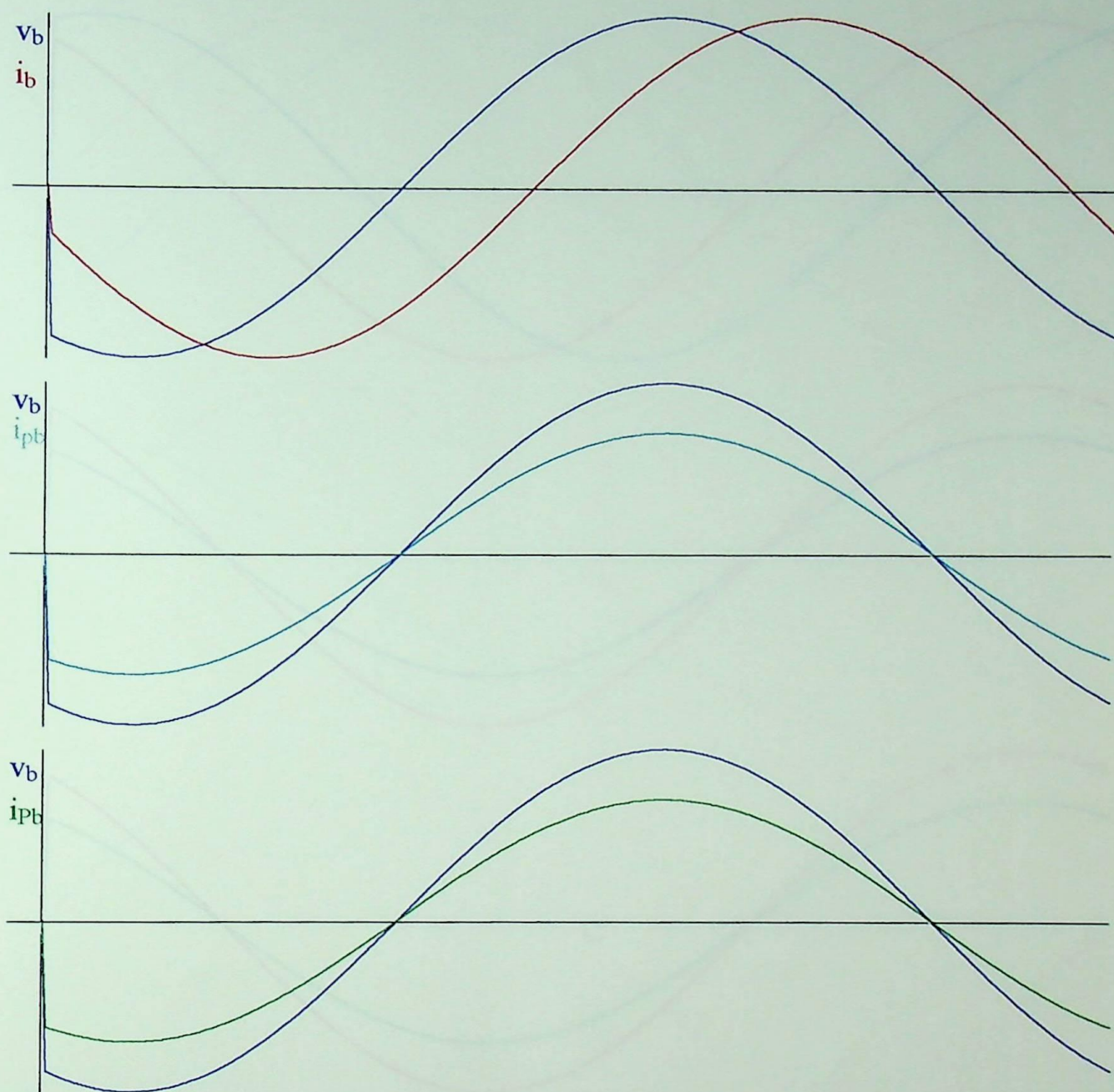
CURVAS DAS TENSÕES E CORRENTES INSTANTÂNEAS NAS FASES ABC

Apêndice B
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.2



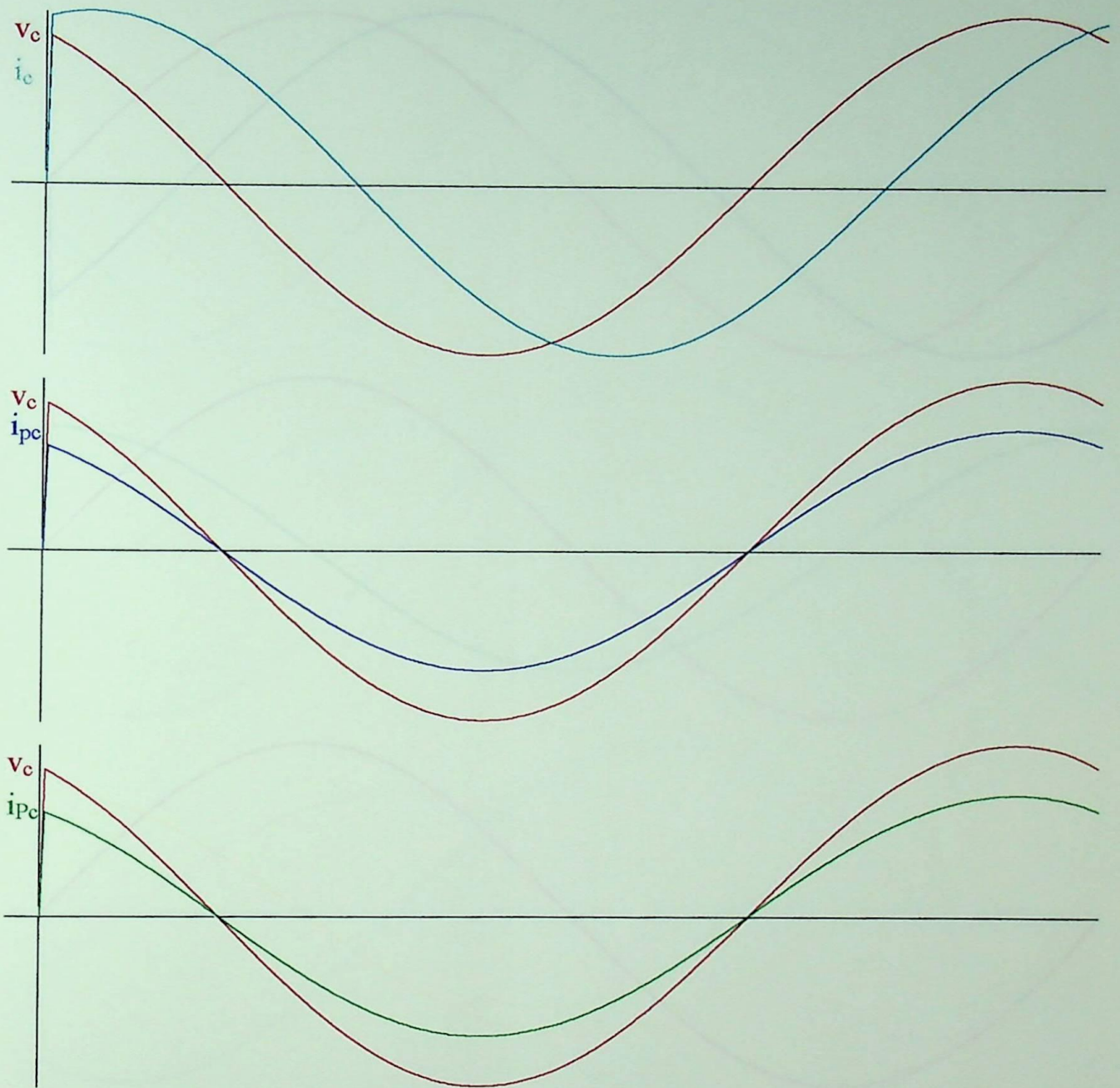
CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE A

Apêndice B
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.2



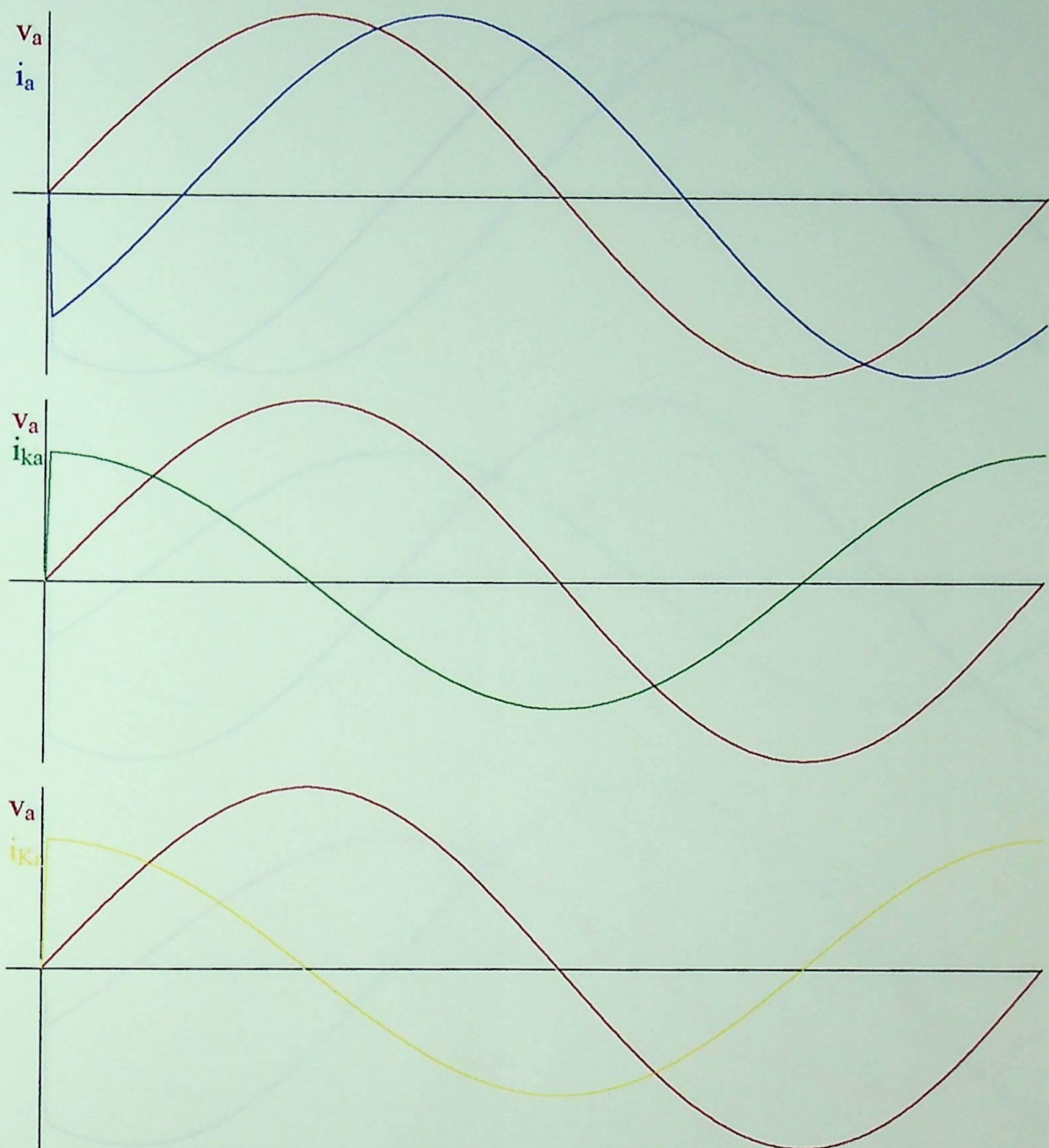
CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE B

Apêndice B
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.2



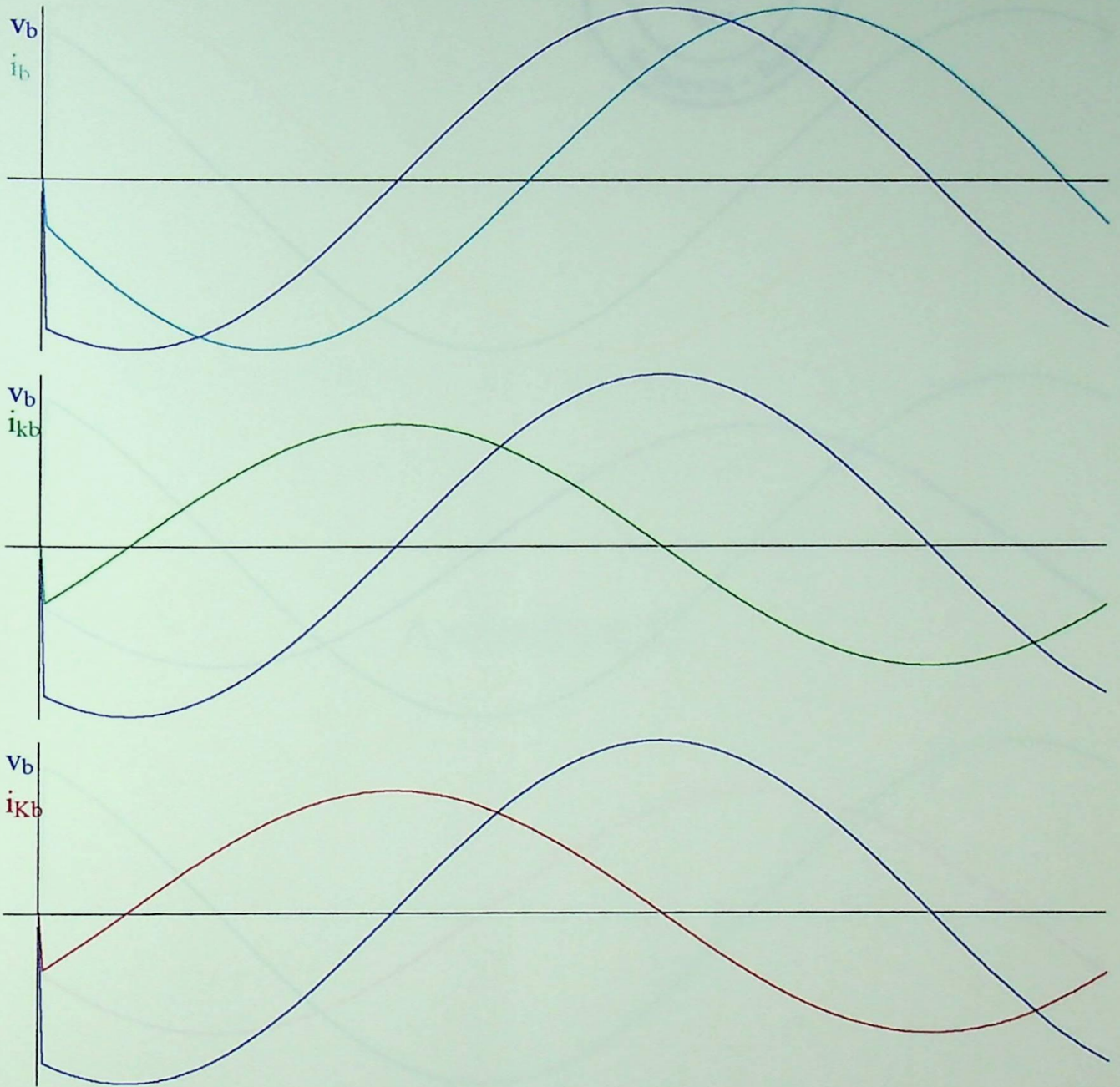
CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE C

Apêndice B
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.2



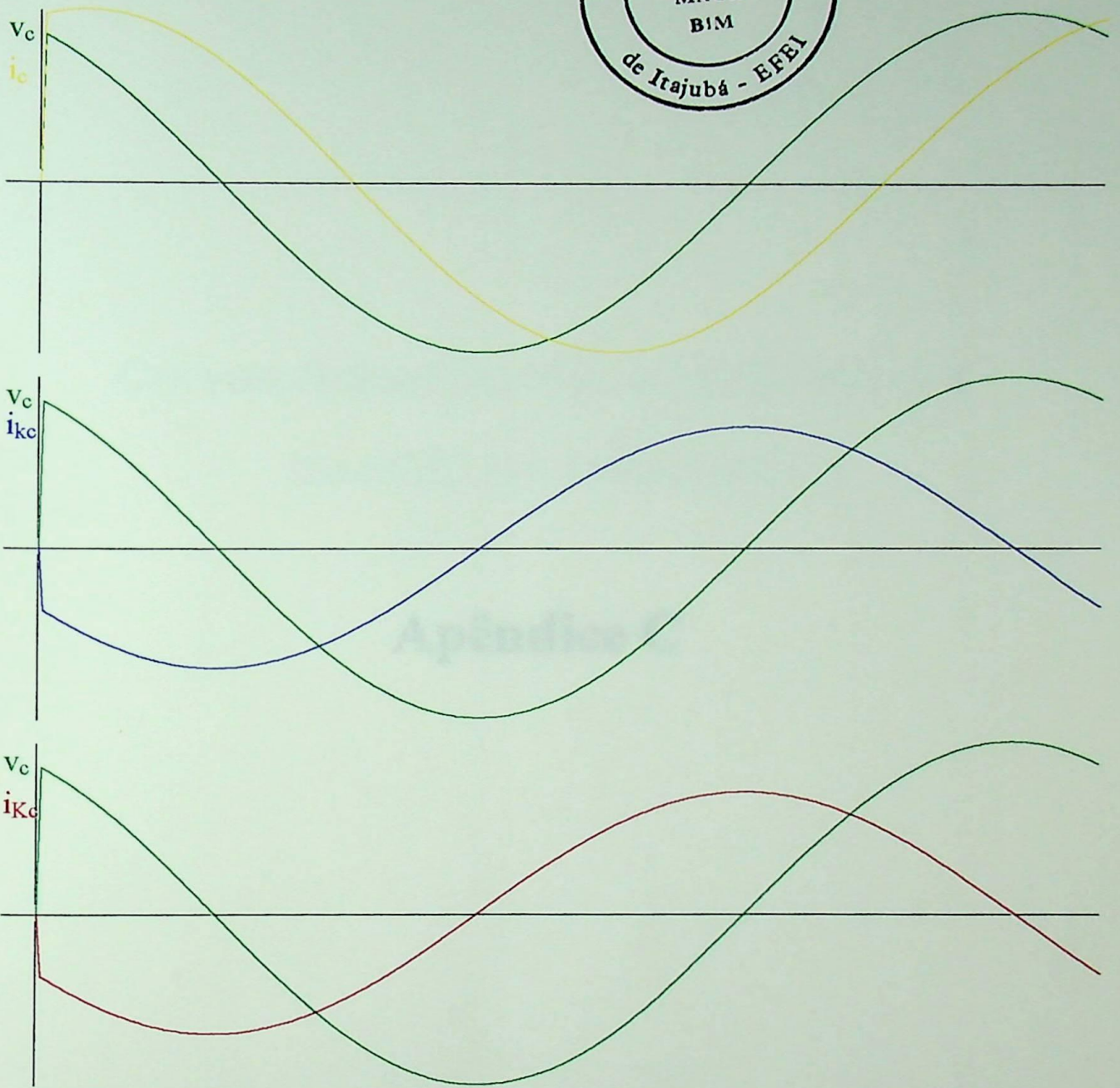
CURVAS das CORRENTES - INSTANTÂNEA de COMP. de TENTI e AKAGI na FASE A

Apêndice B
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.2



CURVAS das CORRENTES - INSTANTÂNEA de COMP. de TENTI e AKAGI na FASE B

Apêndice B
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.2

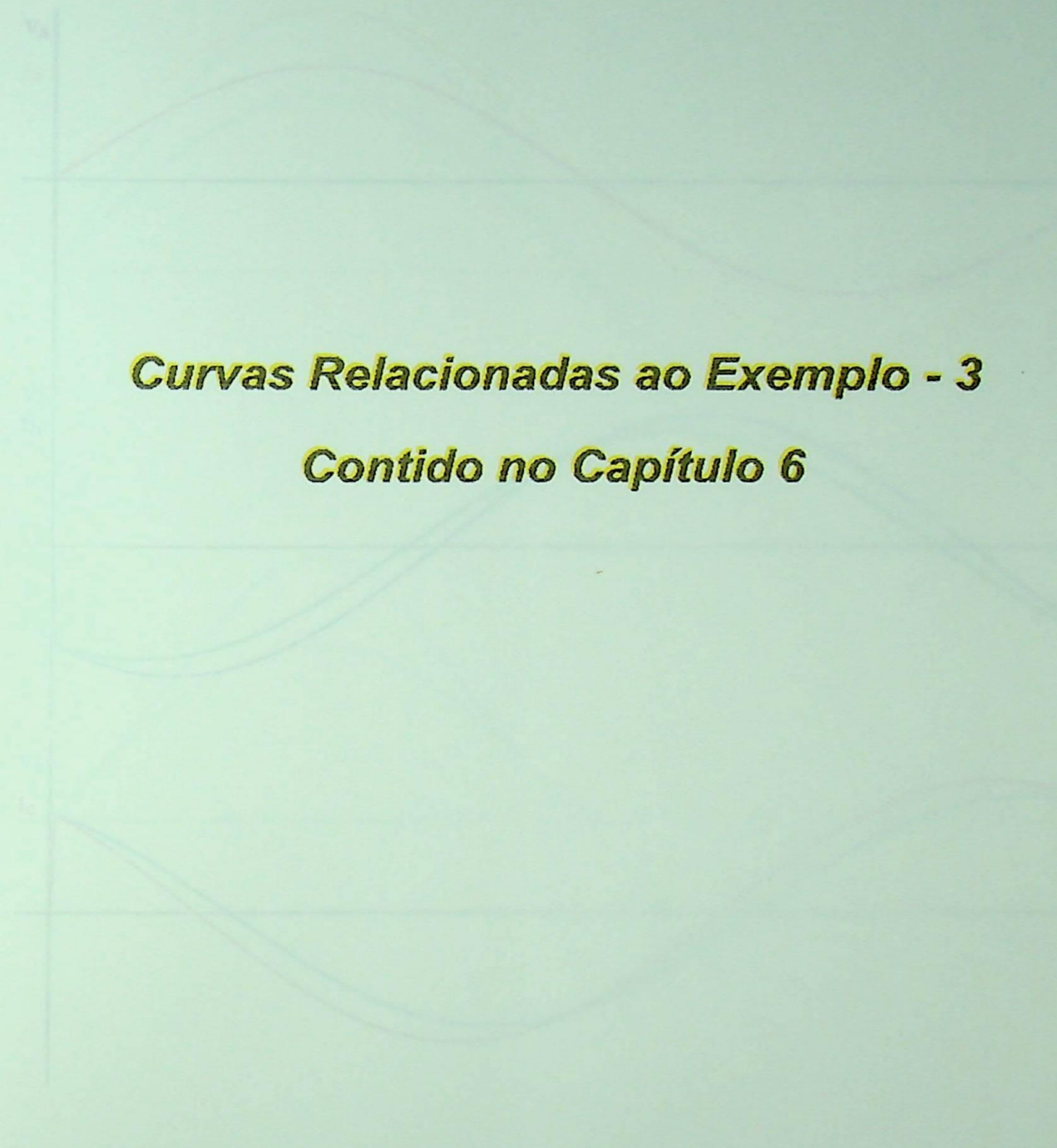


CURVAS das CORRENTES - INSTANTÂNEA de COMP. de TENTI e AKAGI na FASE C

Apêndice B
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.2

*Curvas Relaxantes de Tensão e
Condição de Equilíbrio*

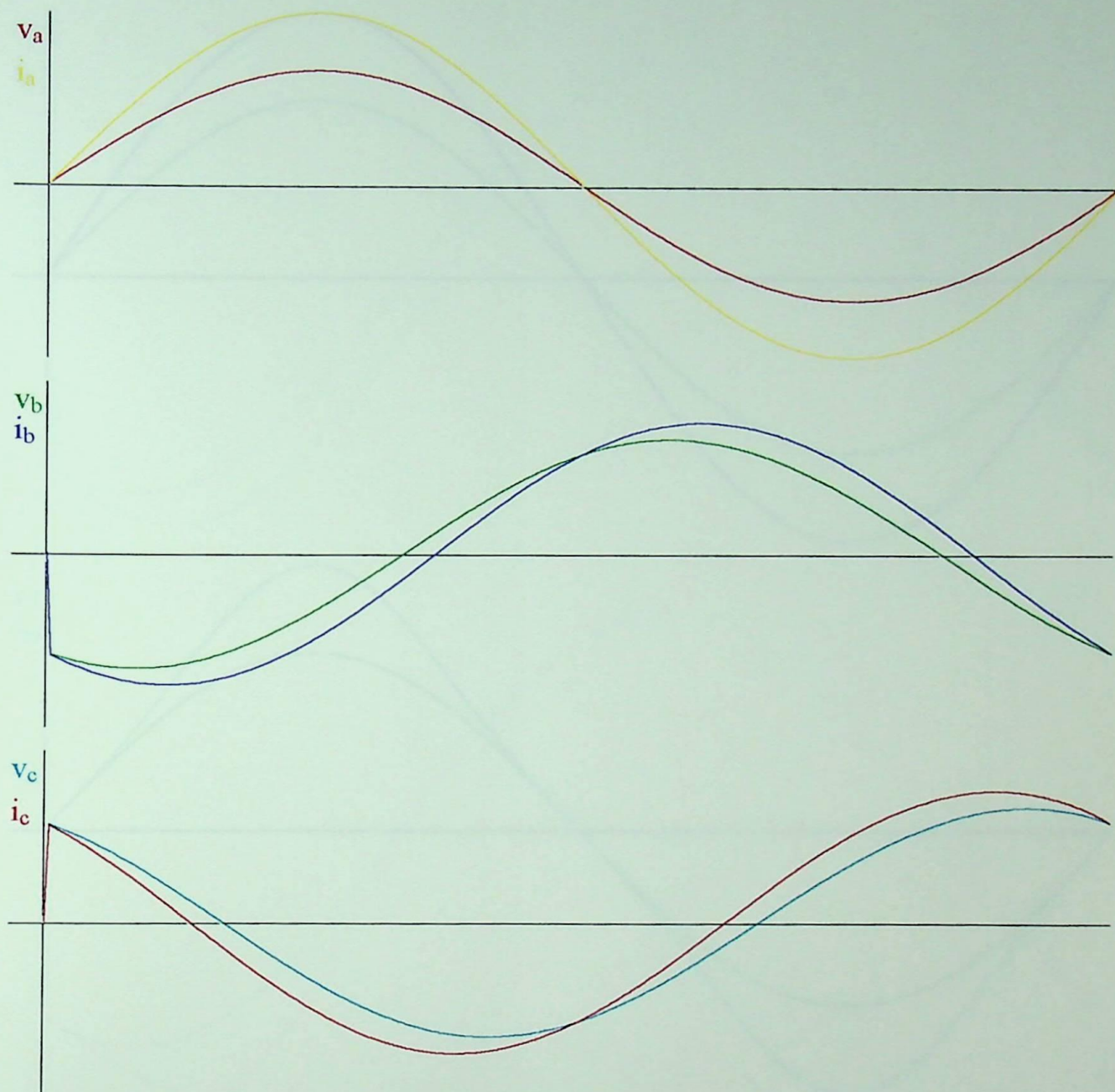
Apêndice C



Curvas Relacionadas ao Exemplo - 3
Contido no Capítulo 6

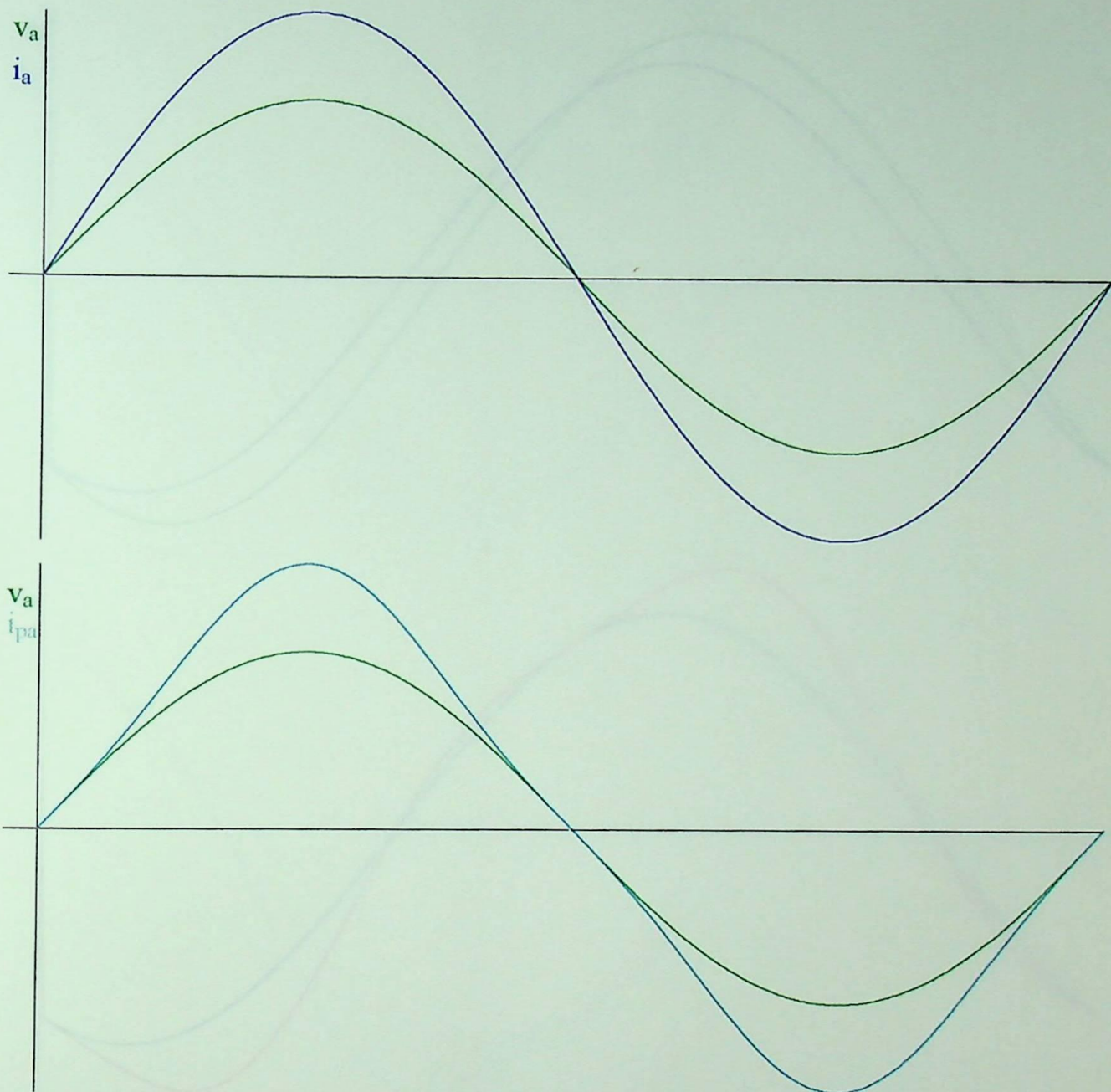
CURVAS DAS TENSÕES E CORRENTES RELACIONADAS COM O EXEMPLO 6.3

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



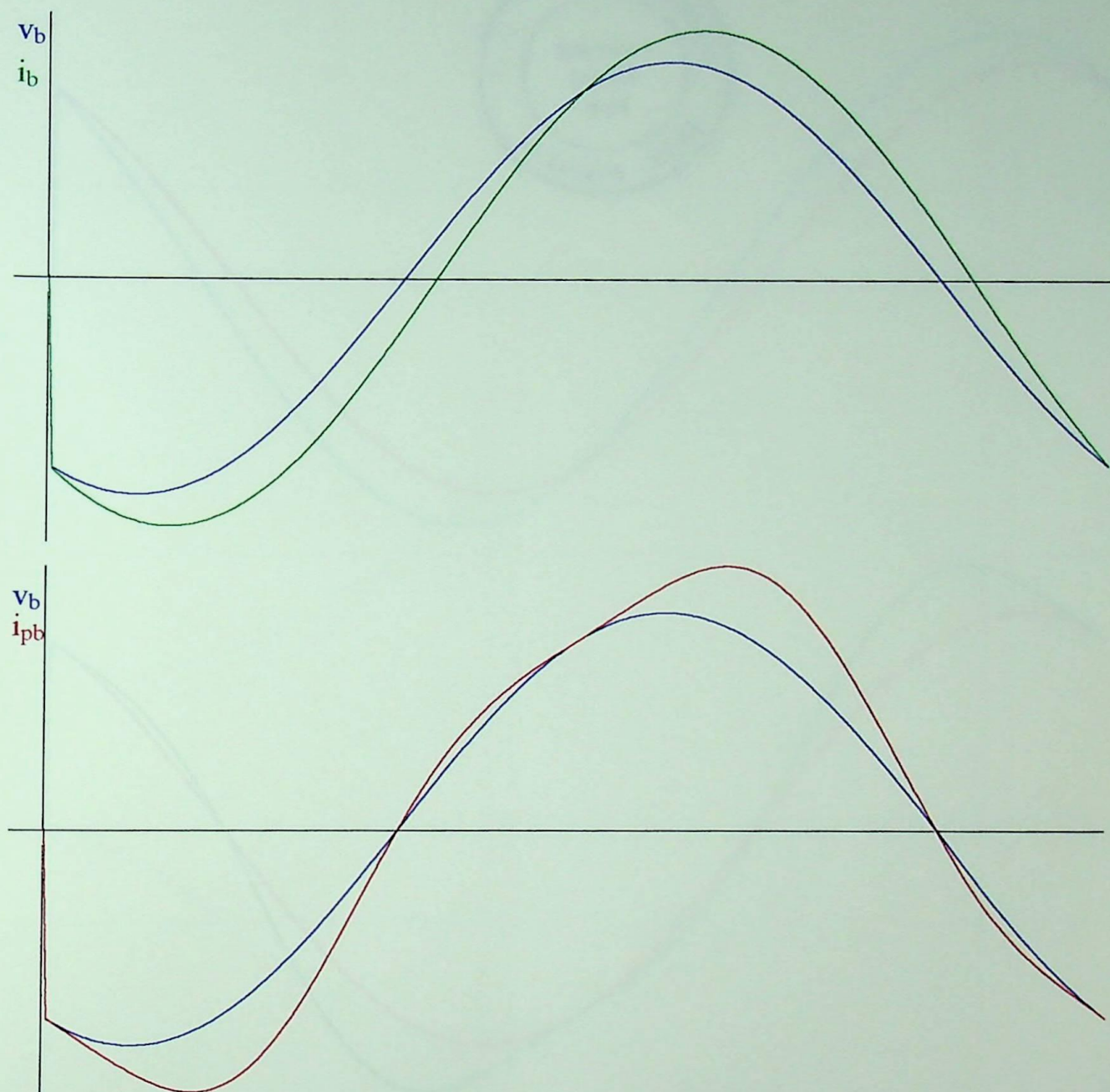
CURVAS DAS TENSÕES E CORRENTES INSTANTÂNEAS NAS FASES ABC

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



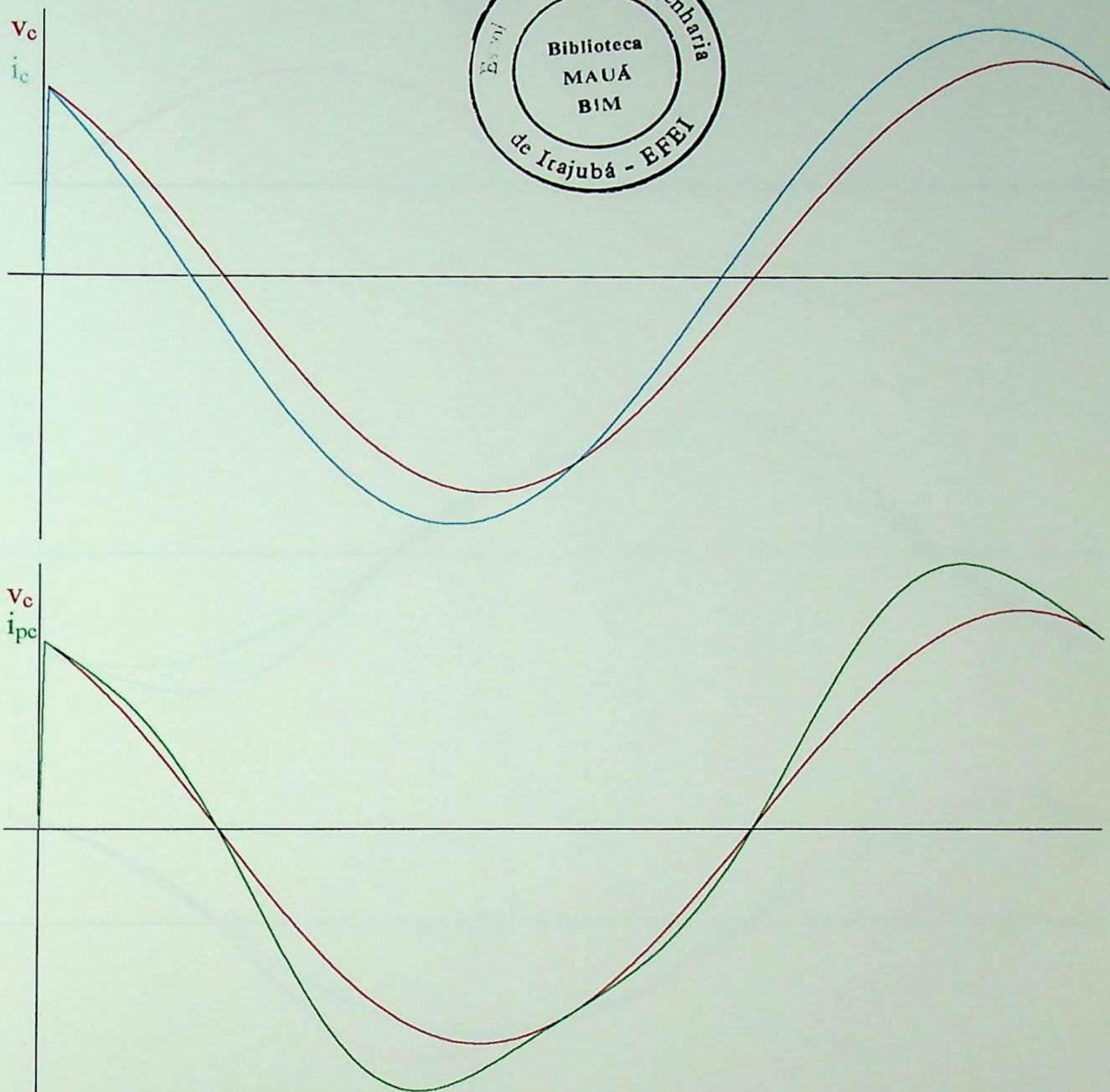
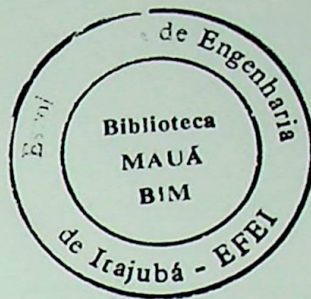
CURVAS da CORRENTE de FRYZE e INSTANTÂNEA na FASE A

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



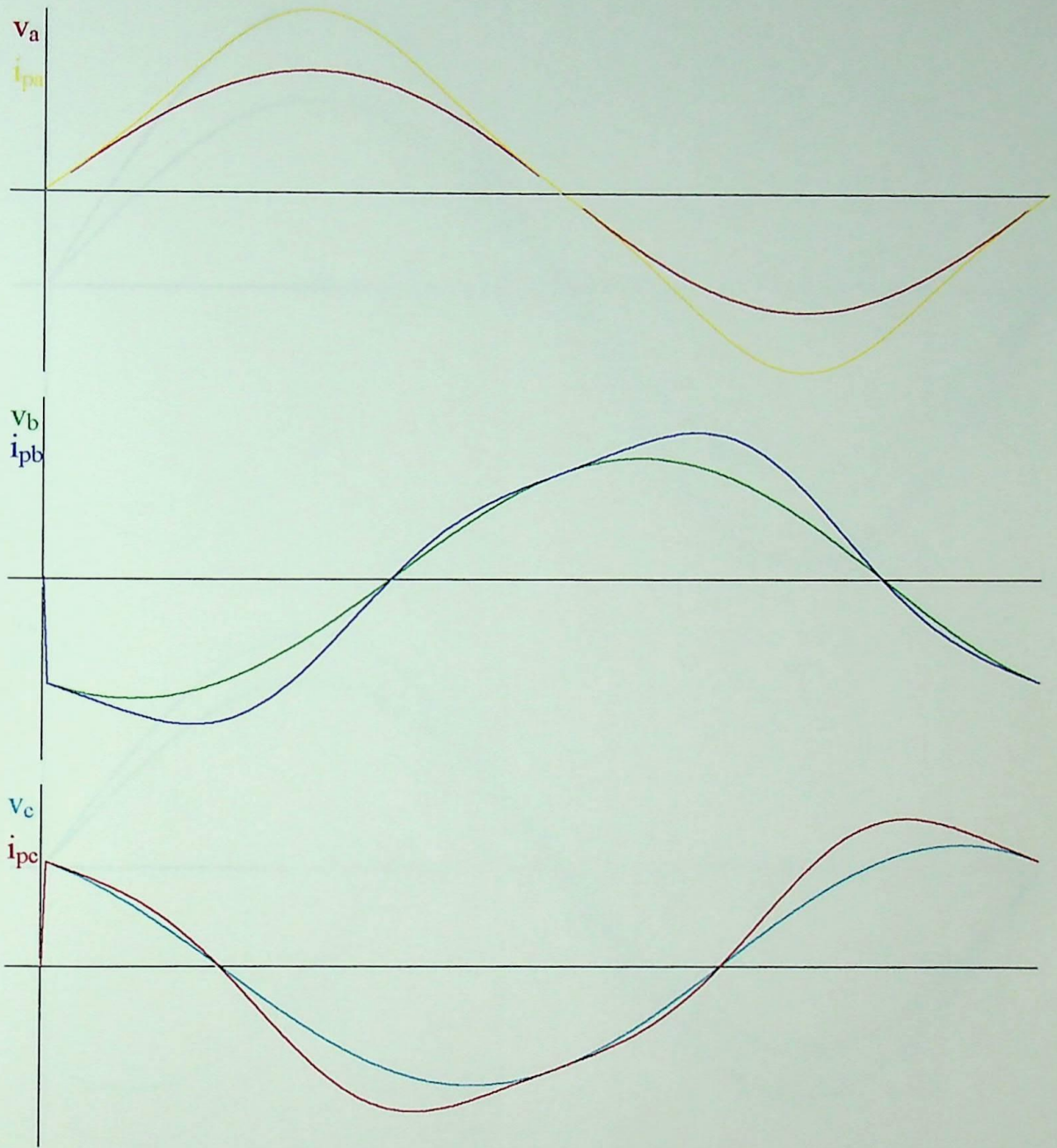
CURVAS da CORRENTE de FRYZE e INSTANTÂNEA na FASE B

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



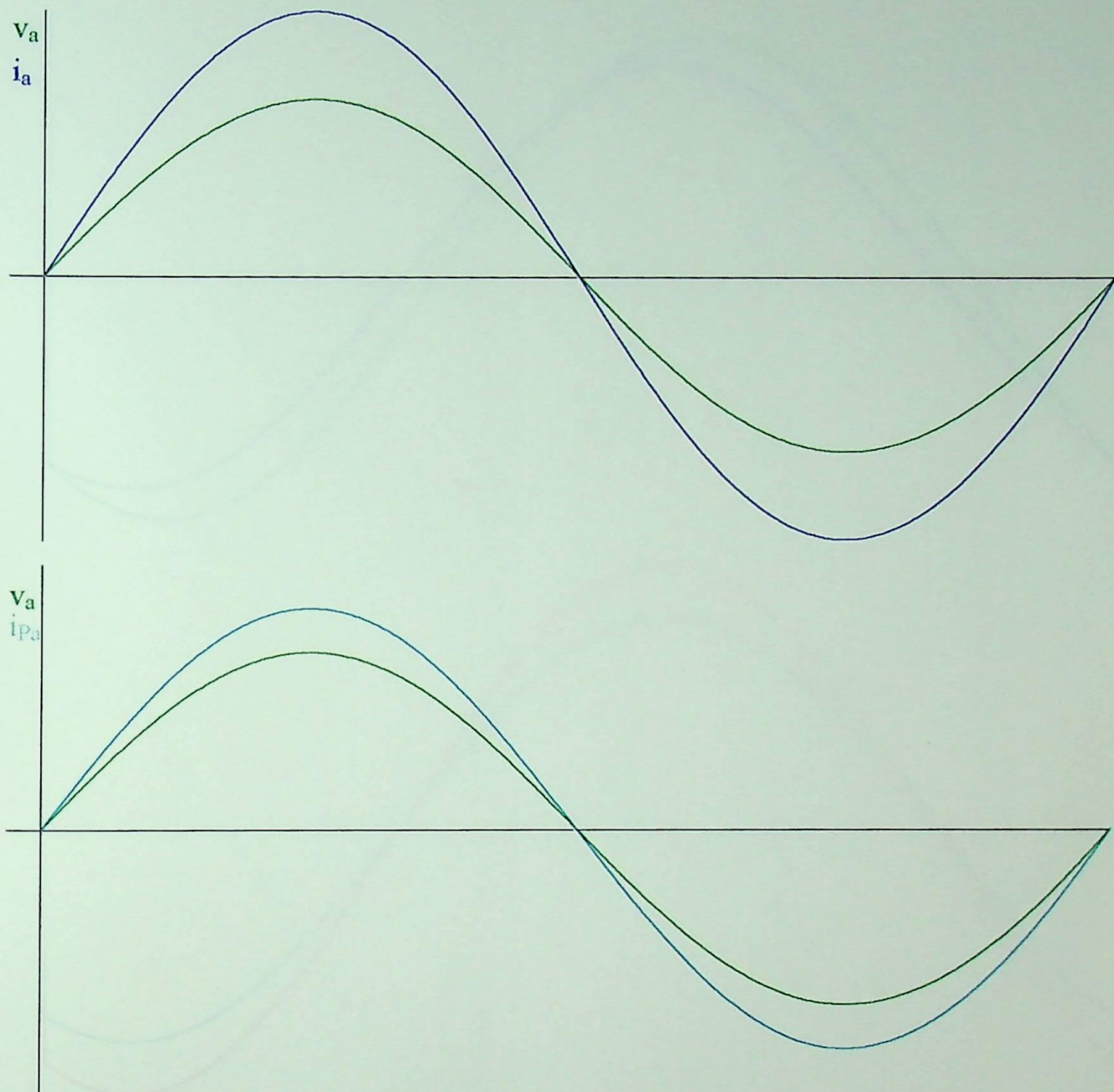
CURVAS da CORRENTE de FRYZE e INSTANTÂNEA na FASE C

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



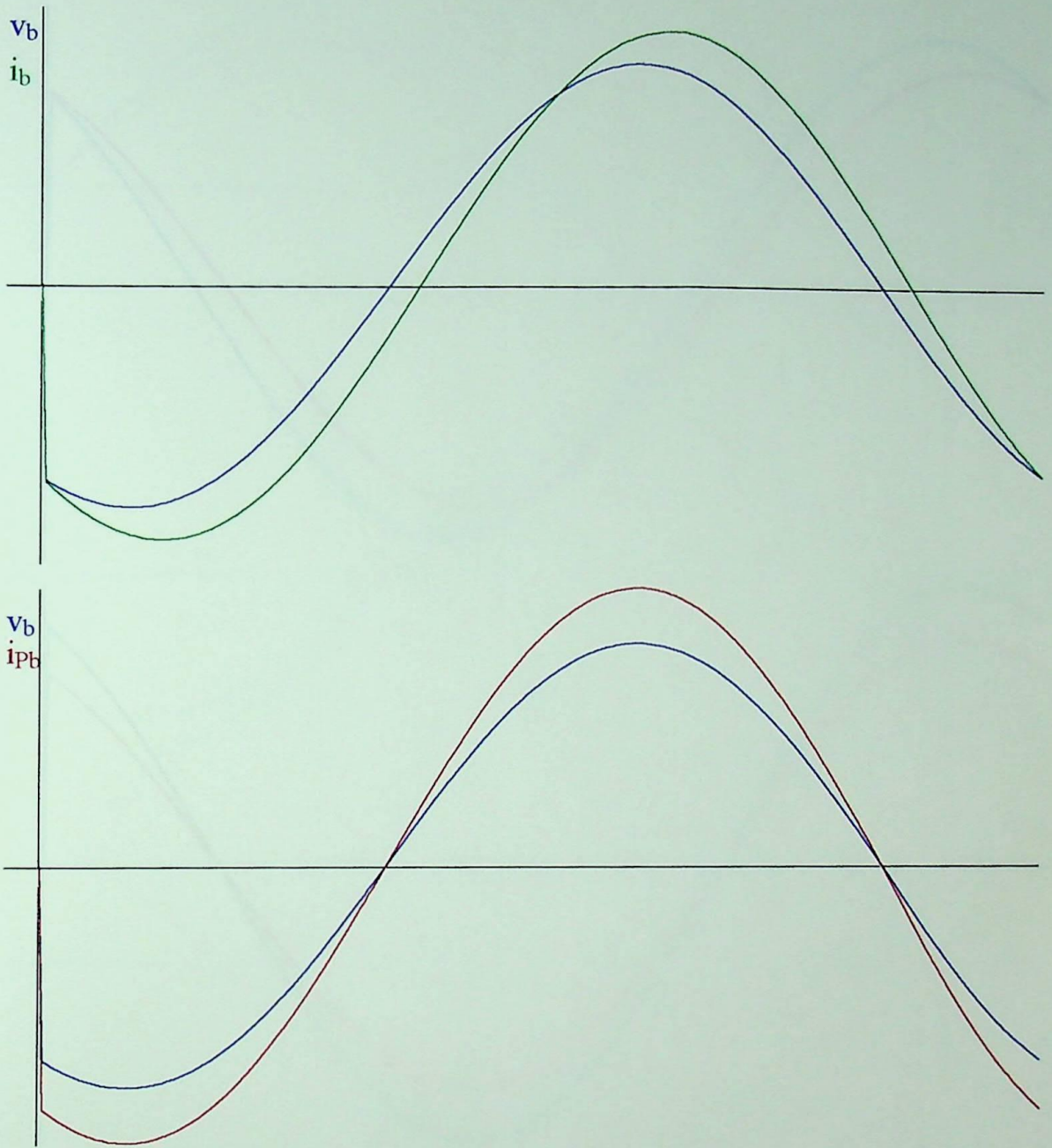
CURVAS das TENSÕES e CORRENTES de FRYZE nas FASES ABC

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



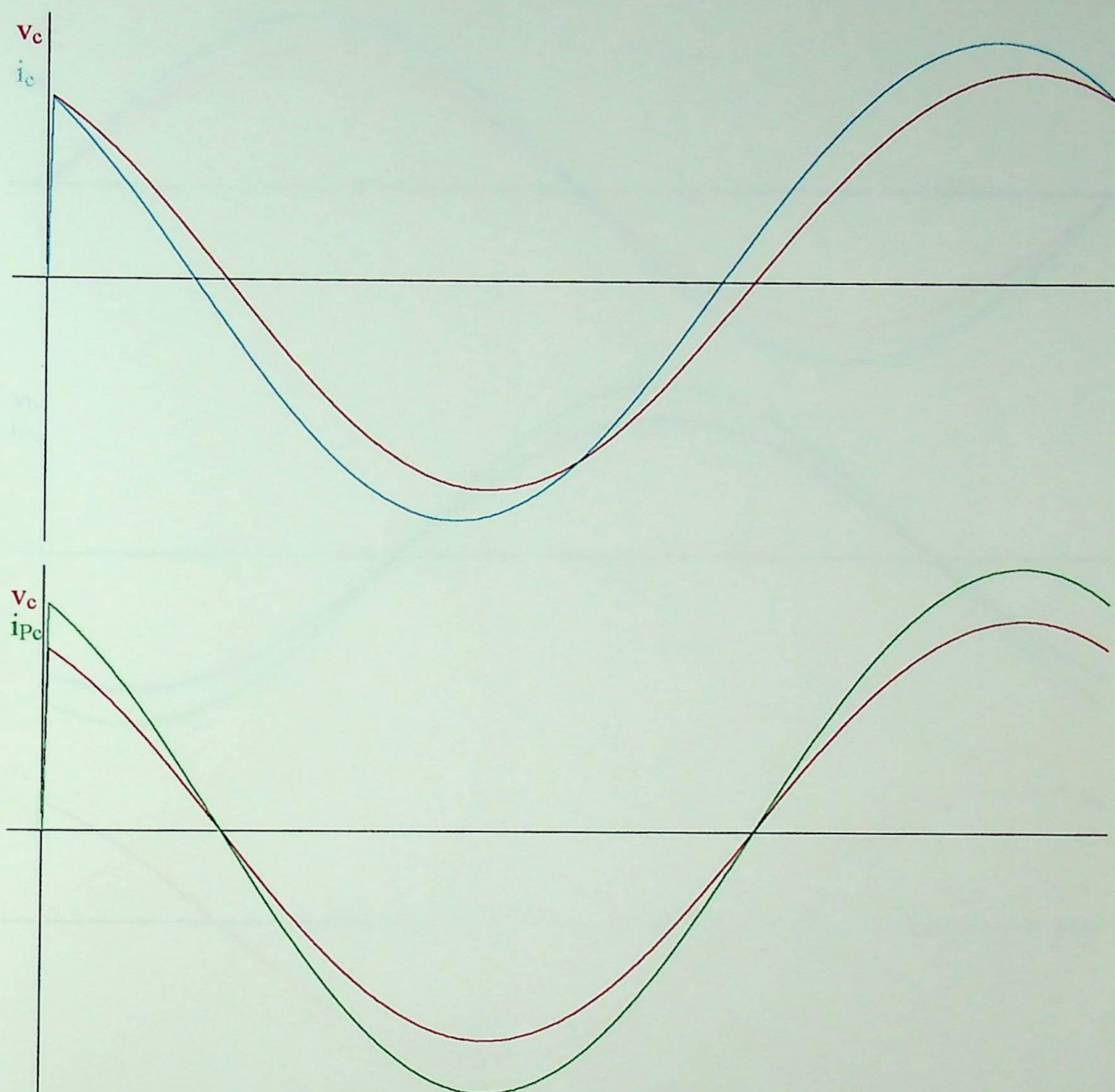
CURVAS da CORRENTE de TENTI e INSTANTÂNEA na FASE A

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



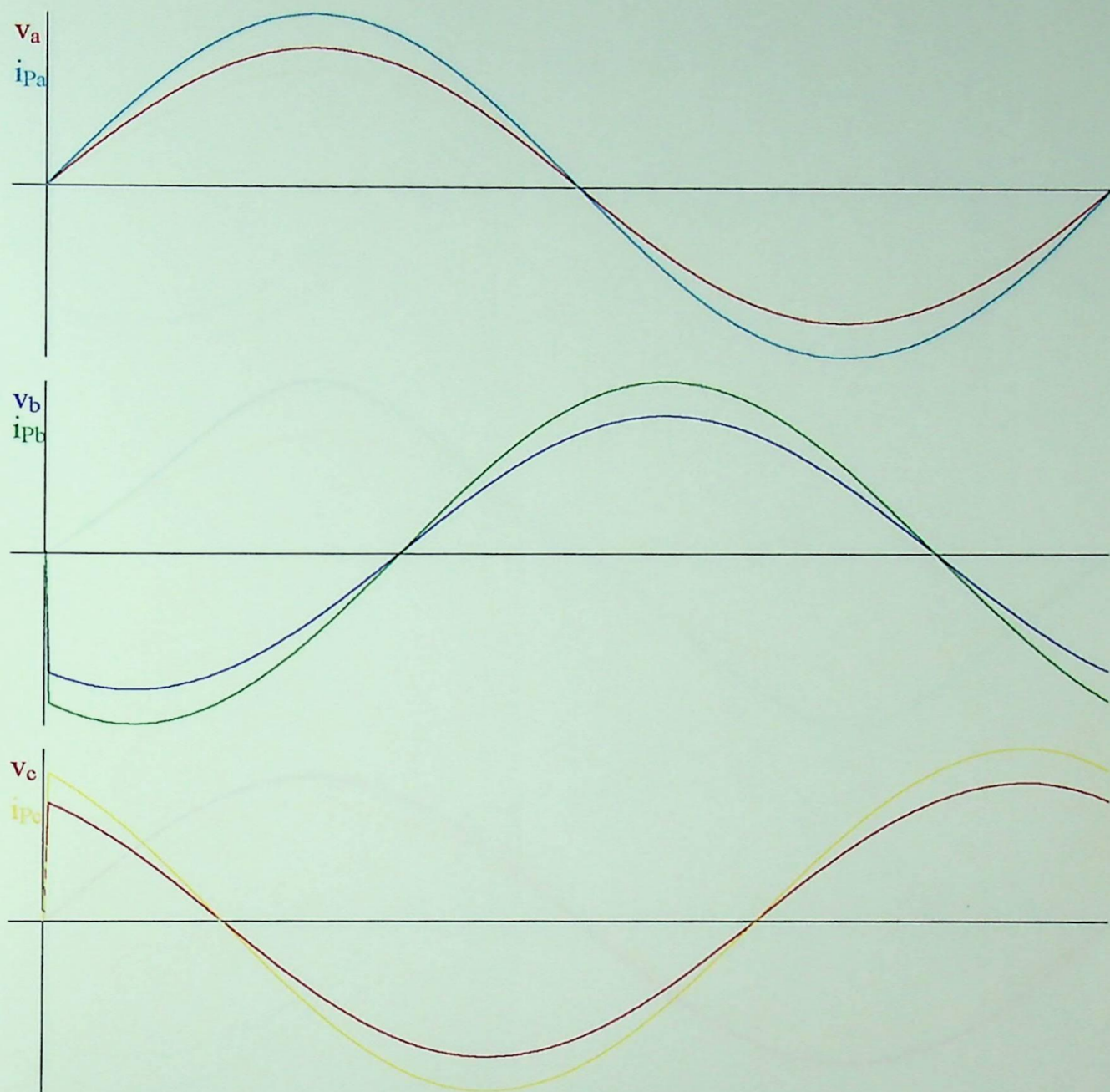
CURVAS da CORRENTE de TENTI e INSTANTÂNEA na FASE B

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



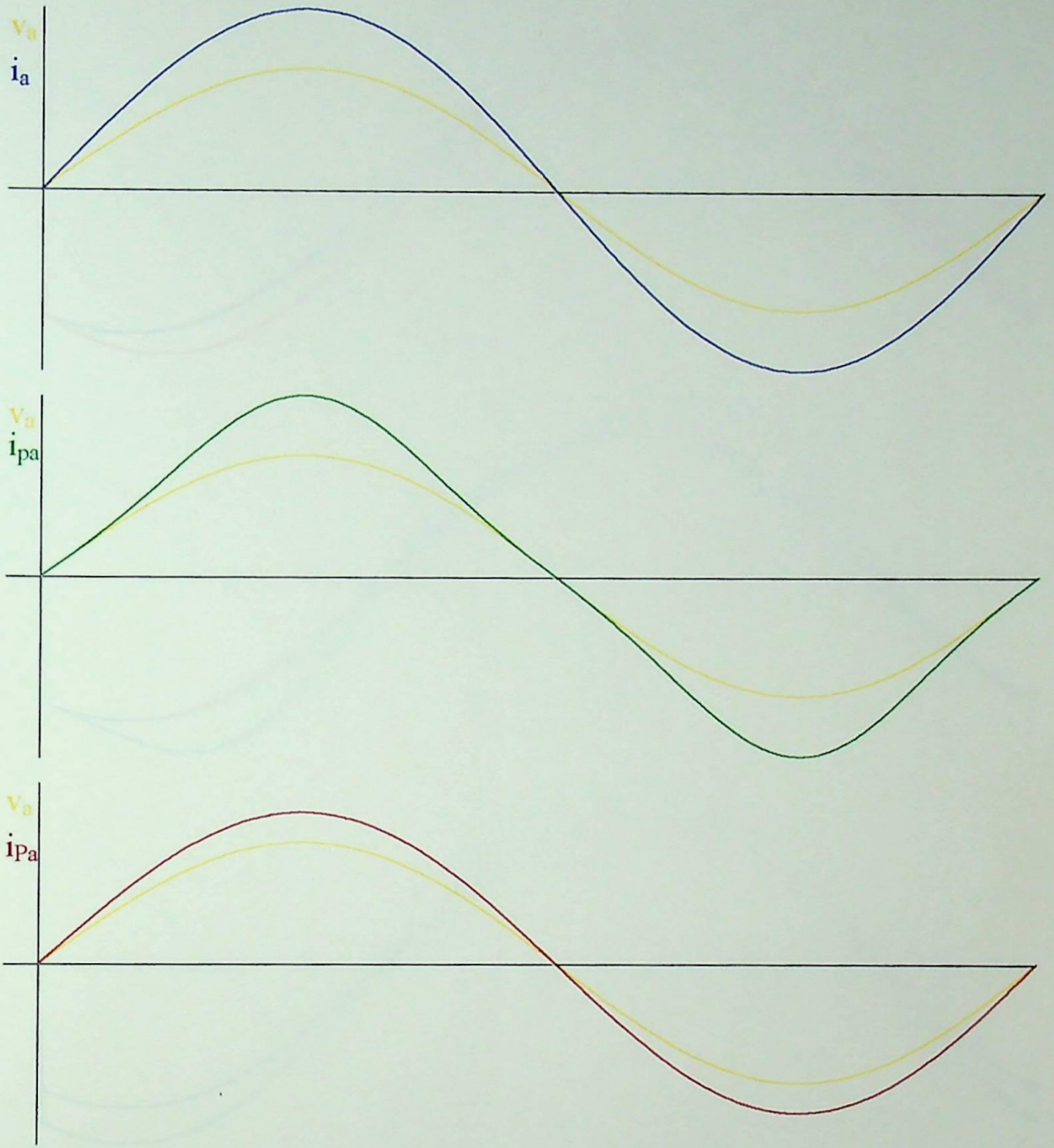
CURVAS da CORRENTE de TENTI e INSTANTÂNEA na FASE C

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



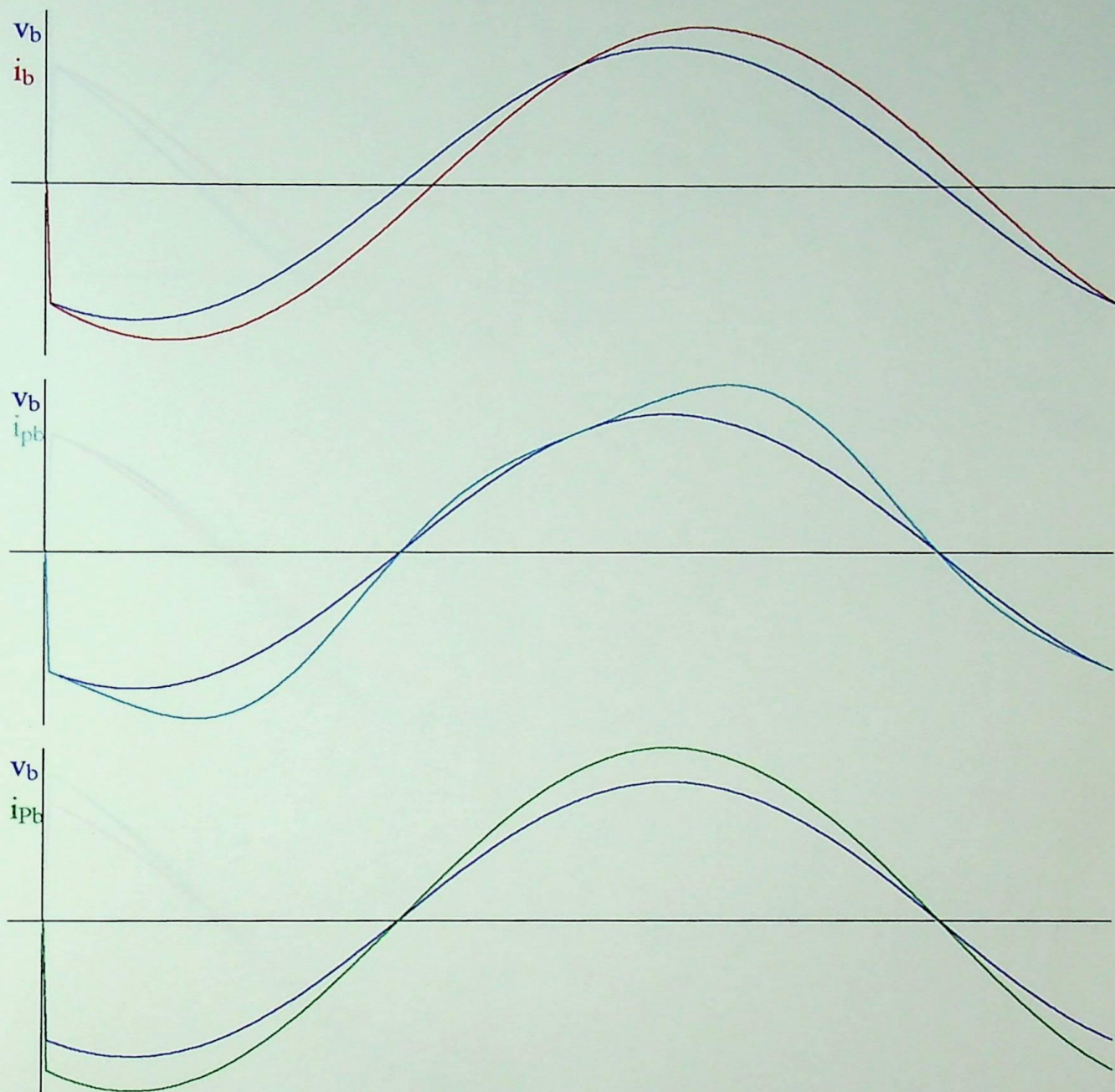
CURVAS das TENSÕES e CORRENTES de TENTI nas FASES ABC

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



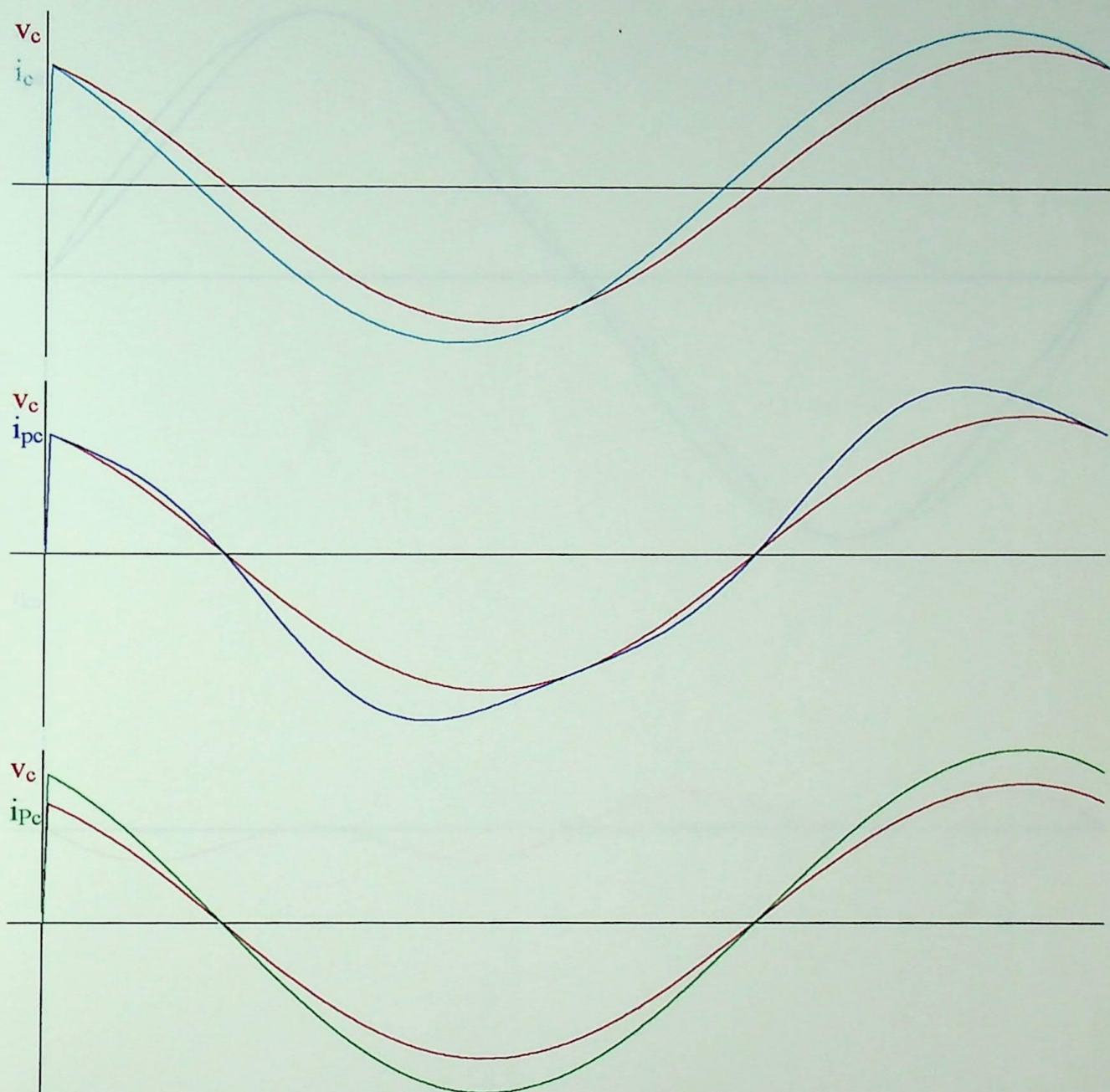
CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE A

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



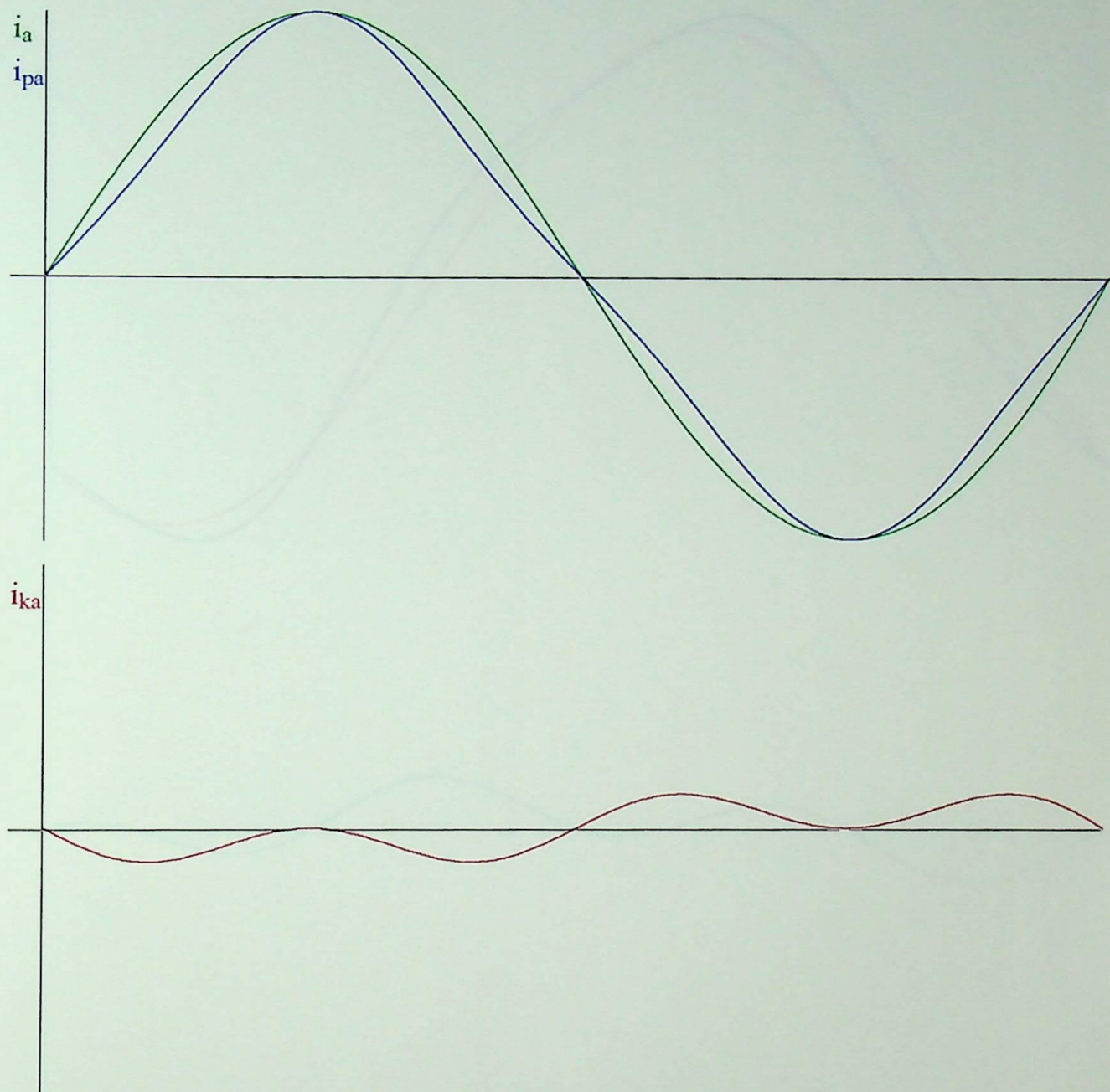
CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE B

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



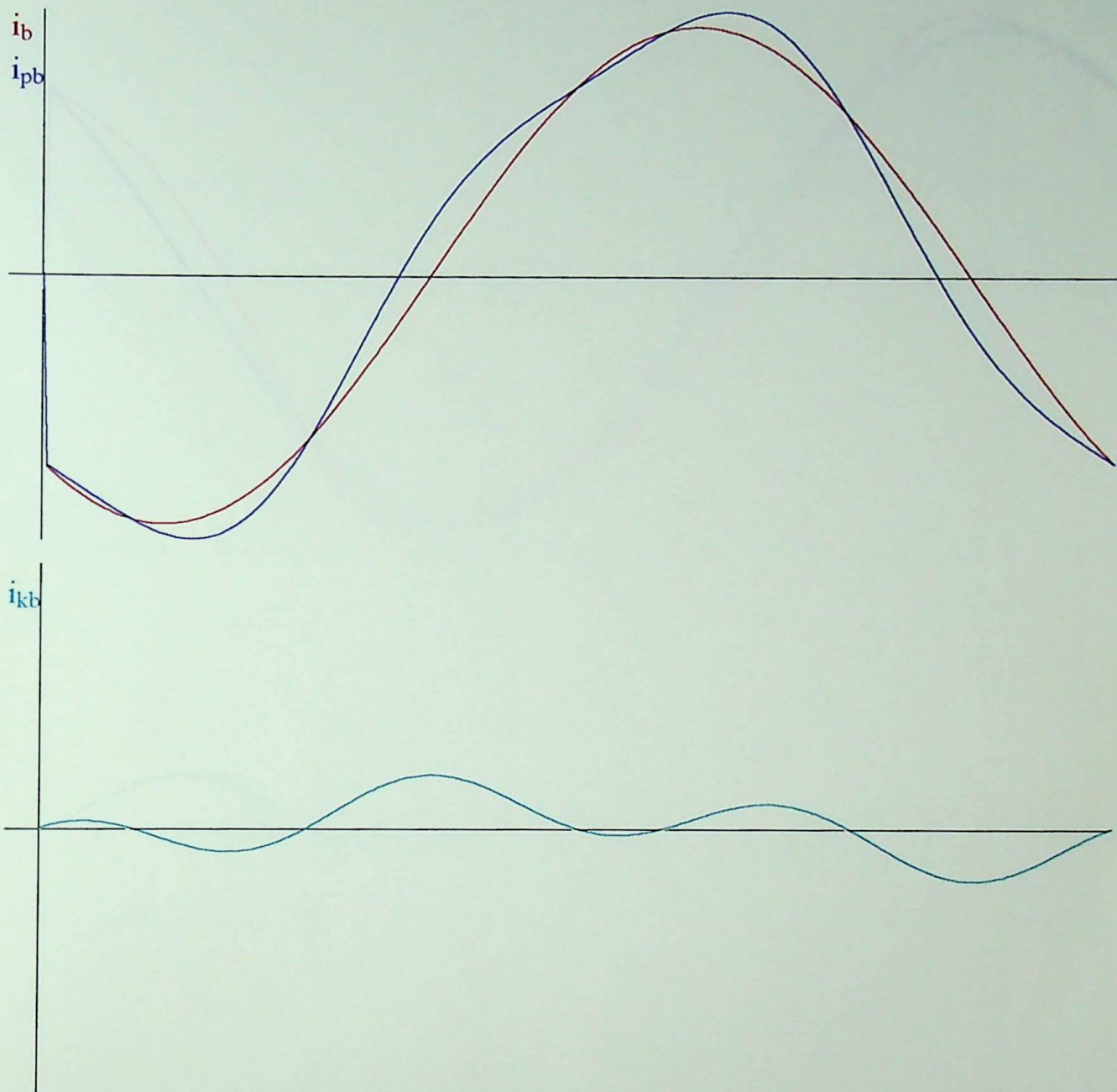
CURVAS das CORRENTES INSTANTÂNEA de FRYZE e de TENTI na FASE C

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



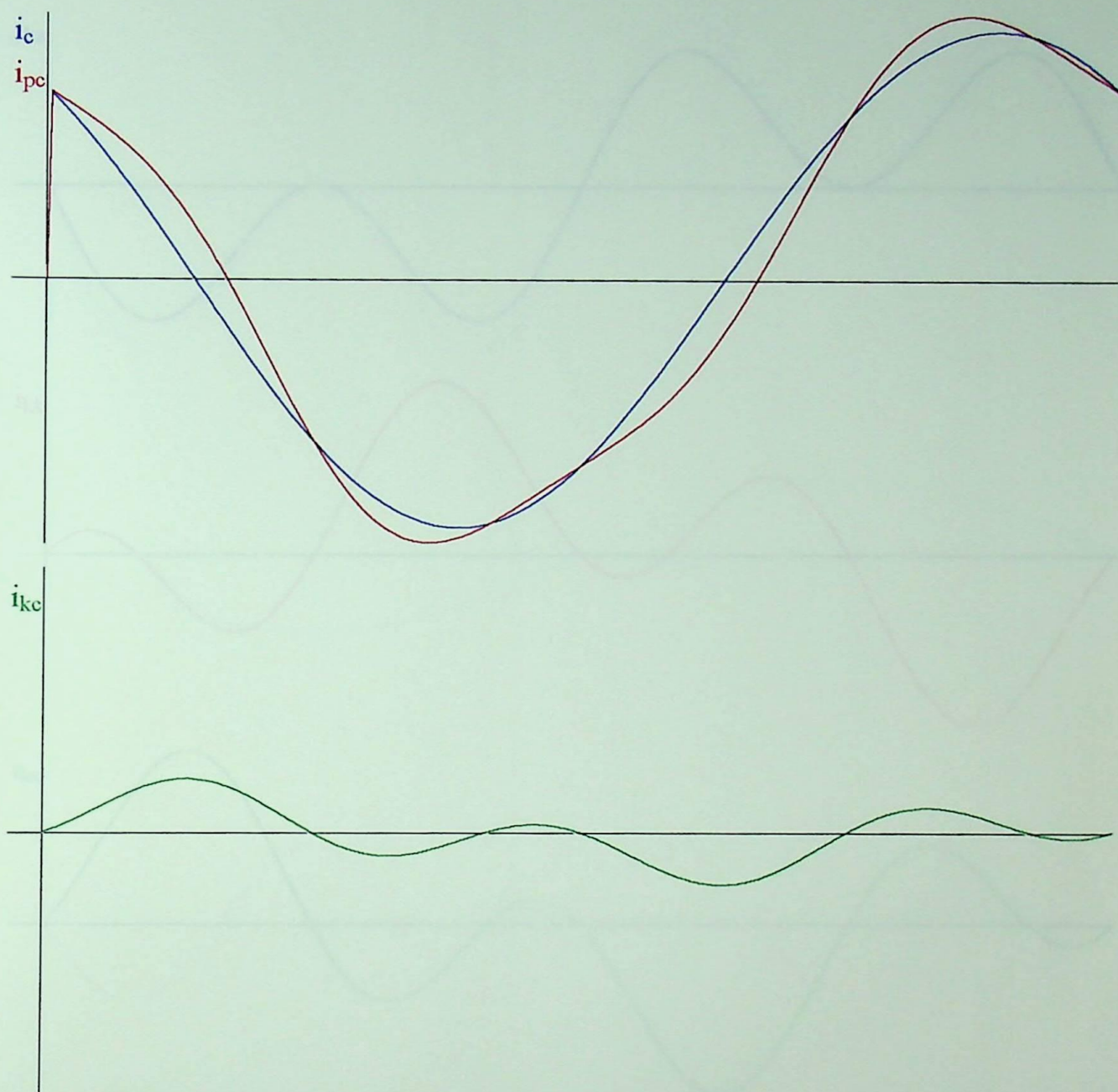
CORRENTES INSTANTÂNEA - de FRYZE - COMPENSAÇÃO de AKAGI na FASE A

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



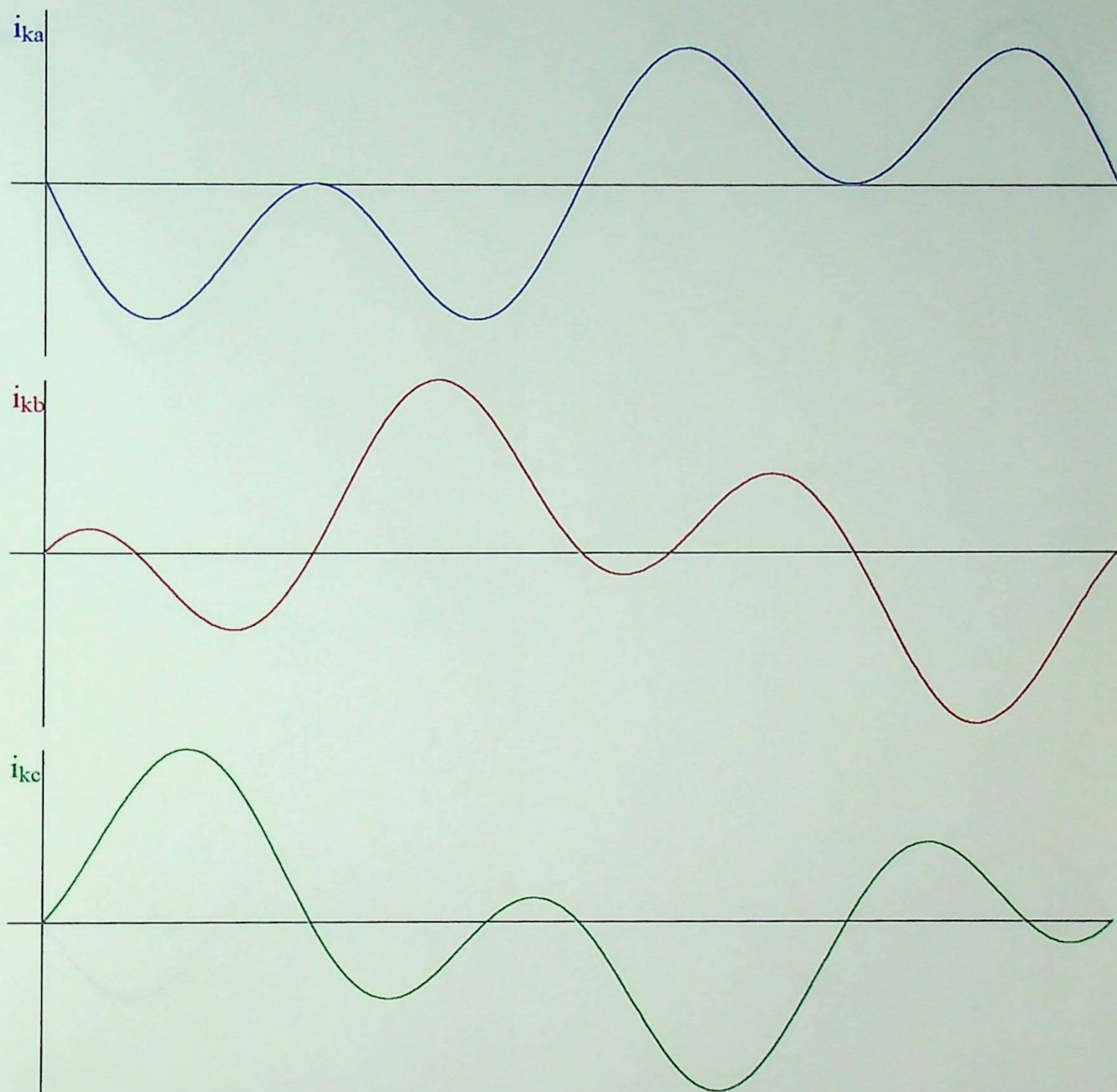
CORRENTES INSTANTÂNEA - de FRYZE - COMPENSAÇÃO de AKAGI na FASE B

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



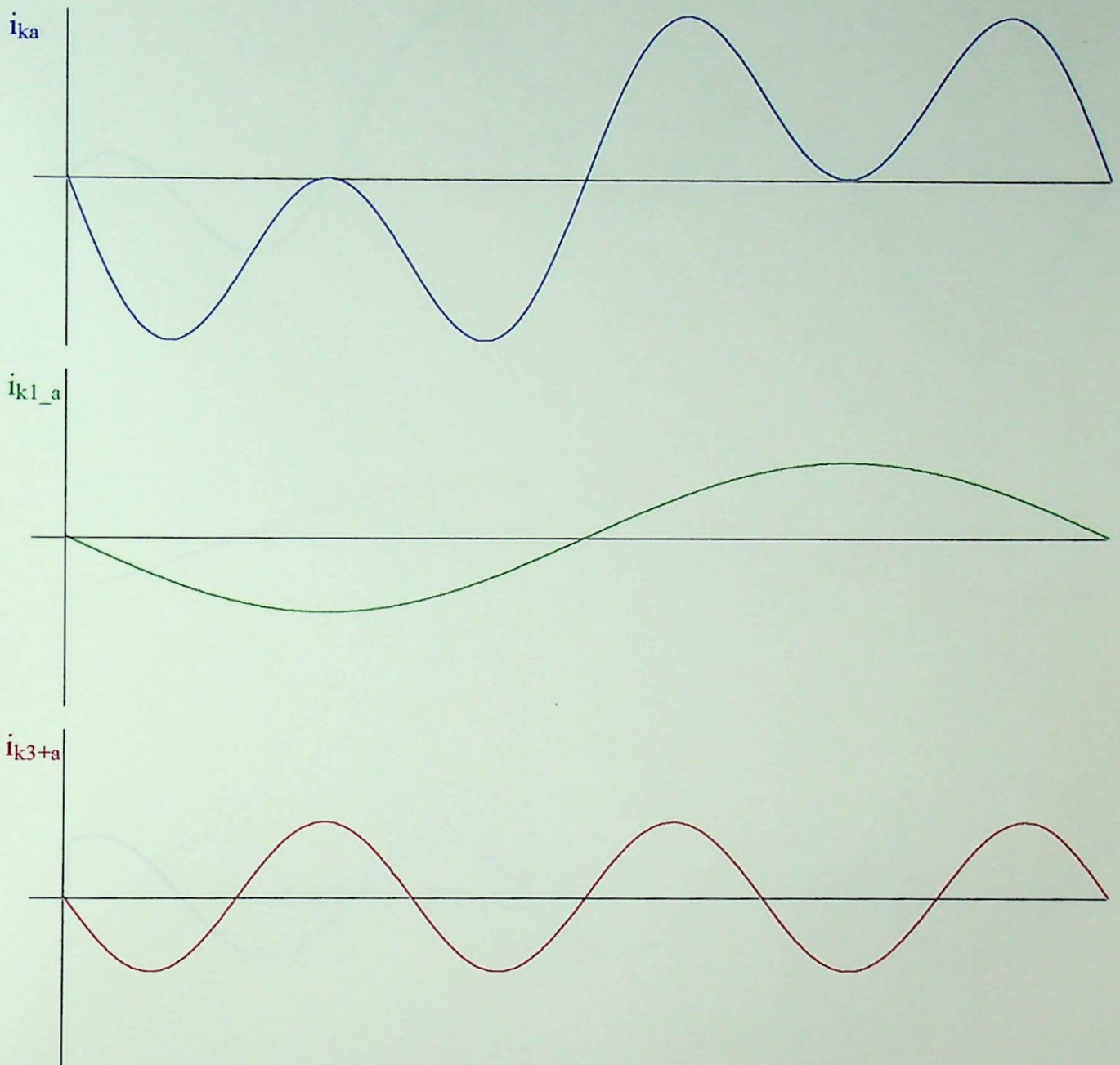
CORRENTES INSTANTÂNEA - de FRYZE - COMPENSAÇÃO de AKAGI na FASE C

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



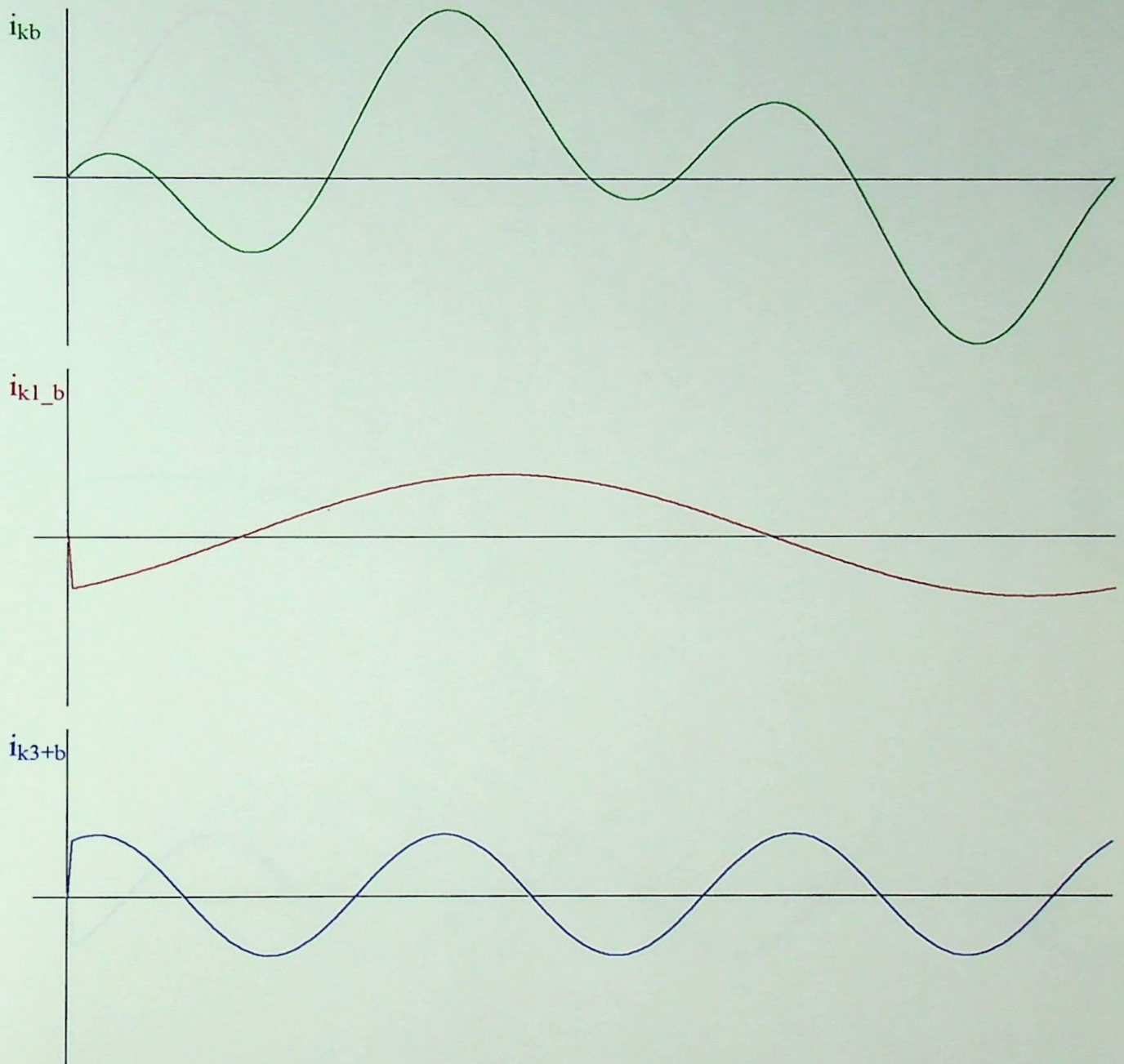
CURVA das CORRENTES do COMPENSADOR de AKAGI nas FASES A B C

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



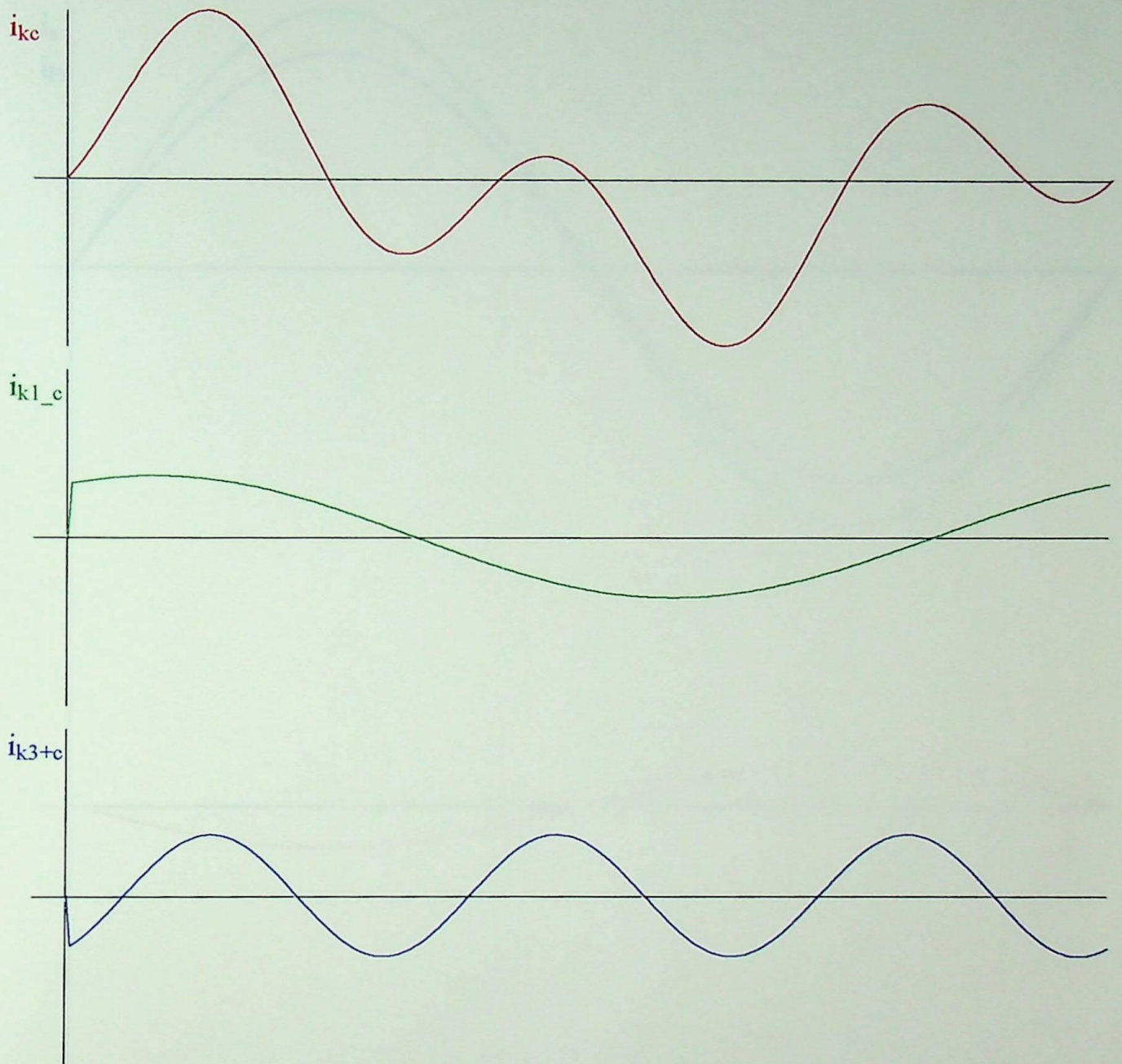
CORRENTE de COMPENS. de AKAGI e COMPONENTES HARMÔNICAS de SEQ. FASE A

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



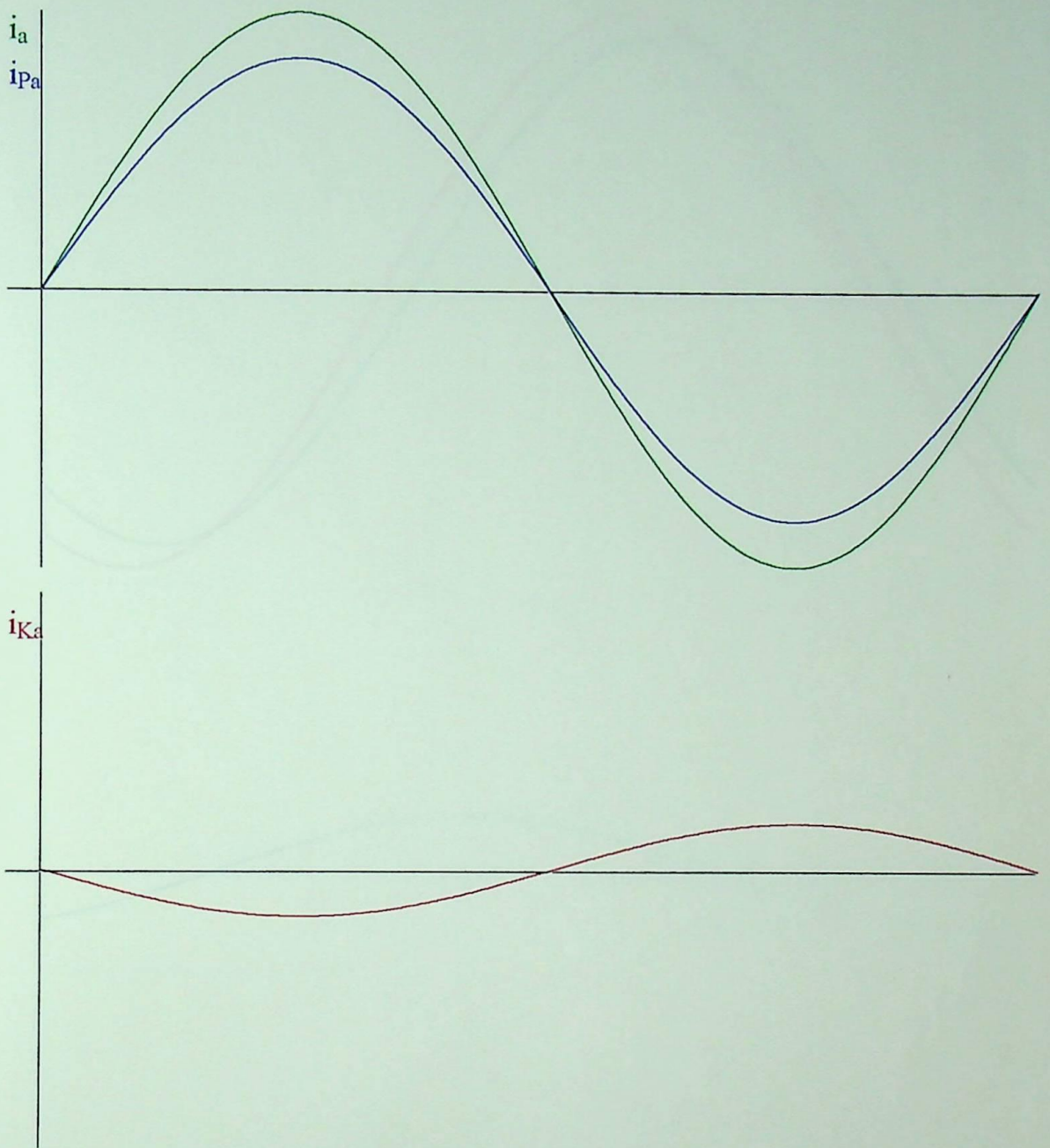
CORRENTE de COMPENS. de AKAGI e COMPONENTES HARMÔNICAS de SEQ. FASE B

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



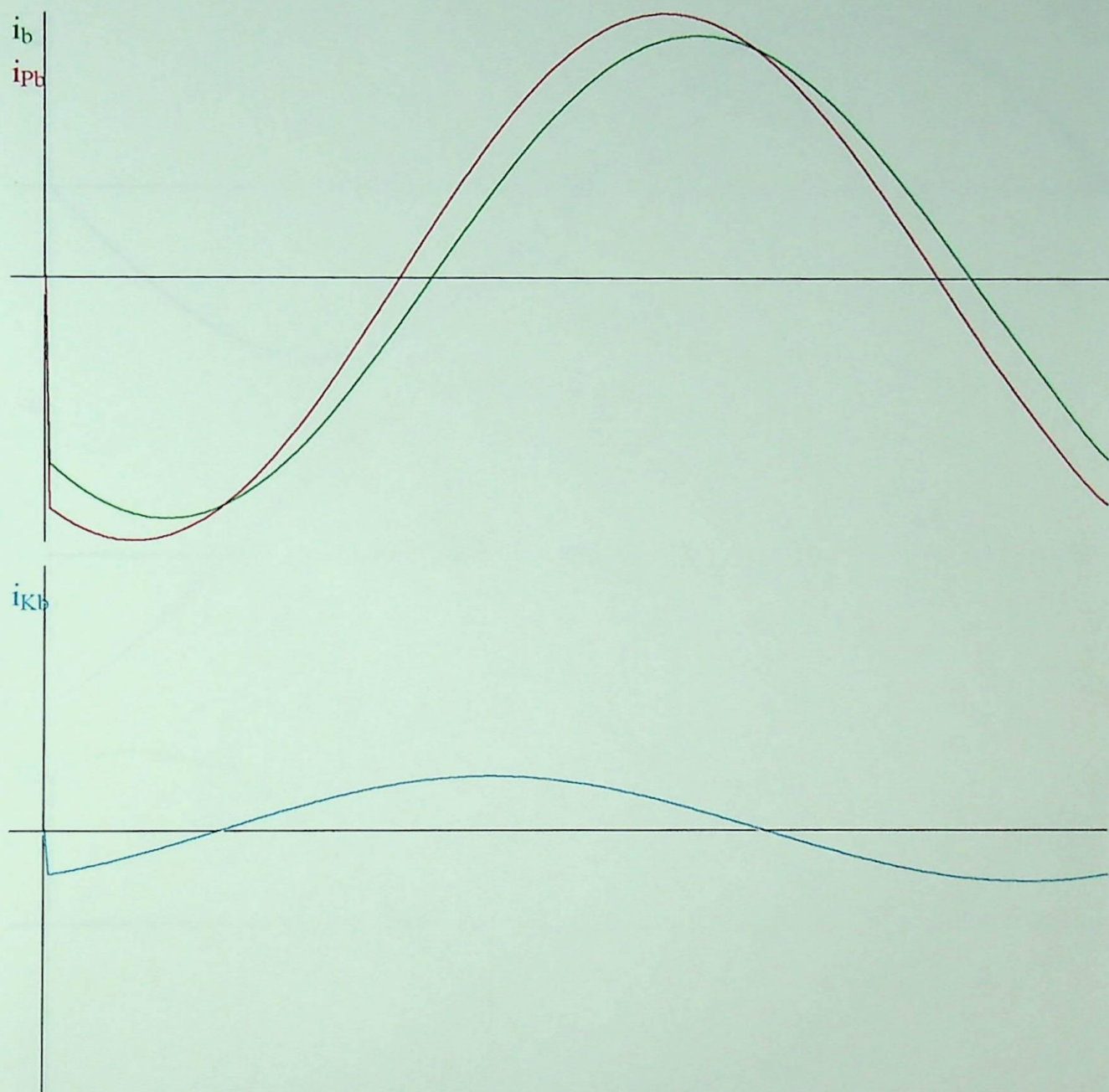
CORRENTE de COMPENS. de AKAGI e COMPONENTES HARMÔNICAS de SEQ. FASE C

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



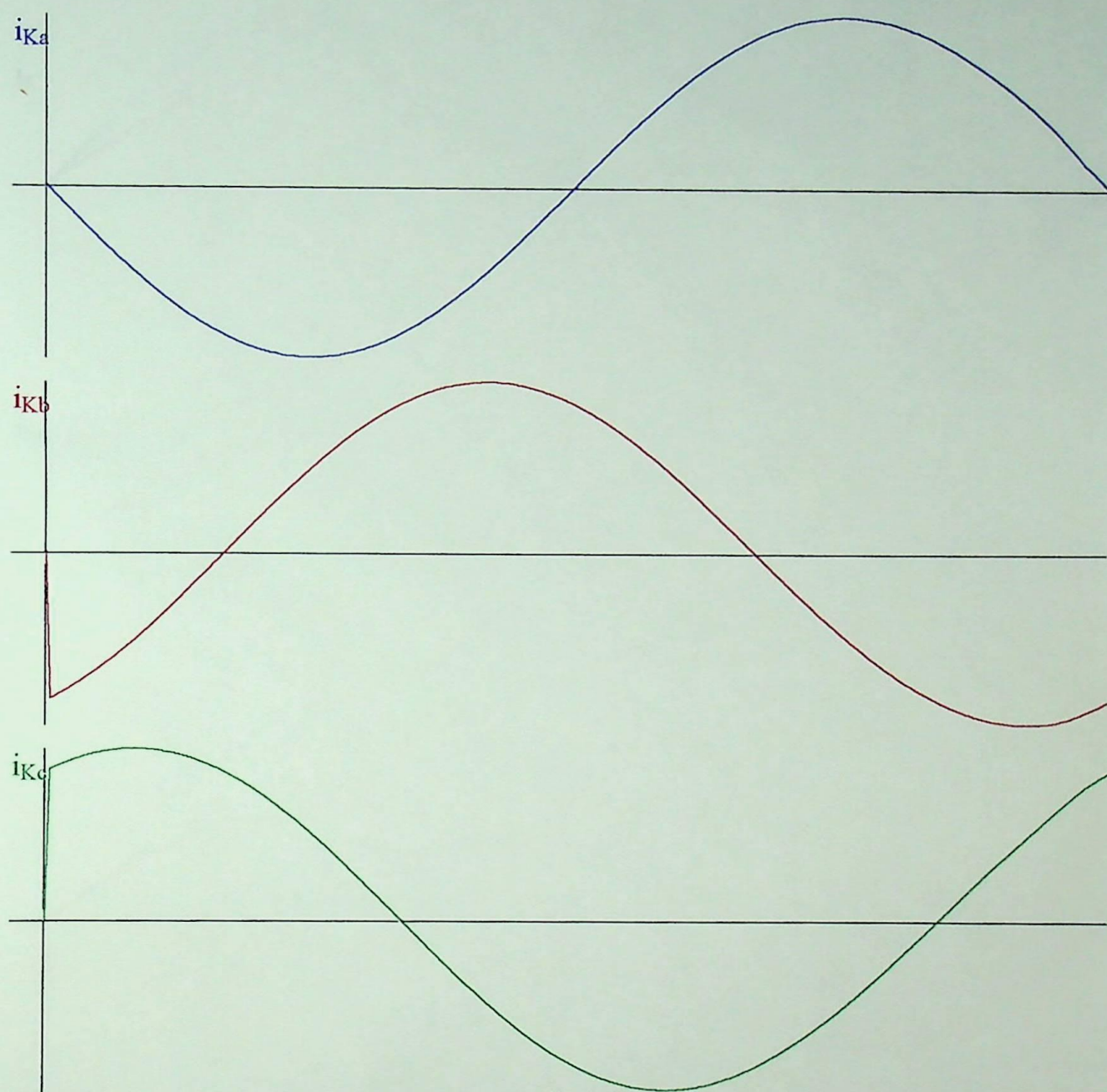
CORRENTES INSTANTÂNEA - de TENTI - COMPENSAÇÃO de TENTI na FASE A

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



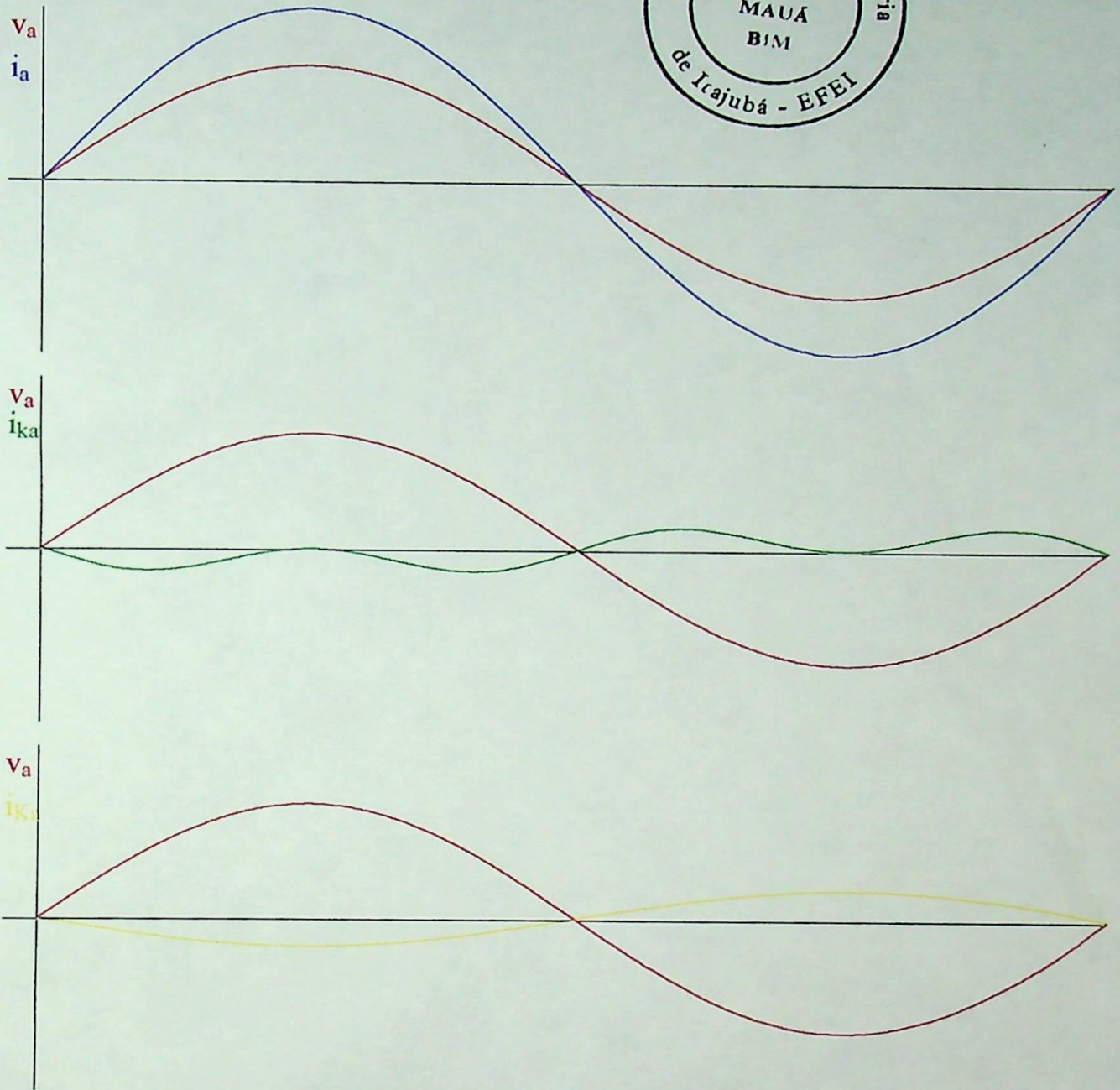
CORRENTES INSTANTÂNEA - de TENTI - e COMPENSAÇÃO de TENTI na FASE B

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



CURVA das CORRENTES do COMPENSADOR de TENTI nas FASES A B C

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3



CURVAS das CORRENTES - INSTANTÂNEA de COMP. de TENTI e AKAGI na FASE A

Apêndice C
Curvas Representativas
para o Exemplo 6.3

