

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA



**Uma Proposta para a Compensação
Dinâmica de Cargas Desequilibradas**

Lucas Tiago de Oliveira

Uberlândia

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

Uma Proposta para a Compensação Dinâmica de Cargas Desequilibradas

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

BANCA EXAMINADORA:

José Carlos de Oliveira, Ph.D. - **UFU (Orientador)**

Ivan Nunes Santos, Dr. - **UFU**

Anésio de Leles Ferreira Filho, Dr. - **UNB**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

O48p
2018 Oliveira, Lucas Tiago de, 1993-
 Uma proposta para a compensação dinâmica de cargas
 desequilibradas / Lucas Tiago de Oliveira. - 2018.
 77 f. : il.

Orientador: José Carlos de Oliveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1169>
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Sistemas de energia elétrica -
Controle de qualidade - Teses. 3. Sistemas de energia elétrica -
Estabilidade - Teses. I. Oliveira, José Carlos de, 1947- II. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3

Uma Proposta para a Compensação Dinâmica de Cargas Desequilibradas

Lucas Tiago de Oliveira

Dissertação apresentada por Lucas Tiago de Oliveira à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos parciais para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. José Carlos de Oliveira, PhD

(Orientador) – UFU

Prof. José Rubens Macedo Jr, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica - UFU

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, pela força, amor e a paz que só ele pode me conceder. Dedico também a minha família em especial meus pais, João Lucas e Valda, pelos valores, amor e dedicação que foram e sempre serão importantes na minha vida.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de expressar minha gratidão a Deus pela sua misericórdia com a minha vida, e assim, me proporcionar saúde e todos os demais meios para que eu vencesse mais essa jornada.

Também, desejo meus agradecimentos a toda a minha família que me apoiou em todos os momentos e compreendeu as dificuldades que essa caminhada teria, em especial meus pais, João Lucas e Valda, e minha irmã, Samara.

Sou de forma especial grato pela oportunidade que tive de trabalhar com o Professor PhD. José Carlos de Oliveira, que utilizou de sua expertise para me auxiliar na condição de orientador desse trabalho, onde sua participação foi crucial para a conclusão dessa dissertação.

Quero também lembrar dos colegas de profissão que estiveram comigo durante o período de construção desse projeto, que também foram de grande ajuda para esse trabalho, dentre muitos que me auxiliaram quero destacar Fenando Silva, Gustavo Santos, Henrique José, Guilherme Xavier, Leandro Pains, Raquel Filiagi e Pedro Barra. E também aos demais integrantes dos núcleos de qualidade da energia elétrica e de distribuição da energia elétrica da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, sem sombra de dúvidas me ajudaram durante esse projeto.

Não obstante, queria destacar a instrução e muitas vezes a paciência dos professores da Faculdade de Engenharia Elétrica, vale destacar os professores Dr. Antônio Carlos Delaiba, Dr. Isaque Nogueira Gondim, Dr. José Rubens Macedo e PhD. José Wilson Resende.

À CAPES que por meio do auxílio financeiro, mediante a concessão de bolsa de estudos, possibilitou a dedicação a esse trabalho.

“Assim, quer vocês comam, quer bebam, quer façam qualquer outra coisa, façam tudo para a glória de Deus.”

1 Coríntios 10:31

Resumo

Idealmente, sistemas elétricos trifásicos devem apresentar tensões e correntes com a mesma magnitude e com um defasamento angular de 120° entre si. Todavia, as situações encontradas em campo, via de regra, evidenciam dissemelhanças entre as grandezas elétricas, caracterizando, assim, os conhecidos sistemas trifásicos desequilibrados. Tal condição operativa se deve a uma série de fatores, alguns intrínsecos aos sistemas de suprimentos, e outros, às características das cargas alimentadas. Diante dos reconhecidos impactos negativos associados com operações impróprias das redes e seus componentes, assim como também efeitos sobre a eficiência do processo de fornecimento e consumo da energia elétrica, os agentes reguladores têm se mantido vigilantes em relação a esse indicador da qualidade da energia elétrica. Por tais motivos, valores limítrofes são frequentemente encontrados nas regulamentações nacionais e internacionais. Nessas circunstâncias, uma vez ultrapassados tais padrões, medidas para mitigação ou adequação aos padrões de qualidade estabelecidos devem ser prontamente empregadas. Para o atendimento a tais requisitos, são vários os recursos conhecidos e disponibilizados no mercado, entretanto, ao se confrontar os benefícios com os custos de algumas soluções, surge a motivação para a busca de estratégias mais atrativas. Nesse particular situa-se a presente pesquisa feita nessa dissertação, a qual encontra-se voltada para a proposição de um dispositivo compensador de desequilíbrios à base de componentes estáticos comerciais de baixo custo, associados com uma estratégia de chaveamento e controle para adequação às condições dinâmicas normalmente impostas pelas cargas. Tendo em vista que a pesquisa em pauta se apresenta como uma proposição inicial, a mesma é consubstanciada pelos seus fundamentos teóricos, e o processo avaliativo da eficácia do seu desempenho é feita computacionalmente.

Palavras Chave: Desequilíbrio de tensão, compensação de desequilíbrios, qualidade da energia elétrica, sistemas elétricos de potência.

Abstract

Ideally, three-phase electrical systems must have voltages and currents with the same magnitude and with an angular phase-shift of 120° . However, the situations found in the field, as a rule, show dissimilarities between these electric quantities, thus characterizing the well-known unbalanced three-phase systems. This operational condition is due to a number of factors, some intrinsic to the supply systems, and others to the characteristics of the fed loads. In view of the recognized negative impacts associated with improper operations of the networks and their components, as well as effects on the efficiency of the electricity supply and consumption process, regulatory agencies have been aware in relation to this indicator of the electrical power quality. For these reasons, boundary values are often found in national and international regulations. In such circumstances, once such standards are exceeded, measures to mitigate or conform to established power quality standards should be used. To meet these requirements, several strategies are known and available in the market, however, when confronting the benefits with the costs of some solutions, the motivation for the search for more attractive strategies appears. In this way, the present research is focused as the main target in this dissertation, which is aimed at proposing an imbalance compensator based on low-cost commercial static components, associated with a switching and control strategy to suit dynamic conditions normally imposed by the loads. Considering that the research in question is presented as an initial proposition, it is based on its theoretical foundations, and the evaluation process of the effectiveness of its performance is done computationally.

Key words: Voltage imbalance, imbalance compensation, electrical power quality, power systems.

Lista de Figuras

Figura 2.1 - Relação entre as metodologias responsáveis pela quantificação do fator de desequilíbrio.....	31
Figura 2.2 – Arranjo elétrico típico de suprimento de uma unidade consumidora contendo cargas equilibradas, desequilibradas e compensador.....	32
Figura 2.3 – Representação da parcela da carga responsável pelo desequilíbrio.....	33
Figura 2.4 – Circuito equivalente formado pela carga total (equilibrada e desequilibrada) e do dispositivo compensador.....	33
Figura 2.5 – Exemplo de aplicação: compensação de uma carga monofásica conectada entre as fases a e b.....	38
Figura 3.1 - Estrutura física do compensador dinâmico de desequilíbrios.....	44
Figura 3.2 - Formas de onda das correntes e tensões das unidades indutivas e capacitivas, relacionados com seus respectivos ângulos de disparo.....	45
Figura 3.3 - Correntes fundamental e harmônicas de acordo com a variação do ângulo de disparo.....	48
Figura 3.4 - Fluxograma da lógica do controle do compensador.....	49
Figura 3.5 - Diagrama de blocos do controle proporcional-integral saturado... ..	50
Figura 3.6 - Tensão de alimentação e resposta do PLL.....	51
Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema utilizado para os estudos de desempenho.....	54
Figura 4.2 – Sistema elétrico para os estudos de desempenho - implementado no software Matlab.....	56
Figura 4.3 - Composição do bloco representativo da carga desequilibrada dinâmica.....	57
Figura 4.4 - Fator de desequilíbrio na barra 1 (69 kV) - sem compensador.....	59
Figura 4.5 - Correntes de linha na barra 1 (69 kV) - sem compensador.....	59
Figura 4.6 - Fator de potência da carga desequilibrada sem compensador.....	60
Figura 4.7 - Fator de desequilíbrio de tensão da barra 1 (69 kV) - com compensador.....	61
Figura 4.8 - Correntes de linha na barra 1 (69 kV) - com compensador.....	62
Figura 4.9 - Fator de potência da carga desequilibrada com o compensador..	62

Figura 4.10 - Potências reativas de referência e medidas para a fase AB do compensador.....	63
Figura 4.11 - Potências reativas de referência e medidas para a fase BC do compensador.....	63
Figura 4.12 - Potências reativas de referência e medidas para a fase CA do compensador.....	64
Figura 4.13 - Ângulos de disparo dos reatores controlados a tiristores – fases AB, BC e CA.....	64

Listas de Tabelas

Tabela 2.1 - Tabela com as tensões de linha e fase utilizadas no exemplo.....	38
Tabela 4.1 - Dados dos equipamentos do sistema supridor.	54
Tabela 4.2 - Estágios da carga desequilibrada.	55
Tabela 4.3 - Parâmetros das cargas equilibradas.	56
Tabela 4.4 - Tempo de comutação dos estágios de carregamento.....	57
Tabela 4.5 - Potência reativa dos elementos do compensador.....	57
Tabela 4.6 - Distorções harmônicas individuais (até ordem 9) e totais das correntes no barramento de 69 kV.....	65
Tabela 4.7 - Distorções harmônicas individuais (até ordem 9) e totais das tensões no barramento de 69 kV..	66

Lista de Símbolos

- a – operador de rotação igual a $1 \angle 120^\circ$;
- B_{ab} – susceptância da carga desequilibrada entre as fases A e B;
- B_{bc} – susceptância da carga desequilibrada entre as fases B e C;
- B_{ca} – susceptância da carga desequilibrada entre as fases C e A;
- B'_{ab} – susceptância de compensação entre as fases A e B;
- B'_{bc} – susceptância de compensação entre as fases B e C;
- B'_{ca} – susceptância de compensação entre as fases C e A;
- $B_{L_{i,j}}$ – susceptâncias entre as fases i e j ;
- $B_{L_{i,j}}(\text{máx})$ – susceptância máxima oferecida pelo reator;
- FD% – fator de desequilíbrio percentual de sequência negativa;
- G_{ab} – condutância da carga desequilibrada entre as fases A e B;
- G_{bc} – condutância da carga desequilibrada entre as fases B e C;
- G_{ca} – condutância da carga desequilibrada entre as fases C e A;
- G_{eq} – condutância equivalente do conjunto carga e compensador;
- I – módulo da corrente de linha do sistema;
- \dot{I}_a – corrente de linha na fase A;
- \dot{I}_b – corrente de linha na fase B;
- \dot{I}_c – corrente de linha na fase C;
- \dot{I}_{ab} – corrente após a compensação da carga entre as fases A e B;
- \dot{I}_{bc} – corrente após a compensação da carga entre as fases B e C;
- \dot{I}_{ca} – corrente após a compensação da carga entre as fases C e A;

$I_{L_{\text{pico}}}$ – corrente fundamental do RCT, valor de pico;

$I_{L_{\text{pico}_n}}$ – corrente harmônica de ordem n produzida pelo reator;

K_i – ganho da unidade integral do controlador;

K_p – ganho da unidade proporcional do controlador;

L – indutância nominal do reator;

P_{ab} – potências ativas da carga desequilibrada entre as fases A e B;

P_{bc} – potências ativas da carga desequilibrada entre as fases B e C;

P_{ca} – potências ativas da carga desequilibrada entre as fases C e A;

Q_{ab} - potências reativas da carga desequilibrada entre as fases A e B;

Q_{bc} - potências reativas da carga desequilibrada entre as fases B e C;

Q_{ca} - potências reativas da carga desequilibrada entre as fases C e A;

$Q_{L_{i,j}}$ – potência reativa ao reator inserido entre as fases i e j ;

Q'_{ab} – potência reativa do compensador entre as fases A e B;

Q'_{bc} – potência reativa do compensador entre as fases B e C;

Q'_{ca} – potência reativa do compensador entre as fases C e A;

V – módulo da tensão fase-neutro do sistema;

\hat{V}_A – tensão da fase A;

\hat{V}_B – tensão da fase B;

\hat{V}_C – tensão da fase C;

\hat{V}_0 – tensão da componente de sequência zero;

\hat{V}_1 – tensão da componente de sequência positiva;

\hat{V}_2 – tensão da componente de sequência negativa;

\hat{V}_{ab} – fasor da tensão entre as fases A e B;

\dot{V}_{bc} – fasor da tensão entre as fases B e C;

\dot{V}_{ca} – fasor da tensão entre as fases C e A;

$V_{méd}$ – média das tensões de linha;

V_{pico} – tensão fase-fase nos terminais do RCT, valor de pico;

X_{bc} – reatância do elemento de compensação entre as fases B e C;

X_{ca} – reatância do elemento de compensação entre as fases C e A;

\dot{Y}_{ab} – admitância da carga entre as fases A e B;

\dot{Y}_{bc} – admitância da carga entre as fases B e C;

\dot{Y}_{ca} – admitância da carga entre as fases C e A;

α – ângulo de atraso do disparo do tiristor, em radianos;

ϕ – ângulo de defasagem entre a tensão do barramento supridor e as correntes de linha para o conjunto formado pela carga e dispositivo de compensação;

$\Delta V_{máx}$ – máximo desvio entre as tensões de linha medidas e a média das tensões;

ω – frequência angular da rede.

Lista de Abreviatura

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques a Haute Tension</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i>
FD	Fator de Desequilíbrio
LVUR	<i>Line Voltage Unbalanced Rate</i>
RCT	Reator Controlado por Tiristores
CCT	Capacitores Chaveados por Tiristores
PI	Proporcional Integral
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>

Sumário

Capítulo 1

Introdução geral

1.1	Contextualização do tema:.....	18
1.2	Estado da arte:.....	19
1.2.1	Fontes de desequilíbrios	19
1.2.2	Efeitos.....	20
1.2.3	Regulamentações	21
1.2.4	Soluções mitigatórias	22
1.3	Contribuições	24
1.4	Estrutura da dissertação	24

Capítulo 2

Estratégia para a compensação de desequilíbrios por meio de componentes passivos

2.1	Considerações iniciais	26
2.2	Métodos para a quantificação do indicador de desequilíbrio	27
2.2.1	Método das componentes simétricas.....	27
2.2.2	Método CIGRÉ.....	29
2.2.3	Método ANSI/NEMA	30
2.3	Correlação entre os indicadores de desequilíbrio	30
2.4	Estrutura física do compensador	32
2.4.1	Parametrização dos componentes do compensador	32
2.4.2	Exemplo de aplicação	37
2.5	Considerações finais.....	40

Capítulo 3

Proposta de dispositivo para a compensação dinâmica dos desequilíbrios

3.1	Considerações iniciais	42
3.2	Estratégia para a compensação dinâmica de desequilíbrios	43
3.3	A concepção do sistema de controle do compensador dinâmico de desequilíbrios	48
3.4	Considerações finais.....	51

Capítulo 4

Estudos computacionais de desempenho do compensador dinâmico

4.1.	Considerações iniciais.....	53
4.2.	Caracterização do sistema teste	53
4.3.	Estudos de desempenho.....	56
4.3.1	Resultados sem a presença do dispositivo compensador.....	58
4.3.2	Resultados com a inserção do dispositivo compensador.....	60
4.4.	Efeitos Colaterais	65
4.5.	Considerações Finais.....	66

Capítulo 5

Considerações finais

Considerações Finais.....	68
---------------------------	----

Referências Bibliográficas

Referências Bibliográficas.....	71
---------------------------------	----

Capítulo 1

Introdução Geral

1.1 Contextualização do tema

Com o crescimento do desenvolvimento tecnológico e correspondentes demandas da energia elétrica, dentre inúmeras outras questões, surge a relevância do controle da qualidade do produto oferecido pelas empresas supridoras. Isso se deve, sobretudo, a maior acessibilidade às informações atreladas com os direitos e deveres na relação comercial entre aqueles responsáveis pelo fornecimento e os que os recebem. Neste particular, os temas vinculados com a qualidade da energia elétrica se apresentam como fatores de grande importância e, inserido nesse contexto, esta dissertação encontra-se direcionada a contemplar um dos fenômenos em pauta.

Genericamente, o termo qualidade da energia elétrica está relacionado com um conjunto de fenômenos capazes de impactar na forma de onda, magnitude ou frequência da tensão e/ou corrente elétrica. Portanto, questões associadas com distorções harmônicas, desequilíbrios, variações de tensão de curta e longa duração, flutuações de tensão, e ainda, as interrupções dos suprimentos se apresentam como distúrbios contemplados dentro do conceito estabelecido pela área.

No que tange às questões tratadas dentro do contexto dos desequilíbrios presentes nas redes elétricas, vale lembrar que, via de regra, é de se esperar que os suprimentos elétricos ocorram através de tensões senoidais e

equilibradas, ou seja, as três fases devem apresentar a mesma magnitude para as tensões, e ainda, que estas se apresentem com um desfasamento angular de 120 graus. Isto caracteriza os denominados sistemas equilibrados ou simétricos e, para as condições que fogem a esta situação ideal, as redes elétricas são ditas desequilibradas ou assimétricas [1].

O fenômeno ora tratado se faz presente nos suprimentos elétricos desde o início do emprego da tecnologia da geração, transmissão e distribuição da energia elétrica e, são inúmeros os trabalhos encontrados na literatura que contemplam aspectos diversos associados com a matéria. Vários destes serão apresentados ao longo da dissertação e, à luz dos efeitos nocivos deste distúrbio, o mesmo tem sido objetivo de regulamentação por parte dos agentes responsáveis pela manutenção da qualidade dos suprimentos. Em consonância com tais diretrizes, uma vez constatadas violações dos limites preconizados, medidas corretivas ou mitigatórias se fazem requeridas, tema este que se apresenta como cerne da presente pesquisa.

1.2 Estado da arte

Ambicionando contextualizar sobre a temática dos desequilíbrios, na sequência estão apresentados aspectos gerais relacionados com tópicos de interesse sobre a questão em foco.

1.2.1 Fontes de desequilíbrios

Deveras, os desequilíbrios são atribuídos a assimetrias nos parâmetros atrelados a geração e/ou transmissão da energia elétrica e também pela natureza das cargas ou pela sua distribuição desigual entre as fases dos sistemas elétricos.

As instalações que dispõem de um extensivo remanejamento de cargas monofásicas e bifásicas são, normalmente, as causadores das dissemelhanças entre as correntes presentes num determinado sistema trifásico e, à vista disso, se apresentam como origens para as tensões desequilibradas [2] [3]. Dentre as

situações práticas mais reais destaca-se a presença das instalações siderúrgicas constituídas por fornos a arco [4]. Sistemas ferroviários para o transporte também se situam nesta categoria [5].

Um outro motivo para a ocorrência do fenômeno em questão se fundamenta na assimetria das redes de transmissão e distribuição, quer no que se refere à disposição física dos condutores e outros componentes que perfazem o complexo elétrico. Neste particular, medidas praticadas no processo construtivo das redes, a exemplo das transposições, se apresentam como meios para mitigar as contribuições advindas do sistema de suprimento [6].

Na atualidade, o crescente aumento das denominadas unidades de geração distribuídas, não obstante seus atrativos, também se apresentam como configurações topológicas com potencial para o aumento dos desequilíbrios [7], [8], dado o fato que as mesmas são geralmente monofásicas ou bifásicas.

1.2.2 Efeitos

É concernente que os desequilíbrios possuem consequências perniciosas para os equipamentos, quando os seus suprimentos são por meio de redes trifásicas assimétricas [9].

Em máquinas rotativas os problemas causados pelas correntes de sequência negativa têm uma abrangência tanto mecânica como elétrica. Nas grandezas mecânicas os efeitos se fazem notados visto a manifestação de um campo girante da sequência negativa, o qual, por sua vez, resulta em conjugados pulsantes, vibrações e ruídos, que podem causar danos as partes mecânicas da máquina. Sob o ponto de vista das consequências de natureza elétrica, as correntes de sequência negativa podem resultar em acréscimos das perdas elétricas, com respectivos impactos nas questões térmicas e vida útil dos dispositivos [10] [11].

De fato, a título de ilustração, desequilíbrios de tensão da ordem de 5% podem acarretar correntes de sequência negativa de cerca de 30%, como relatado nestas referências. Estas correntes, além dos efeitos diretos sobre as cargas acionadas, também se apresentam como fatores que contribuem para as

sobrecargas em cabos, transformadores e outros componentes que perfazem os complexos elétricos. Nestas circunstâncias, pode ocorrer a extrapolação dos limites de carregamento estabelecidos em projeto, sobreaquecimentos, degradações do isolante e falhas inesperadas [12].

As assimetrias nas grandezas elétricas também são capazes de agravar os problemas relacionados as correntes harmônicas, na presença de cargas eletrônicas, a exemplo dos sistemas de retificação de 6 ou mais pulsos [13] [14]. Para tais situações, as esperadas ordens harmônicas, denominadas por características, perdem suas propriedades intrínsecas aos sistemas de conversão CA-CC e outras componentes, denominadas por não-características passam a compor o espectro de frequências das correntes de linha.

1.2.3 Regulamentações

Em razão dos efeitos negativos causados pelos desequilíbrios nos sistemas elétricos, existem orientações nacionais e internacionais que normatizam os indicadores que expressam tal nível de anomalia ou desvios do padrão ideal dos suprimentos. Essas regulamentações intentam estabelecer valores limítrofes para os indicadores já consolidados na literatura concernente, para harmonizar a interação entre os agentes do setor elétrico.

No ambiente nacional, a Agência Nacional de Energia Elétrica, (ANEEL), no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico (PRODIST), determina que os percentuais de desequilíbrios de tensão devem ser limitados a 3% em conjuntos com nível de tensão inferiores a 1 kV e 2% para sistemas entre 1 kV e 230 kV [1].

No que tange a rede básica, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em conformidade com o Procedimentos de Rede – Submódulo 2.8, recomenda que os limites individuais e globais não ultrapassem 1,5% e 2,0%, respectivamente, utilizando o método das componentes simétricas como base para o cálculo dos indicadores de conformidade dos desequilíbrios de tensão [15].

No âmbito internacional, a *International Electrotechnical Commission* (IEC), delimita o fator de desequilíbrio em 2% para instalações em baixa tensão e que o respectivo fator pode ser calculado tanto pela metodologia do CIGRÉ quanto pelo método das Componentes Simétricas [16].

Da mesma forma, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), mediante o documento denominado *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* (IEEE Std 1159-2009), estabelece que o fator de desequilíbrio deve ser menor que 2%, sendo desejável que seja inferior a 1%. A metodologia utilizada para o acompanhamento deste indicador é o método das componentes simétricas [17].

Sob outra perspectiva, o *American National Standards Institute* (ANSI) institui que o fator de desequilíbrio não deve ser superior em 3% em condições a vazio, indicador esse que é mensurado pela metodologia ANSI/NEMA [18].

À luz do exposto, segue que as normatizações nacionais e internacionais, em sua maioria, são convergentes no que tange as metodologias de quantificação do indicador de desequilíbrio, majoritariamente, dos métodos CIGRÉ e componentes simétricas. Não obstante este fato, para fins dessa dissertação, será utilizado tão apenas a metodologia das componentes simétricas.

1.2.4 Soluções mitigatórias

Em decorrência dos efeitos perniciosos para o sistema elétrico e da existência dos limites impostos pelos agentes reguladores do sistema elétrico, quando da violação dos limites preconizados, medidas corretivas se fazem necessárias. Para tanto, a literatura contempla algumas diretrizes para o atendimento aos requisitos postos, como discutido a seguir.

Num plano primário, recorre-se, para os sistemas de distribuição, a uma redistribuição das cargas entre alimentadores e fases [19]. Naturalmente, estas medidas, a exemplo também das transposições dos condutores amplamente empregadas nos sistemas de transmissão, apresentam-se como soluções mitigatórias mais simples e econômicas.

Para outras situações, quando o processo do equilíbrio não seja factível por meio dos procedimentos supramencionados, há ainda recursos tecnológicos oferecidos pelos denominados dispositivos compensadores de desequilíbrio, os quais podem se apresentar com uma constituição física caracterizada pela composição apropriada de elementos passivos, ou ainda, pelos conhecidos equipamentos reguladores ativos. Estes são considerados com maiores detalhes na sequência.

Quanto à primeira filosofia, caracterizada por equipamentos de compensação formados por elementos passivos a parâmetros fixos, esse processo se encontra plenamente consolidado e utilizado em várias instalações elétricas. De fato, tal estratégia se mostra atrativa tanto pelo lado técnico como econômico, propriedades estas decorrentes pela simplicidade construtiva e robustez [20].

Todavia, como mencionado, o emprego de componentes à parâmetros constantes não se mostra eficaz quando as cargas geradoras dos desequilíbrios se apresentam com uma dinâmica operacional, a exemplo dos fornos elétricos à arco e outros. Nestas circunstâncias, a implementação de recursos para o controle dos componentes por meio de, por exemplo, chaves eletrônicas, pode ser considerada para fins da obtenção de um mecanismo dinâmico para o processo da compensação [10].

Numa outra vertente, na atualidade encontram-se disponíveis no mercado, recursos integrados para a compensação de harmônicos, regulação de tensão, adequação do fator de potência e também correção dos desequilíbrios. Nesta categoria se apresentam os denominados compensadores ativos, que crescem em importância aplicativa em virtude do avanço da tecnologia de materiais e do surgimento de semicondutores com capacidade de chaveamento em altas frequências [21] [22] [23]. Não obstante seus grandes atrativos, tais produtos são relativamente dispendiosos visto utilizarem uma tecnologia mais avançada para seus componentes e controles, além de exigências maiores quanto às instalações físicas e manutenções [24].

1.3 Contribuições desta dissertação

Diante do contexto supra apresentado, essa pesquisa de mestrado encontra-se direcionada à:

- Estabelecer uma proposta de compensador de desequilíbrios à base de componentes indutivos e capacitivos de valores fixos, os quais são controlados eletronicamente para fins da obtenção de uma característica de desempenho dinâmica;
- Propor uma estratégia para o controle eletrônico visando a compatibilização do processo de regulação às condições impostas pela dinâmica de um suprimento;
- Simular computacionalmente a proposição feita mediante de técnicas de modelagem no domínio do tempo, visando validar a proposta feita.

1.4 Estrutura da dissertação

Além do presente capítulo, que tem um caráter introdutório, o presente trabalho se apresenta estruturado como segue:

Capítulo 2 Estratégia para a compensação de desequilíbrios por meio de componentes passivos

Esse capítulo apresenta as metodologias que estão consolidadas na literatura pertinente e também o princípio matemático que substancia o compensador de desequilíbrio. Em consonância com o que foi apresentado é desenvolvido um sistema teste para a aplicação numérica em um sistema teste.

Capítulo 3 Proposta de dispositivo para a compensação dinâmica dos desequilíbrios

Esse capítulo apresenta a metodologia de controle empregada para o controle da potência reativa dos elementos passivos, em concordância com o que foi apresentado na seção anterior do trabalho.

Capítulo 4 Estudos Computacionais de Desempenho do Compensador Dinâmico

Esse capítulo apresenta a estrutura do ambiente computacional utilizado para as simulações. Isso posto, inicia-se a demonstração dos estudos de casos utilizados para a validação do processo de compensação, em seguida são apresentados os resultados afim certificar a metodologia proposta.

Capítulo 5 Conclusões Gerais

Adicionalmente as conclusões parciais exploradas ao longo desta dissertação, esse capítulo encontra-se fundamentado na sintetização das análises conclusivas externadas nos capítulos precedentes.

Capítulo 2

Estratégia para a compensação de desequilíbrios por meio de componentes passivos

2.1 Considerações iniciais

Em consonância com o exposto anteriormente, dentre as estratégias aplicáveis à questão dos compensadores de desequilíbrios, a mais atrativa sob o ponto de vista da simplicidade construtiva, custos, requisitos de manutenção, dentre outros aspectos, os dispositivos concebidos à base de componentes indutivos e capacitivos exercem função preponderante.

À luz deste reconhecimento, este capítulo encontra-se focado na contextualização desta tecnologia, com destaque aos fundamentos físicos que norteiam o processo e a respectiva modelagem matemática visando o produto final ora destacado.

Visando contemplar tais premissas, inicialmente, é apresentada uma síntese dos procedimentos de cálculo destinados a quantificação dos níveis de desequilíbrios, estabelecendo uma análise crítica dos métodos e definição do processo de cálculo empregado nestes estudos.

Na sequência é estabelecida a topologia elétrica de um arranjo genérico, caracterizado por uma carga desequilibrada, estática, junto à qual é inserido o dispositivo de compensação aqui explorado. A partir do circuito elétrico equivalente a este complexo, são então estabelecidos os modelos elétricos que

conduzem a quantificação dos desequilíbrios presentes e o dimensionamento dos componentes que perfazem o conjunto (carga e compensador) que se mostram, para a rede de suprimento, como um consumo totalmente equilibrado. Adicionalmente a propriedade da eliminação da componente de corrente de sequência negativa injetada no supridor, é também mostrado que o compensador ainda se apresenta com potencialidade para a melhoria do fator de potência da unidade consumidora.

2.2 Métodos para a quantificação do indicador de desequilíbrio

O desequilíbrio de tensão, como já referido, trata-se de um fenômeno aplicável às redes trifásicas e caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões ou correntes presentes [1].

Diante dos fundamentos clássicos aplicáveis à matéria, sabe-se que, não obstante uma maior complexidade para os trabalhos de monitoração em campo, o emprego da decomposição das tensões e/ou correntes nas sequências positiva, negativa e zero, se apresenta como a metodologia mais adequada. Todavia, visando aspectos práticos associados com o emprego de uma instrumentação mais simples, outras propostas podem ser encontradas, as quais são consideradas em detalhes a seguir.

2.2.1 Método das componentes simétricas

O método das Componentes Simétricas [25], apoiado em técnicas de análise no domínio da frequência, consiste na transformação de um conjunto de fasores desequilibrados de um sistema polifásico, em um conjunto de outros sistemas, cada qual com propriedades balanceadas.

Tomando por base um sistema trifásico e desequilibrado, a aplicação deste procedimento, quer para as tensões como para as correntes, conduz às conhecidas componentes de sequência positiva, negativa e zero, a saber:

- Componentes de sequência positiva: constituídas por três fasores de mesmo módulo, com defasagem de 120° entre si e mesma sequência de fase que os fasores originais;
- Componentes de sequência negativa: constituídas por três fasores de mesmo módulo, com defasagem de 120° entre si e sequência de fases invertida em relação aos fasores originais;
- Componentes de sequência zero: constituída por três fasores igualmente desfasados e com o mesmo módulo, ou seja, em fase.

Estas componentes podem ser calculadas mediante a utilização da transformada de Fortescue [25], apresentada pela matriz (2.1). Esta considera uma correlação entre os fasores tensão, todavia, pode ser igualmente utilizada para as correntes.

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Onde:

- \dot{V}_A , \dot{V}_B e \dot{V}_C – fasores das tensões de fase para o sistema real A, B e C, respectivamente;
- \dot{V}_0 , \dot{V}_1 e \dot{V}_2 – fasores das tensões de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente;
- a – operador de rotação igual a $1 \angle 120^\circ$.

Da expressão matricial (2.1) obtém-se, via processo de inversão, as requeridas componentes de sequência, como indicado em (2.2).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_A \\ \dot{V}_B \\ \dot{V}_C \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

À vista disso, o Fator de Desequilíbrio é calculado com base na relação entre as tensões ou correntes de sequência negativa e positiva, como apresentado na Equação (2.3).

$$FD\% = \frac{V_2}{V_1} \times 100 \quad (2.3)$$

Onde:

- FD% – fator de desequilíbrio percentual de sequência negativa;
- V_2 e V_1 – magnitude das tensões eficazes de sequência negativa e positiva, respectivamente.

De forma análoga poder-se-ia aplicar as formulações para as correntes, e ainda, utilizar destes recursos para a caracterização do fator de desequilíbrio de sequência zero [26], o qual não possui maiores aplicações para a área.

2.2.2 Método CIGRÉ

Reconhecendo que os procedimentos de cálculo supra postos requerem as amplitudes e ângulos dos fasores, e que esta última grandeza nem sempre se faz prontamente disponível, por meio de desenvolvimentos matemáticos consonantes com os princípios acima estabelecidos, a CIGRÉ [17] propôs uma formulação alternativa. Esta, como apresentado em (2.4), é aplicada utilizando apenas os módulos das tensões eficazes de linha.

$$FD\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \quad (2.4)$$

Onde a grandeza β é determinada através de (2.5).

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.5)$$

Onde:

- V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} – magnitudes das tensões eficazes de linha.

Dessarte, o método CIGRÉ é prático pela facilidade de aplicação visto requerer medidores muito mais simples, de menor custo e dispensando processamentos dos sinais registrados [27].

2.2.3 Método ANSI/NEMA

De acordo com a *American National Standards Institute* (ANSI) e a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), o fator de desequilíbrio, também denominado por *Line Voltage Unbalanced Rate* (LVUR), é definido em consonância com (2.6) [28].

$$FD\% = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{V_{\text{méd}}} \times 100 \quad (2.6)$$

Onde:

- $\Delta V_{\text{máx}}$ – máximo desvio entre as tensões de linha medidas e a média das tensões (V_{med});
- $V_{\text{méd}}$ – média das tensões de linha.

Ressalta-se que tais equações são válidas apenas quando aplicadas às tensões de linha, cujo resultado retorna um valor próximo ao fornecido pelos demais métodos quando da manifestação de baixo conteúdo harmônico e para as condições nas quais a componente de sequência zero é desprezível [29].

2.3 Correlação entre os indicadores de desequilíbrio

Por fim, a partir do emprego de sinais de referência (tensões com níveis de desequilíbrios pré-estabelecidos via componentes simétricas) procede-se à

aplicação das formulações destinadas a quantificação dos padrões de assimetria. Os resultados assim obtidos encontram-se destacados na Figura 2.1.

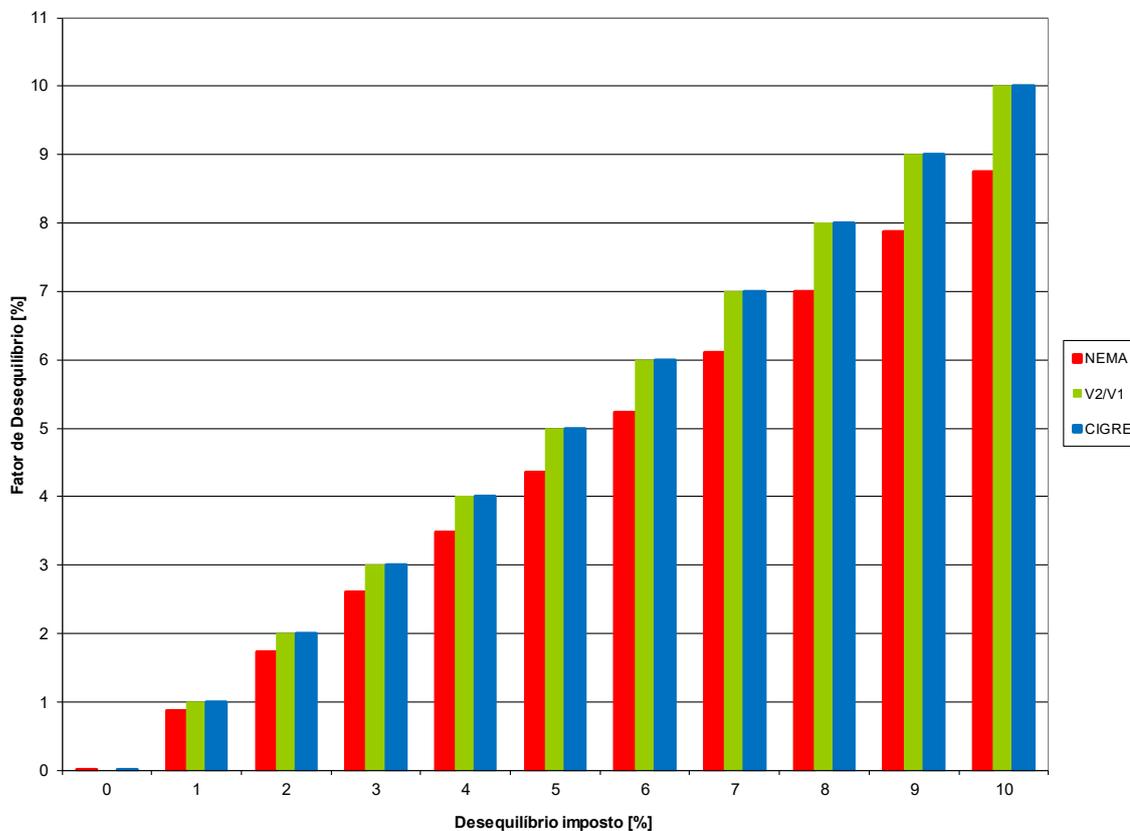


Figura 2.1 - Relação entre as metodologias responsáveis pela quantificação do fator de desequilíbrio.

Os resultados evidenciam que os indicadores obtidos por meio das componentes simétricas se apresentam totalmente condizentes. O método CIGRE também evidencia total aderência aos resultados esperados, enquanto que, à medida que os graus de assimetria aumentam, cresce também as discrepâncias entre a proposição da ANSI/NEMA. Portanto, fica aqui esclarecido que os cálculos podem ser realizados com base nas componentes simétricas ou pela metodologia CIGRE, sendo a primeira metodologia a adotada para fins desse trabalho, como já mencionado anteriormente.

2.4 Estrutura física do compensador

Visando agora o estabelecimento da metodologia voltada para a compensação dos desequilíbrios produzidos por cargas elétricas assimétricas, a Figura 2.2 ilustra uma situação típica passível de se encontrar num suprimento elétrico. A Figura 2.2 mostra a rede de suprimento, supostamente equilibrada quanto às suas tensões de alimentação e um consumidor. Este se apresenta formado por conjuntos de cargas equilibradas e outras desequilibradas. Também, é ilustrada a presença do dispositivo compensador aqui focado.

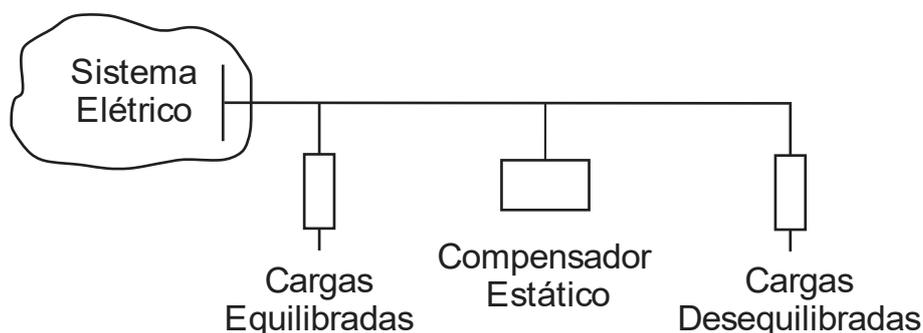


Figura 2.2 – Arranjo elétrico típico de suprimento de uma unidade consumidora contendo cargas equilibradas, desequilibradas e compensador.

Para o presente momento, tanto as cargas como o compensador são considerados estáticos, isto é, os níveis de consumo e desequilíbrio são mantidos constantes para as formulações que se seguem. Da mesma forma, quando da inserção do dispositivo compensador, este se apresenta caracterizado por componentes indutivos e capacitivos com valores fixos.

2.4.1 Parametrização dos componentes do compensador

O princípio básico de compensação de uma carga desequilibrada parte do pressuposto que o barramento trifásico de suprimento do consumidor se apresenta com tensões de linha equilibradas e representadas por: $\dot{V}_{ab} = \sqrt{3}V\angle 0^\circ$; $\dot{V}_{bc} = \sqrt{3}V\angle -120^\circ$; $\dot{V}_{ca} = \sqrt{3}V\angle 120^\circ$. Estas grandezas encontram-se alimentando as cargas equilibradas e desequilibradas, sendo que estas últimas

são indicadas na forma de suas admitâncias equivalentes da Figura 2.3. Diante destas condições operativas as correntes de linha se apresentam com níveis de assimetria diretamente atrelados com as distintas admitâncias equivalentes conectadas entre as fases. As descrições matemáticas de tais correntes, na ausência do compensador, se fazem desnecessárias, motivo pelo qual as mesmas não são aqui apresentadas.

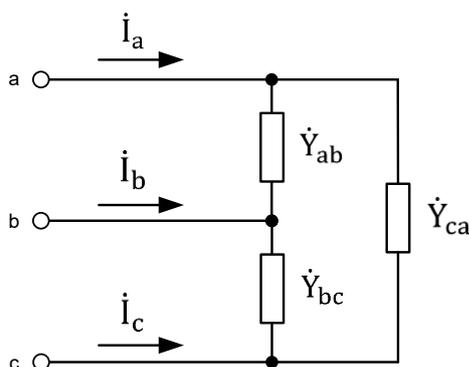


Figura 2.3 – Representação da parcela da carga responsável pelo desequilíbrio.

Objetivando atingir uma condição operacional tal que a carga total seja suprida através de um conjunto de correntes de alimentação simétricas, torna-se imperativo a inserção de admitâncias (ou susceptâncias) representativas do dispositivo compensador, como indicado na Figura 2.4.

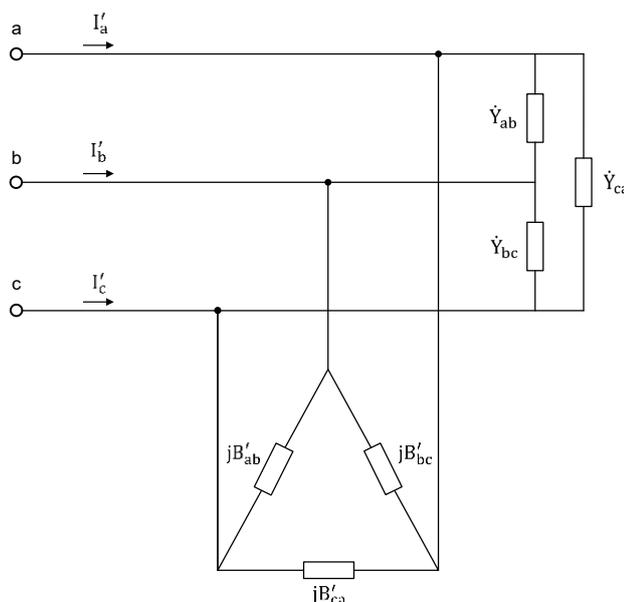


Figura 2.4 – Circuito equivalente formado pela carga total (equilibrada e desequilibrada) e do dispositivo compensador.

Em atenção aos objetivos aqui estabelecidos, é de se esperar que, o conjunto indicado na Figura 2.4 resulte nas correntes totais de alimentação \dot{I}_a , \dot{I}_b e \dot{I}_c , tal que estas se apresentem com mesma magnitude e defasadas de 120° entre si.

Seguindo esta estratégia e denominando as susceptâncias do compensador por B'_{ab} , B'_{bc} e B'_{ca} , tem-se que as novas correntes de linha, fornecidas pelo supridor, passam a ser descritas por meio das Equações 2.7, 2.8 e 2.9.

$$\dot{I}'_a = (\dot{Y}_{ab} + jB'_{ab})\dot{V}_{ab} - (\dot{Y}_{ca} + jB'_{ca})\dot{V}_{ca} \quad (2.7)$$

$$\dot{I}'_b = (\dot{Y}_{bc} + jB'_{bc})\dot{V}_{bc} - (\dot{Y}_{ab} + jB'_{ab})\dot{V}_{ab} \quad (2.8)$$

$$\dot{I}'_c = (\dot{Y}_{ca} + jB'_{ca})\dot{V}_{ca} - (\dot{Y}_{bc} + jB'_{bc})\dot{V}_{bc} \quad (2.9)$$

Onde:

- B'_{ab} , B'_{bc} e B'_{ca} – susceptâncias de compensação;
- \dot{Y}_{ab} , \dot{Y}_{bc} e \dot{Y}_{ca} – admitâncias equivalentes da carga total.

Substituindo as admitâncias equivalentes da carga através de suas respectivas condutâncias e susceptâncias, assim como introduzindo as expressões representativas das tensões de alimentação do barramento supridor, chega-se às Equações 2.10, 2.11 e 2.12.

$$\dot{I}'_a = [G_{ab} + j(B_{ab} + B'_{ab})]\sqrt{3}V\angle 0^\circ - [G_{ca} + j(B_{ca} + B'_{ca})]\sqrt{3}V\angle 120^\circ \quad (2.10)$$

$$\dot{I}'_b = \{[G_{bc} + j(B_{bc} + B'_{bc})]\sqrt{3}V\angle -120^\circ\} - [G_{ca} + j(B_{ca} + B'_{ca})]\sqrt{3}V\angle 0^\circ \quad (2.11)$$

$$\dot{I}'_c = [G_{ca} + j(B_{ca} + B'_{ca})]\sqrt{3}V\angle 120^\circ - [G_{ab} + j(B_{ab} + B'_{ab})]\sqrt{3}V\angle -120^\circ \quad (2.12)$$

Estando as cargas conectadas em triângulo e suas condutâncias dadas por G_{ab} , G_{bc} e G_{ca} , uma vez que as mesmas são supridas por tensões

equilibradas, de valor eficaz de $\sqrt{3}V$, resta que a potência ativa sem compensação é dada pela Equação 2.13.

$$\text{Potência Ativa (sem compensação)} = (\sqrt{3}V)^2 [G_{ab} + G_{bc} + G_{ca}] \quad (2.13)$$

Tendo em vista que, após a compensação feita por componentes reativos (ideais), não há implicações sobre a potência ativa total fornecida, isto determina que esta grandeza permanece constante. Tendo em mente que o arranjo completo se apresenta como uma constituição equilibrada, o conjunto formado pela carga e compensador pode ser representado por uma condutância equivalente representada por G_{eq} . Nestes termos surge a Equação 2.14.

$$\text{Potência Ativa (com compensação)} = (\sqrt{3}V)^2 [G_{eq}] \quad (2.14)$$

Assim procedendo, as correntes de linha, já equilibradas, se apresentam com módulos dados pela Equação 2.15.

$$3VI \cos \phi = (\sqrt{3}V)^2 [G_{eq}]$$
$$I = \frac{V \cdot G_{eq}}{\cos \phi} \quad (2.15)$$

Onde:

- ϕ – ângulo do fator de potência após o processo de compensação;
- G_{eq} – condutância equivalente do conjunto carga e compensador;
- V – módulo da tensão fase-neutro do sistema;
- I – módulo da corrente de linha do sistema.

Da Equação 2.15 chega-se à expressão 2.16.

$$I = VG_{eq}\sqrt{1 + \tan^2 \phi} \quad (2.16)$$

Substituindo a equação 2.16 nas expressões 2.10, 2.11 e 2.12, tem-se:

$$\begin{aligned} & \left[G_{ab} + \frac{1}{2}G_{ca} + \frac{\sqrt{3}}{2}B_{ca} + \frac{\sqrt{3}}{2}B'_{ca} \right] + j \left[B_{ab} + B'_{ab} + \frac{1}{2}B_{ca} + \frac{1}{2}B'_{ca} - \frac{\sqrt{3}}{2}G_{ca} \right] \\ & = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3} \cos \phi} \angle (330^\circ - \phi) \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} & \left[-\frac{1}{2}G_{bc} + \frac{\sqrt{3}}{2}B_{bc} + \frac{\sqrt{3}}{2}B'_{bc} + G_{ab} \right] + j \left[-\frac{1}{2}B_{bc} - \frac{1}{2}B'_{bc} - \frac{\sqrt{3}}{2}G_{bc} - B_{ab} - B'_{ab} \right] \\ & = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3} \cos \phi} \angle (210^\circ - \phi) \end{aligned} \quad (2.18)$$

$$\begin{aligned} & \left[-\frac{1}{2}G_{ca} - \frac{\sqrt{3}}{2}B_{ca} - \frac{\sqrt{3}}{2}B'_{ca} + \frac{1}{2}G_{bc} - \frac{\sqrt{3}}{2}B_{bc} - \frac{\sqrt{3}}{2}B'_{bc} \right] \\ & + j \left[-\frac{1}{2}B_{ca} - \frac{1}{2}B'_{ca} + \frac{3}{2}G_{ca} + \frac{1}{2}B_{bc} + \frac{1}{2}B'_{bc} + \frac{\sqrt{3}}{2}G_{bc} \right] \\ & = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3} \cos \phi} \angle (90^\circ - \phi) \end{aligned} \quad (2.19)$$

$$G_{eq} = G_{ab} + G_{bc} + G_{ca} \quad (2.20)$$

As identidades acima conduzem às expressões que determinam os parâmetros e natureza das susceptâncias que irão compor o compensador ora almejado. Estas são:

$$B'_{ab} = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3}} [-\sqrt{3} - \tan \phi] + \frac{2}{\sqrt{3}}G_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}}G_{bc} - B_{ab} \quad (2.21)$$

$$B'_{bc} = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3}} [-\sqrt{3} - \tan \phi] + \frac{2}{\sqrt{3}}G_{ab} + \frac{1}{\sqrt{3}}G_{bc} - B_{bc} \quad (2.22)$$

$$B'_{ca} = \frac{G_{eq}}{\sqrt{3}} [-\sqrt{3} - \tan \phi] + \frac{2}{\sqrt{3}}G_{ab} + \frac{1}{\sqrt{3}}G_{ca} - B_{ca} \quad (2.23)$$

Correlacionando os parâmetros acima determinados, com as correspondentes potências dos componentes indutivos ou capacitivos, chega-se

às Equações 2.24, 2.25 e 2.26. Vale ressaltar que grandezas positivas estão atreladas com capacitores e negativas com reatores.

$$Q'_{ab} = \left(-\frac{1}{3} \tan \phi\right) P_{ab} + \left(\frac{-\sqrt{3} - \tan \phi}{3}\right) P_{bc} + \left(\frac{\sqrt{3} - \tan \phi}{3}\right) P_{ca} - Q_{ab} \quad (2.24)$$

$$Q'_{bc} = \left(\frac{\sqrt{3} - \tan \phi}{3}\right) P_{ab} + \left(-\frac{1}{3} \tan \phi\right) P_{bc} + \left(\frac{-\sqrt{3} - \tan \phi}{3}\right) P_{ca} - Q_{bc} \quad (2.25)$$

$$Q'_{ca} = \left(\frac{-\sqrt{3} - \tan \phi}{3}\right) P_{ab} + \left(\frac{\sqrt{3} - \tan \phi}{3}\right) P_{bc} + \left(-\frac{1}{3} \tan \phi\right) P_{ca} - Q_{ca} \quad (2.26)$$

Onde:

- Q'_{ab} , Q'_{bc} e Q'_{ca} – potências reativas dos componentes que perfazem o compensador. Valores individuais entre as respectivas fases indicadas;
- P_{ab} , P_{bc} e P_{ca} – potências ativas da carga. Valores individuais entre as respectivas fases indicadas;
- Q_{ab} , Q_{bc} e Q_{ca} – potências reativas da carga. Valores individuais entre as respectivas fases indicadas;
- ϕ – ângulo de defasagem entre a tensão do barramento supridor e as correntes de linha para o conjunto formado pela carga e dispositivo de compensação.

2.4.2 Exemplo de aplicação

A título de ilustração, procede-se, a seguir, a parametrização de um compensador visando atender aos objetivos aqui explorados. O presente exemplo corresponde a uma carga resistiva, monofásica, ligada entre as fases a e b, com a potência de 1 MW, conforme ilustra a Figura 2.5.

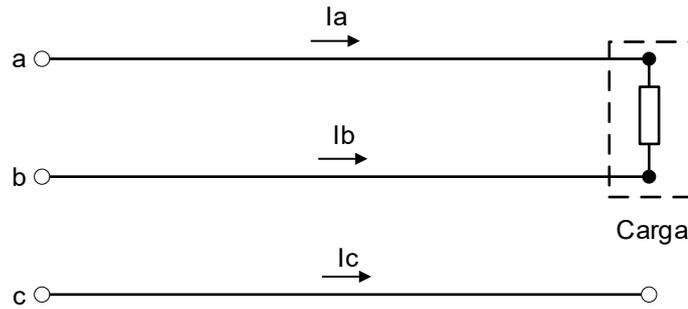


Figura 2.5 – Exemplo de aplicação: compensação de uma carga monofásica conectada entre as fases a e b.

Na Figura 2.5 as tensões associadas com o barramento de suprimento são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tabela com as tensões de linha e fase utilizadas no exemplo

Tensões de Linha		Tensões de Fase	
Módulo (V)	Ângulo	Módulo (V)	Ângulo
13800	0°	7967,4337	-30°
13800	-120°	7967,4337	-150°
13800	120°	7967,4337	90°

Admitindo um nível de curto-circuito infinito e que a tensão fase-fase seja de 13800 V, as correntes de linha, sem a compensação, são:

$$\dot{I}_a = 72,464 \angle 0^\circ [A]$$

$$\dot{I}_b = 72,464 \angle 180^\circ [A]$$

$$\dot{I}_c = 0 [A]$$

Por meio das Equações 2.23, 2.24 e 2.25, para uma compensação com o fator de potência unitário, chega-se aos seguintes resultados:

$$Q_{ab} = 0 [Mvar]; Q_{bc} = 577,35 [KVAR]; Q_{ca} = -577,35 [KVAR]$$

Ou seja, entre as fases B e C será introduzido um banco de capacitores de 577,35 KVAR e entre as fases C e A um reator de mesma potência.

Suas respectivas reatâncias são:

$$jX_{bc} = -j * \frac{13800^2}{577350} = -j329,8519 [\Omega]$$

$$jX_{ca} = j * \frac{13800^2}{577350} = j329,8519 [\Omega]$$

Nestes termos, as correntes de fase na carga e no compensador serão:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{P}{\dot{V}_{ab}} = \frac{10^6}{13800\angle 0^\circ} = 72,464\angle 0^\circ$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{V}_{bc}}{-jX_{bc}} = \frac{13800\angle -120^\circ}{-j329,8519} = 41,8369\angle -30^\circ$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{V}_{ca}}{jX_{ca}} = \frac{13800\angle 120^\circ}{j329,8519} = 41,8369\angle 30^\circ$$

E as respectivas correntes de linha, que representam o conjunto visto pelo barramento supridor, são:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{bc} = 72,464\angle 0^\circ - 41,8369\angle 30^\circ = 41,8369\angle -30^\circ$$

$$\dot{I}_b = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ca} = 41,8369\angle -30^\circ - 72,464\angle 0^\circ = 41,8369\angle -150^\circ$$

$$\dot{I}_c = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 41,8369\angle 30^\circ - 41,8369\angle -30^\circ = 41,8369\angle 90^\circ$$

É notório que as correntes de linha após a inserção o compensador tem um comportamento equilibrado, pois elas possuem mesmo módulo e ângulos de defasagem entre si de 120°. Quanto ao fator de potência, basta observar que as defasagens entre as tensões e respectivas correntes indicam um valor unitário.

Por fim, é importante ressaltar que a eficácia do compensador ora definido é aplicável tão somente à carga. Eventuais desequilíbrios presentes nas tensões de suprimento e advindos de outras fontes que não o consumidor em questão, não serão afetados [24].

2.5 Considerações finais.

O presente capítulo focou nos fundamentos matemáticos que norteiam a parametrização do compensador de desequilíbrios e fator de potência, caracterizado por componentes reativos de valores fixos, destinados a contemplar cargas estáticas desequilibradas, nos termos postos para o presente estágio dos desenvolvimentos.

O capítulo sintetizou as metodologias para a quantificação do indicador de desequilíbrio das tensões e correntes, em consonância com as regulamentações internacionais e nacionais. As discussões feitas foram voltadas para uma contextualização do tema e também conceituar os procedimentos em prática e limítrofes. Nesta etapa ficou, pois, esclarecido que as metodologias clássicas e mais consistentes se apresentam na forma das tradicionais componentes de sequência e da proposta elaborada pela CIGRE.

Em seguida, foi apresentado o desenvolvimento analítico do equacionamento de especificação do compensador para uma carga genérica e desequilibrada. Estabelecida a formulação do processo de compensação e sua tradução em forma de equacionamentos tradicionais, chegou-se, por fim, às equações destinadas à parametrização dos componentes que perfazem o disposto explorado. Visando esclarecer aspectos aplicativos desses resultados, estes foram aplicados a uma situação típica passível de manifestação nas redes elétricas. A eficácia do compensador foi devidamente comprovada tanto quanto para fins do equilíbrio das correntes como também para a adequação do fator de potência da unidade consumidora considerada.

Foi também esclarecido, que a estratégia de compensação utilizada é aplicável tão somente à carga propriamente dita, visto que eventuais

desequilíbrios pré-existentes no barramento de suprimento fogem ao escopo das metas aqui estabelecidas.

Por fim, vale ressaltar que os procedimentos ora descritos se encontram atrelados com uma carga de características estáticas e constantes, fato este que destoa das condições reais encontradas em campo, quando os consumos, equilibrados e desequilibrados, apresentam-se com uma dinâmica própria do complexo elétrico suprido. Nessas condições, o emprego de um dispositivo mitigador à parâmetros constantes, embora sua eficácia ao processo da compensação de uma determinada carga desequilibrada, não se mostraria efetivo para situações outras que não a posta. Diante deste reconhecimento, surge a motivação para a busca de soluções que venham a contemplar a dinâmica operativa dos consumidores, conforme tratado a seguir.

Capítulo 3

Proposta de dispositivo para a compensação dinâmica dos desequilíbrios

3.1. Considerações iniciais

Não obstante a eficácia do dispositivo anteriormente focado, este como esclarecido, se mostra apropriado às aplicações de caráter idealizados por meio de cargas com características estáticas. Todavia, em vista das condições reais de operação das unidades consumidoras, que se apresentam com uma reconhecida dinâmica operacional, fica evidenciado que adequações do dispositivo explorado se fazem necessárias. Essa propriedade já se faz presente em outros recursos comercialmente oferecidos no mercado, a exemplo dos filtros ativos ou outros compensadores com características similares e fundamentados nos recursos oferecidos pela eletrônica de potência.

Muito embora tal reconhecimento da existência destes dispositivos, o fato é que, a busca por soluções que visem atender a requisitos de ordem econômica, simplicidade operacional, reduzida manutenção, dentre outros aspectos, implica que as pesquisas devem primar por tais horizontes. Nesse sentido, a adequação da tecnologia contemplada nesta dissertação, aliada a mecanismos eficazes de controle, naturalmente se apresenta como desafios importantes a serem investigados.

Visando, pois, compatibilizar a estratégia de compensação à componentes reativos à parâmetros fixos com as necessidades supra postas,

esse capítulo encontra-se imbuído do propósito de oferecer uma alternativa conciliando uma operacionalidade apropriada ao processo da compensação de desequilíbrios de cargas consumidoras com dinâmicas próprias.

3.2. Estratégia para a compensação dinâmica de desequilíbrios

Tendo como meta a compensação dinâmica de desequilíbrio utilizando elementos passivos, existem duas opções para tal: que os componentes sejam subdivididos e chaveados mecanicamente via disjuntores ou por meio de dispositivos eletrônicos.

A primeira hipótese se apresenta consonante com as técnicas tradicionais e emprega bancos de capacitores de vários estágios e disjuntores comandados por meio de um controle central que define o número de unidades capacitivas a serem inseridas ou retiradas da operação. Esse processo, entretanto, se apresenta com alguns inconvenientes, a exemplo do tempo de resposta, desgaste das chaves mecânicas, requisitos de manutenção, dentre outros.

Num outro plano surge o recurso das chaves estáticas eletrônicas, normalmente caracterizadas pelo emprego dos tiristores, visto sua escala de tensão e corrente disponível no mercado. Essa estratégia se mostra como uma efetiva forma comercial para fins de controle, a exemplo das aplicações caracterizadas por reatores controlados por tiristores (RCT) e capacitores chaveados por tiristores (CCT) [30], [31] e [32]. Naturalmente, outras tecnologias para o chaveamento eletrônico poderiam ser consideradas para os objetivos dessa pesquisa, todavia, diante do sucesso dos tiristores, esses dispositivos se apresentam como os recursos a serem aqui aplicados.

Voltando, pois, ao tratamento do dispositivo compensador de desequilíbrios em pauta, o emprego dos chaveamentos tiristorizados se apresentariam com as seguintes orientações:

- Em se tratando do reator, este, muito embora seja à parâmetro fixo, quando visto pela rede de suprimento, será visto como uma susceptância indutiva variável, em consonância com o controle do ângulo de disparo da chave eletrônica que o comanda;

- No que tange ao capacitor, também à parâmetros fixos, este se apresentará inserido ou desconectado por meio da chave eletrônica que o comanda, a qual opera sem variações do ângulo de disparo.

Essa concepção corresponde ao arranjo ilustrado na Figura 3.1. A definição pelo emprego de um elemento indutivo ou capacitivo, a ser empregado para os fins almejados, assim como seus valores, constituiu-se em tema explorado no capítulo anterior. Quanto ao princípio do processo de compensação dinâmico propriamente dito, como já mencionado, o controle das chaves eletrônicas do reator, por meio de ajustes de seus ângulos de disparo, irá ditar a combinação requerida e os valores das reatâncias, para cada situação operativa da carga desequilibrada.

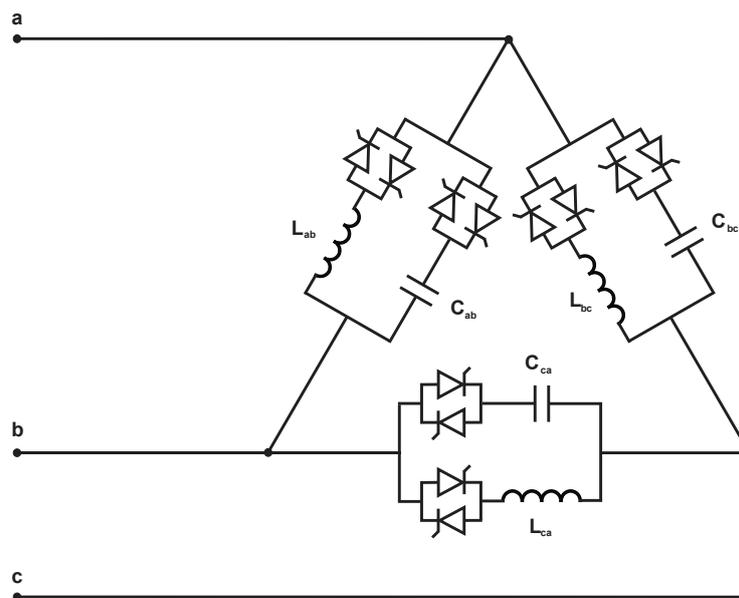


Figura 3.1 - Estrutura física do compensador dinâmico de desequilíbrios.

Diante do exposto, a lógica concebida para a atuação das chaves eletrônicas indicadas se apresenta nos seguintes termos:

- Para os capacitores, quando estes se fizerem necessário, será sempre utilizado um ângulo de disparo de 90° , como praticado nos clássicos dispositivos CCTs. Isto se justifica pela inserção do componente sem transitórios significativos. Também, em assim

procedendo, o capacitor se fará integralmente inserido ou estará totalmente fora de operação, como anteriormente mencionado;

- No que se refere aos reatores, estes serão controlados através de seus respectivos ângulos de disparo, os quais serão responsáveis pelas requeridas variações de suas susceptâncias vistas pela rede. Também, em sintonia com o princípio operacional dos RCTs, o campo de variação para o ângulo ora referido deverá estar entre $\alpha \geq 90^\circ$ até o limite de 180° . Para $\alpha = 90^\circ$ o reator estará com plena potência e com $\alpha = 180^\circ$ o mesmo se apresenta como se estivesse desconectado.

A Figura 3.2 ilustra formas de onda das tensões e correntes para os dois componentes supramencionados, a saber: o reator para um ângulo de disparo genérico e o capacitor para o disparo de 90° .

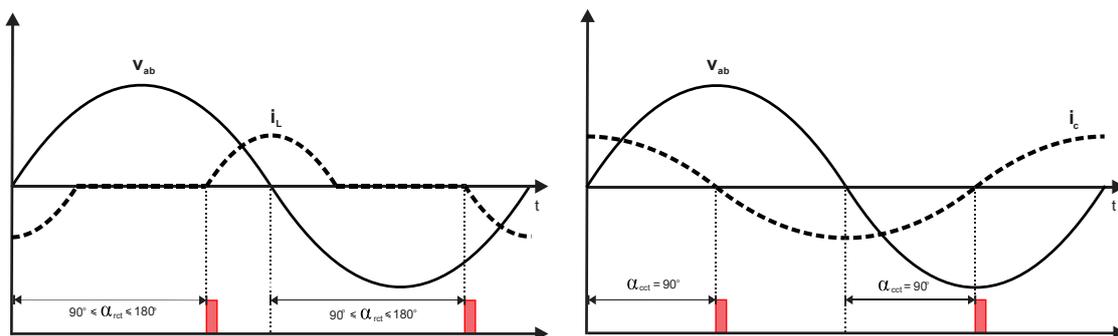


Figura 3.2 - Formas de onda das correntes e tensões das unidades indutivas e capacitivas, relacionadas com seus respectivos ângulos de disparo.

Observando-se a forma de onda da corrente do reator, constata-se que a mesma se apresenta com aspecto não senoidal, fato este que determina, mediante a aplicação da Série de Fourier, que a mesma possuirá uma componente fundamental e componentes harmônicas [33].

A componente fundamental, de acordo com a referência acima, é dada por:

$$I_{L_{\text{pico}}}(\alpha) = \frac{V_{\text{pico}}}{\omega L} \left(2 + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{\pi} - \frac{2\alpha}{\pi} \right) \quad (3.1)$$

Sendo:

- $I_{L_{pico}}$ – corrente fundamental do RCT, valor de pico para um ângulo de disparo genérico, e que resulta num valor eficaz I_L ;
- V_{pico} – tensão fase-fase nos terminais do equipamento, valor de pico;
- α – ângulo de atraso do disparo do tiristor, em radianos;
- L – indutância nominal do reator, calculada mediante a metodologia apresentada no capítulo 2. Este valor determina a máxima potência reativa passível para o reator, a qual ocorrerá com $\alpha=90^\circ$.

Do exposto segue que a potência reativa associada ao reator, para um ângulo de disparo genérico, pode ser representada como a seguir:

$$Q_{L_{i,j}}(\alpha) = B_{L_{i,j}}(\alpha) * V^2 \quad (3.2)$$

Onde:

- $Q_{L_{i,j}}(\alpha)$ – Potência reativa do reator inserido entre as fases i e j para um ângulo de disparo compreendido entre 90° e 180° ;
- $B_{L_{i,j}}(\alpha)$ – Susceptâncias entre as fases i e j ;
- V – Tensão eficaz aplicada aos terminais do RCT.

Com base nessas considerações fica evidente que, diante do controle das chaves eletrônicas, o reator, visto pela rede, se apresenta com uma susceptância variável e expressa pela Equação 3.3.

$$B_{L_{i,j}}(\alpha) = B_{L_{i,j}}(\text{máx}) * \left[2 + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{\pi} - \frac{2\alpha}{\pi} \right] \quad (3.3)$$

Sendo:

- α – ângulo de disparo do tiristor em radianos;
- $B_{L_{i,j}}(\text{máx})$ – susceptância máxima oferecida pelo reator com um ângulo de disparo $\alpha=90^\circ$;

- $B_{L_{ij}}(\alpha)$ – susceptância do reator para um ângulo de disparo genérico.

O processo supra esclarecido evidencia que, que um reator de valor fixo, é possível obter um componente equivalente variável, visto a partir da rede. Essa é a propriedade almejada para a obtenção de um compensador de desequilíbrios dinâmico, visto que, para cada requisito imposto pelo consumidor haverá, via medições e processamentos, a definição de um ângulo de disparo responsável por oferecer a susceptância indutiva requerida pelo método.

Por fim, em decorrência da forma de onda da corrente do reator, que pode se apresentar como não-senoidal, além da sua respectiva componente fundamental (acima empregada), a mesma irá também ocasionar o surgimento de componentes harmônicas, como previsto em [33], [34].

As correntes harmônicas se apresentam com as magnitudes definidas pela Equação 3.5. Quanto as ordens para as frequências harmônicas características, estas são dadas por: $n = 2k + 1$, onde $k = 1, 2, 3, \dots$. Portanto, são esperadas apenas as componentes ímpares.

$$I_{L_{pico_n}} = \frac{V_{pico}}{\omega L} \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{n \sin(\alpha) \cos(n\alpha) - \cos(\alpha) \sin(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right\} \quad (3.5)$$

Sendo:

- $I_{L_{pico_n}}$ - corrente harmônica de ordem n produzida pelo reator;
- V_{pico} – tensão de pico fase-fase;
- α – ângulo de disparo do tiristor;
- L – indutância plena do reator.

Com o objetivo de ilustrar a interdependência entre o valor eficaz da corrente fundamental e das respectivas componentes harmônicas com as variações do ângulo de disparo, a Figura 3.3 mostra o comportamento dessas grandezas. Como pode ser observado, para $\alpha=90^\circ$ a corrente fundamental se

apresenta num valor de 100% da nominal, enquanto que para $\alpha=180^\circ$ a mesma é nula.

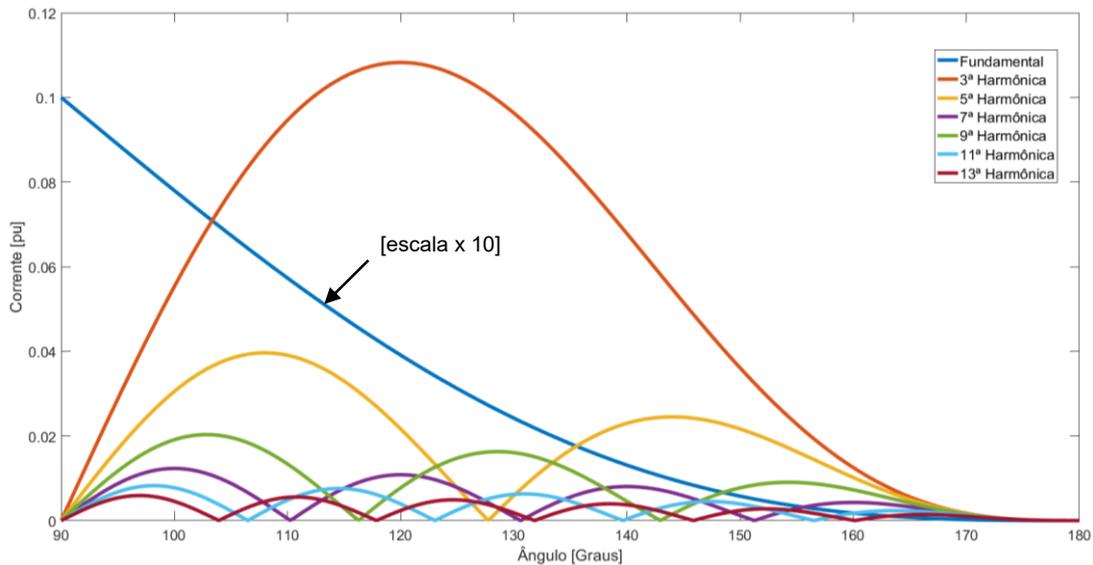


Figura 3.3 - Correntes fundamental e harmônicas de acordo com a variação do ângulo de disparo.

3.3. A concepção do sistema de controle do compensador dinâmico de desequilíbrios

A estrutura do sistema de controle destinado a cumprir os objetivos supra delineados se apresenta consonante com as seguintes etapas:

- Inicialmente procede-se a um conjunto de medições das potências ativas e reativas consumidas pela carga desequilibrada. Este banco de dados permitirá obter valores mais críticos quanto aos níveis de desequilíbrios e, nestes termos, serão definidas as potências reativas máximas das unidades reativas (indutores e capacitores), calculadas por meio das Equações 2.23, 2.24 e 2.25;
- Uma vez parametrizados os componentes que perfazem o compensador, situações outras que não as mais críticas, serão atendidas mediante o controle das chaves eletrônicas visando, para cada situação operacional do consumidor, proceder a requerida compensação dos desequilíbrios.

Tendo em vista que a realização das medições visando a determinação das potências máximas dos reatores e capacitores fogem ao escopo do controle propriamente dito, as descrições realizadas na sequência consideram que esta etapa já foi cumprida em atenção a um protocolo de medições pré-estabelecido.

Após auferidas as potências mais críticas para a carga, os valores das potências reativas nominais dos componentes que irão compor o compensador, por fase, são determinados das já citadas Equações 2.23, 2.24 e 2.25.

Uma vez definidas as potências reativas nominais das unidades componentes do dispositivo em pauta, os valores efetivos, para cada condição operativa do consumidor, serão definidos dentro da lógica sintetizada no fluxograma da Figura 3.4. Vale ressaltar que uma potência reativa positiva se constitui num fornecimento (predominância capacitiva). Também, é importante observar que a estrutura estabelecida é aplicável individualmente para cada fase do compensador.

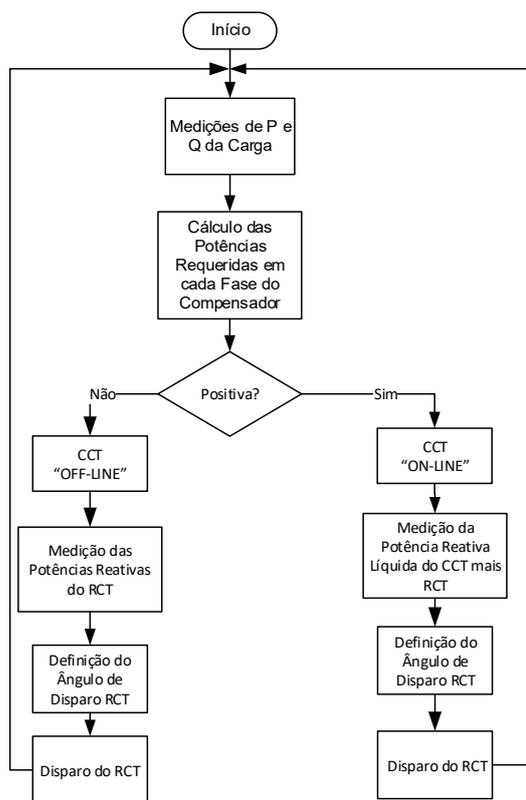


Figura 3.4 - Fluxograma da lógica de controle do compensador.

Como discutido, o ângulo de condução do elemento indutivo deve ocorrer entre 90 e 180 graus. Por tal motivo torna-se necessário limitar a atuação do

controlador, no caso um PI, a estes limites de atuação através de mecanismos de saturação, como indicado na Figura 3.5.

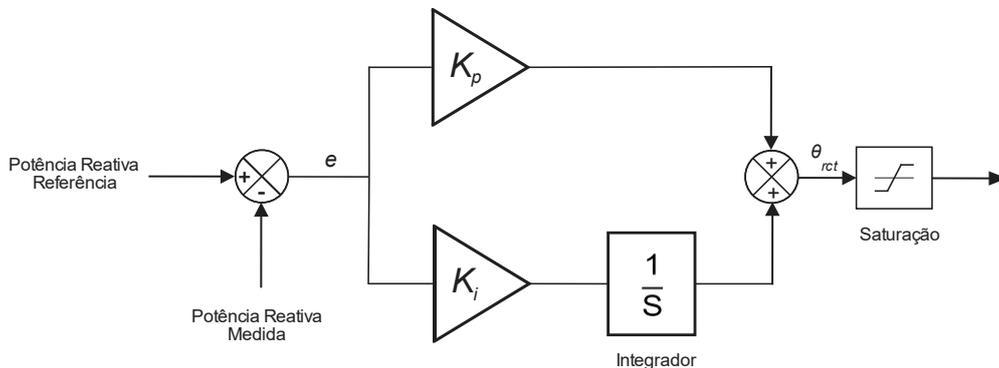


Figura 3.5 - Diagrama de blocos do controle proporcional-integral saturado.

Em suma, o controle proporcional-integral irá comparar a potência reativa que está sendo medida com o valor calculado e por meio disso promover a variação do ângulo de disparo, até que o erro entre essas duas grandezas esteja próximo de zero.

Complementarmente, há necessidade de meios que possibilitem determinar os ângulos das tensões para cada fase do sistema, objetivando, sobretudo, o estabelecimento das referências para os pulsos a serem utilizados para o disparo dos tiristores. Para isto, o recurso *Phase-Locked Loop* (PLL), comumente utilizado em casos onde o controle do conversor é baseado em controladores PI, foi empregado [35], [36].

A Figura 3.6 mostra esta questão do sincronismo entre a tensão aplicada na entrada do PLL e a resposta do mesmo, a qual corresponde a uma rampa com o valor instantâneo igual ao valor do ângulo da tensão amostrada.

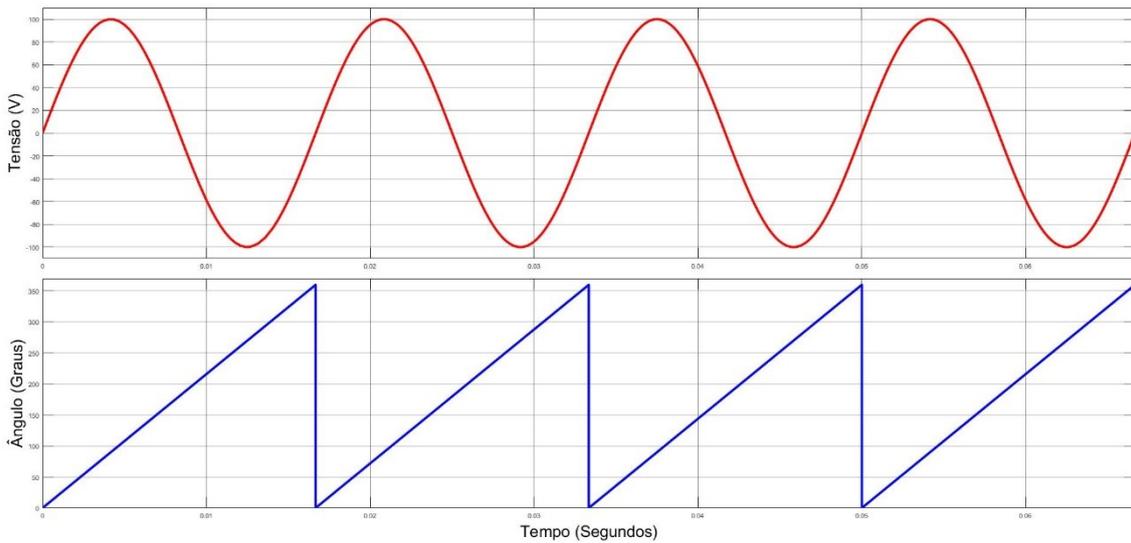


Figura 3.6 - Tensão de alimentação e resposta do PLL.

O controle PLL utilizado no presente trabalho de dissertação foi obtido por meio da biblioteca do próprio software utilizado para as implementações das propostas aqui feitas e dos estudos de desempenho, qual seja, MATLAB/SIMULINK.

3.4. Considerações finais

O presente capítulo foi centrado no estabelecimento das bases para o controle e operação do compensador de desequilíbrios visando o atendimento a situações dinâmicas operacionais. De fato, tradicionalmente, as referências bibliográficas que tratam a matéria em pauta primam pelo processo da compensação sob condições tais que as unidades consumidoras se apresentam com condições operativas estáticas, isto é, os níveis de desequilíbrios se mostram invariáveis no tempo. Naturalmente, esta situação é hipotética e a realidade das redes elétricas não se mostram consonantes com tais premissas.

Uma vez reconhecido que as situações em campo impõem uma dinâmica bastante acentuada, é natural que a busca por mecanismos de compensação que priorizem esta realidade seja imperativa.

Visando, pois, contemplar tais metas, foram apresentados os fundamentos de uma estrutura física de dispositivo, composto por indutores e

capacitores, devidamente controlados e chaveados por meio de chaves eletrônicas, as quais, como amplamente conhecido, possuem propriedades adequadas aos fins ora postos.

Feita tal proposição, os trabalhos avançaram no sentido do estabelecimento de uma lógica operacional para o controle do compensador, de forma a adequá-lo aos requisitos impostos pelas cargas. Para tanto, os fundamentos da técnica de controle e suas particularidades foram apresentadas de forma resumida, visto que a presente pesquisa não contemplou mecanismos de otimização de controle, mas tão apenas o emprego de recursos classicamente utilizados e disponibilizados nas bibliotecas de programas computacionais encontrados no mercado.

Por fim, vale observar que a estrutura estabelecida se mostra consonante com os recursos disponibilizados pela plataforma MATLAB/SIMULINK, fato este determinante para os direcionamentos dos trabalhos a este software. Neste foi implementada a filosofia de controle descrita, e tal ferramenta de estudos constitui-se a base para as investigações aplicativas consideradas a seguir.

Capítulo 4

Estudos computacionais de desempenho do compensador dinâmico

4.1. Considerações iniciais

O capítulo antecedente foi direcionado para explicitar os fundamentos matemáticos e as funcionalidades do equipamento em pauta. Feitas as considerações de ordem topológica, a modelagem e a lógica operacional da estrutura de controle, resta, para o momento, a avaliação do sistema como um todo. Para tanto procede-se, nesta unidade, a proposição de um complexo elétrico composto por cargas equilibradas e desequilibradas, em que pese o fato que esta última se apresenta com características variáveis ao longo do tempo. Com base nessas premissas é feito o dimensionamento de um compensador aplicável ao processo da mitigação dos desequilíbrios.

Os estudos computacionais de desempenho do arranjo completo é feito através do software SIMULINK visando a programação gráfica do sistema implementado.

4.2. Caracterização do sistema teste

Para a realização das investigações voltadas para a ratificação da eficácia da proposta, foi empregado um sistema elétrico hipotético. Esse se apresenta com uma topologia tipicamente radial, a qual alimenta um complexo formado por

cargas equilibradas e desequilibradas. O referido arranjo encontra-se indicado na Figura 4.1, a qual, além do alimentador e composição das cargas, ainda ilustra a presença do compensador de desequilíbrios focados nesta dissertação.

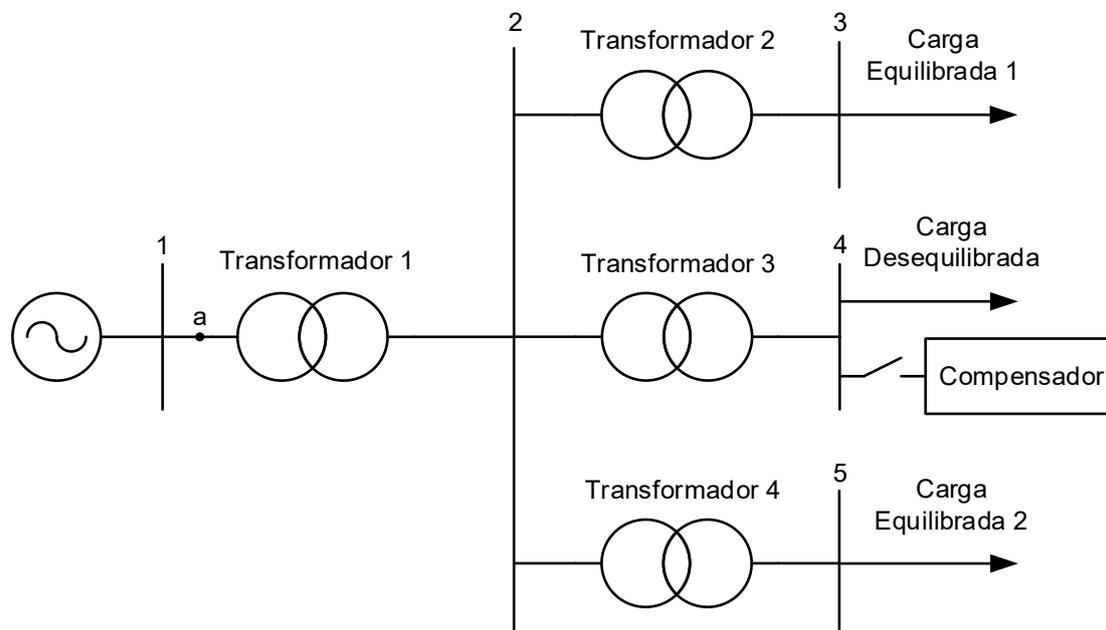


Figura 4.1 - Diagrama unifilar do sistema utilizado para os estudos de desempenho.

Os componentes que constituem o sistema utilizado e respectivas parametrizações são fornecidos na Tabela 4.1, salientando que informações são em valores percentuais, utilizam por base as grandezas nominais dos próprios equipamentos.

Tabela 4.1 - Dados dos equipamentos do sistema supridor.

Componentes	Parâmetros Correspondentes
Sistema Supridor	Tensão nominal: 69 kV Potência de curto-circuito: 100 MVA
Transformador 1	Relação de tensão: 69/13,8 kV Potência nominal: 15 MVA Resistência: 1% Reatância: 6% Ligação: Delta/Estrela Aterrado
Transformador 2	Relação de tensão: 13,8/4,16 kV Potência nominal: 6 MVA Resistência: 1,4% Reatância: 8% Ligação: Delta/Estrela Aterrado

Transformador 3	Relação de tensão: 13,8/0,44 kV Potência nominal: 6 MVA Resistência: 1,4% Reatância: 8% Ligação: Delta/Estrela Aterrado
Transformador 4	Relação de tensão: 13,8/4,16 kV Potência nominal: 5 MVA Resistência: 1,4% Reatância: 8% Ligação: Delta/Estrela Aterrado

Com objetivo de proporcionar as requeridas variações dinâmicas, a metodologia utilizada foi embasada em meros chaveamentos que proporcionam, em momentos distintos, incrementos e reduções dos níveis das cargas desequilibradas supridas. A lógica para tal foi aleatória e encontra-se sintetizada na Tabela 4.2. Complementarmente, a Tabela 4.2 apresenta, para cada situação empregada, os montantes de cargas desequilibradas que se fazem presentes para cada estágio do processo do chaveamento imposto. Vale destacar que, para fins desse trabalho, as cargas se apresentam com características de impedância constante.

Tabela 4.2 - Estágios da carga desequilibrada.

Estágios	Fases	Potências	
		P (kW)	Q (kvar)
1	AB	0,0	0,0
	BC	2090,0	600,0
	CA	0,0	0
2	AB	0,0	0,0
	BC	3135,0	1195,5
	CA	0,0	0,0
3	AB	1045,0	297,7
	BC	3125,0	1195,5
	CA	1045,0	297,7
4	AB	2090,0	600,0
	BC	0,0	0,0
	CA	1045,0	297,7

Por fim, a Tabela 4.3 fornece as cargas equilibradas que totalizam o consumo do sistema elétrico simulado.

Tabela 4.3 - Parâmetros das cargas equilibradas.

Cargas	Parâmetros Correspondentes
Carga Equilibrada 1	Tensão Nominal: 4,16 kV Potência Ativa: 4,881 MW Potência Reativa: 3 Mvar
Carga Equilibrada 2	Tensão Nominal: 4,16 kV Potência Ativa: 4,09 MW Potência Reativa: 1,5 Mvar

4.3. Estudos de desempenho

Como informado anteriormente, os trabalhos investigativos conduzidos nessa dissertação foram de cunho computacional e utilizaram como ferramenta de estudos o software Simulink/Matlab, com destaque a sua biblioteca *Simscape Power Systems*. Os resultados associados com a implementação do complexo elétrico utilizado são ilustrados na Figura 4.2.

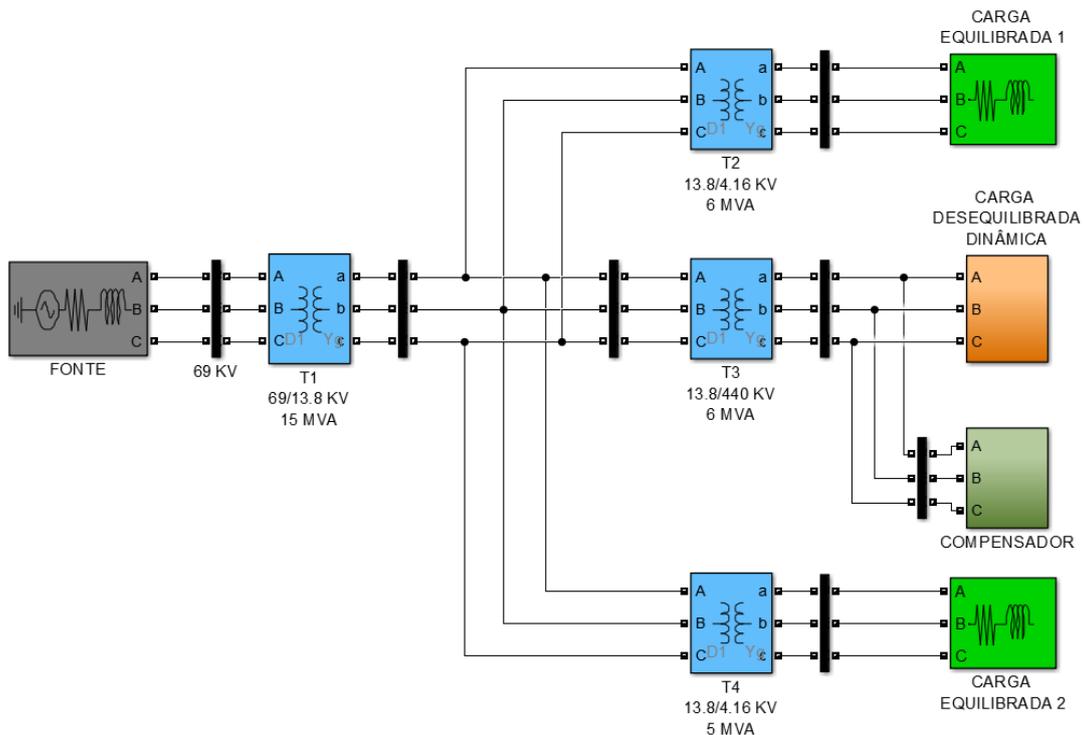


Figura 4.2 – Sistema elétrico para os estudos de desempenho - implementado no software Matlab.

Quanto ao bloco identificado como carga desequilibrada na Figura 4.2, de fato, a mesma se apresenta constituída com a composição detalhada na Figura 4.3. Essa mostra os estágios que proporcionam as variações dos consumos requeridos para fins da avaliação da eficácia dinâmica do compensador.

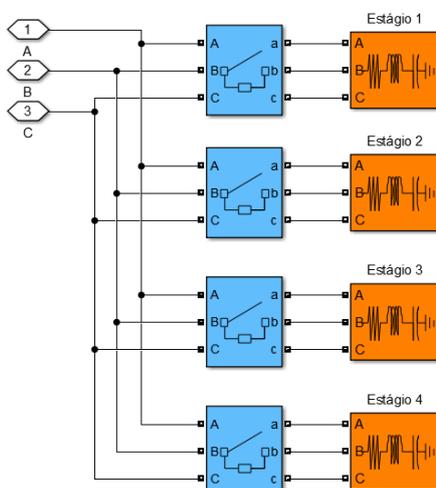


Figura 4.3 - Composição do bloco representativo da carga desequilibrada dinâmica.

A Tabela 4.4 detalha os estágios de carregamentos e respectivos momentos de comutação.

Tabela 4.4 - Tempo de comutação dos estágios de carregamento.

Estágios de Carga	Tempo (segundos)
1	0
2	0,6
3	1
4	1,3

Os parâmetros do compensador requeridos para a compensação dos maiores desequilíbrios encontram-se na Tabela 4.5. Estes foram determinados com base nas condições de compensação mais críticas impostas pela dinâmica das cargas. Adicionalmente, os componentes foram dimensionados visando ainda a operação do sistema com fator de potência unitário.

Tabela 4.5 - Potência reativa dos elementos do compensador.

Descrição	Potência Reativa (Mvar)
Reator	6
Banco de Capacitores	6

Vale ressaltar, que os parâmetros de potência podem ser dissemelhantes a depender do conhecimento da carga desequilibrada e da potência reativa necessária para a correção do fator de potência, conforme o especificado em circunstâncias de projeto.

No que se refere aos estudos propriamente ditos, estes, como informado acima, foram conduzidos à luz de imposições sucessivas de chaveamentos das cargas desequilibradas, em momentos específicos como já estabelecido. Os resultados ao longo do tempo total de estudos, que compreendeu um intervalo de 1,6s, contemplaram as seguintes grandezas:

- Apresentação do perfil do fator de desequilíbrio das tensões no barramento de 69 kV ao longo do tempo de estudos;
- As correntes de linha fornecidas pelo supridor em 69 kV;
- Fator de potência associado com a operação das cargas desequilibradas.

Também, os resultados indicados representam o desempenho do sistema diante da:

- Ausência do dispositivo de compensação de desequilíbrios;
- Presença do compensador.

4.3.1 – Resultados sem o dispositivo compensador

A Figura 4.4 mostra o comportamento do fator de desequilíbrio das tensões do barramento de 69 kV durante o tempo de estudo, sem a presença do compensador. É importante destacar que tais desequilíbrios encontrados para o barramento de suprimento são oriundos tão somente das cargas desequilibradas supridas, visto que a rede, propriamente dita, se apresenta originalmente equilibrada.

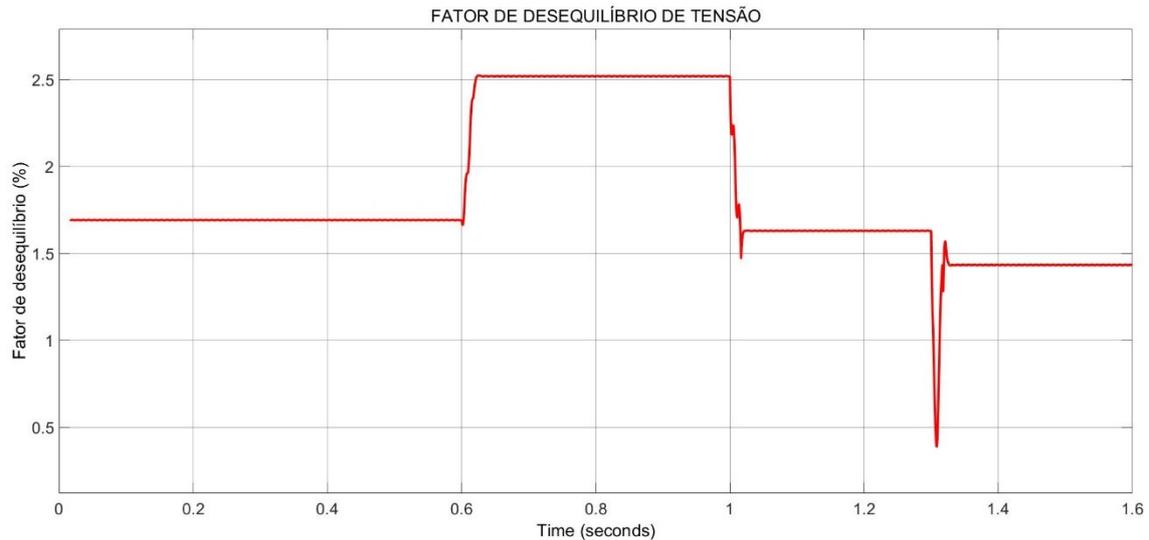


Figura 4.4 - Fator de desequilíbrio na barra 1 (69 kV) - sem compensador.

Conforme observado na Figura 4.4, apenas com o primeiro estágio de cargas desequilibras, este se apresenta em torno de 1,7%, aumentando para um patamar de 2,5% quando da entrada do segundo estágio de carga. Esse valor, como conhecido, já determina uma violação dos limites preconizados. Posteriormente, as novas cargas inseridas impõem fatores de desequilíbrios inferiores, os quais se encontram diretamente correlacionados com os chaveamentos impostos.

A Figura 4.5 evidencia a dissemelhança entre as correntes principais no barramento de suprimento, portanto em 69 kV, também associadas com os distintos níveis de cargas desequilibradas inseridas.

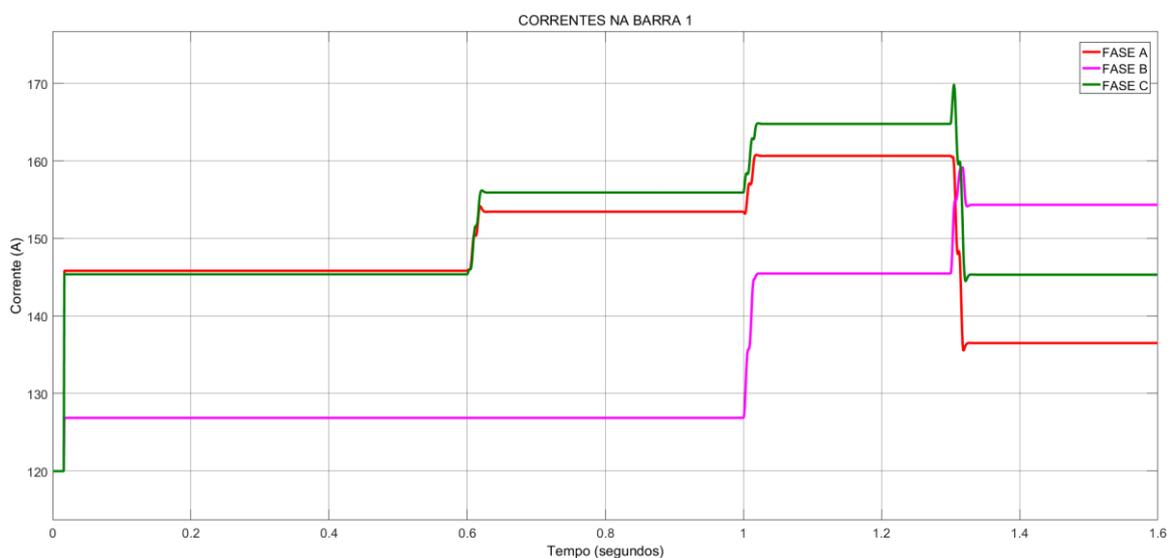


Figura 4.5 - Correntes de linha na barra 1 (69 kV) - sem compensador.

Por fim, a Figura 4.6 é indicativa dos valores do fator de potência atrelados com cada estágio das cargas desequilibradas utilizadas. Portanto, as grandezas excluem quaisquer influências das cargas equilibradas.

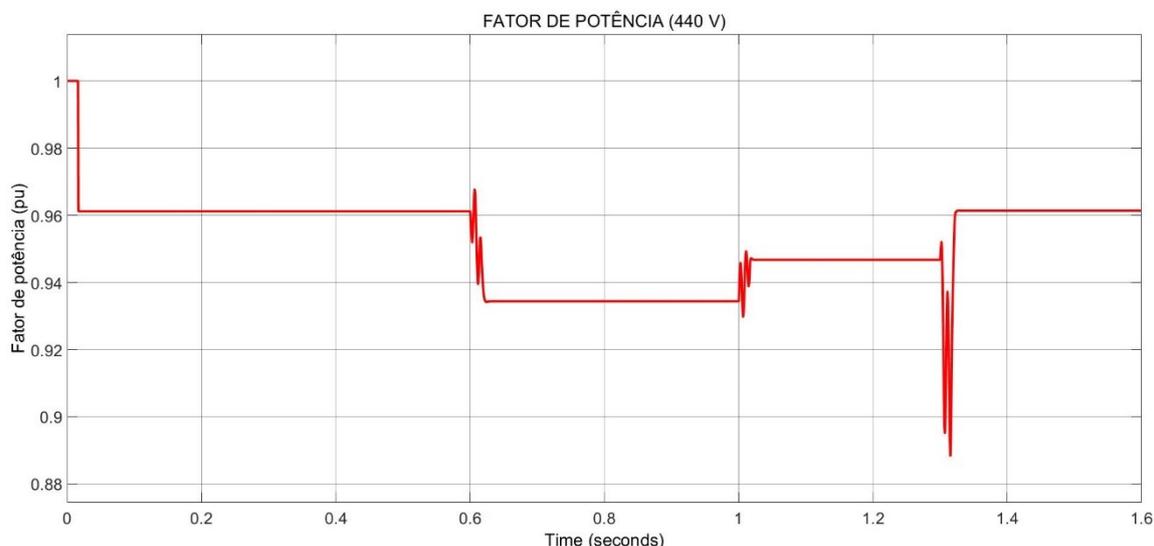


Figura 4.6 - Fator de potência da carga desequilibrada sem compensador.

4.3.2 – Resultados com a inserção do dispositivo compensador

Desta feita, as investigações do desempenho do complexo elétrico são feitas nos mesmos termos anteriormente empregados, todavia, considerando-se a presença do compensador de desequilíbrios dinâmico.

A Figura 4.7 evidencia o comportamento instantâneo do fator de desequilíbrio de tensão e comprova a atuação do compensador diante de variações de carga. Em consonância com a mesma estratégia já empregada, por meio da qual as cargas desequilibradas são dinamicamente alteradas por meio de seus respectivos chaveamentos, os resultados aqui apresentados deixam claro que, para nenhum caso, o fator de desequilíbrio ultrapassa, nas regiões estabilizadas, os valores limítrofes. Os níveis de desequilíbrios após a ação do compensador se apresentam inferiores a 0,1%.

Naturalmente, diante da necessidade de medições e do processamento das informações relacionadas com as potências consumidas, o que ocasiona atrasos no controle utilizado. Este fato justifica as regiões transitórias para as

quais os indicadores de desequilíbrios se apresentam superiores aos esperados. Com pode ser constatado, tais regiões de transição se apresentam com durações de cerca de 30 ms e, por tal motivo, tais desvios serão sempre desconsiderados quando do emprego dos conhecidos protocolos de medição para os indicadores de qualidade da energia elétrica [26].

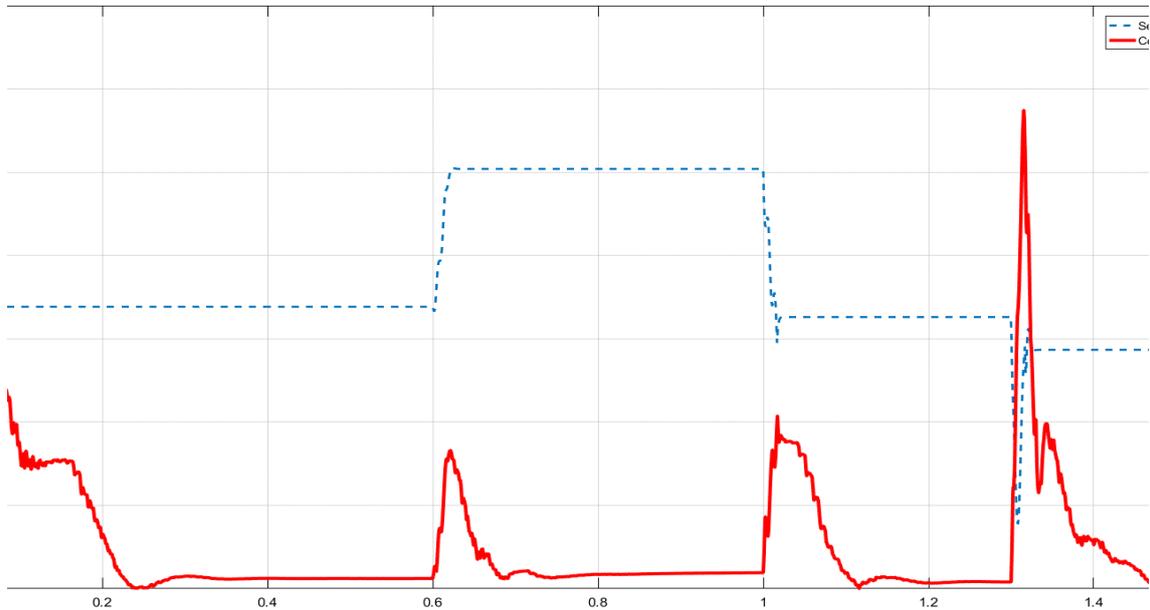


Figura 4.7 - Fator de desequilíbrio de tensão da barra 1 (69 kV) - com compensador.

Quanto as correntes de linha fornecidas pelo sistema supridor, estas se encontram indicadas na Figura 4.8. Os perfis mostrados evidenciam, com clareza, que tais grandezas se mostram com mesma magnitude, fato este que caracteriza o sucesso do processo de compensação implementado. Os transitórios observados são advindos do processo de controle implementado.

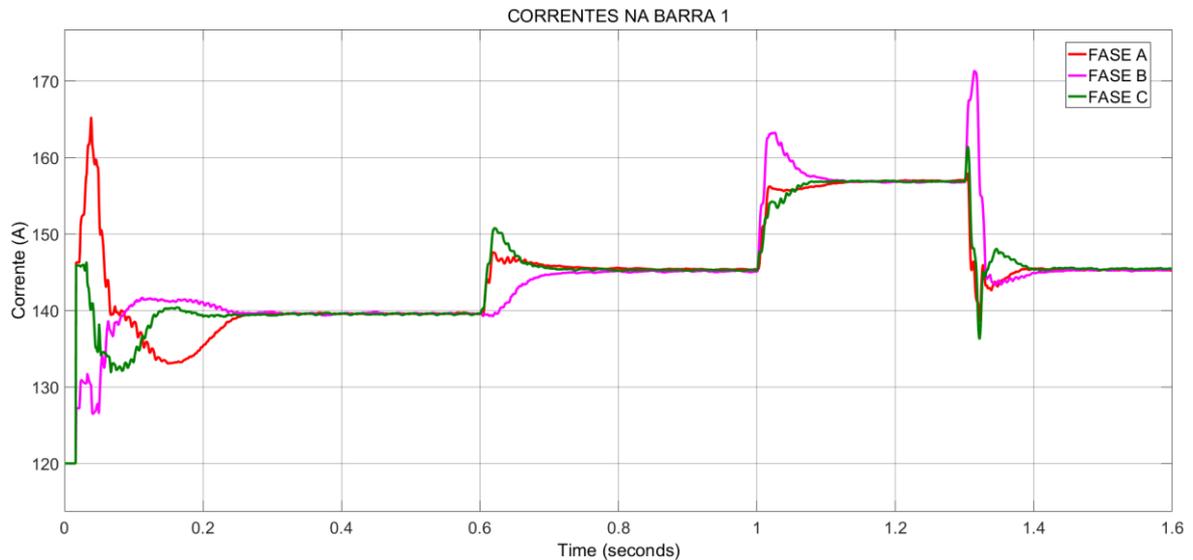


Figura 4.8 - Correntes de linha na barra 1 (69 kV) - com compensador.

No que tange ao fator de potência das cargas desequilibradas, tendo em vista que o compensador foi ajustado para o processo do equilíbrio das correntes em conjunto com um fator de potência unitário, constata-se, por meio da Figura 4.9 total eficácia da metodologia utilizada. As pequenas oscilações dos valores preconizados se devem, como já explorado, à resposta do sistema de controle.

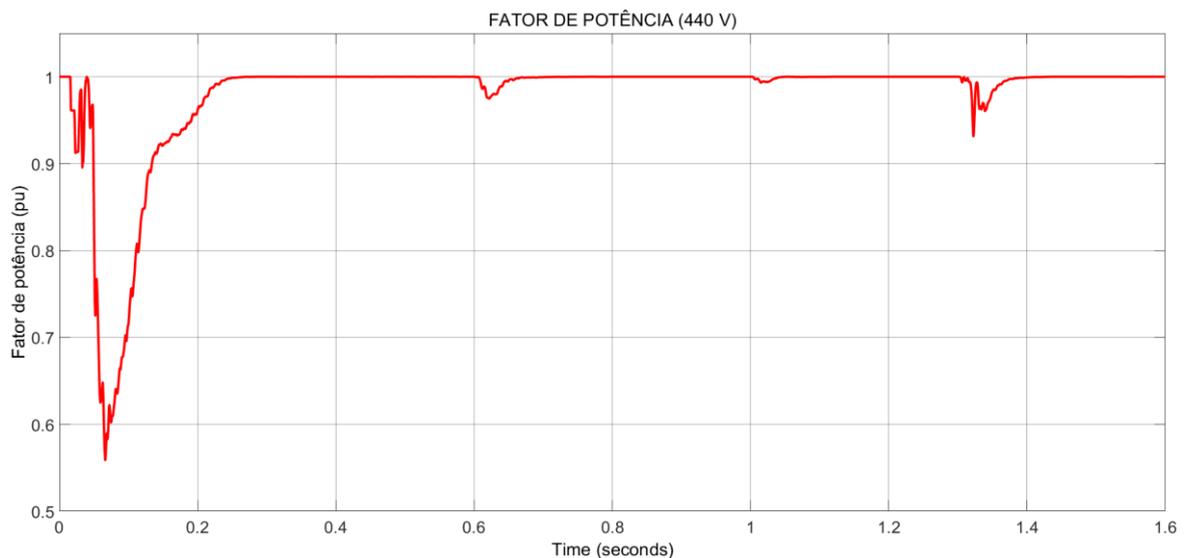


Figura 4.9 - Fator de potência da carga desequilibrada com o compensador.

Quanto as potências reativas requeridas do compensador, com destaque àquelas exigidas para as suas fases AB, BC e CA, estas, em atenção aos

princípios estabelecidos para o processo da regulação, se apresentam com valores distintos, conforme determinado pelos ângulos de disparo impostos para a unidade capacitiva e reativa.

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 são indicativas, para cada intervalo de tempo (distintos níveis de carga desequilibrada), as potências reativas requeridas e definidas pelo sistema de controle (valores de referência) e aquelas efetivamente vinculadas com o processo da compensação do desequilíbrio (valores medidos ou efetivamente manifestados). Facilmente podem ser identificadas situações para as quais a inserção dos capacitores (valor pleno) e também a atuação dos reatores (controlados pelos ângulos de disparo).

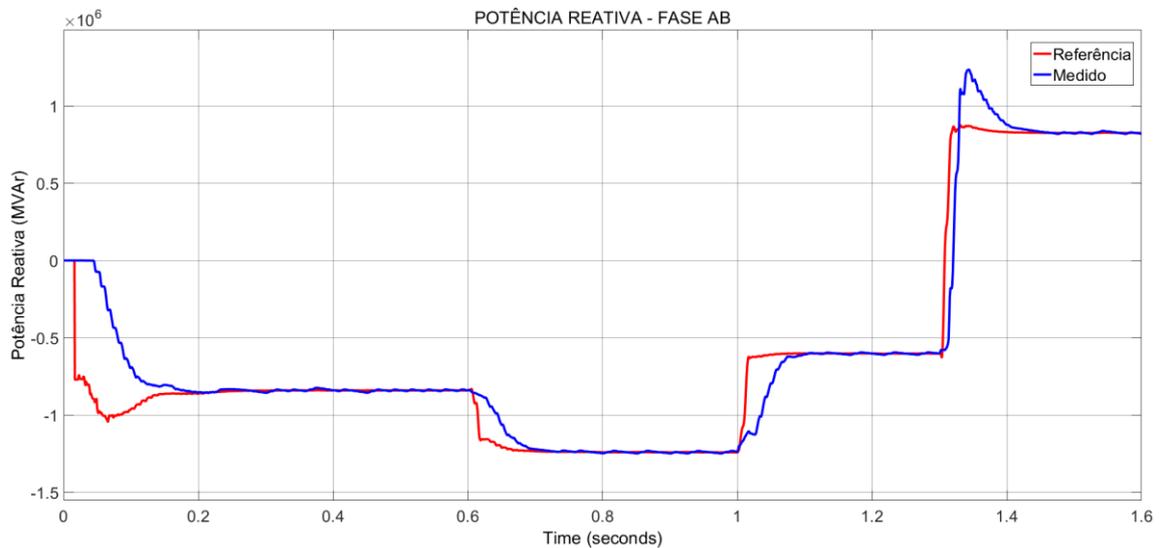


Figura 4.10 - Potências reativas de referência e medidas para a fase AB do compensador.

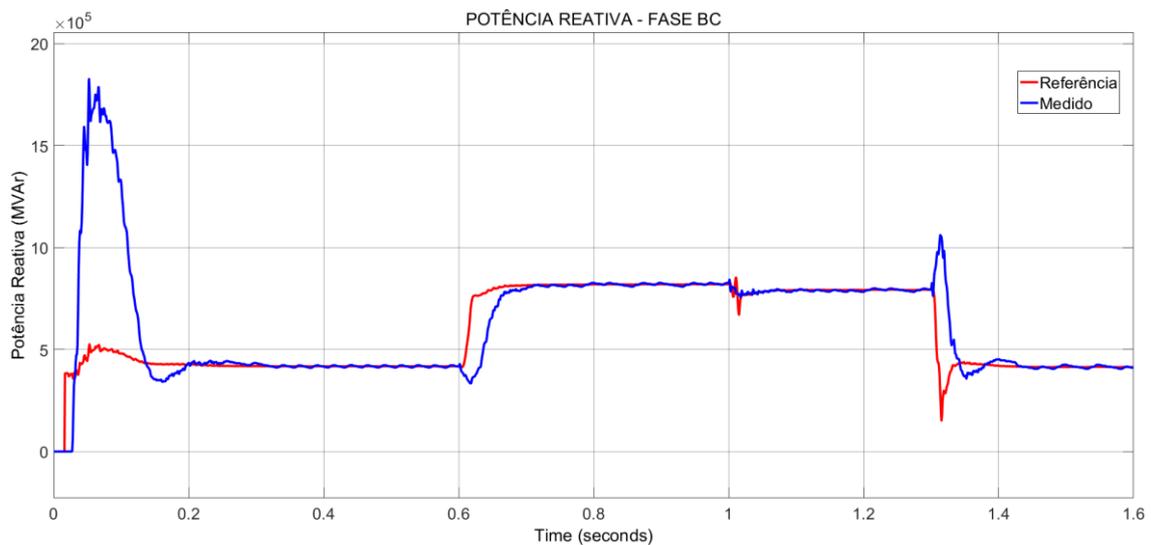


Figura 4.11 - Potências reativas de referência e medidas para a fase BC do compensador.

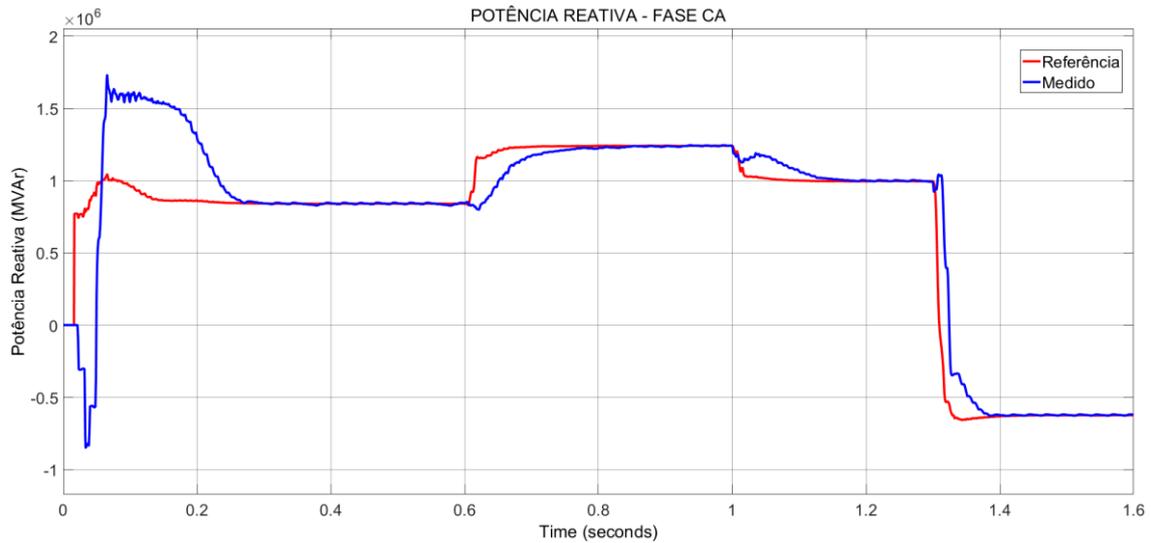


Figura 4.12 - Potências reativas de referência e medidas para a fase CA do compensador.

Por fim, a Figura 4.13 representa as variações impostas aos ângulos de disparo dos reatores controlados a tiristores, por fase. Como pode ser observado, para a maior parte do tempo, não se utiliza a potência plena destes componentes, os quais foram especificados para a situação mais crítica para a carga desequilibrada.

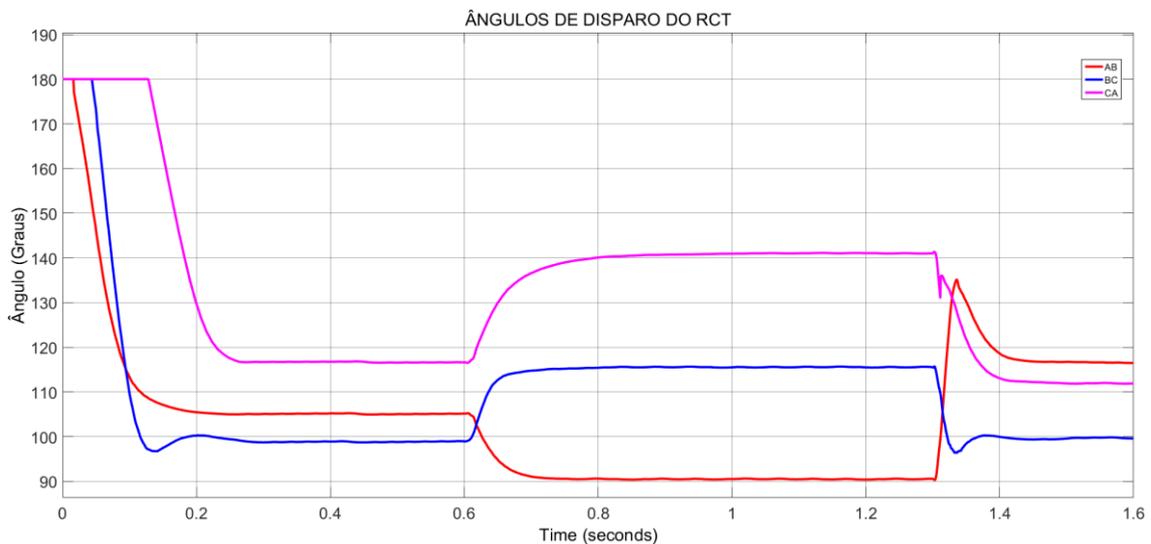


Figura 4.13 - Ângulos de disparo dos reatores controlados a tiristores – fases AB, BC e CA.

4.4. Efeitos Colaterais

Conforme supramencionado, os reatores controlados a tiristores são reconhecidos pela literatura como equipamentos responsáveis pela geração de correntes harmônicas, as quais, uma vez injetadas nas redes, podem impactar negativamente sobre o indicador de distorções harmônicas e causar efeitos sobre diversos equipamentos [33]. Esta questão foi devidamente considerada na seção 3.2 dessa dissertação.

Para o caso em estudo, a Tabela 4.6 fornece as distorções harmônicas individuais até a 9ª componente, assim como as distorções totais das correntes injetadas no barramento de 69 kV para cada estágio de desequilíbrio da carga. Muito embora não se tenha explicitada a composição harmônicas quanto as ordens presentes, vale aqui lembrar que os indicadores totais se apresentam constituídos das componentes ímpares, dentre as quais a dominante se apresenta como a 5ª harmônica. A de ordem 3, que possui maior magnitude por fase, não possui a mesma propriedade quando se considera as de linha, visto a conexão delta do compensador.

Tabela 4.6 – Distorções harmônicas individuais (até ordem 9) e totais das correntes no barramento de 69 kV.

Estágios	Fase A (%)					Fase B (%)					Fase C (%)				
	3ª	5ª	7ª	9ª	THD	3ª	5ª	7ª	9ª	THD	3ª	5ª	7ª	9ª	THD
1	0,95	0,16	0,03	0,03	0,97	0,90	1,95	0,28	0,04	2,16	0,22	1,81	0,31	0,01	1,84
2	1,73	0,13	0,03	0,02	1,74	1,45	0,59	0,05	0,00	1,57	1,1	0,66	0,05	0,02	1,29
3	0,45	0,09	0,03	0,01	0,46	0,24	0,91	0,09	0,02	0,94	0,48	0,91	0,06	0,01	1,03
4	0,43	1,51	0,14	0,05	1,57	0,75	1,21	0,11	0,03	1,43	0,92	0,29	0,04	0,02	0,97

Complementarmente, a Tabela 4.7 apresenta as distorções individuais de tensão (até a ordem 9) e as totais atreladas com a operação do compensador, no barramento de 69 kV, para cada estágio do desequilíbrio.

Tabela 4.7 - Distorções harmônicas individuais (até ordem 9) e totais das tensões no barramento de 69 kV.

Estágios	Fase A (%)					Fase B (%)					Fase C (%)				
	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	THD	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	THD	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	THD
1	0,54	0,15	0,04	0,05	0,57	0,51	1,86	0,37	0,07	1,96	0,13	1,71	0,4	0,02	1,76
2	1,02	0,13	0,04	0,03	1,04	0,87	0,59	0,08	0,01	1,09	0,66	0,66	0,06	0,02	0,95
3	0,29	0,09	0,05	0,03	0,31	0,15	0,99	0,13	0,03	1,01	0,31	0,99	0,1	0,02	1,04
4	0,26	1,49	0,20	0,08	1,53	0,45	1,2	0,15	0,05	1,29	0,55	0,29	0,05	0,04	0,62

Do exposto segue que as distorções harmônicas de tensão ficaram dentro dos limites regulamentados pelo PRODIST. Todavia, cabe aqui ressaltar que a situação ora explorada encontra-se associada com uma determinada aplicação do processo e os resultados obtidos encontram-se diretamente relacionados com este. Portanto, as constatações feitas não podem ser prontamente estendidas a toda e qualquer situação envolvendo a interação entre os dispositivos compensadores de desequilíbrios e respectivas redes de conexão.

4.5. Considerações Finais

O presente capítulo, como detalhado ao longo do texto, foi imbuído do propósito de explorar, de forma ilustrativa, a eficácia do dispositivo compensador focado nessa dissertação. Para tanto, os trabalhos foram iniciados com a caracterização topológica e paramétrica de um complexo elétrico hipotético e representativo de uma instalação industrial suprida em 69 kV e constituída por um conjunto de cargas equilibradas e desequilibradas. Essas últimas foram consideradas e inseridas em forma de blocos distintos, cada qual representando um nível de desequilíbrio variável. Nesses termos, foi estabelecida uma lógica dinâmica de alterações dos desequilíbrios impostos pelos carregamentos, os quais foram alvo do processo de regulação ao longo de momentos distintos.

O complexo elétrico, como um todo, incluindo o compensador de desequilíbrios proposto, foi então implementado computacionalmente no simulador SIMULINK/MATLAB, o qual se constitui como ferramenta básica para os estudos de desempenho aqui realizados.

Estudos conduzidos com a ausência do compensador foram inicialmente feitos e apresentados. Os resultados evidenciaram violações dos limites estabelecidos pelos agentes reguladores, fato esse determinante para o estabelecimento do processo de adequação, como proposto neste trabalho. Baseado nos desequilíbrios mais críticos foram parametrizados os elementos indutivos e capacitivos a serem empregados em conjunto com seus respectivos chaveamentos e controle eletrônicos.

Numa segunda etapa as investigações foram refeitas, todavia, considerando a presença do compensador, com a dinâmica de controle proposta e implementada no mencionado simulador.

Os resultados apresentados foram elucidativos sobre a eficácia do processo de compensação idealizado. De fato, por meio do controle dos ângulos de disparo dos tiristores de comando dos componentes passivos ficou evidenciada a potencialidade do dispositivo para a compensação de situações dinâmicas para as cargas componentes do complexo elétrico. Em complemento à ação do equilíbrio das correntes, é importante enfatizar que o equipamento proposto também se mostrou efetivo quanto à operação da carga desequilibrada com um fator pré-definido pelo usuário.

Como seria esperado, um aspecto negativo que foi devidamente ressaltado e explorado nos estudos refere-se à questão da geração de harmônicos de correntes quando do emprego do controle eletrônico do reator. De fato, este efeito não pode ser ignorado quando do emprego do dispositivo em pauta e, para o caso em questão, avaliações foram feitas e constataram a presença de distorções advindas do processo da compensação.

Vale, todavia, destacar que os trabalhos conduzidos primaram pela definição de uma rede de suprimento originalmente equilibrada. Estudos complementares evidenciaram que, como esperado, o dispositivo proposto se mostra consistente aos objetivos da compensação das cargas, e não de eventuais pré-desequilíbrios (*background voltage imbalance*) existentes na rede elétrica de suprimento.

Capítulo 5

Considerações finais

Este capítulo tem por meta sintetizar os principais aspectos abordados durante os desenvolvimentos relatados nessa dissertação, voltada para a questão do balanceamento de cargas desequilibrada e, por conseguinte, seus impactos sobre os níveis de desequilíbrios manifestados nos barramentos de suprimento, em consonância com os termos previstos pela legislação em vigor.

Tendo por meta o tema em pauta, o Capítulo 1 destinou-se a contextualizar questões associadas com: a natureza do fenômeno conhecido por desequilíbrios em redes trifásicas, as principais situações causadoras desses distúrbios, os seus impactos sobre as redes elétricas e seus componentes, os limites estabelecidos pelas agências reguladoras e, por fim, apresentou uma síntese geral sobre os procedimentos em prática, visando a mitigação dos desequilíbrios para adequação aos padrões requeridos nacionalmente e internacionalmente.

Avançando, o Capítulo 2 apresentou, de forma sistematizada, as metodologias para a quantificação do indicador de desequilíbrio das tensões e correntes. Muito embora a constatação que as estratégias baseadas no método CIGRE e das componentes simétricas tenham evidenciado grande correlação, esse último foi o procedimento adotado ao longo de todo o trabalho.

Ainda dentro deste capítulo, foram ainda considerados os fundamentos matemáticos destinados a estabelecer o equacionamento para a parametrização

dos componentes que perfazem um compensador estático de desequilíbrios, o qual, além do equilíbrio das grandezas trifásicas, ainda permitiu a definição de um fator de potência pré-definido pelo usuário. Objetivando ilustrar a aplicabilidade da metodologia, um estudo de caso foi realizado de forma analítica, e seus resultados ratificaram a eficácia do procedimento.

Muito embora o sucesso no processo da compensação estática dos desequilíbrios, a dinâmica operacional das redes elétricas orienta para que as estratégias de compensação primem, na prática, pelo reconhecimento e atuação diante de situações em que as cargas se apresentem com significativas variações no tempo. Diante disso surgiu a motivação para o cerne dessa dissertação, focada na proposição de um dispositivo dinâmico.

Assim, o capítulo 3 estabeleceu a proposição topológica do equipamento, à base de elementos passivos, ou seja, utilizando indutores e capacitores fixos, todavia, equipados com recursos de manobra e controle. Para consubstanciar essa proposta, modelagens matemáticas foram estabelecidas, as quais culminaram por oferecer as bases para a ação do controle almejada e, a partir desses fundamentos, foi estabelecida uma lógica e estratégia de controle com vistas a adequar a compensação às mais distintas condições operacionais impostas pelas cargas desequilibradas. Essencialmente, a proposta foi centrada na inserção plena de um capacitor, ou não, complementada pela atuação controlada de um reator. Por fim, aspectos outros relacionados com a geração de harmônicos pelo dispositivo foram ainda considerados, visto que tais distúrbios podem trazer impactos negativos sobre a rede.

Por fim o capítulo 4 foi direcionado a uma avaliação computacional da proposta feita. Para tanto, utilizando-se de uma rede elétrica hipotética, suprindo uma carga mista (equilibrada e desequilibrada), com comportamento dinâmico para sua parcela desequilibrada, foi utilizada para os fins aqui postos. Esse arranjo implementado no software SIMULINK/MATLAB, que foi a ferramenta utilizada para os estudos de desempenho.

Quanto aos estudos de caso propriamente ditos, esses foram subdivididos em dois grupos. Um primeiro constituído pela estrutura da rede e carga, com o comportamento dinâmico imposto à parcela desequilibrada, sem a presença do

dispositivo proposto. Numa segunda etapa, as investigações foram refeitas, todavia, diante da presença do dispositivo contemplado na proposição dessa pesquisa.

A eficácia do processo da compensação foi claramente evidenciada, ratificando, pois, a estratégia proposta quando a sua topologia, controle e desempenho dinâmico quanto ao processo da eliminação das correntes de sequência negativa associadas com as cargas desequilibradas. Também, ficou demonstrada a potencialidade do dispositivo no que tange a melhoria do fator de potência da carga ao valor requerido pelo usuário.

Um aspecto meritório de destaque e que foi devidamente ressaltado no texto refere-se ao campo de atuação do compensador. Este mostrou total eficácia quanto a atuação sobre os desequilíbrios gerados pelas cargas supridas, e não à rede de suprimento propriamente dita.

Quanto aos impactos do controle do reator sobre as distorções harmônicas, os estudos enfatizaram, para o caso em questão, que os fenômenos não se apresentaram de maior monta. Todavia, esse é um resultado particular para o estudo de caso feito, e não há como generalizar tal constatação.

Não obstante as contribuições oferecidas por esta dissertação, fica aqui registrado o reconhecimento que os trabalhos pertinentes ao tema são ainda merecedores de estudos complementares, afim do pleno domínio e aplicabilidade em campo da técnica aqui proposta. A exemplo desses novos horizontes de desafios ressalta-se, sobremaneira, a comprovação experimental dos modelos estabelecidos para a inclusão dos fenômenos associados aos desequilíbrios e estudos de viabilidade financeira.

Referências Bibliográficas

- [1] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, “Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST,” 1 Janeiro 2017. [Online]. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>. [Acesso em 18 Julho 2018].
- [2] L. S. Czarnecki, S. M. Hsu e G. Chen, “Adaptive Balancing Compensator,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, nº 3, pp. 1663-1669, 1995. doi: <https://doi.org/10.1109/61.400954>.
- [3] O. C. N. Souto, “Modelagem e Análise de Desempenho Térmico de Motores de Indução Sob Condições Não Ideais de Alimentação,” Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- [4] A. L. Ferreira Filho, “Análise do Comportamento do Fator de Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo de Tensão,” Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-024/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.
- [5] N. Mingpruk, U. Leeton e T. Kulworawanichpong, “Modeling and Simulation of Voltage Unbalance in AC Electric Railway Systems using MATLAB/Simulink,” em *International Symposium on System Integration*, Sapporo, Japan, 2016.

- [6] A. V. E. Flores, M. C. D. Tavares e C. M. J. Portela , “Análise da Correta Modelagem da Transposição em Linhas de Transmissão do Domínio da Frequência,” em *SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro, 2007.
- [7] J. Aramizu e J. C. M. Vieira, “Analysis of PV generation impacts on voltage imbalance and on voltage regulation in distribution networks,” em *Power and Energy Society General Meeting (PES)*, Vancouver, BC, Canada, 2013.
- [8] S. Bhagavathy, N. Pearsall, G. Putrus e S. Walker, “Performance assessment of a three-phase distribution network with multiple residential single-phase PV systems,” em *International Conference & Exhibition on Electricity Distribution*, Glasgow, UK, 2017. doi: <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.0805>.
- [9] E. Muljadi, R. Schiferl e T. A. Lipo, “Induction Machine Phase Balancing by Unsymmetrical Thyristor Voltage Control,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vols. %1 de %2IA-21, nº 3, pp. 669-678, 1985.
- [10] A. von Jouanne e B. B. Banerjee, “Assessment of Voltage Unbalance,” *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 16, nº 4, 2001. doi: <https://doi.org/10.1109/61.956770>.
- [11] M. M. Berndt e N. L. Schmitz, “Derating of polyphase induction motors operated with unbalanced line voltages,” *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III: Power Apparatus and Systems* , vol. 81, nº 3, pp. 680-683, 1962. doi: <https://doi.org/10.1109/AIEEPAS.1962.4501391>.
- [12] L. F. L. Arão, “Avaliação comparativa entre métodos para atribuição de responsabilidades devido ao desequilíbrio de tensão,” Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGEEDM-557/14, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

- [13] J. Li, G. Konstantinou, H. R. Wickramasinghe, J. Pou, X. Wu e X. Jin, "Impact of Circulating Current Control in Capacitor Voltage Ripples of Modular Multilevel Converters under Grid Imbalances," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. PP, pp. 1-9, 2017.
- [14] M. Ahmadpour, M. Sabahi, H. Hassanzadeh e E. Babaei, "Speed control of induction motor under unbalance network using vector control," em *14th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, Phuket, Thailand, 2017.
- [15] Operador Nacional do Sistema Elétrico, "Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de qualidade da energia elétrica da Rede Básica," 16 Dezembro 2016. [Online]. Disponível em: <http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. [Acesso em 18 Julho 2018].
- [16] IEC 61000-3-14, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-14: Assessment of emission limits for harmonics, interharmonics, voltage fluctuations and unbalance for the connection of disturbing installations to LV power systems," 2011.
- [17] IEEE Std. 1159, "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," 2009.
- [18] ANSI C84.1-2011, "American National Standard – For Electric Power Systems and Equipment – Voltage Ratings (60 Hertz)," 2011.
- [19] R. P. Broadwater, A. H. Khan, H. E. Shaalan e E. R. Lee, "Time varying load analysis to reduce distribution losses through reconfiguration," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, nº 1, pp. 294-300, 1993. doi: <https://doi.org/10.1109/61.180349>.
- [20] V. L. Martinez, J. M. Romeu e J. M. P. Garcia, "Unbalance Compensator for Three-Phase Industrial Installations," *IEEE Latin*

- America Transactions* , vol. 9, nº 5, pp. 808-814, 2011. doi: <https://doi.org/10.1109/TLA.2011.6030993>.
- [21] A. Campos, G. Joos, P. D. Ziogas e J. F. Lindsay, "Analysis and Design of a Series Voltage Unbalance Compensator Based on a Three-Phase VSI Operating with Unbalanced Switching Functions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, nº 3, pp. 269-274, 1994. doi: <https://doi.org/10.1109/63.311259>.
- [22] V. B. Bhavaraju e P. N. Enjeti, "An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, nº 2, pp. 287-292, 1996. doi: <https://doi.org/10.1109/28.491476>.
- [23] Z. Hanzelka e Y. Varetsky, "Negative-sequence active power stream as an index of unbalance source," em *11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*, Lisboa, Portugal, 2011.
- [24] L. T. Oliveira, R. C. F. Gregory e J. C. Oliveira , "A eficácia dos compensadores de desequilíbrios passivos frente às solicitações dinâmicas de cargas," em *XV Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica*, Uberlândia, MG, 2017.
- [25] C. Fortescue, "Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 37, nº 2, pp. 1027-1140, 1918. doi: <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1918.4765570>.
- [26] IEC 61000-4-30, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods, 3 ed., 2015, p. 146.
- [27] J. A. L. Ghijsselen e A. P. M. Van den Bossche, "Exact Voltage Unbalance Assessment Without Phase Measurement," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, nº 1, pp. 519-520, February 2005. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.841145>.

- [28] American National Standard (ANSI), “ANSI C84.1-2011 - American National Standard For Electric Power Systems and Equipment - Voltage Ratings (60 Hertz),” National Electrical Manufacturers Association (NEMA), 2006.
- [29] IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers, “IEEE Std 1159 - 2009 - Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality,” New York, NY, 2009.
- [30] J. C. Oliveira, A. B. Vasconcellos, R. Apolônio , M. K. Kawaphara, J. E. Carvalho e E. R. Junior , “Compensador Estático de Reativos Controlado a Tiristores: Modelagem e Simulação,” em *VII Conferência Brasileira sobre Qualidade de Energia - VII CBQEE*, Santos, São Paulo, 2007.
- [31] A. Ruszczuk, K. Koska e K. Janisz, “Solid-state switch for capacitors bank used in reactive power compensation,” em *XII International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Lagow, Poland, 2015.
- [32] G. Olivier, I. Mougharbel e G. Dobson-Mack, “Minimal Transient Switching of Capacitors,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, nº 4, pp. 1988-1994, October 1993. doi: <https://doi.org/10.1109/61.248312>.
- [33] G. N. Hingorani e L. Gyugyi, *Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, Wiley-IEEE Press, 1999.
- [34] A. von Jouanne, J. G. Rangel , P. Enjeti e W. Gray, “Harmonics generated by variable speed AC motor drives: Case studies,” em *PCIM Conference*, Nürnberg, Germany, 1994.
- [35] L. P. Moura, “Avaliação experimental do desempenho de unidades eólicas quanto à geração de distorções harmônicas,” Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

- [36] L. Hadjidemetriou, E. Kyriakides e F. Blaabjerg, "A New Hybrid PLL for Interconnecting Renewable Energy Systems to the Grid," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, nº 6, pp. 2709 - 2719, 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2265252>.
- [37] O. C. N. Souto, J. C. de Oliveira e L. M. Neto, "Induction motors thermal behaviour and life expectancy under non-ideal supply conditions," em *Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Orlando, FL, 2000. doi: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2000.896848>.
- [38] A. Greenwood, *Electrical Transient in Power Systems*, 2ª ed., John Wiley & Sons, 1991.
- [39] R. Grünbaum, "Facts for voltage control and power quality improvement in distribution grids," em *CIGRE Seminar 2008: SmartGrids for Distribution*, Frankfurt, 2008. doi: <https://doi.org/10.1049/ic:20080473>.