

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

RODRIGO ALESSANDRO NUNES DE OLIVEIRA

**COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS EM REDES TRIFÁSICAS A QUATRO
FIOS UTILIZANDO DISPOSITIVOS HÍBRIDOS**

Ilha Solteira
2017

RODRIGO ALESSANDRO NUNES DE OLIVEIRA

**COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS EM REDES TRIFÁSICAS A QUATRO
FIOS UTILIZANDO DISPOSITIVOS HÍBRIDOS**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia -
UNESP – Campus de Ilha Solteira, para a
obtenção do título de Doutor em Engenharia
Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Luis Carlos Origa de Oliveira
Orientador

Ilha Solteira
2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

- O48c Oliveira, Rodrigo Alessandro Nunes de.
Compensação de desequilíbrios em redes trifásicas a quatro fios utilizando dispositivos híbridos / Rodrigo Alessandro Nunes de Oliveira. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2017
102 f. : il.
- Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2017
- Orientador: Luis Carlos Origa de Oliveira
Inclui bibliografia
1. Compensação de desequilíbrios. 2. Reator controlado. 3. Dispositivos eletromagnéticos. 4. Arranjos híbridos.
-



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Ilha Solteira

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: Compensação de Desequilíbrios em Redes Trifásicas a Quatro Fios utilizando Dispositivos Híbridos

AUTOR: RODRIGO ALESSANDRO NUNES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. LUIZ FERNANDO BOVOLATO
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Prof. Dr. JULIO BORGES DE SOUZA
Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Profa. Dra. CAROLINA GOULART DE CARVALHO
./ Faculdades Integradas Urubupungá

Prof. Dr. GIULIANO PIERRE ESTEVAM
Departamento de Engenharia Elétrica / FATEC Araçatuba

Ilha Solteira, 08 de setembro de 2017

RESUMO

Em sistemas trifásicos de potência as tensões entregues pela fonte são senoidais, iguais em magnitude e com defasamento angular de 120° entre fases. Contudo, as tensões resultantes nos pontos de utilização podem ser desbalanceadas por diversas razões. A natureza do desbalanceamento inclui magnitudes, e/ou diferentes defasagens angulares, entre fases das tensões. Nos sistemas de distribuição de energia elétrica são encontradas as maiores causas para geração de desequilíbrios de tensão, devido à distribuição irregular de cargas por fase, as quais variam constantemente devido à inserção e/ou retirada das mesmas. Visando a implantação de dispositivos de compensação de desequilíbrios que utilizem o menor número de componentes eletrônicos, apresentem mecanismos de controle simplificados e que sejam menos sensíveis a distúrbios na rede elétrica, apresenta-se um arranjo topológico como contribuição original deste trabalho. Destaca-se que o arranjo proposto atende às prerrogativas preconizadas e nestas condições, vislumbra-se um desempenho operacional robusto e a custo reduzido quando comparado às demais estruturas de compensação em utilização.

Palavras chave: Compensação de desequilíbrios. Reator controlado. Dispositivos eletromagnéticos. Arranjos híbridos.

ABSTRACT

In three-phase power systems, the voltages delivered by the source are sinusoidal, has equal magnitudes and 120° angular phase difference between phases. However, the resulting voltages at the consumer points may be unbalanced for several reasons. The nature of the imbalance includes different magnitudes, and/or angular phase shift, between the phases of the voltages. In electrical power distribution systems, the greatest cause for voltage unbalances are due to the irregular distribution of loads per phase, which vary constantly due to the load insertion and/or removal. With the aim of implementing a unbalance compensation device that use the least number of electronic components, has a simplified control technique and are less sensitive to electrical network disturbances, a topological arrangement is presented as the original contribution of this work. It should be noted that the proposed arrangement meets the intended prerogatives and, under these conditions, it is possible to foresee a robust and low operational-cost performance, when compared to the other compensation structures already in use.

Keywords: Unbalance compensation. Controlled reactor. Electromagnetic devices. Hybrid topology.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
ANSI	American National Standards Institute
BE	Bloqueador Eletromagnético
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CENELEC	European Committee Electrotechnical Standardization
CIGRE	International Council on Large Electric Systems
FAP	Filtro Ativo Paralelo
FE	Filtro Eletromagnético
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
LQEE	Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
NER	National Electricity Regulator
PAC	Ponto de Acoplamento de Cargas
PQ	Power Quality
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PSIM	Power Simulator
RCT	Reator Controlado por Tiristores
SE	Supressor Eletromagnético
STATCOM	Static Synchronous Compensator
SVC	Static VAR compensator

SUMÁRIO

1	Introdução Geral.....	7
2	Desequilíbrios em Redes Elétricas.....	12
2.1	Principais Causas de Desequilíbrios nas Redes Elétricas.	12
2.2	Principais Consequências dos Desequilíbrios nas Redes Elétricas	13
2.2.1	<i>Máquinas Elétricas</i>	13
2.2.2	<i>Sistemas de Controle e Regulação de Tensão</i>	15
2.2.3	<i>Redes Elétricas</i>	15
2.2.4	<i>Equipamentos Eletrônicos</i>	15
2.3	Quantificação, Recomendações e Normas	16
2.4	Conclusões	21
3	Metodologias para Compensação de Desequilíbrios	23
3.1	Compensação em Sistemas Trifásicos a Três Fios.....	24
3.2	Correntes Compensatórias no Domínio do Tempo Para Três Fios	29
3.3	Compensação em Sistemas Trifásicos a Quatro Fios.....	31
3.4	Correntes Compensatórias no Domínio do Tempo Para Quatro Fios	34
3.5	Compensação de Desequilíbrios Baseada na Teoria PQ.....	34
3.6	Conclusões	39
4	Equipamentos Para Compensação de Desequilíbrios	40
4.1	Desequilíbrios em Redes Elétricas a Quatro Fios.	40
4.2	Compensação Utilizando-se Filtros Ativos	41
4.2.1	<i>Filtro Ativo de Quatro Braços</i>	41
4.2.2	<i>Filtro Ativo de Três Braços e Dispositivos Eletromagnéticos</i>	43
4.3	Compensação Utilizando Compensadores Estáticos.....	45
4.3.1	<i>Combinação de Dois Compensadores Estáticos</i>	45
4.3.2	<i>Compensador Estático e Dispositivos Eletromagnéticos</i>	46
4.4	Modelagem Teórica do Arranjo Proposto	48
4.4.1	<i>Reator Controlado Por Tiristores</i>	48
4.4.2	<i>Dispositivos Eletromagnéticos</i>	51
4.4.3	<i>Simulação Digital em Ambiente PSIM</i>	53
4.5	Conclusões	63
5	Dimensionamento, Projeto e Construção do Protótipo	64
5.1	Supressor eletromagnético	65
5.1.1	<i>Bloqueador eletromagnético</i>	65
5.1.2	<i>Filtro eletromagnético</i>	66
5.2	Compensador estático de reativos (SVC).....	68
5.2.1	<i>Reator controlado a tiristor (RCT)</i>	68
5.2.2	<i>Módulo gerador de sinais</i>	70
5.2.3	<i>Circuito de sincronismo com a rede</i>	73
5.2.4	<i>Driver para disparo dos tiristores</i>	76
5.2.5	<i>Ensaio experimental do RCT</i>	79
5.3	Conclusões	80
6	Estudos Experimentais	81
6.1	Plataforma Experimental.....	81
6.2	Procedimentos Experimentais	83
6.3	Resultados Experimentais	84
6.4	Conclusões	90
7	Conclusões Finais	91
8	Referências.....	95

1. INTRODUÇÃO GERAL

As redes elétricas atuais são, em sua maioria, originalmente concebidas como de natureza trifásica. Nestas condições, junto às fontes o sistema elétrico normalmente apresenta condições operacionais muito próximas às ideais, isto é, tensões trifásicas senoidais com amplitudes equilibradas e frequência constante, bem como defasagens angulares de 120 graus entre as diferentes fases.

Ocorre, entretanto, que ao longo das redes existe uma diversidade de cargas elétricas que apresentam particularidades quanto à sua forma de conexão às redes de suprimento elétrico, tais como fator de potência nem sempre dentro de valores considerados adequados pelas empresas de distribuição, formas de onda das correntes de alimentação distorcidas, grau de intermitência (conexões e desconexões não programadas), entre outros.

Particularmente, no tocante à forma de conexão, estas cargas podem ser de natureza monofásica, bifásicas ou trifásicas e podem absorver diferentes intensidades de corrente nas diferentes fases. Mesmo aquelas de natureza trifásica, em determinadas condições operacionais, podem também drenar correntes desequilibradas durante seu ciclo operacional. Diante de tais fatos, é razoável admitir que, de um modo geral, as redes elétricas normalmente operam com diferentes níveis de desequilíbrios nas correntes das fases que as compõe.

O impacto das correntes desequilibradas sobre as tensões depende naturalmente dos níveis de curto circuito nos diferentes pontos de acoplamento de comum (PAC). Quanto menor o nível de curto circuito, maior será a influência dos desequilíbrios das correntes sobre as tensões no PAC, podendo atingir proporções relevantes, a ponto de impactar os consumidores adjacentes. Considerando a topologia radial predominante nas redes elétricas, compreendendo a geração, transmissão e distribuição, é também fato incontestável que os desequilíbrios de tensão são mais notáveis nos extremos do sistema elétrico, ou seja, no seguimento da distribuição da energia e particularmente nas redes secundárias de baixa tensão.

Neste cenário, torna-se imprescindível o estabelecimento de limites toleráveis para os desequilíbrios de tensão pelas agências reguladoras. Caberá então às concessionárias deste serviço, implantar soluções, ou, em alguns casos, solicitar providências por parte do consumidor previamente identificado como responsável pela ocorrência, visando à minimização dos impactos aos demais consumidores.

Várias medidas reparadoras podem ser adotadas mediante uma análise prévia da forma de carregamento da rede. Dentre elas, destaca-se o remanejamento de cargas conectadas à rede, bem como a recondução de ramais de distribuição. Ocorre, entretanto que, devido principalmente às dinâmicas das cargas, estas providências muitas vezes não promovem o resultado almejado na sua plenitude.

Como alternativa, a solução para tais problemas pode ser alcançada com o uso de equipamentos auxiliares, referenciados como compensadores, para atuar em conjunto com as cargas e garantir a redistribuição equilibrada das correntes por fase de forma praticamente independente das condições de carregamento da rede e da dinâmica das cargas.

As metodologias para determinação das correntes de compensação são bastante conhecidas e, fundamentalmente, possuem duas vertentes principais. A primeira refere-se ao método baseado nas componentes sequenciais das correntes. Neste caso os requisitos de compensação são impostos a partir da hipótese de se produzir componentes compensatórias que anulem as componentes de sequências indesejadas produzidas pela carga desequilibrada. A segunda baseia-se na teoria das potências complexas instantâneas (teoria PQ), onde os requisitos de compensação estão atrelados à eliminação das potências reais e imaginárias oscilantes. De um modo geral, esta teoria não só produz resultados consistentes para o caso abordado neste trabalho, mas também é facilmente extensível a outros objetivos mais abrangentes, como, por exemplo, a eliminação das componentes harmônicas.

Por outro lado, independente da metodologia a ser utilizada para determinação das correntes compensatórias, normalmente, quando aplicadas a redes elétricas a quatro fios, requerem cálculos mais refinados que implicam em ações de controle mais sofisticadas. No caso da utilização do método das componentes simétricas, os requisitos de compensação são direcionados para a determinação de correntes compensatórias que anulem simultaneamente as componentes de sequências zero e negativas. No método PQ, além da nulidade das parcelas oscilantes das potências real e imaginária, torna-se necessário também a eliminação da potência instantânea de sequência zero.

1.1 O Estado da Arte

Para concretização das ações previstas nas metodologias de compensação descritas anteriormente, são utilizados equipamentos cujas principais premissas operacionais são: prover potência reativa indutiva e/ou capacitiva de forma contínua, ter controle independente

por fase, impactar minimamente as redes elétricas no tocante a consumo de potência ativa e geração de componentes harmônicas.

Para atender tais requisitos, vários arranjos têm sido testados e utilizados na concepção dos chamados compensadores de desequilíbrios. Entre eles destacam-se os compensadores estáticos (SVC), compensadores síncronos estáticos (STATCOM) e filtros ativos.

De um modo geral, todos se baseiam no uso de chaves eletrônicas, tais como tiristores, GTO's e IGBT's, e incorporam sistemas de controle que são concebidos a partir do uso extensivo de circuitos analógicos e digitais. Naturalmente são equipamentos que agregam um alto grau de complexidade de construção e demandam cuidados operacionais sendo, portanto, necessária a adoção de medidas de proteção normalmente implantadas não só fisicamente como também no software de controle. Estas características os tornam relativamente sensíveis a intercorrências nas redes e, portanto, toda implantação envolvendo equipamentos desta natureza deve ser conduzida com muito critério no sentido de garantir os objetivos tangíveis com segurança operacional.

Particularmente, quando se pretende adotar medidas de compensação em redes a quatro fios, que é o foco deste trabalho, mais alguns desafios são impostos. Como as redes com esta topologia normalmente estão disponíveis nos ramais de baixa tensão, os níveis admissíveis de investimento em equipamentos de compensação e demais custos operacionais associados, são proporcionalmente menores quando comparados aos seguimentos de distribuição primária e transmissão de energia. Diante destes fatos, alguns trabalhos acadêmicos (AFONSO et al., 2001, 2005, 2006; BELCHIOR et al., 2006; CZARNECKI, 1994; FREITAS, 2004; FREITAS, 2014; GYUGI, 1976, 1978; JOU, 2008; LINDEKE, 2003; MORAIS, 2008; OLIVEIRA, L. et al., 2000a, 2000b, 2004; OMORI, 2007; PREGITZER et al., 2006; RIBEIRO, 2003; SINGH, et al., 1999; TEODORO, 2005; VENDRAMINI, 2006) são conduzidos no sentido de propor arranjos alternativos, (ativos, passivos e híbridos) para compor equipamentos de compensação com vista, principalmente, à redução dos custos de implantação, flexibilidade, baixo custo operacional, bem como robustez.

Neste cenário se concretiza a proposta deste trabalho, que têm como contribuição original a avaliação conceitual (prova de conceito) de uma proposta de equipamento de compensação para ser utilizado em sistemas a quatro fios a partir de um arranjo híbrido de elementos passivos (eletromagnéticos) e ativos (reatores controlados a tiristores, RCT). Visando redução dos custos de implantação, a proposta contempla o uso reduzido de chaves eletrônicas, optando por aquelas com tecnologia mais simples e mais difundidas no mercado,

com a topologia de um SVC. No tocante a redução dos custos operacionais tem-se como premissa a incorporação de um dispositivo com controle autônomo e baseado em elementos passivos e robustos, neste caso um filtro eletromagnético. O aumento da flexibilidade operacional é proporcionado pela ação conjunta dos dispositivos utilizados no arranjo híbrido, pois além de possuir um sistema de controle mais simples, ainda pode se manter parcialmente operante, mediante ocorrências relacionadas a falhas de operação da etapa ativa.

1.2 Organização da tese

Para o desenvolvimento desta tese, o assunto em pauta foi abordado ao longo de sete Capítulos, cujos conteúdos são apresentados a seguir.

No Capítulo 1 apresenta-se uma introdução geral, abordando a constituição física das redes de energia elétrica e suas principais propriedades. São abordadas questões relacionadas com o aparecimento de desequilíbrios de tensões e correntes, bem como as medidas corretivas normalmente adotadas para minimiza-las. A proposta e a originalidade no uso de um equipamento de compensação são apresentadas conceitualmente e discutido em um contexto comparativo.

No Capítulo 2 abordam-se os conceitos e definições relacionados aos desequilíbrios nas redes elétricas e formas de quantificação. São apresentadas suas principais causas e consequências para os equipamentos conectados às redes. As normas e regulamentações vigentes relevantes são comentadas e discutidas comparativamente no tocante a formas de quantificação e limites admissíveis vigentes.

As metodologias mais utilizadas para determinação das correntes compensatórias são apresentadas no Capítulo 3. No final deste capítulo, destacam-se as principais características de cada metodologia abordada com destaque para suas particularidades com relação às suas implantações em software e requisitos de hardware.

No Capítulo 4 destacam-se os principais equipamentos utilizados como compensadores de desequilíbrios, suas topologias, abrangências operacionais, flexibilidades e limitações. São discutidas, sob um cenário comparativo, as relações de custos de implementação e custos operacionais envolvendo os diferentes arranjos convencionais. Na sequência, apresenta-se conceitualmente o arranjo híbrido proposto neste trabalho, enfatizando sua originalidade, bem como suas principais vantagens e desvantagens com relação às demais estruturas previamente descritas.

O projeto e dimensionamento de um protótipo do equipamento de compensação proposto são tratados no Capítulo 5. Inicialmente discute-se o arranjo físico e as respectivas especificações de suas partes constituintes, notadamente o SVC e o filtro eletromagnético. Os circuitos eletrônicos para controle e acionamento das chaves são apresentados abordando suas especificidades e características. O capítulo é finalizado com a apresentação dos resultados dos ensaios experimentais envolvendo as características operacionais do protótipo.

O Capítulo 6 é dedicado aos estudos teóricos e experimentais envolvendo o desempenho operacional do protótipo construído. Inicia-se pela discussão dos resultados obtidos por meio de simulação digital em ambiente PSIM (*Power Simulator*), envolvendo o dispositivo proposto e apresentação dos resultados tangíveis na compensação de desequilíbrios na rede simulada. Em seguida aborda-se a constituição física da plataforma experimental destinada à análise do comportamento do protótipo. São colhidos vários resultados experimentais envolvendo a compensação de vários tipos de desequilíbrios, entre os quais alguns são selecionados para ilustrar o desempenho do protótipo, sobretudo no tocante à comprovação de sua aderência conceitual.

Finalmente, apresentam-se no Capítulo 7 as principais conclusões extraídas durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como algumas sugestões e/ou recomendações para a continuidade do tema, tendo em vista as dificuldades encontradas nesta proposta original.

2. DESEQUILÍBRIOS EM REDES ELÉTRICAS

Em sistemas trifásicos de potência as tensões geradas são senoidais e iguais em magnitude com defasamento de 120° . Contudo, as tensões resultantes nos sistemas de potência na distribuição final e no ponto de utilização podem ser desbalanceadas por diversas razões. A natureza do desbalanceamento inclui magnitudes diferentes de tensão no sistema de frequência fundamental, desvio do ângulo de fase das componentes fundamentais e diferentes níveis de distorção harmônica entre as fases.

O grau de desequilíbrio é definido de um modo geral pela relação entre o módulo da tensão de sequência negativa e o módulo da tensão de sequência positiva. Este entendimento está baseado no fato de que um conjunto trifásico de tensões equilibradas possui apenas componentes de sequência positiva, enquanto que na situação desequilibrada, componentes de sequência negativa e zero se fazem presentes. Para as formulações de definição do nível de desequilíbrio, ou fator de desequilíbrio, utilizando componentes simétricas são considerados apenas os valores para a componente de sequência negativa, pois esta é a mais apropriada no caso de possíveis interferências em equipamentos conectados ao sistema, (DUGAN, 2003).

2.1 Principais causas de desequilíbrios nas redes elétricas

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica verifica-se a maior causa dos desequilíbrios de tensão devido à distribuição irregular de cargas por fase, que varia constantemente ocasionada pela inserção e/ou retirada de cargas.

Na transmissão, a causa mais relevante para desequilíbrios está relacionada com a distribuição das fases ao longo de grandes trechos das linhas com irregularidades em sua transposição.

Outro ponto importante a ser citado é o emprego excessivo de transformadores monofásicos, o que é comum para as concessionárias que utilizam sistema de distribuição primária a quatro fios com o neutro aterrado, sendo que em cada fase é conectada um transformador monofásico para suprir cargas monofásicas como residências e iluminação pública. Variações nas cargas monofásicas fazem com que as correntes nos condutores das três fases sejam diferentes, o que resulta em quedas de tensões diferentes, provocando desequilíbrio.

Anomalias encontradas no sistema são também causas importantes de desequilíbrios e podem representar níveis de até 5%.

Entre elas destacam-se as falhas na isolação de equipamentos, aberturas de condutores ou a abertura de fusíveis em uma das fases de um banco de capacitores.

Mesmo equipamentos trifásicos podem apresentar algum grau de desequilíbrio individual que pode contribuir para o aumento dos desequilíbrios globais de uma rede ou sistema elétrico. Um exemplo de equipamento desequilibrado é um motor com a impedância desbalanceada, devido ao aumento de aquecimento não homogêneo do estator.

Na magnetização dos transformadores trifásicos, a corrente de magnetização se diferencia de uma fase para outra devido à diferenças magnéticas encontradas na sua própria construção. Nestas condições, quando a conexão é do tipo estrela, com neutro isolado, as tensões de fase se apresentam sensivelmente desbalanceadas, fato que é minimizado caso o secundário seja tipo triângulo.

Os fornos elétricos trifásicos a arco, devido à alta potência processada, são as principais fontes de desequilíbrio nas redes elétricas. Durante o processo de fusão e refino, a carga elétrica equivalente provoca diferentes carregamentos entre as fases, originando altas correntes desequilibradas que, normalmente, provocam grandes desequilíbrios nas tensões ao longo do sistema elétrico industrial, (DUGAN, 2003).

2.2 Principais consequências dos desequilíbrios nas redes elétricas

Em vista da possibilidade da ocorrência de uma alimentação trifásica desequilibrada, devem-se avaliar as consequências desta na operação dos diversos componentes que constituem as redes elétricas (IEEE, 1993).

2.2.1 Máquinas elétricas

Para máquinas elétricas destacam-se, inicialmente, o caso dos motores elétricos que, devido ao grande número existente e sensibilidade à sequência negativa, são os primeiros a serem considerados.

Quando tensões de fase desequilibradas são aplicadas aos terminais de um motor trifásico, aparecem correntes de sequência negativa adicionais circulando no motor, aumentando as perdas por calor primeiramente no rotor. A condição mais severa acontece quando uma fase é aberta e o motor desenvolve potência monofásica.

É fato conhecido que a impedância de sequência negativa dos motores é bastante inferior à correspondente impedância de sequência positiva. Assim sendo, para um determinado nível de tensão de sequência negativa, a corrente que se estabelece através dos enrolamentos do motor pode ser altamente prejudicial ao mesmo.

Fisicamente, sabe-se que a impedância de sequência negativa é da mesma ordem de grandeza da impedância de rotor bloqueado de um motor, ou seja, a impedância de sequência negativa é cerca de 1/5 a 1/10 da impedância normal a plena carga. Disto resulta que a corrente de sequência negativa é cerca de 5 a 10 vezes maior para a tensão de sequência positiva, em pu. Como resultado deste fato, o motor experimentará aumentos de temperatura como aqueles ilustrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Efeitos do Desequilíbrio de Tensões na Temperatura de Motores.

Fd (%)	I₂ (%)	Δ (°C)
0.0	0	0
2.0	15	5
3.5	27	15
5.0	38	30

Fonte: Adaptado de IEEE TASK FORCE, 1993.

É interessante observar que, para um motor apresentando uma corrente de partida de 7 vezes a corrente nominal, caso o fator de desequilíbrio da tensão ultrapasse 14%, o motor, a vazio, já atingirá sua temperatura de operação à plena carga.

Adicionalmente, as correntes de sequência negativa causam torques eletromagnéticos que agem no sentido de frear o motor. Todavia, dentro dos níveis de desequilíbrios normalmente encontrados tal efeito é relativamente pequeno.

Todos os motores são sensíveis aos desequilíbrios nas tensões de fase, mas os compressores herméticos usados em condicionadores de ar são mais susceptíveis a esta condição. Estes motores operam com altas densidades de corrente nos enrolamentos devido ao efeito adicional de resfriamento da refrigeração. Assim, um pequeno incremento nas perdas por calor devido à circulação adicional de correntes, causada pelo desequilíbrio nas tensões de fase, terá um grande efeito sobre compressor hermético.

Da mesma forma com que os motores são afetados, os geradores são igualmente influenciados e, por este motivo, os níveis de desequilíbrio devem ser limitados. Os geradores modernos apresentam baixa tolerância quanto aos níveis de correntes de sequência negativa.

2.2.2 Sistemas de controle e regulação de tensão

Dispositivos para o controle e regulação de tensão responderão indevidamente se as tensões se apresentarem desequilibradas. Já se registrou a ocorrência em que o equipamento regulador de tensão elevou a tensão quando, de fato, deveria reduzi-la (IEEE, 1993).

2.2.3 Redes elétricas

O carregamento desbalanceado de redes trifásicas ocasiona aumento das perdas nas linhas e no complexo elétrico como um todo. Estas perdas não apenas resultam em gastos financeiros indevidos, como também, implicam em redução das potências úteis disponíveis de linhas e equipamentos.

Como exemplo extremo de carregamento desequilibrado e indevido, caso uma linha trifásica entregue toda a potência como uma potência monofásica, sem utilizar o condutor central, as perdas seriam dobradas, (DUGAN, 2003).

2.2.4 Equipamentos eletrônicos

Os efeitos das redes desequilibradas sobre a operação de equipamentos eletrônicos de potência são também igualmente importantes. Como exemplo disto cita-se o caso de retificadores supridos por tensões trifásicas desbalanceadas. Sabe-se que, se um retificador é alimentado por um sistema de tensões balanceadas e senoidais, a tensão de saída deve ser eficientemente filtrada de modo a garantir, para muitas aplicações, uma tensão CC com baixo nível de flutuação. Entretanto, sob a ação de uma alimentação desbalanceada, as ordens e níveis de harmônicos presentes na tensão resultante ficam substancialmente incrementados. Do lado CC o componente harmônico adicional e dominante é o de 2ª ordem, ou seja, um sinal de 120 Hz, independentemente do número de fases do conversor. (PENG, 2001; SINGH, 1999).

Por outro lado, as componentes harmônicas de corrente do lado CA são também significativamente afetadas. Dentre as alterações ocorridas destacam-se o aparecimento de 3ª ordem e seus múltiplos ímpares. Estes harmônicos não possuem as características de sequência zero, como ocorre convencionalmente para o harmônico de 3ª ordem e, portanto, não podem ser eliminados por conexões delta ou pelo isolamento do neutro de transformadores.

2.3 Quantificação, recomendações e normas

A forma mais consistente para quantificação do nível de desequilíbrio é dada pela relação entre os módulos das componentes de sequência negativa e positiva das tensões trifásicas. Isso porque, tal procedimento leva em consideração tanto o módulo quanto ângulo da referida grandeza para obter o seu nível de desequilíbrio. Entretanto, uma vez que o ângulo da tensão não é usualmente uma grandeza disponibilizada, a aplicação de tal método pode criar alguma dificuldade no procedimento de medição.

Com o objetivo de simplificar os processos de medição para quantificar os níveis de desequilíbrios de tensão (F_d) é possível identificar basicamente três formas distintas e mais difundidas entre os órgãos reguladores, conforme estabelecido nas expressões de (1) a (3).

a) **CIGRE** - International Council on Large Electric Systems

$$F_d(\%) = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100 \quad (1)$$

$$\text{Sendo: } \beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}$$

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} os módulo das tensões de linha.

b) **NEMA** - National Electrical Manufacturers Association

$$F_d(\%) = \frac{\Delta V_{Max}}{V_{Med}} \cdot 100 \quad (2)$$

Sendo: $\Delta V_{máx}$ o máximo desvio das tensões em relação a $V_{médio}$

$V_{médio}$ a média aritmética dos módulos das tensões trifásicas.

c) **IEEE** - Institute of Electrical and Electronic Engineers

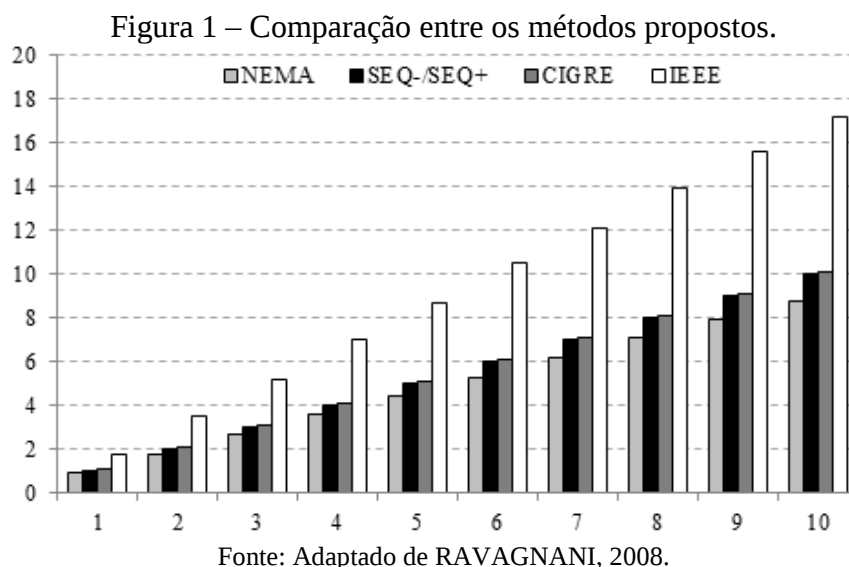
$$F_d(\%) = \frac{3(V_{máx} - V_{mín})}{V_a + V_b + V_c} \cdot 100 \quad (3)$$

$V_{máx}$, $V_{mín}$ - Maior e menor valor dentre os módulos das tensões, respectivamente.

V_a , V_b , V_c - Módulo das tensões de fase;

As expressões de (1) a (3) consideram apenas os módulos das tensões trifásicas, o que pode simplificar substancialmente os procedimentos de quantificação. Foram executadas

algumas simulações a partir de um sistema trifásico típico com desequilíbrios que, calculados pelo método das componentes simétricas (SEQ-/SEQ+), resultaram em níveis de F_d (%) variando de 0 a 10%. A Figura 1 mostra a comparação dos resultados obtidos a partir de cada método proposto anteriormente, bem como o método das componentes simétricas.



Observa-se que a formulação sugerida pelo CIGRÉ é a que mais se aproxima dos valores obtidos através da relação entre componentes sequenciais, com uma vantagem de que nesta metodologia de cálculo utilizam-se apenas as amplitudes das tensões de linha.

Diante do exposto, como alternativa à formulação ideal (V_2/V_1), adotou-se no PRODIST (2010) a expressão sugerida pelo CIGRE como método para quantificação dos níveis de desequilíbrio nas redes elétricas nacionais.

Para garantir as condições operacionais adequadas para os equipamentos elétricos, as agências regulamentadoras estabelecem limites apropriados para os níveis toleráveis para de desequilíbrios nas redes elétricas de suprimento.

A IEC (*International Electrotechnical Commission*) é uma organização mundial de normatização, cujo objetivo é promover a cooperação internacional em questões relativas a normas/recomendações/orientações no contexto elétrico e eletrônico. Com esta finalidade, a IEC publica documentos para uso internacional, os quais são publicados em forma de normas, relatórios técnicos e manuais. Particularmente, as questões relacionadas com desequilíbrios estão contidas em uma extensão da norma IEC 555-2, sob a denominação IEC 1000-2-2, de 1990. Esta recomendação indica que um nível aceitável de desequilíbrio em sistemas de baixa tensão é de 2%. Em alguns casos, valores elevados podem ocorrer pelo menos por períodos limitados, por exemplo, durante um curto-circuito.

Nos Estados Unidos, em 1973, o IEEE iniciou um projeto de desenvolvimento de normas sobre harmônicos e divulgou, em 1981, a primeira recomendação, a qual recebeu a designação de IEEE 519. O padrão IEEE 519 de 1992 recomenda 2% como limite aceitável para o fator de desequilíbrio.

Em dezembro de 1991, o CENELEC (*European Committee Electrotechnical Standardization*) fundamentado na IEC-555-2, aprovou um documento que dá as diretrizes para os padrões de qualidade para os países europeus. Este último documento recebeu a sigla EN605552-2. Em 1993, novamente, foi iniciado pelo CENELEC um processo de revisão, que culminou, em 1994, de uma norma europeia (EN50160, 1994). Esta norma fornece as principais características a serem atendidas pela tensão nos terminais de suprimento dos consumidores, nos níveis de distribuição de baixa ($\leq 1\text{kv}$) e média tensão (1-35 kV).

No que se refere aos desequilíbrios nas redes elétricas, a norma EN50160 estabelece que, sob condições normais de suprimento, durante o período de uma semana, 95% dos valores rms da componente de sequência negativa, devem estar na faixa de 0 a 2% da componente de sequência positiva. Tais valores rms consistem da média dos pontos medidos durante 10 (dez) minutos consecutivos. Em algumas áreas, onde partes dos consumidores são monofásicos ou bifásicos, podem-se admitir desequilíbrios de até 3%.

A norma NRS 048 foi elaborada para o órgão regulador NER (*National Electricity Regulator*), por representantes da *South African Electricity Supply Industry*, através de um grupo de trabalhos designado por *Electricity Suppliers Liaison Committee*. A fundamentação desta norma está nas diretrizes estabelecidas pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) e pela norma Européia (CENELEC). Adicionalmente, os termos da NRS 048 utilizaram, ainda, dos relatórios e dados locais disponíveis.

A NRS 048, destinada a regulamentar a qualidade dos suprimentos elétricos, foi aprovada pelo *National Electricity Regulator* em 21 de Novembro de 1996. O nível de compatibilidade para desequilíbrios de tensão em sistemas elétricos trifásicos deve ser igual a 2%. Nas redes elétricas onde há predominância de consumidores monofásicos ou bifásicos, os níveis máximos admissíveis poderão atingir 3%.

Na ANSI (*American National Standards Institute*), o padrão C84. 1-1995, para sistemas elétricos de potência e equipamentos de medição de tensão, foi desenvolvido pela NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*). A norma ANSI – C84. 1 – 1995, estabelece valores nominais de tensão e tolerâncias operacionais para sistemas de 100V a

230kV em 60Hz.. Recomenda que os sistemas de suprimento elétrico devem ser projetados e operados de modo a limitar o máximo desequilíbrio de tensão em 3%, sob condições a vazio.

Apresenta-se na Tabela 2 uma síntese dos principais normas consultadas, onde se constata claramente uma convergência para índices de conformidade para o desequilíbrio de tensão entre 2% e 3%.

Tabela 2 – Índices de conformidade para desequilíbrios de tensão.

RECOMENDAÇÃO/NORMA	LIMITE
EN 50160	2%
ANSI C84. 1	3%
NRS 048	2%
IEEE 519	2%
IEC	2%

Fonte: Adaptado de RAVAGNANI, 2008.

Particularmente, a EN 50160 e a NRS 048 estabelecem que, em algumas áreas, onde parte dos consumidores são monofásicos ou bifásicos, podem ocorrer desequilíbrios de até 3%.

A ANSI C84. 1-1995 recomenda que as fontes de alimentação dos sistemas elétricos de potência devam ser projetadas e operadas de modo a limitar a máxima tensão desbalanceada em 3% quando medida em relação ao rendimento do dispositivo elétrico operando sem carga. A IEC recomenda que o máximo desbalanceamento de tensão na alimentação de sistemas elétricos de potência seja limitado a 2%.

Concomitantemente, na norma MG1-1993, sobre a potência operacional dos motores e geradores, recomenda-se que para tensões desbalanceadas superiores a 1%, motores de indução devem ser reduzidos pelo fator apropriado.

As normas IEC também restringem o desbalanceamento de tensão permissível em motores de indução a 1% e exigem uma adequação das máquinas, se o desbalanceamento for maior. Estas normas também indicam que alguns equipamentos eletrônicos, tais como os computadores, podem apresentar problemas operacionais se a tensão apresentar Fd maior que 2 ou 2,5%. Ambas estabelecem que, em geral, cargas monofásicas não devem ser conectadas a circuitos trifásicos de baixa tensão alimentando equipamentos sensíveis a desbalanceamento da tensão de fase. Para estes casos é recomendável a utilização de um circuito separado para o suprimento destas cargas.

A aparente contradição entre a ANSI C84. 1-1995, permitindo um desbalanceamento de tensão de 3% em sistemas de potência, e a NEMA-MG1-1993, recomendando

redimensionamento de motores na presença de desbalanceamento de tensão superior a 1%, é fundamentada nas seguintes premissas:

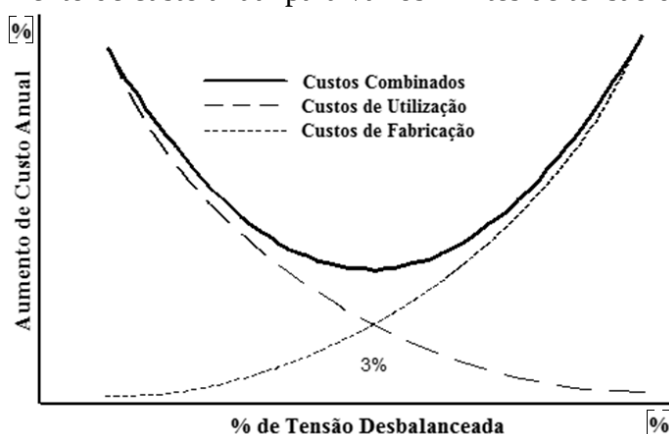
- Atualmente o cliente acaba pagando os custos referentes aos serviços necessários para reduzir o desbalanceamento de tensão, e os custos exigidos para produção relativos à obtenção de uma média de desbalanceamento de tensão para operação de um motor;
- Os custos no desenvolvimento de melhorias no desempenho dos dispositivos são máximos quando o desbalanceamento de tensão se aproxima de zero e diminuem à medida que se permite que o desbalanceamento de tensão cresça;
- Foi relatado que para os fabricantes os custos de aprimoramento de motores são mais baixos quando o desbalanceamento de tensão é zero e aumentam rapidamente de acordo com o aumento do desbalanceamento.

Quando estes custos, excluindo-se o custo de energia relacionada ao motor, são combinados, curvas podem ser desenvolvidas conforme se mostra na Figura 2, que indica o custo do dispositivo para o cliente para vários limites de porcentagens de desbalanceamento de tensão.

O melhor valor do desbalanceamento de tensão ocorre quando o custo para o cliente (usuário) é minimizado, o que de acordo com a ANSI C84. 1 implica em ser aproximadamente 3% de tensão desbalanceada conforme mostra a Figura 2.

Ainda sobre o desbalanceamento de tensões em sistemas de distribuição a CAE (*Canadian Electrical Association*) apresenta outro ponto de vista sobre a aparente contradição entre os níveis de desbalanceamento apropriados para sistemas elétricos de potência e em instalações elétricas comerciais e industriais. Até os anos 70, a economia de energia não era considerada um fator de projeto significativo como hoje, e o apoio tecnológico dos computadores para projetar aparatos de energia elétrica não se achava disponível. Consequentemente, motores e equipamentos com projeto mais antigo permitiam níveis de distúrbio muito maiores do que aqueles que agora podem ser tolerados.

Figura 2 – Aumento de custo anual para vários limites de tensão desbalanceada.



Fonte: Adaptado de RAVAGNANI, 2008.

Fabricantes e usuários de motores estão, portanto, procurando por uma fonte de energia com nível de desbalanceamento de tensão mais baixo, que lhes permitiria operar com mínima redução, o que os levaria a utilizar os menores motores possíveis. Entretanto, devido ao crescimento da quantidade de cargas monofásicas incluindo trens elétricos e cargas de tração, o desbalanceamento de tensões em sistemas de distribuição de energia, atualmente, está crescendo, resultando daí que os distribuidores de energia gostariam que os equipamentos e dispositivos pudessem operar em ótimas condições com desbalanceamentos de tensões maiores (RAVAGNANI, 2008).

Somado a este fato vários trabalhos desenvolvidos nesta área ratificam que a adoção deste valor (Fd) como índice de conformidade para desequilíbrios, resulta em que os efeitos manifestados nos mais diversos equipamentos elétricos não comprometem a sua operação. Neste cenário a orientação do PRODIST segue a maioria das normas internacionais mantendo-se o índice de conformidade relacionado a desequilíbrio de tensão em 2%.

2.4 Conclusões

O aumento da diversidade de cargas sensíveis a problemas de qualidade da energia tornou o desequilíbrio de tensão um fator muito preocupante. Este aspecto tem sido frequentemente observado mediante o aumento do número de reclamações por parte dos consumidores com respeito à má qualidade do fornecimento de energia elétrica em vários países industrializados.

Considerando-se a dimensão do problema, os órgãos reguladores formalizaram recomendações e normas fixando-se limites máximos toleráveis para os desequilíbrios de tensão. Particularmente no Brasil, o PRODIST, baseado na experiência internacional estabeleceu com limite um índice de desequilíbrio de tensão de 2%, calculado pela relação percentual entre os módulos das componentes de sequência negativa e positiva, ou pela expressão alternativa proposta pelo CIGRÉ.

3. METODOLOGIAS PARA COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS

Durante a operação normal de um sistema de distribuição de energia elétrica, observa-se uma constante variação nas cargas de naturezas trifásica, bifásicas ou monofásicas bem como nos respectivos fatores de potência. Estas variações impactam diretamente as condições operacionais idealizadas, fazendo com que as redes elétricas operem sob condições desequilibradas, com baixo fator de potência e regulação de tensão inadequada.

Na gestão operacional das redes elétricas vários procedimentos são realizados no sentido de manter os índices de desequilíbrios, fator de potência e regulação de tensão dentro de padrões aceitáveis. Entre eles destacam-se: remanejamento de cargas trifásicas; realocação de cargas monofásicas ou bifásicas; recondução de ramais; manobras, entre outros. Uma vez esgotadas as possibilidades citadas, normalmente recorre-se ao uso de equipamentos auxiliares para compensação dos desequilíbrios, fator de potência e regulação de tensão.

Diante da variedade de equipamentos de compensação, destacam-se aqueles com funcionalidades mais abrangentes que incorporam a compensação automática e simultânea dos impactos causados pela dinâmica das cargas, notadamente, desequilíbrios de correntes, fator de potência e regulação de tensão. Para tanto, independentemente da tecnologia utilizada na concepção destes equipamentos, todos se apoiam em metodologias de compensação e técnicas operacionais que viabilizem as funcionalidades esperadas.

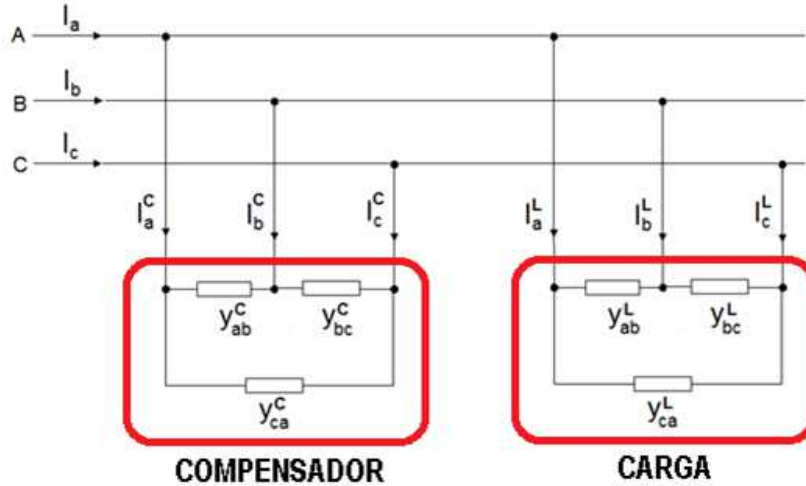
Várias metodologias têm sido propostas para atender as demandas citadas, (BARROS, 2000; OLIVEIRA, BARROS, 2000a, 2000b, 2004; TEODORO, 2005). Entre elas, duas principais vertentes são destacadas, notadamente aquelas fundamentadas no método de Steinmetz, ou das componentes simétricas e o método das potências complexas instantâneas (teoria PQ).

Neste capítulo apresentam-se os fundamentos de cada dos métodos citados com destaque para sua aplicação em redes elétricas com ou sem o uso do condutor neutro, referenciados neste trabalho como redes elétricas a quatro fios ou redes elétricas a três fios, respectivamente. Na sequência, discute-se através de exemplos de aplicação, as principais características de cada método, focalizando-se especificamente suas potencialidades quanto à possível implementação prática.

3.1 Compensação em sistemas trifásicos a três fios

A Figura 3 mostra uma carga desequilibrada, ligada a um sistema trifásico (a-b-c). Inserido a este sistema, temos um compensador trifásico ligado em paralelo com a carga.

Figura 3- Sistema trifásico a três fios com carga desequilibrada.



Fonte: próprio autor

Admitindo-se as tensões de alimentação simétricas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = V \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (4)$$

Sendo V o valor eficaz da tensão fase-neutro e $\alpha = 1 \angle 120^\circ$, as tensões de fase-fase podem então ser calculadas por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{ab} \\ \mathbf{V}_{bc} \\ \mathbf{V}_{ca} \end{bmatrix} = V \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\alpha^2 \\ \alpha^2 & -\alpha \\ \alpha & -1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ao se considerar individualmente o compensador ou a carga equivalente conectada em triângulo, tem-se, genericamente:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ab} \\ \mathbf{I}_{bc} \\ \mathbf{I}_{ca} \end{bmatrix} = V \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ab}(1 - \alpha^2) \\ \mathbf{y}_{bc}(\alpha^2 - \alpha) \\ \mathbf{y}_{ca}(\alpha - 1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Sendo $\mathbf{y}_{ab}$, $\mathbf{y}_{bc}$, $\mathbf{y}_{ca}$ as admitâncias entre fases, as correntes de linha são dadas por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ab}(1-\alpha^2) - \mathbf{y}_{ca}(\alpha-1) \\ \mathbf{y}_{bc}(\alpha^2 - \alpha) - \mathbf{y}_{ab}(1-\alpha^2) \\ \mathbf{y}_{ca}(\alpha-1) - \mathbf{y}_{bc}(\alpha^2 - \alpha) \end{bmatrix} \quad (7)$$

As componentes simétricas das correntes de linha podem então ser determinadas a partir da matriz de transformação inversa $\mathbf{T}^{-1}$, conforme ilustrado na equação (8).

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Fazendo os cálculos matriciais tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -\alpha^2 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ab} \\ \mathbf{y}_{bc} \\ \mathbf{y}_{ca} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Utilizando-se a equação genérica (9), as componentes sequenciais das correntes na carga e no compensador, são dadas respectivamente pelas expressões (10) e (11), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0^L \\ \mathbf{I}_1^L \\ \mathbf{I}_2^L \end{bmatrix} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -\alpha^2 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ab}^L \\ \mathbf{y}_{bc}^L \\ \mathbf{y}_{ca}^L \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0^C \\ \mathbf{I}_1^C \\ \mathbf{I}_2^C \end{bmatrix} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -\alpha^2 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ab}^C \\ \mathbf{y}_{bc}^C \\ \mathbf{y}_{ca}^C \end{bmatrix} \quad (11)$$

A metodologia de compensação consiste, portanto na determinação das correntes de compensação de forma a compor uma corrente total equilibrada. Para isto, basta impor que a componente de sequência negativa total seja nula, uma vez que para o sistema isolado adotado não existe possibilidade de circulação da componente de sequência zero, (BARROS, 2000). Desta forma tem-se:

$$\mathbf{I}_2^L + \mathbf{I}_2^C = 0 \quad (12)$$

A partir das equações (11) e (12), obtém-se:

$$\mathbf{I}_2^L = \mathbf{V} \cdot [\alpha^2 \mathbf{y}_{ab}^C + \mathbf{y}_{bc}^C + \alpha \mathbf{y}_{ca}^C] \quad (13)$$

Separando-se as partes real e imaginária das correntes e das admitâncias e ainda considerando-se o compensador como um dispositivo que idealmente não consome potência ativa, tem-se:

$$Re[\mathbf{I}_2^L] + j Im[\mathbf{I}_2^L] = V[\alpha^2 jB_{ab}^C + jB_{bc}^C + \alpha jB_{ca}^C] \quad (14)$$

Isolando-se as partes reais e imaginárias da expressão (14), obtém-se:

$$Re[\mathbf{I}_2^L] = V \frac{\sqrt{3}}{2} [B_{ab}^C - B_{ca}^C] \quad (15)$$

$$Im[\mathbf{I}_2^L] = V \left[B_{bc}^C - \frac{1}{2} (B_{ca}^C + B_{ab}^C) \right] \quad (16)$$

O sistema de equações (15) e (16) possui três incógnitas e, portanto apresenta várias soluções.

Uma solução particularizada pode ser obtida impondo-se condições sobre a componente de sequência positiva resultante. Uma possibilidade normalmente adotada é a imposição do fator de deslocamento final desejado para o conjunto formado pelo compensador e a carga a ser compensada. Neste sentido, define-se a seguinte equação:

$$\tan(\phi) = \frac{Im[\mathbf{I}_1^L] + Im[\mathbf{I}_1^C]}{Re[\mathbf{I}_1^L]} \quad (17)$$

Sendo $\cos\phi$ o fator de deslocamento desejado, a partir da combinação das equações de (15) a (17), obtém-se:

$$B_{bc}^C = \frac{1}{3V} (2 Im[\mathbf{I}_2^L] + \tan(\phi) Re[\mathbf{I}_1^L] - Im[\mathbf{I}_1^L]) \quad (18)$$

A corrente de compensação na fase bc pode então ser determinada por:

$$\mathbf{I}_{bc}^C = -\frac{\sqrt{3}}{3} (Im[\mathbf{I}_1^L] - 2 Im[\mathbf{I}_2^L] - \tan(\phi) Re[\mathbf{I}_1^L]) \quad (19)$$

Isolando-se os termos necessários das equações (15) e (16) e em seguida fazendo-se a somatória membro a membro, tem-se:

$$2B_{ab}^C = 2B_{bc}^C + \frac{2 Im[\mathbf{I}_2^L]}{V} - \frac{2 Re[\mathbf{I}_2^L]}{\sqrt{3}V} \quad (20)$$

Das equações anteriores obtêm-se as expressões (21) e (22) para o cálculo da susceptância e da corrente a ser absorvida entre as fases ab do compensador.

$$B_{ab}^C = \frac{1}{3V} (\sqrt{3} Re[\mathbf{I}_2^L] - Im[\mathbf{I}_2^L] - Im[\mathbf{I}_1^L] + \tan(\phi) Re[\mathbf{I}_1^L]) \quad (21)$$

$$\mathbf{I}_{ab}^C = -\frac{\sqrt{3}}{3} (Im[\mathbf{I}_1^L] + Im[\mathbf{I}_2^L] - \sqrt{3} Re[\mathbf{I}_2^L] - \tan(\phi) Re[\mathbf{I}_1^L]) \quad (22)$$

Finalmente, através de um processo semelhante determina-se a susceptância de compensação na fase ca e a respectiva corrente.

$$B_{ca}^C = \frac{1}{3V} \left(-Im[I_2^L] - Im[I_1^L] + \tan(\phi) Re[I_1^L] - \sqrt{3} Re[I_2^L] \right) \quad (23)$$

$$I_{ca}^C = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(Im[I_1^L] + Im[I_2^L] + \sqrt{3} Re[I_2^L] - \tan(\phi) Re[I_1^L] \right) \quad (24)$$

As correntes de compensação dadas pelas expressões (19), (22), (24), são apresentadas em função das componentes sequenciais das correntes na carga. Os resultados equivalentes em função das componentes de fase abc podem ser obtidos, como se segue.

Considera-se inicialmente a nulidade da componente de sequência zero para sistemas isolados aplicada as equações anteriores.

$$Im[I_1^L] + Im[I_2^L] = Im[I_a^L] \quad (25)$$

Por outro lado, tem-se:

$$Im[I_1^L] - 2 Im[I_2^L] = Im[I_1^L - 2.I_2^L] \quad (26)$$

Substituindo-se as componentes sequenciais pelas respectivas composições das componentes de fase e reagrupando os termos, obtém-se:

$$Im[I_1^L] - 2 Im[I_2^L] = Im[I_a^L] + Im[\alpha.I_b^L] + Im[\alpha^2.I_c^L] \quad (27)$$

Os termos relacionados com a parte real das componentes sequenciais podem ser expressos em função das partes imaginárias, como:

$$Re[I_2^L] = \frac{1}{3} Re[I_a^L + \alpha^2.I_b^L + \alpha.I_c^L] \quad (28)$$

Separando as partes reais e imaginárias das correntes de linha Ia, Ib e Ic e representando o operador α na forma retangular *tem-se*:

$$Re[I_2^L] = \frac{1}{3} \left[-\frac{3}{2}.I_{bR}^L - \frac{3}{2}.I_{cR}^L - \frac{\sqrt{3}}{2}.I_{bI}^L - \frac{\sqrt{3}}{2}.I_{cI}^L \right] \quad (29)$$

Sabendo-se que:

$$Im[\alpha.I] = \frac{\sqrt{3}}{2} I_R - \frac{1}{2} I_1 \quad (30)$$

$$Im[\alpha^2.I] = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_R - \frac{1}{2} I_1 \quad (31)$$

Substituindo-se (30) e (31) em (29), obtém-se:

$$Re[I_2^L] = \frac{\sqrt{3}}{3} \left[-Im[\alpha.I_b^L] + Im[\alpha^2.I_c^L] \right] \quad (32)$$

Da mesma forma, para a parte real da componente de sequência positiva, tem-se:

$$Re[I_1^L] = \frac{1}{3} Re[I_a^L + \alpha I_b^L + \alpha^2 I_c^L] \quad (33)$$

Ou seja;

$$Re[I_1^L] = \frac{\sqrt{3}}{3} [Im[\alpha^2 I_b^L] - Im[\alpha I_c^L]] \quad (34)$$

A partir das relações anteriores, substituindo-se os termos obtidos na expressão (19), obtém-se:

$$I_{bc}^C = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left[-Im[I_a^L] + Im[\alpha I_b^L] + Im[\alpha^2 I_c^L] - \frac{tg\phi}{\sqrt{3}} (Im[\alpha^2 I_b^L] - Im[\alpha I_c^L]) \right] \quad (35)$$

Seguindo o mesmo procedimento, agora substituindo-se os termos nas expressões (22) e (24), (BARROS, 2000), tem-se:

$$I_{ab}^C = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(Im[I_a^L] + Im[\alpha I_b^L] - Im[\alpha^2 I_c^L] - \frac{tg\phi}{\sqrt{3}} (-Im[\alpha^2 I_b^L] - Im[\alpha I_c^L]) \right) \quad (36)$$

$$I_{ca}^C = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(Im[I_a^L] - Im[\alpha I_b^L] + Im[\alpha^2 I_c^L] - \frac{tg\phi}{\sqrt{3}} (Im[\alpha^2 I_b^L] - Im[\alpha I_c^L]) \right) \quad (37)$$

As equações (35), (36) e (37) podem então ser utilizadas para o cálculo das correntes de compensação em função das correntes de linha absorvidas pela carga. Estas equações podem ser reescritas na forma matricial conforme apresentado em (38).

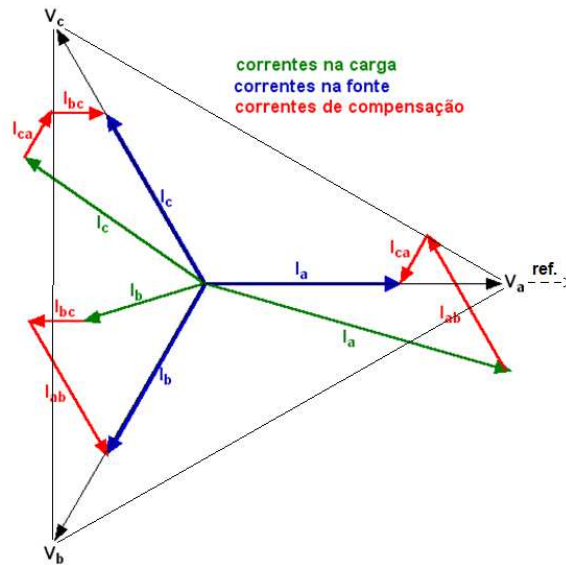
$$\begin{bmatrix} I_{ab}^C \\ I_{bc}^C \\ I_{ca}^C \end{bmatrix} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} Im \begin{bmatrix} I_a^L \\ \alpha I_b^L \\ \alpha^2 I_c^L \end{bmatrix} + \frac{tan(\phi)}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} Im \begin{bmatrix} \alpha^2 I_b^L \\ \alpha I_c^L \end{bmatrix} \quad (38)$$

As correntes de compensação são correntes reativas necessárias em cada ramo do compensador para que o conjunto carga-compensador opere de forma equilibrada e com um fator de potência pré-definido.

Esta metodologia de compensação de correntes será referenciada ao longo deste trabalho como método de Steinmetz aplicado a sistemas trifásicos a três fios.

A título de ilustração, apresenta-se na Figura 4 um diagrama fasorial contendo as correntes da carga desequilibrada, as correntes de compensação e as correntes finais compensadas, (BARROS, 2000).

Figura 4: Diagrama fasorial para compensação a três fios.



Fonte: adaptado de BARROS NETO, 2000.

3.2 Correntes compensatórias no domínio do tempo para três fios

As equações desenvolvidas anteriormente possibilitam que o conjunto carga-compensador seja visto como equilibrado e com um fator de potência determinado. A equação (38) é útil para as análises e simulações digitais no domínio da frequência. Os dados são obtidos a partir da medição dos valores eficazes na carga e da determinação das respectivas partes imaginárias, fixando-se uma referência de fase.

Para implementação física do sistema de controle, visando-se a operação em tempo real, as equações (38) não são adequadas. Neste caso é importante que dados relativos às correntes de alimentação da carga sejam obtidos a partir de amostragens das correntes e no menor tempo possível. Para isto, as equações das correntes de compensação formuladas anteriormente são adaptadas no sentido de incorporar grandezas obtidas no domínio do tempo, (OLIVEIRA, BARROS, 2004).

Genericamente para uma fase qualquer, tem-se:

$$i^L = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[I \cdot e^{j\omega t} \right] = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[(\operatorname{Re}[I^L] + j \operatorname{Im}[I^L]) (\cos \omega t + j \operatorname{sen} \omega t) \right] \quad (39)$$

Extraindo a parte real, obtém-se;

$$i^L = \sqrt{2} \cdot [\operatorname{Re}(I^L) \cos \omega t - \operatorname{Im}(I^L) \operatorname{sen} \omega t] \quad (40)$$

Observando-se a equação (40) verifica-se que a parte imaginária da corrente complexa na fase a pode ser obtida quando $\cos(\omega t^*) = 0$ e $\operatorname{sen}(\omega t^*) = -1$, conforme equação (41).

$$i_a^L = \sqrt{2} \operatorname{Im}[I_a^L] \quad (41)$$

Este instante pode ser identificado, observando-se o momento em que a tensão na fase passa por zero com derivada positiva. Admitindo a fase a como referência de ângulos, resulta:

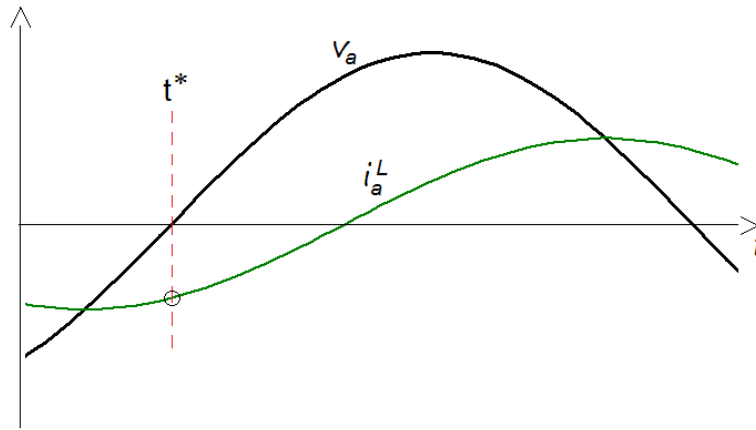
$$v_a = \sqrt{2}V \cos(\omega t^*) = 0 \quad (42)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sqrt{2}V \sin(\omega t^*) > 0 \quad (43)$$

Para representar este procedimento utiliza-se a notação dada em (44), ilustrado na Figura 5.

$$Im[I_a^L] = \frac{i_a^L}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_a=0 \\ \frac{dv_a}{dt}>0}} \quad (44)$$

Figura 5- Aquisição da parte imaginária da corrente ia .



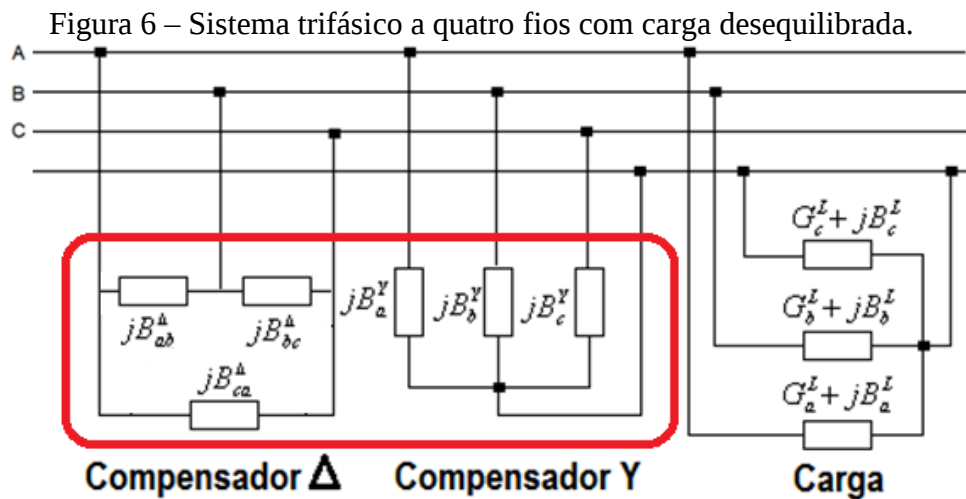
Fonte: próprio autor

Adotando-se um procedimento análogo e considerando-se as referências de fase específicas, é possível determinar as demais correntes necessárias para o sistema de controle (OLIVEIRA, BARROS, 2004). Os resultados finais são apresentados de forma sintética na equação (45).

$$\begin{bmatrix} I_{ab}^C \\ I_{bc}^C \\ I_{ca}^C \end{bmatrix} = \frac{-1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_a}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_a=0 \\ \frac{dv_a}{dt}>0}} \\ \frac{i_b}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_b=0 \\ \frac{dv_b}{dt}>0}} \\ \frac{i_c}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt}>0}} \end{bmatrix} + \frac{tg\phi}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_b}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt}>0}} \\ \frac{i_c}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_b=0 \\ \frac{dv_b}{dt}>0}} \end{bmatrix} \quad (45)$$

3.3 Compensação em sistemas trifásicos a quatro fios

Considerando o sistema trifásico a quatro fios como mostrado na Figura 6, onde a subestação é assumida como uma fonte de tensão equilibrada e constante. A carga é representada por admitâncias conectadas em estrela aterrada. As admitâncias da carga podem ser obtidas pelas medidas das correntes e tensões no lado da carga. Se a carga é desequilibrada, as correntes da linha de distribuição são desbalanceadas (desequilibradas) e causam queda de tensão desigual nas linhas de distribuição, de tal forma que as tensões na barra da carga resultem também desequilibradas.



Fonte: Adaptado de BARROS NETO, 2000.

Para balancear as correntes de linha e melhorar o fator de potência, um compensador ligado em estrela aterrada e um compensador ligado em triângulo são colocados na barra da carga para proporcionar uma parcela diferente de compensação de potência reativa para cada fase. O método das componentes simétricas é usado no processo de derivação das fórmulas de compensação (BARROS, 2000; OLIVEIRA, BARROS, 2004). Embora a carga seja desequilibrada, o sistema supridor percebe o conjunto carga, compensador conectado em estrela, compensador conectado em triângulo, como uma única carga equilibrada.

Sabendo-se a tensão, a condutância e a susceptância da carga é possível encontrar as correntes de linha da carga (46).

$$\begin{bmatrix} I_a^L \\ I_b^L \\ I_c^L \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} (G_a^L + jB_a^L) \\ \alpha^2 (G_b^L + jB_b^L) \\ \alpha (G_c^L + jB_c^L) \end{bmatrix} \quad (46)$$

Aplicando a matriz de transformação dos componentes sequenciais em função dos componentes de fase, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} I_0^L \\ I_1^L \\ I_2^L \end{bmatrix} = \frac{V}{3} \begin{bmatrix} G_a^L - \frac{1}{2}(G_b^L + G_c^L - B_b^L\sqrt{3} + B_c^L\sqrt{3}) \\ G_a^L + G_b^L + G_c^L \\ G_a^L - \frac{1}{2}(G_b^L + G_c^L + B_b^L\sqrt{3} - B_c^L\sqrt{3}) \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} B_a^L - \frac{1}{2}(B_b^L + B_c^L + G_b^L\sqrt{3} - G_c^L\sqrt{3}) \\ B_a^L + B_b^L + B_c^L \\ B_a^L - \frac{1}{2}(B_b^L + B_c^L - G_b^L\sqrt{3} + G_c^L\sqrt{3}) \end{bmatrix} \quad (47)$$

Repetindo-se o procedimento anterior, os componentes simétricos das correntes do compensador ligado em Y e em Δ podem ser obtidos, respectivamente a partir das expressões (48) e (49).

$$\begin{bmatrix} I_0^Y \\ I_1^Y \\ I_2^Y \end{bmatrix} = \frac{V}{3} \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 (B_b^Y - B_c^Y) \\ 0 \\ \sqrt{3}/2 (B_c^Y - B_b^Y) \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} B_a^Y - 1/2 (B_b^Y + B_c^Y) \\ B_a^Y + B_b^Y + B_c^Y \\ B_a^Y - 1/2 (B_c^Y + B_b^Y) \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\begin{bmatrix} I_0^\Delta \\ I_1^\Delta \\ I_2^\Delta \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{3}/2 (B_{ca}^\Delta - B_{ab}^\Delta) \end{bmatrix} + j \begin{bmatrix} 0 \\ B_{ab}^\Delta + B_{bc}^\Delta + B_{ca}^\Delta \\ \sqrt{3}/2 (B_{ca}^\Delta - B_{ab}^\Delta) \end{bmatrix} \quad (49)$$

Com a operação conjunto dos dois compensadores estáticos, o equilíbrio da carga total equivalente é obtido quando os componentes de sequência negativa e zero das correntes de carga são eliminados.

$$\begin{aligned} \text{Re}[I_2^L] + \text{Re}[I_2^Y] + \text{Re}[I_2^\Delta] &= 0 \\ \text{Im}[I_2^L] + \text{Im}[I_2^Y] + \text{Im}[I_2^\Delta] &= 0 \\ \text{Re}[I_0^L] + \text{Re}[I_0^Y] + \text{Re}[I_0^\Delta] &= 0 \\ \text{Im}[I_0^L] + \text{Im}[I_0^Y] + \text{Im}[I_0^\Delta] &= 0 \\ \text{Im}[I_1^L] + \text{Im}[I_1^Y] + \text{Im}[I_1^\Delta] &= 0 \end{aligned} \quad (50)$$

As duas primeiras equações do sistema (50) fazem com que o componente de sequência negativa da carga total equivalente seja nulo. A terceira e a quarta equações fazem com que o conjunto apresente um componente de sequência zero nulo. Já a quinta equação estabelece que a carga total equivalente apresente um fator de potência unitário.

O sistema de equações tem soluções infinitas porque há seis variáveis (susceptâncias do compensador ligado em Y e do compensador ligado em Δ) com cinco restrições (equações). Uma restrição adicional junto com as cinco anteriores oferecerá uma solução única. Neste trabalho a restrição sugerida é que a parte imaginária do componente de sequência positiva da

corrente da carga é eliminada pelo compensador ligado em Y sozinho, isto é, o compensador ligado em Δ não gera parte imaginária das correntes de sequência positiva. Então, a nova restrição será:

$$B_{ab}^{\Delta} + B_{bc}^{\Delta} + B_{ca}^{\Delta} = 0 \quad (51)$$

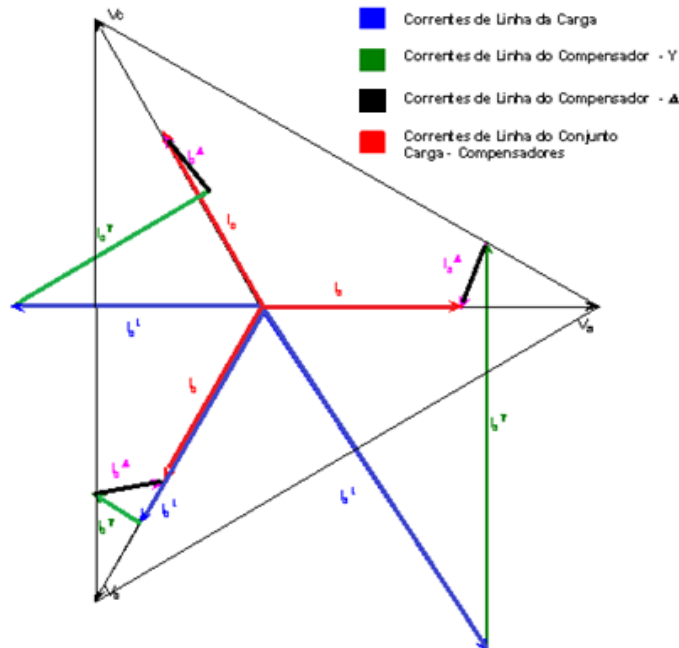
Substituindo os elementos das equações (47), (48) e (49) no sistema de equações (50), e considerando-se a restrição (51), obtém-se a solução para compensadores Y e Δ , expressas em função das condutâncias e susceptâncias da carga desequilibrada.

$$\begin{bmatrix} B_a^Y \\ B_b^Y \\ B_c^Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ -1/\sqrt{3} & 0 & 1/\sqrt{3} \\ 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_a^L \\ G_b^L \\ G_c^L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_a^L \\ B_b^L \\ B_c^L \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$\begin{bmatrix} B_{ab}^{\Delta} \\ B_{bc}^{\Delta} \\ B_{ca}^{\Delta} \end{bmatrix} = \left(\frac{2}{3\sqrt{3}} \right) \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_a^L \\ G_b^L \\ G_c^L \end{bmatrix} \quad (53)$$

Esta metodologia de compensação de correntes será referenciada ao longo deste trabalho como método de Steinmetz aplicado a sistemas trifásicos a quatro fios. A Figura 7 ilustra o diagrama fasorial de uma condição de operação que comporta ação simultânea dos compensadores citados.

Figura 7 - Diagrama Fasorial da compensação a quatro fios.



Fonte: Adaptado de BARROS, 2000.

3.4 Correntes compensatórias no domínio do tempo para quatro fios

As susceptâncias de compensação expressas em termos das admitâncias da carga são compactas, contudo, elas são inúteis para compensação on-line porque as admitâncias de carga são variantes no tempo. As admitâncias da carga podem ser obtidas, a partir de medidas das tensões e correntes de carga, o que permite que um dispositivo de controle ajuste a injeção de reativos no sistema, fazendo com que o conjunto carga e compensador tenha suas correntes sempre equilibradas e com o fator de potência desejado.

Deve-se adaptar as equações (52) e (53) para que os valores das condutâncias e das susceptâncias dos compensadores possam ser escritas em função de amostragens das tensões e das correntes da carga, desta forma, obtém-se as fórmulas de compensação on-line para os compensadores, no domínio do tempo, equações (54) e (55), (OLIVEIRA, BARROS, 2004).

$$\begin{bmatrix} B_a^Y \\ B_b^Y \\ B_c^Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{i_a^L}{V\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_a=0 \\ dv_a>0 \end{smallmatrix} \right. \\ \frac{i_b^L}{V\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_b=0 \\ dv_b>0 \end{smallmatrix} \right. \\ \frac{i_c^L}{V\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_c=0 \\ dv_c>0 \end{smallmatrix} \right. \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} tg(\phi) & (tg\phi + \sqrt{3}) & (tg\phi - \sqrt{3}) \\ (tg\phi - \sqrt{3}) & tg\phi & (tg\phi + \sqrt{3}) \\ (tg\phi + \sqrt{3}) & (tg\phi - \sqrt{3}) & tg\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_a^L}{3V\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_a>0 \\ dv_a=0 \end{smallmatrix} \right. \\ \frac{i_b^L}{3V\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_b>0 \\ dv_b=0 \end{smallmatrix} \right. \\ \frac{i_c^L}{3V\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_c>0 \\ dv_c=0 \end{smallmatrix} \right. \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$\begin{bmatrix} B_{ab}^\Delta \\ B_{bc}^\Delta \\ B_{ca}^\Delta \end{bmatrix} = \left(\frac{2}{3\sqrt{3}V} \right) \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_a^L}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_a>0 \\ dv_a=0 \end{smallmatrix} \right. \\ \frac{i_b^L}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_b>0 \\ dv_b=0 \end{smallmatrix} \right. \\ \frac{i_c^L}{\sqrt{2}} \left| \begin{smallmatrix} v_c>0 \\ dv_c=0 \end{smallmatrix} \right. \end{bmatrix} \quad (55)$$

3.5 Compensação de desequilíbrios baseada na teoria PQ

A teoria geral da potência reativa instantânea trifásica ou ainda teoria da potência instantânea é genericamente designada como Teoria PQ, a qual foi apresentada pela primeira vez por (AKAGI, 1983) e, em seguida, foi estendida para sistemas trifásicos a quatro fios (CZARNECKI, 2006; WATANABE, 1998).

Os algoritmos de controle baseados na teoria PQ operam sobre valores instantâneos de tensões e correntes. Os cálculos são feitos no domínio do tempo, tornando a sua aplicação indicada para o controle em tempo real de equipamentos de compensação, tanto em regime permanente como em regime transitório. Além disso, é ainda possível atribuir significado físico às grandezas em foco, o que facilita a compreensão de qualquer sistema trifásico genérico, (AKAGI, 1983).

Embora os algoritmos de controle baseados na teoria PQ utilizem as grandezas instantâneas de tensões e correntes, na análise que se apresenta a seguir, o sistema é considerado operando em regime permanente senoidal. Tal procedimento tem por objetivo permitir a utilização da representação fasorial das grandezas elétricas e, sobretudo viabilizar o uso das componentes simétricas no sentido de promover uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos a partir de ferramentas de cálculo bastante difundidas no meio científico (AFONSO, 2000a, 2000b).

As expressões gerais das tensões são dadas por:

$$\begin{aligned} v_a(t) &= \sqrt{2}V_a \sin(\omega t + \phi_a) \\ v_b(t) &= \sqrt{2}V_b \sin(\omega t + \phi_b) \\ v_c(t) &= \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + \phi_c) \end{aligned} \quad (56)$$

Genericamente, para as correntes, tem-se:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + \delta_a) \\ i_b(t) &= \sqrt{2}I_b \sin(\omega t + \delta_b) \\ i_c(t) &= \sqrt{2}I_c \sin(\omega t + \delta_c) \end{aligned} \quad (57)$$

Sendo: V_i e I_i - valores eficazes das tensões fase-neutro e correntes de linha, respectivamente.

Considerando-se as componentes sequenciais das tensões e correntes, as expressões no domínio do tempo, dadas em (56) e (57), podem ser reescritas conforme (58) e (59).

Assumindo-se como notação: $V_0 = V_0$, $V_+ = V_1$ e $V_- = V_2$;

$I_0 = I_0$, $I_+ = I_1$ e $I_- = I_2$, temos:

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2}V_0 \sin(\omega t + \phi_0) + \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t + \phi_+) + \sqrt{2}V_- \sin(\omega t + \phi_-) \\ v_b &= \sqrt{2}V_0 \sin(\omega t + \phi_0) + \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t + \phi_+ - 2\pi/3) + \sqrt{2}V_- \sin(\omega t + \phi_- + 2\pi/3) \\ v_c &= \sqrt{2}V_0 \sin(\omega t + \phi_0) + \sqrt{2}V_+ \sin(\omega t + \phi_+ + 2\pi/3) + \sqrt{2}V_- \sin(\omega t + \phi_- - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (58)$$

$$\begin{aligned}
i_a &= \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \delta_0) + \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \delta_+) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t + \delta_-) \\
i_b &= \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \delta_0) + \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \delta_+ - 2\pi/3) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t + \delta_- + 2\pi/3) \\
i_c &= \sqrt{2}I_0 \sin(\omega t + \delta_0) + \sqrt{2}I_+ \sin(\omega t + \delta_+ + 2\pi/3) + \sqrt{2}I_- \sin(\omega t + \delta_- - 2\pi/3)
\end{aligned} \tag{59}$$

Os parâmetros V_0 , V_+ , V_- , I_0 , I_+ , I_- , correspondem aos valores eficazes das componentes de sequência zero, positiva e negativa das tensões e correntes. Os ângulos ϕ_0 , ϕ_+ , ϕ_- , δ_0 , δ_+ , δ_- , são as fases das componentes de sequência zero, positiva e negativa das tensões e correntes, respectivamente.

A teoria PQ utiliza a transformação de coordenadas de abc para $\alpha\beta 0$ o que na realidade é uma transformação algébrica de um sistema de tensões e correntes trifásicas em um sistema de referência estacionário como o sistema abc, mas com as coordenadas ortogonais. Esta transformação é também conhecida como Transformação de *Clarke*, dada pelas expressões (60) e (61).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{60}$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{61}$$

Escrevendo-se as tensões resultantes nas coordenadas $\alpha\beta 0$, obtém-se;

$$\begin{aligned}
v_0 &= \sqrt{6}V_0 \sin(\omega t + \phi_0) \\
v_\alpha &= \sqrt{3}V_+ \sin(\omega t + \phi_+) + \sqrt{3}V_- \sin(\omega t + \phi_-) \\
v_\beta &= -\sqrt{3}V_+ \sin(\omega t + \phi_+) + \sqrt{3}V_- \sin(\omega t + \phi_-)
\end{aligned} \tag{62}$$

Analogamente, as correntes nas coordenadas $\alpha\beta 0$, são dadas por:

$$\begin{aligned} i_0 &= \sqrt{6}I_0 \sin(\omega t + \delta_0) \\ i_\alpha &= \sqrt{3}I_+ \sin(\omega t + \delta_+) + \sqrt{3}I_- \sin(\omega t + \delta_-) \\ i_\beta &= -\sqrt{3}I_+ \cos(\omega t + \delta_+) + \sqrt{3}I_- \cos(\omega t + \delta_-) \end{aligned} \quad (63)$$

Os valores instantâneos das potências da teoria PQ podem então ser calculados a partir dos valores das tensões e correntes segundo os eixos $\alpha\beta 0$.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (64)$$

As potências instantâneas reais p , e imaginária q , podem ser convenientemente representadas através dos seus valores médios e oscilantes, conforme equações (65), (66) e (67).

$$p_o = v_o i_o = \bar{p}_o + \tilde{p}_o \quad (65)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (66)$$

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha = \bar{q} + \tilde{q} \quad (67)$$

Substituindo-se as expressões (62) e (63) em (66), os valores médio $\bar{p}$ e oscilante $\tilde{p}$ podem ser obtidos, pelas expressões (68) e (69).

$$\bar{p} = 3V_+ I_+ \cos(\phi_+ - \delta_+) + 3V_- I_- \cos(\phi_- - \delta_-) \quad (68)$$

$$\tilde{p} = -3V_+ I_- \cos(2\omega t + \phi_+ + \delta_-) - 3V_- I_+ \cos(2\omega t + \phi_- + \delta_+) \quad (69)$$

Observa-se que o valor médio da potência real instantânea é formado pelo produto de tensões e correntes de componentes da mesma sequência, positiva ou negativa. Por outro lado, a componente oscilatória é função do produto cruzado das componentes sequenciais.

De forma análoga, Substituindo-se as expressões (62) e (63) em (67), os valores médio $\bar{q}$ e oscilante $\tilde{q}$ da potência imaginária instantânea podem ser obtidos por:

$$\bar{q} = -3V_+ I_+ \sin(\phi_+ - \delta_+) + 3V_- I_- \sin(\phi_- - \delta_-) \quad (70)$$

$$\tilde{q} = 3V_+ I_- \sin(2\omega t + \phi_+ + \delta_-) - 3V_- I_+ \sin(2\omega t + \phi_- + \delta_+) \quad (71)$$

Analisando-se da expressão (70), verifica-se, como no caso anterior, que o valor médio da potência imaginária instantânea é formado pelo produto de tensões e correntes de

componentes da mesma sequência, positiva ou negativa, enquanto a parcela oscilante, equação (71) é formada pelo produto cruzado das componentes sequenciais.

Substituindo-se as expressões (62) e (63) em (65), obtém-se:

$$\bar{p}_0 = 3V_0 I_0 \cos(\phi_0 - \delta_0) \quad (72)$$

$$\tilde{p}_0 = -3V_0 I_0 \cos(2\omega t + \phi_0 + \delta_0) \quad (73)$$

Neste caso, tanto a componente média como a oscilatório dependem unicamente do produto das tensões e correntes de componentes de sequência zero. Desta forma, conclui-se que se um sistema trifásico possuir potência de sequência zero, esta terá sempre uma componente contínua e uma componente oscilante, não sendo possível que uma componente exista sem a outra.

A situação ideal seria que nos sistemas elétricos trifásicos existisse apenas o valor médio da potência real, tal como é definida pela teoria PQ. A compensação das potências reais e imaginárias oscilantes por meio de um compensador faz com as energias associadas deixem de transitar entre a fonte e a carga, passando a transitar entre a carga e o sistema de compensação.

O compensador absorve energia, que depois devolve, sendo o balanço energético nulo, num sistema ideal. A potência imaginária não está associada a nenhuma troca de energia entre fonte e carga, fato que viabiliza um sistema de compensação apenas com elementos armazenadores de energia (indutores e capacitores). O compensador proporciona, portanto, um caminho alternativo para a troca de energia entre as fases do sistema elétrico.

Desta forma, a metodologia de compensação consiste, basicamente, em anular as componentes oscilantes, as potências de sequência zero e a potência média imaginária para garantir a operação equilibrada e com fator de deslocamento unitário.

Nestas condições, a partir das expressões (64) e (65), conclui-se que as correntes no compensador em coordenadas $\alpha\beta 0$ podem ser obtidas a partir das equações (74), (TEODORO, 2005).

$$\begin{bmatrix} i_0^C \\ i_\alpha^C \\ i_\beta^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -p_0 \\ -\tilde{p} \\ -(\bar{q} + \tilde{q}) \end{bmatrix} \quad (74)$$

As correntes instantâneas de compensação nas linhas, em coordenadas abc são, portanto obtidas pela transformada de *Clark* inversa, conforme equações (75).

$$\begin{bmatrix} i_a^C \\ i_b^C \\ i_c^C \end{bmatrix} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} i_0^C \\ i_\alpha^C \\ i_\beta^C \end{bmatrix} \quad (75)$$

3.6 Conclusões

Neste capítulo foram abordadas as principais metodologias adotadas para a compensação de desequilíbrios nas redes elétricas.

A técnica conhecida como método de *Steimnetz*, baseia-se na determinação das componentes simétricas da corrente da carga objetivando eliminar ou minimizar as componentes de sequência negativa e zero, bem como ajustar o fator de potência residual para um valor previamente desejado. Apesar de ser desenvolvida no domínio da frequência, a partir da análise das relações entre grandezas envolvidas com as correntes e tensões instantâneas, é possível estabelecer um procedimento auxiliar para determinação das correntes compensatórias partindo-se de amostragens em tempo real.

A segunda técnica está fundamentada na determinação de potências instantâneas referenciadas em um sistema de duas coordenadas através da transformação de *Clark*, e é também conhecida como método das Potências Instantâneas (Teoria PQ). Esta teoria proporciona uma forma relativamente simples e intuitiva de controle dos sistemas de compensação aplicados na correção do desequilíbrio e do fator de deslocamento. Neste caso, as correntes de compensação são definidas em tempo real a partir da eliminação ou redução das parcelas oscilantes das potências real e imaginária e do valor médio residual da potência imaginária.

4. EQUIPAMENTOS PARA COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS

As redes de distribuição de energia elétrica secundárias são circuitos elétricos trifásicos a quatro fios (três fases e neutro) e normalmente operam nas tensões 230/115 volts, 220/127 volts, 380/220 volts. A maioria dos consumidores residenciais e comerciais de pequeno porte, bem como os serviços de iluminação pública, está normalmente conectada a estas redes.

Considerando-se a diversidade de cargas, bem como a dinâmica operacional das mesmas, verifica-se que estas redes apresentam correntes desequilibradas e muitas vezes com circulação de correntes de sequência zero pelo condutor neutro.

Como visto em capítulos anteriores, a compensação dos desequilíbrios em redes trifásicas a quatro fios normalmente requer requisitos de controle mais complexos, envolvendo em alguns casos o uso de mais de um equipamento de compensação (CZARNECKI, 2013; OLIVEIRA, BARROS, 2000; OLIVEIRA, 2004).

Neste capítulo, discute-se as principais propostas disponíveis na literatura atual envolvendo a utilização de equipamentos baseados em tecnologias ativas, passivas e híbridas. Particularmente, destacam-se alguns avanços envolvendo tecnologias híbridas compostas por filtros ativos e eletromagnéticos, onde parte dos resultados experimentais foram obtidos no contexto deste trabalho.

Finalmente apresentam-se os fundamentos que norteiam a proposição de uma nova estrutura de compensação híbrida, a qual constitui a principal contribuição deste trabalho no tocante a originalidade. Trata-se de um arranjo composto por um compensador estático associado a um bloqueador e um filtro eletromagnéticos.

4.1 Desequilíbrios em redes elétricas a quatro fios.

Os níveis de desequilíbrios das tensões e das correntes nas redes elétricas a quatro fios podem ser quantificados a partir de dois índices. O primeiro refere-se ao fator de desequilíbrio definido pela relação entre os valores eficazes das correntes de sequências negativa e positiva, o segundo, menos usual, mas particularmente importante nesta avaliação, é dado pela relação entre os valores eficazes das componentes de sequência zero e positiva, conforme equações (76) e (77). Considerando-se, pois, um sistema a quatro fios, onde eventualmente a componente de sequência zero pode estar presente, a simetria perfeita entre as correntes nas

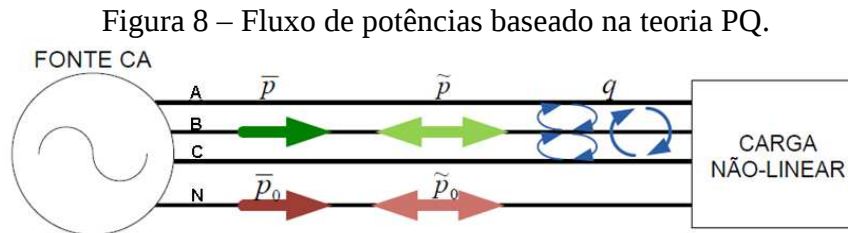
linhas é garantida somente quando os dois fatores de desequilíbrio citados resultarem simultaneamente nulos.

$$F_{d2} = \frac{I_2}{I_1} 100\% \quad (76)$$

$$F_{d0} = \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\% \quad (77)$$

4.2 Compensação utilizando-se filtros ativos

Considerando-se a teoria PQ apresentada no Capítulo 2 deste trabalho, sabe-se que entre as potências instantâneas ilustradas na Figura 8, apenas o valor médio da potência real instantânea $\bar{p}$ e o valor médio da potência de sequência zero $\bar{p}_0$, precisam ser fornecidos pela fonte de alimentação, pois somente estas componentes de potência realizam, efetivamente, trabalho junto à carga. As demais potências estão relacionadas com a presença de harmônicas, desequilíbrios e energia reativa, notadamente, $\tilde{p}$, $\tilde{p}_0$ e q . Estas potências podem ser compensadas com a utilização de um filtro ativo paralelo (AFONSO, 2000a, 2001).



Fonte: Adaptado de AFONSO, 2000a.

Nestas condições, um filtro ativo capaz de sintetizar diferentes correntes instantâneas, apresenta-se como uma potencial opção para compensação dos desequilíbrios. Para tanto, algumas topologias tem sido utilizadas para esta finalidade, diferenciando-se pelo número de chaves, funcionalidades, imunidade a distúrbios e, sobretudo, custos de implantação.

4.2.1 Filtro ativo de quatro braços

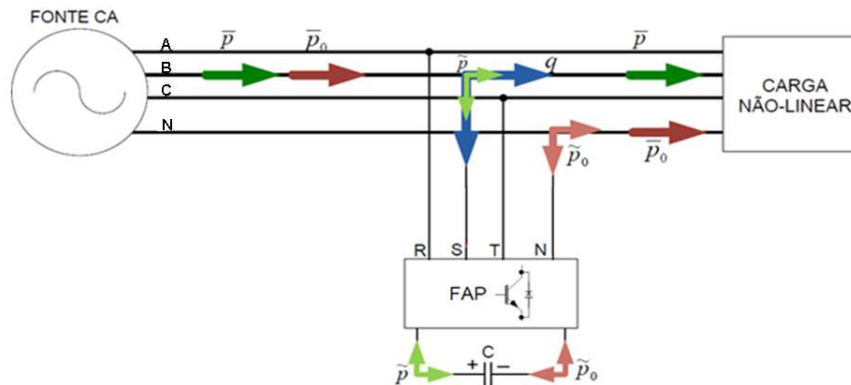
A topologia de um filtro ativo em paralelo (FAP) com quatro braços é aplicada em sistemas trifásicos com fio neutro, e tem ampla aplicação. Tal topologia pode ser utilizada para compensar distorções harmônicas, corrigir o fator de potência, bem como prover o

balanceamento das correntes de carga, ou seja, F_{d2} e F_{d0} nulos, mesmo com carregamentos monofásicos.

A Figura 9 ilustra esquematicamente o fluxo das potências ativas e reativas pelo sistema elétrico, compensadas por um filtro ativo de quatro braços, próprio para sistemas a quatro fios.

Observa-se que a atuação do filtro ativo se faz no sentido de suprir a potência reativa total q , a potência instantânea de sequência zero $\bar{p}_0$, bem como as parcelas oscilatórias das potências $\tilde{p}$ e $\tilde{p}_0$, (AFONSO, et al., 2006).

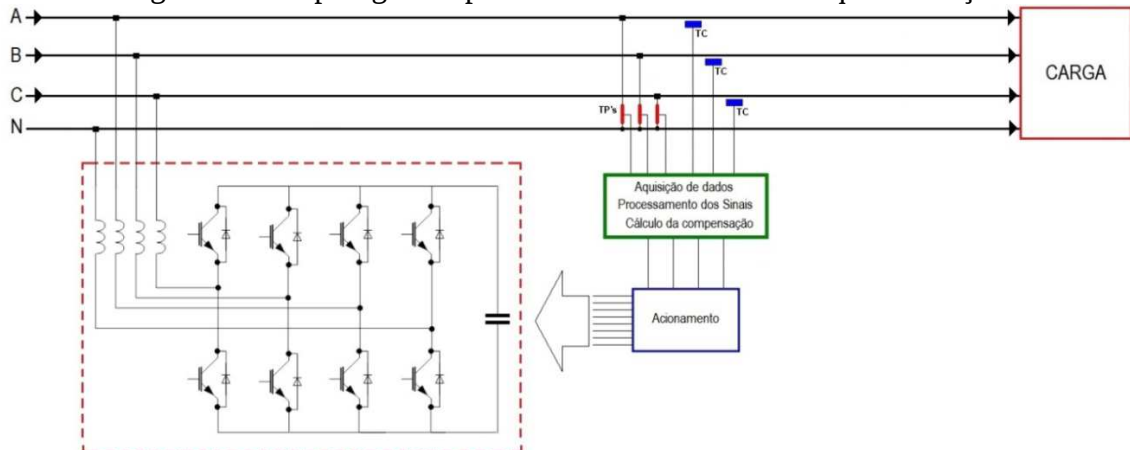
Figura 9 – Compensação com o uso de um FAP de quatro braços.



Fonte: Adaptado de AFONSO, 2000a.

Apresenta-se simplificada na Figura 10 o arranjo elétrico para aplicação de um filtro ativo de quatro braços como compensador de desequilíbrios em redes elétricas a quatro fios (AFONSO, et al., 2005, 2006).

Figura 10 – Topologia simplificada com filtro ativo de quatro braços.



Fonte: o próprio autor

Por meio do controle das chaves eletrônicas é possível sintetizar correntes compensatórias associadas às potências ativa oscilante, potência reativa total e a potência de sequência zero oscilante. Nestas condições, a fonte de alimentação supre apenas as parcelas de potências médias.

4.2.2 Filtro Ativo de Três Braços e Dispositivos Eletromagnéticos

Considerando-se a expectativa de aplicação de estruturas compensadoras mais simples para compensação de desequilíbrios em sistemas elétricos a quatro fios vislumbrou-se a possibilidade de utilização de um novo arranjo de compensação incorporando estruturas eletromagnéticas para confinamento das componentes de sequência zero.

Nesta perspectiva pretende-se utilizar um filtro ativo de menor custo de três pernas contendo, portanto apenas seis chaves eletrônicas. Por outro lado esta simplificação topológica implica também na utilização de um número menor de sensores de corrente e tensão bem como na simplificação dos procedimentos de controle. Frente a um carregamento monofásico com cargas lineares ou não lineares a compensação das componentes de sequência zero poderá ser realizada através da ação dos dispositivos eletromagnéticos (FREITAS, 2011, 2014; FREITAS, et al., 2013, 2014).

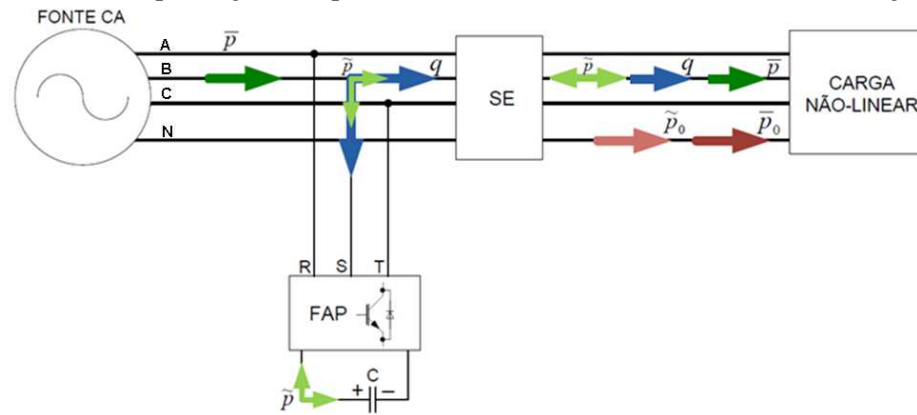
Os dispositivos eletromagnéticos são estruturas passivas, simples e robustas, para os quais o conhecimento tecnológico já se encontra totalmente dominado e com custos bem definidos (McLYMAN, 2004). Considerando-se o mesmo nível de potência a ser processada, presume-se que os custos dos dispositivos eletromagnéticos sejam menores quando comparados aos dispositivos a estado sólido, notadamente as chaves eletrônicas. Espera-se que esta relação seja ainda mais favorável quando se incorpora os custos relacionados com os dispositivos relacionados ao processamento de sinais e controle das chaves eletrônicas.

Nestas condições, à luz da teoria das potências complexas instantâneas, o novo fluxo de potências se fará conforme ilustrado na Figura 11.

As parcelas de potências de sequência zero, pela ação dos dispositivos eletromagnéticos ficam confinadas ao trecho compreendido entre as cargas e o ponto de instalação do supressor eletromagnético (SE- filtro e bloqueador eletromagnético) (BELCHIOR, et al., 2006; OLIVEIRA, et al., 2007, 2008), fazendo com que as correntes de suprimento sejam isentas de desequilíbrios de sequência zero, F_{d0} nulo. As potências relacionadas com a parte oscilante da potência ativa, bem como a parcela total da potência reativa instantânea, são compensadas

pelo filtro ativo de três pernas, provocando F_{d2} nulo. Observa-se que, idealmente, que sob a ação conjunta dos dois dispositivos, assim como no caso anterior, somente a parcela real da potência instantânea será proveniente da fonte de alimentação (OLIVEIRA, et al., 2010).

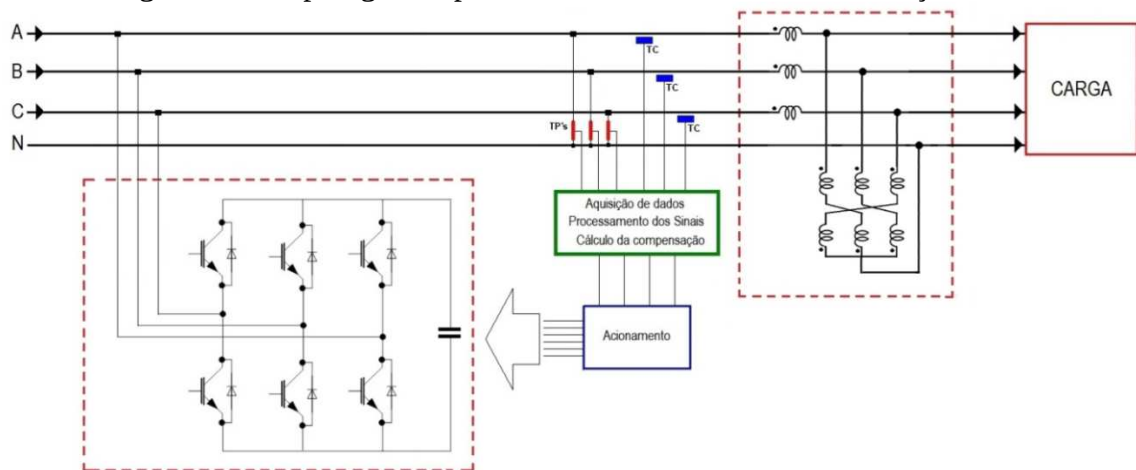
Figura 11 – Compensação das potências com o uso de um FAP de três braços e SE.



Fonte: Adaptado de AFONSO 2000a

Apresenta-se simplificada na Figura 12 o arranjo elétrico para aplicação de um filtro ativo de três braços, associado a um dispositivo eletromagnético para confinamento da sequência zero, como compensador de desequilíbrios em redes elétricas a quatro fios.

Figura 12 – Topologia simplificada com filtro ativo de três braços e SE.



Fonte: Adaptado de FREITAS 2014

Este arranjo, bem como a modelagem dos dispositivos eletromagnéticos foi explorado ao longo do desenvolvimento deste trabalho, e os resultados obtidos são apresentados em (FREITAS, 2014; OLIVEIRA, 2015; OLIVEIRA, 2014).

4.3 Compensação utilizando dispositivos estáticos

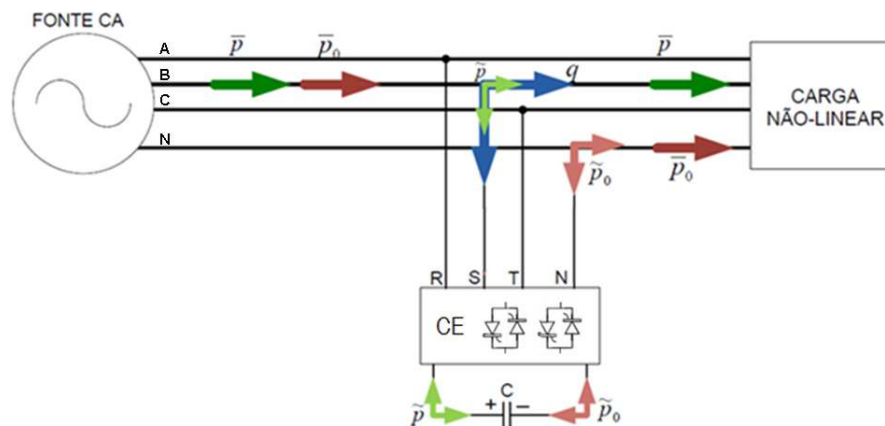
Outra possibilidade para a compensação de desequilíbrios de corrente remete ao uso dos compensadores estáticos controlados por tiristores. São particularmente interessantes, quando comparadas às versões envolvendo filtros ativos, pela simplicidade do sistema de controle e acionamento das chaves.

4.3.1 Combinação de dois compensadores estáticos

Considerando-se o uso apenas de compensadores estáticos para compensação do desequilíbrio de correntes em sistemas a quatro fios, baseado nos desenvolvimentos teóricos apresentados no Capítulo 2, verifica-se a necessidade da utilização de dois compensadores. Neste arranjo pelo menos um dos compensadores estáticos deve ser conectado em estrela para prover a parcela de sequência zero das correntes compensatórias (BARROS, 2000; CZARNECKI, 2013).

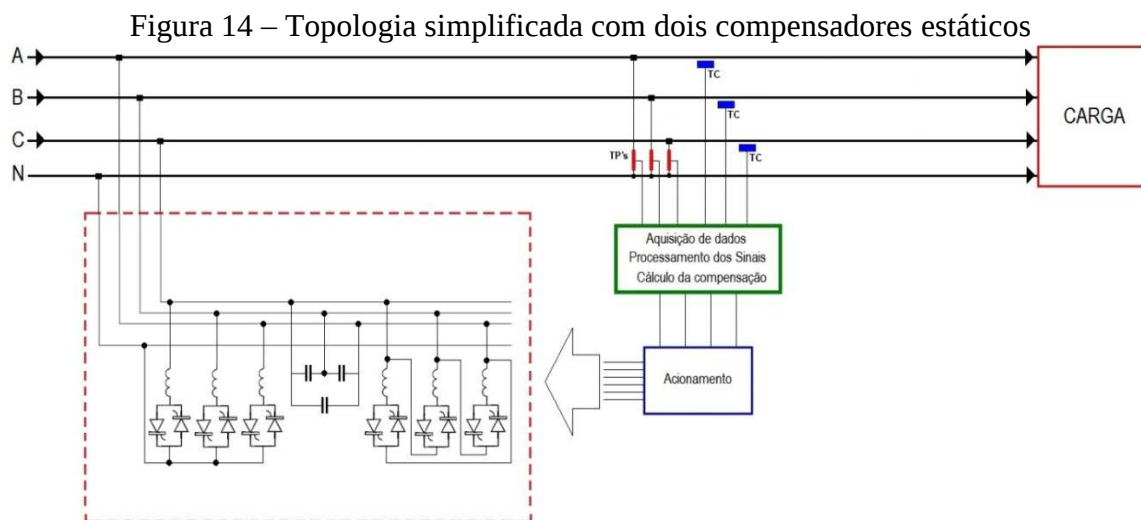
Neste caso, com base na teoria PQ, as parcelas oscilantes das potências real, reativa total e de sequência zero são supridas pelos compensadores estáticos, como sugere a Figura 13.

Figura 13 – Compensação das potências com dois compensadores estáticos.



Fonte: Adaptado de AFONSO, 2000a.

A topologia do circuito de compensação com dois compensadores estáticos é ilustrada, simplificada, na Figura 14.



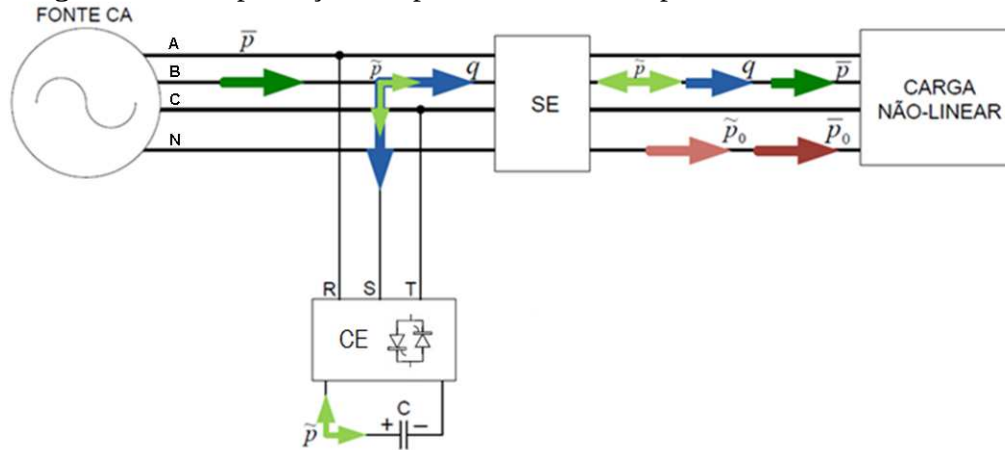
4.3.2 Compensador estático e dispositivos eletromagnéticos

Visando a implementação de dispositivos de compensação de desequilíbrios que utilizem o menor número de componentes eletrônicos, apresentem mecanismos de controle simplificados e que sejam menos sensíveis a distúrbios na rede elétrica, apresenta-se neste item o arranjo topológico proposto como contribuição original deste trabalho. Destaca-se que o arranjo proposto apresentado atende às prerrogativas preconizadas acima e, nestas condições, vislumbra-se um desempenho operacional robusto a custo reduzido quando comparado às demais estruturas de compensação apresentadas anteriormente.

Considerando os resultados animadores obtidos anteriormente derivados do uso combinado de dispositivos ativos e passivos, esta proposta é também fundamentada na utilização de uma estrutura topológica híbrida, agora constituída por um compensador estático e um supressor eletromagnético. Nestas condições, com o uso de apenas um compensador estático pode-se atender os requisitos para compensação de correntes em sistemas a quatro fios, uma vez que as componentes de sequência zero podem ser confinadas pelo supressor eletromagnético.

À luz da teoria PQ, os fundamentos operacionais da estrutura proposta são ilustrados na Figura 15. Assim, nas correntes desequilibradas que alimentam as cargas suas componentes de sequência zero ficam restritas ao trecho entre o supressor e o agrupamento de cargas, enquanto as demais parcelas são fornecidas pelo compensador estático, restando para a rede de suprimento apenas a parte real da potência trifásica.

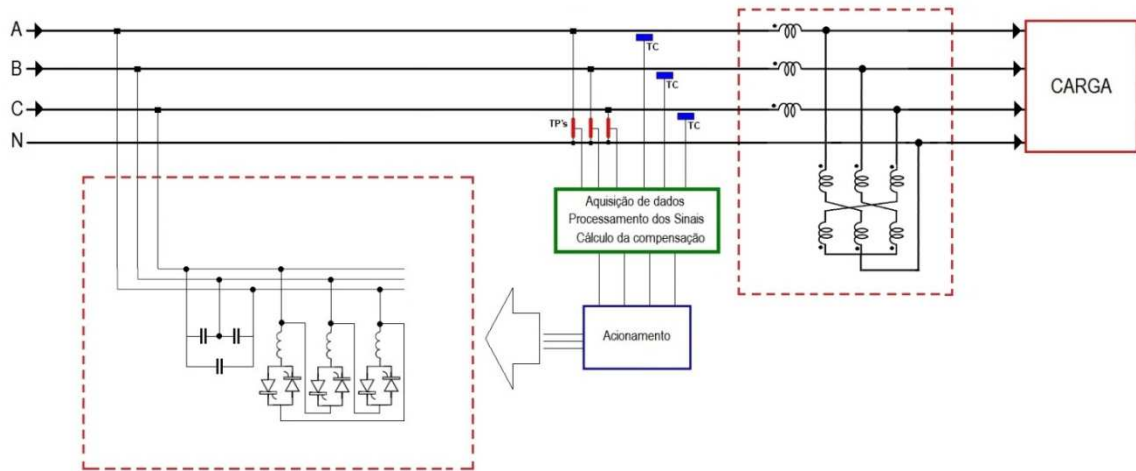
Figura 15– Compensação das potências com compensador estático e um SE.



Fonte: Adaptado de AFONSO, 2000a.

A topologia do circuito de compensação utilizando o arranjo híbrido com um compensador estático e um dispositivo eletromagnético para confinamento de sequência zero é ilustrada, simplificada, na Figura 16.

Figura 16 – Topologia simplificada com um compensador estático e um SE.



Fonte: o próprio autor

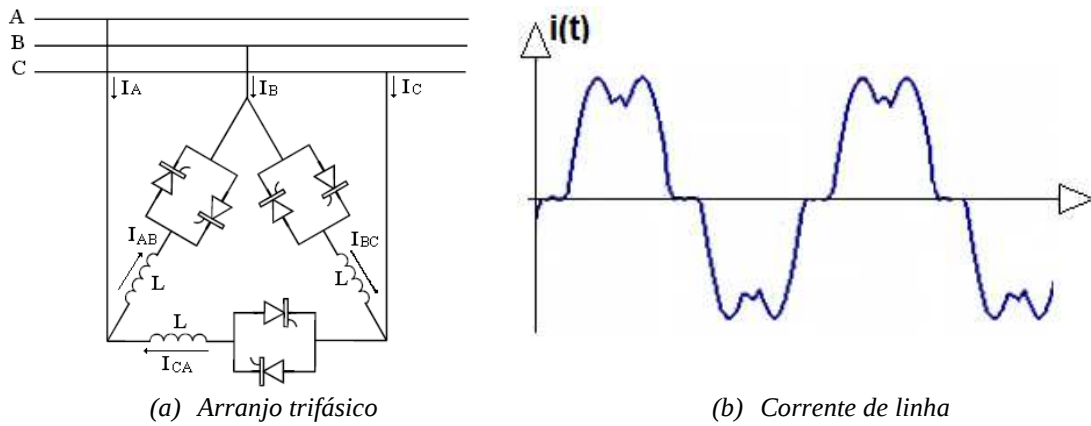
Como destacado anteriormente, esta estrutura topológica para compensação de desequilíbrio de correntes em redes elétricas a quatro fios é a principal contribuição deste trabalho no tocante à originalidade. Neste sentido, os itens subsequentes são dedicados ao estudo detalhado da topologia proposta.

$$I^R = I_{max} [2(\pi - \alpha) - \text{sen } 2(\pi - \alpha)] \quad (78)$$

Sendo I_{max} a corrente máxima ($\alpha=90^\circ$).

A forma convencional para concepção de arranjos trifásicos é a conexão dos reatores em triângulo. A Figura 18(a) ilustra o arranjo, onde cada conjunto de tiristores conectados em antiparalelo pode ter seu ângulo de ignição independentemente controlado. Desta forma, para efeito de uma análise inicial, pode-se tratar cada fase separadamente para obtenção da correspondente corrente e posteriormente compor as correntes de fase para obtenção das respectivas correntes de linha, Figura 18(b).

Figura 18 – Banco de reatores controlados por tiristores.



Fonte: adaptado de MILLER, 1982

Nas condições topológicas ilustradas na Figura 18, as correntes em cada ramo de reator controlado são dadas por:

$$I_{ab}^R = \frac{Q_L}{3V\pi} [2(\pi - \alpha_{ab}) - \text{sen } 2(\pi - \alpha_{ab})]$$

$$I_{bc}^R = \frac{Q_L}{3V\pi} [2(\pi - \alpha_{bc}) - \text{sen } 2(\pi - \alpha_{bc})] \quad (79)$$

$$I_{ca}^R = \frac{Q_L}{3V\pi} [2(\pi - \alpha_{ca}) - \text{sen } 2(\pi - \alpha_{ca})]$$

Sendo Q_L a potência trifásica dos reatores e V a tensão de linha.

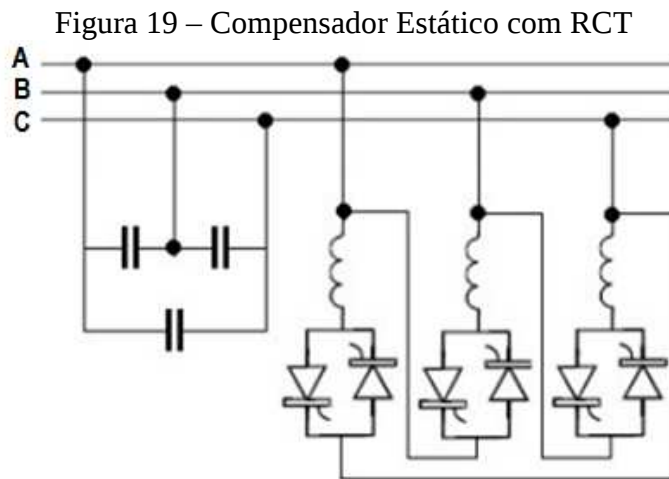
Observa-se que as correntes nos reatores somente apresentarão formas de ondas senoidais quando a tensão de alimentação for senoidal e os de disparo estabelecidos pelo sistema de controle forem coincidentes com os zeros naturais da corrente indutiva total. Para qualquer outra situação, dentro dos limites normais para o ângulo de disparo, as formas de

onda não serão senoidais e, portanto, apresentarão um conteúdo harmônico dependente dos mesmos. Em condições simétricas e equilibradas as ordens características são dadas por $6k \pm 1$.

Para atender as prerrogativas necessárias para compensação dos desequilíbrios de sequência negativa, para diferentes condições operacionais da carga desequilibrada, as correntes de compensação devem assumir, de forma contínua, valores eficazes variáveis abrangendo características capacitivas e indutivas. Para tanto, os reatores controlados devem operar em conjunto com capacitores fixos em paralelo.

Desta forma, este conjunto uma vez convenientemente dimensionado, (OLIVEIRA, MENEZES, 2004), pode atender uma faixa operacional com variação contínua desde um máximo valor capacitivo até um máximo valor indutivo, apenas pelo controle do ângulo de disparo, constituindo-se assim o chamado compensador estático.

O arranjo típico deste compensador é ilustrado na Figura 19.



Fonte: próprio autor

Considerando-se Q_C a potência reativa do banco de capacitores e Q_L a potência reativa do banco de indutores controlados, as relações entre as correntes reativas por fase e os respectivos ângulos de disparo são dadas pelas expressões (80).

$$\begin{aligned}
 I_{ab}^C &= \frac{Q_C}{3V} - \frac{Q_L}{3V\pi} [2(\pi - \alpha_{ab}) - \sin 2(\pi - \alpha_{ab})] \\
 I_{bc}^C &= \frac{Q_C}{3V} - \frac{Q_L}{3V\pi} [2(\pi - \alpha_{bc}) - \sin 2(\pi - \alpha_{bc})] \\
 I_{ca}^C &= \frac{Q_C}{3V} - \frac{Q_L}{3V\pi} [2(\pi - \alpha_{ca}) - \sin 2(\pi - \alpha_{ca})]
 \end{aligned} \tag{80}$$

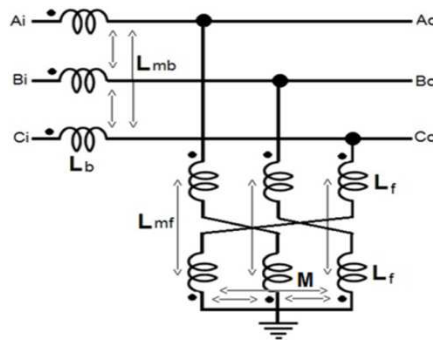
Em função do ângulo de disparo dos tiristores, valor este que será definido pelo sistema de controle, pode-se ter individualmente para cada fase, a corrente do reator variando de zero até seu valor nominal. Se a corrente é nula, isto significa que o reator estará fora de operação e desta forma o compensador agirá com uma característica totalmente capacitiva. À medida que o ângulo de ignição é variado no sentido de, gradativamente, aumentar a corrente no reator, tem-se que o efeito do reator vai se manifestando de forma crescente, atingindo pontos operacionais em que o efeito indutivo se igualará ao capacitivo.

Desta forma, uma vez conhecidas as correntes compensatórias definidas pelo sistema de controle de desequilíbrio, seja pelo método de Steinmetz ou Teoria PQ, os ângulos de disparos das chaves, α_{ab} , α_{bc} e α_{ca} , podem ser determinados pela solução numérica das equações (80).

4.4.2 Dispositivos eletromagnéticos.

O arranjo adotado para o supressor eletromagnético segue a topologia propostas nas referências (DAHONO, 2002; FREITAS, 2014; BUZO, 2016). A Figura 20 ilustra simplificada os dispositivos de bloqueio e confinamento de sequência zero, com destaque para as interligações dos enrolamentos.

Figura 20 – Arranjo Simplificado do supressor eletromagnético.



Fonte: adaptado de FREITAS, 2010.

Apresenta-se em (81) e (82) as equações que regem o modelo matemático adotado para estes dispositivos, conforme desenvolvimento matemático apresentado nos artigos publicados no contexto deste trabalho, (OLIVEIRA, et al., 2009a, 2009b; OLIVEIRA, et al., 2010; FREITAS, et al., 2010).

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} 2(L_f - L_{mf}) & 0 & 0 \\ 0 & 2L_f + L_{mf} + 3M & 0 \\ 0 & 0 & 2L_f + L_{mf} + 3M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}^h \quad (81)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V_0 \\ \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix}^h = jh\omega \begin{bmatrix} L_b + 2L_{mb} & 0 & 0 \\ 0 & L_b - L_{mb} & 0 \\ 0 & 0 & L_b - L_{mb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix}^h \quad (82)$$

Considerando-se os coeficientes de acoplamento magnético entre bobinas de uma mesma coluna, k_f , e entre bobinas de colunas distintas, λ , define-se as impedâncias harmônicas sequenciais dadas em (83) e (84). Estas expressões, ainda que tenham sido obtidas a partir das condições simplificadoras citadas em publicações anteriores, ilustram claramente os princípios operacionais do dispositivo como filtro para as componentes de sequência zero (OLIVEIRA, et al., 2010).

$$Z_{f0}^h = r_o + 2j\omega h[1 - k_f]L \quad (83)$$

$$Z_{f1+/-}^h = r + j\omega h[2 + k_f + 3\lambda]L \quad (84)$$

Baseando-se na similaridade dos enrolamentos, aspectos geométricos e construtivos do núcleo magnético, bem como algumas condições simplificadoras é possível estabelecer um modelo matemático das impedâncias sequenciais no domínio da frequência. Admitindo-se as indutâncias próprias idênticas, L_b , as indutâncias mútuas entre bobinas distintas também iguais entre si, L_{mb} , as resistências equivalentes r_o e r e o fator de acoplamento k_b , obtém-se as expressões (85) e (86). Estas equações mostram de forma inequívoca a ação do dispositivo como bloqueador de componentes de sequência zero (OLIVEIRA, et. al., 2010).

$$Z_{b0}^h = r_o + jh\omega.(1 + 2k_b)L_b \quad (85)$$

$$Z_{b+/-}^h = r + jh\omega(1 - k_b)L_b \quad (86)$$

4.4.3 Simulação digital em ambiente PSIM

Os estudos teóricos envolvendo a prova de conceito do modelo proposto neste trabalho foram implementados por simulação digital na plataforma computacional no domínio do tempo Power Simulator *PSIM*®.

Realizou-se os estudos em duas etapas, considerando-se individualmente a ação dos dispositivos de compensação, notadamente o supressor eletromagnético e o compensador estático com o objetivo de comprovar a eficácia de cada componente no processo de mitigação do desequilíbrio das correntes.

Admitiu-se como carga um conjunto formado por arranjos de resistências e indutâncias, onde o desequilíbrio da carga é simulado mediante alterações na forma de carregamento de cada uma das fases em um sistema a quatro fios. O comportamento das correntes ao longo do circuito é investigado em quatro intervalos distintos compreendendo as ocorrências apresentadas na Tabela 3.

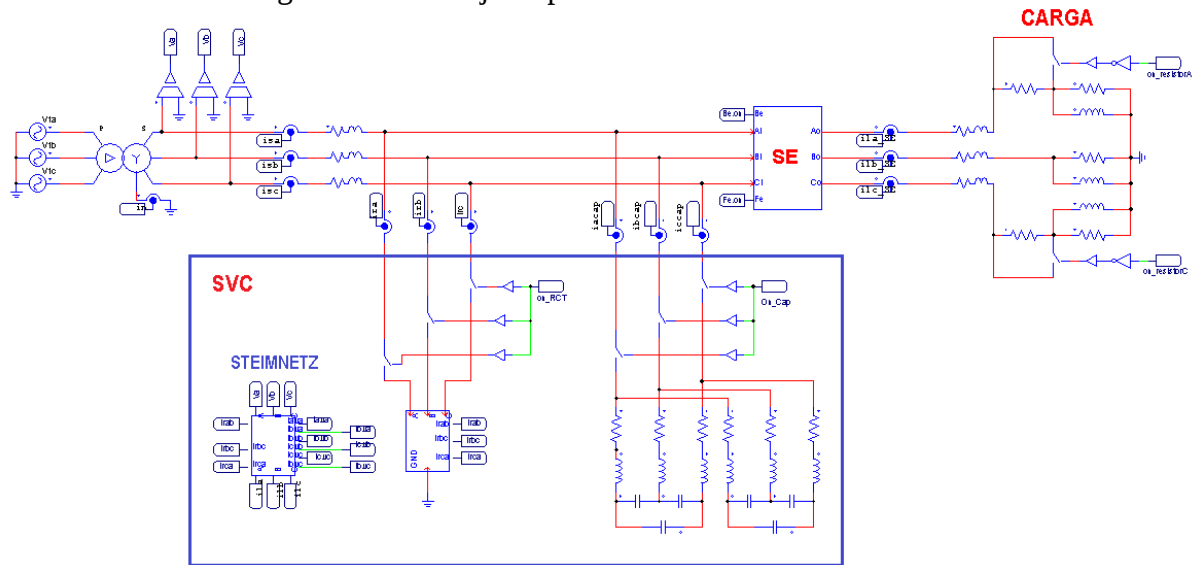
Tabela 3 – Intervalos de simulação

INTERVALO	OCORRÊNCIA
0.95s < t < 1s	Alimentação de carga equilibrada
1s < t < 1.05s	Desequilíbrio da carga sem a ação de dispositivos de mitigação
1.05s < t < 1.1s	Desequilíbrio da carga e ação apenas do compensador Estático.
t > 1,1s	Desequilíbrio da carga e ação do Compensador Estático e do Supressor Eletromagnético

Fonte: o próprio autor

A Figura 21 ilustra o circuito implementado, contendo a carga RL, o supressor eletromagnético e um compensador estático.

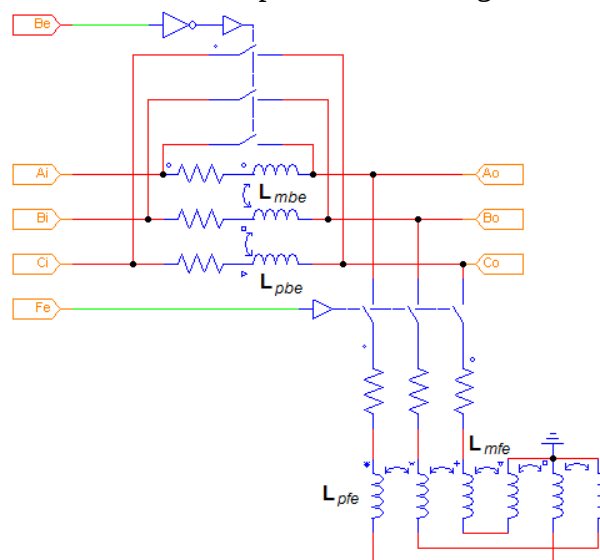
Figura 21 – Arranjo implementado no ambiente *PSIM*.



Fonte: o próprio autor

Os dispositivos eletromagnéticos foram também modelados a partir das metodologias propostas, utilizando-se os elementos básicos primários contendo indutores mutuamente acoplados da biblioteca *PSIM*. Os elementos básicos primários *Coupled Inductor.6* e *Coupled Inductor.3* foram utilizados na concepção do filtro e do bloqueador eletromagnéticos, respectivamente e foram encapsulados em um único bloco denominado SE. Os elementos constituintes deste bloco são ilustrados na Figura 22.

Figura 22 - Modelo do Supressor Eletromagnético no *PSIM*



Fonte: o próprio autor

Os valores das indutâncias mútuas e próprias adotadas para os diferentes enrolamentos são ilustrados nas Figuras 23 e 24, contendo os blocos de entrada de dados do ambiente de simulação *PSIM*. Por outro lado destaca-se também que foram adotados, em princípio, dispositivos (indutores) com núcleo de ar, supondo, portanto, que no processo construtivo destes equipamentos a linearização do meio magnético e ajustes das indutâncias possam ser controlados através do comprimento de entreferros.

Figura 23 - Dados do Filtro Eletromagnético.

Name	Value	Display
MUT61		☐
L11 (self)	.2	☐
L12 (mutual)	0	☐
L22 (self)	.2	☐
L13 (mutual)	0	☐
L23 (mutual)	0	☐
L33 (self)	.2	☐
L14 (mutual)	.199999999	☐
L24 (mutual)	0	☐
L34 (mutual)	0	☐
L44 (self)	.2	☐
L15 (mutual)	0	☐
L25 (mutual)	.199999999	☐
L35 (mutual)	0	☐
L45 (mutual)	0	☐
L55 (self)	.2	☐
L16 (mutual)	0	☐
L26 (mutual)	0	☐
L36 (mutual)	.199999999	☐
L46 (mutual)	0	☐
L56 (mutual)	0	☐
L66 (self)	.2	☐

Fonte: o próprio autor

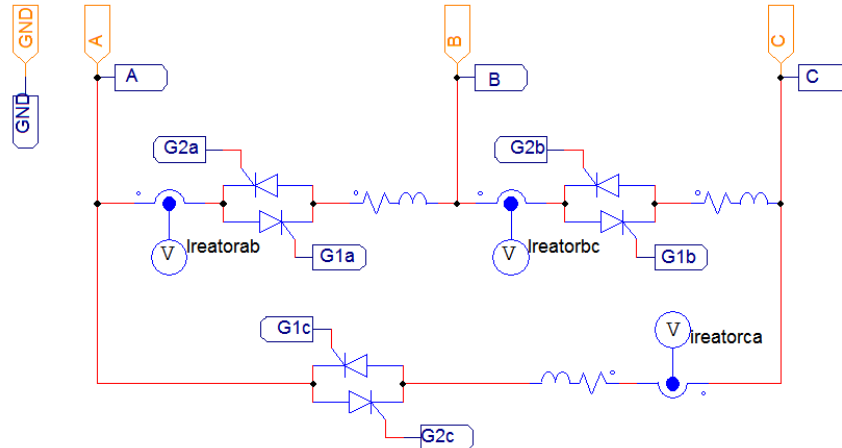
Figura 24 - Dados do Bloqueador Eletromagnético.

Name	Value	Display
MUT1		☐
L11 (self)	0.001	☐
L12 (mutual)	0.000999	☐
L22 (self)	0.001	☐
L13 (mutual)	0.000999	☐
L23 (mutual)	0.000999	☐
L33 (self)	0.001	☐
Initial Current i1	0	☐
Initial Current i2	0	☐
Initial Current i3	0	☐
Current Flag_1	0	☒
Current Flag_2	0	☒
Current Flag_3	0	☐

Fonte: o próprio autor

Os reatores controlados que compõem o compensador estático foram implementados no ambiente *PSIM* conforme arranjo ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Arranjo do Reator controlado a tiristores no ambiente *PSIM*.

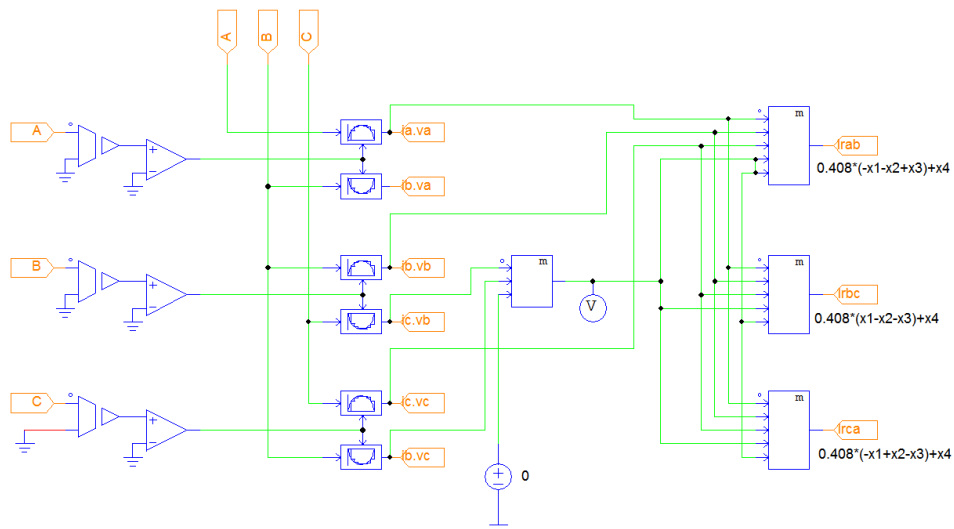


Fonte: o próprio autor

Para definição do sistema de controle, foram implementadas as duas metodologias descritas em capítulos anteriores, ou seja, métodos PQ e *Steinmetz*.

Como exemplo apresenta-se na Figura 26, o diagrama esquemático da metodologia *Steinmetz* no domínio do tempo em ambiente *PSIM*. Estas metodologias são utilizadas para o cálculo das correntes compensatórias I_{ab} , I_{bc} e I_{ca} a serem impostas pelo compensador estático às correntes.

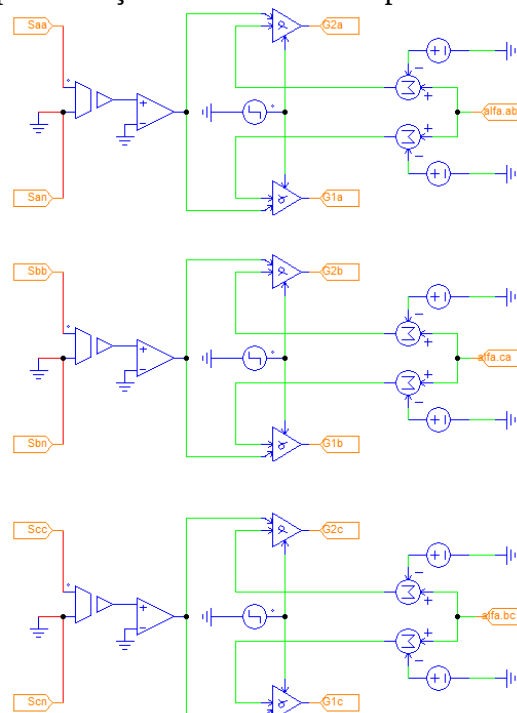
Figura 26 – Implementação do método de Steinmetz no *PSIM*.



Fonte: o próprio autor

O circuito de disparo dos tiristores dos reatores controlados, parte componente do compensador estático, foi implementado no ambiente *PSIM* conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Implementação do método de disparo de tiristores no *PSIM*.



Fonte: o próprio autor

O banco de capacitores foi implementado com a topologia de um filtro sintonizado em quinta e sétima harmônicas com o objetivo específico de reduzir o impacto provocado pela operação dos reatores controlados no tocante às distorções harmônicas da corrente compensatória, Figura 21. É importante destacar que tal providência praticamente não tem influência sobre as componentes fundamentais das correntes e, portanto, não produz nenhum efeito considerável sobre a compensação dos desequilíbrios.

Investigou-se em vários casos estudados o desempenho do sistema de compensação proposto e invariavelmente os resultados obtidos demonstraram de forma inequívoca a eficácia da estratégia adotada.

Como ilustração, apresenta-se dois casos selecionados realizados com premissas de compensação idênticas e direcionadas para o equilíbrio das correntes e fator de potência unitário na fonte de alimentação.

CASO 1: *Desequilíbrio moderado na carga, contendo diferentes carregamentos por fase bem como fatores de potência distintos.*

Apresentam-se na Tabela 4 os resultados para os valores eficazes das correntes nas linhas A, B e C, e respectivos fatores de potência junto à fonte de alimentação, nos diferentes intervalos de ocorrências.

Observa-se no intervalo inicial, $0,95s < t < 1s$, correntes equilibradas com 3,78 A por fase e fatores de potência idênticos na valor de 0,64. Em seguida, intervalo $1s < t < 1,05s$, mediante a alteração na distribuição das cargas por fase o sistema passa a apresentar correntes desequilibradas e fatores de potência diversos nas três fases. Este cenário é reproduzido pelo simulador *PSIM* por meio da inclusão de resistências em série com a carga original nas fases A e C, provocando, portanto o desequilíbrio desejado.

A partir de $t=1,05$ inicia-se a ação do sistema de compensação, iniciando-se pela participação apenas do compensador estático SVC. No intervalo de tempo correspondente, ou seja, $1,05s < t < 1,1s$, observa-se que apesar da redistribuição das correntes por fase promovida pela atuação do SVC, não foi possível alcançar os objetivos preconizados. Tal fato está diretamente ligado à topologia adotada no arranjo do SVC, pois se trata de um arranjo trifásico simplificado composto por apenas um compensador ligado em triângulo e, portanto, incapaz de eliminar a parcela de desequilíbrio associada às componentes de sequência zero, como descrito anteriormente.

Tabela 4 – Resultados para o CASO 1.

FONTE	INTERVALOS OCORRÊNCIAS E CONDIÇÕES OPERACIONAIS			
	$0.95s < t < 1s$	$1s < t < 1.05s$	$1.05s < t < 1.1s$	$t > 1,1s$
	Equilibrado	Desequilíbrio	SVC	SVC+SE
$I_{RMS\ A}$	3,78	1,01	2,21	1,83
$I_{RMS\ B}$	3,78	3,79	3,21	1,83
$I_{RMS\ C}$	3,78	1,70	3,58	1,85
FP_A	0,64i	0,91i	0,59i	0,99i
FP_B	0,64i	0,64i	0,74i	0,98i
FP_C	0,64i	0,93i	0,64i	0,98i

Fonte: o próprio autor

Posteriormente, a partir de $t > 1,1s$, tem-se a ação complementar motivada pela conexão do supressor eletromagnético, o qual promove o confinamento das componentes de sequência zero ao trecho compreendido entre este dispositivo e a carga, eliminando assim estas componentes das correntes provenientes da fonte. O resultado desta ação combinada

concretiza os objetivos estabelecidos, mantendo-se a partir de $t > 1,1s$ os valores eficazes das correntes e respectivos fatores de potência praticamente iguais nas três fases.

Pela Figura 28 observa-se o comportamento no tempo das correntes nas três fases nos diferentes intervalos considerados. Na parte superior da Figura 28, encontram-se as correntes amostradas nos terminais da carga, e na parte inferior da Figura 28 ilustra-se as correntes correspondentes na fonte de alimentação.

O equilíbrio entre as correntes na fonte de alimentação após $t = 1,1s$ é notável, entretanto é importante destacar a presença de distorções harmônicas provenientes da ação do compensador estático, notadamente do reator controlado. As correntes compensatórias correspondentes, envolvendo o reator controlado (superior) e o supressor eletromagnético (inferior), são apresentadas na Figura 29. Neste caso, Os ângulos de disparo dos tiristores, definidos a partir do sistema de controle foram $\alpha_{ab} = 119^\circ$, $\alpha_{bc} = 129^\circ$ e $\alpha_{ca} = 109^\circ$, para os reatores conectados entre as linhas ab, bc e ca, respectivamente,.

A convergência do processo de compensação para a obtenção de fatores de potência praticamente unitário em todas as fases pode ser observado na Figura 30. Nesta Figura apresentam-se as correntes e respectivas tensões nas fases a, b e c, nos intervalos de tempo correspondentes às diferentes ocorrências.

CASO 2: *Desequilíbrio acentuado na carga, provocado pelo desligamento de uma das fases, mantendo as demais fases com fator de potência original.*

O caso em pauta remete a uma condição operacional para uma condição extrema de desequilíbrio provocado pelo desligamento de uma das cargas, neste caso a carga conectada entre a fase A e o neutro. Os resultados obtidos para os valores eficazes das correntes nas linhas A, B e C, e respectivos fatores de potência junto à fonte de alimentação, nos diferentes intervalos de ocorrências, são ilustrados na Tabela 5.

Inicia-se o processo de simulação com o intervalo inicial, $0,95s < t < 1s$, sem nenhuma ocorrência e com correntes equilibradas com 3,78A por fase e fatores de potência idênticos no valor de 0,64, assim como no caso anterior.

No intervalo $1s < t < 1,05s$, mediante a alteração na distribuição das cargas por fase o sistema passa a apresentar correntes desequilibradas e fatores de potência diversos nas três fases. Do ponto de vista do arranjo de simulação, tal ocorrência foi simulada pela inclusão de um alto valor de resistência em série na fase A, Figura 21.

A ação apenas do compensador estático, SVC, sobre as correntes de alimentação correspondente ao intervalo $1,05s < t < 1,1s$, a exemplo do caso anterior, promove uma nova distribuição das correntes notadamente mais homogêneas, entretanto ainda longe do equilíbrio almejado. Os ângulos de disparo dos reatores foram de $\alpha_{ab} = 110^\circ$, $\alpha_{bc} = 141^\circ$ e $\alpha_{ca} = 126^\circ$.

O equilíbrio quase ideal é alcançado após a entrada em operação dos dispositivos reunidos no denominado supressor eletromagnético de sequência zero em $t = 1,1s$.

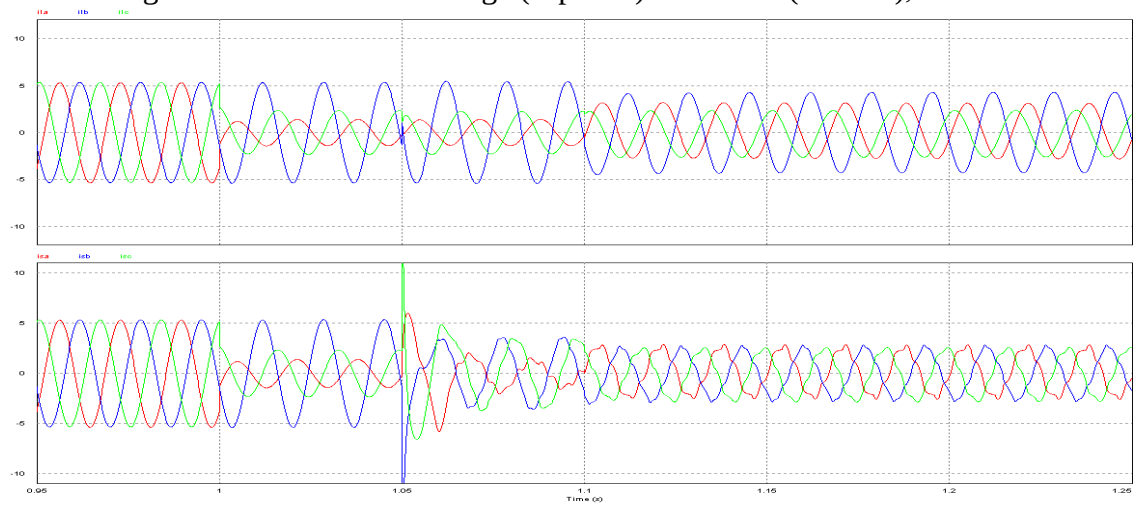
Tabela 5 – Resultados para o CASO 2.

FONTE	INTERVALOS OCORRÊNCIAS E CONDIÇÕES OPERACIONAIS			
	0.95s < t < 1s	1s < t < 1.05s	1.05s < t < 1.1s	t > 1,1s
	Equilibrado	Desequilíbrio	SVC	SVC+SE
I_{RMS A}	3,78	0,32	2,92	1,79
I_{RMS B}	3,78	3,75	3,03	1,83
I_{RMS C}	3,78	3,84	4,57	1,79
FP_A	0,64i	0,47i	0,39i	0,99i
FP_B	0,64i	0,64i	0,59i	0,97i
FP_C	0,64i	0,65i	0,76i	0,94i

Fonte: o próprio autor

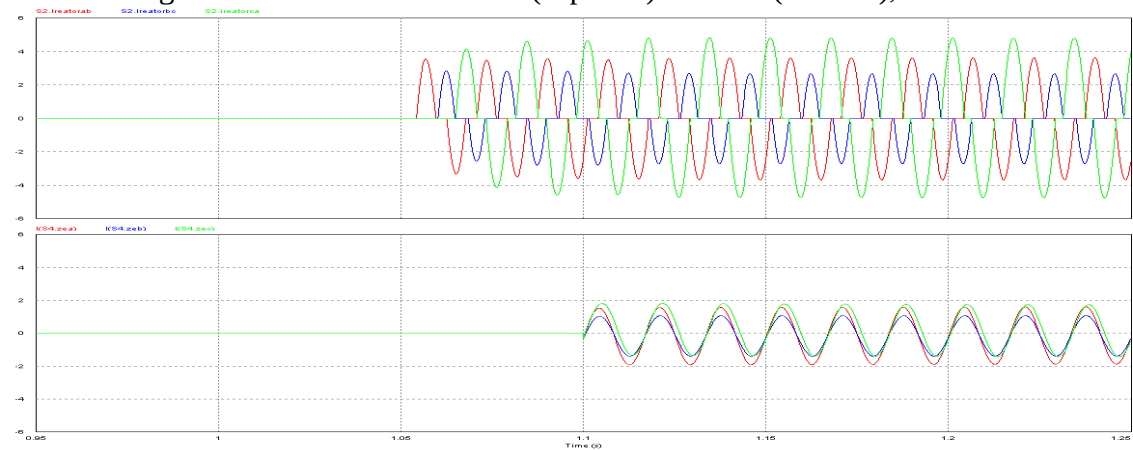
As Figuras 31, 32 e 33, ilustram as formas de ondas das correntes e tensões, nos diferentes intervalos de ocorrências, para as condições descritas neste caso. As informações contidas nas Figuras são equivalentes àquelas apresentadas para o CASO 1.

Figura 28 – Correntes na carga (superior) e na fonte (inferior), CASO 1.



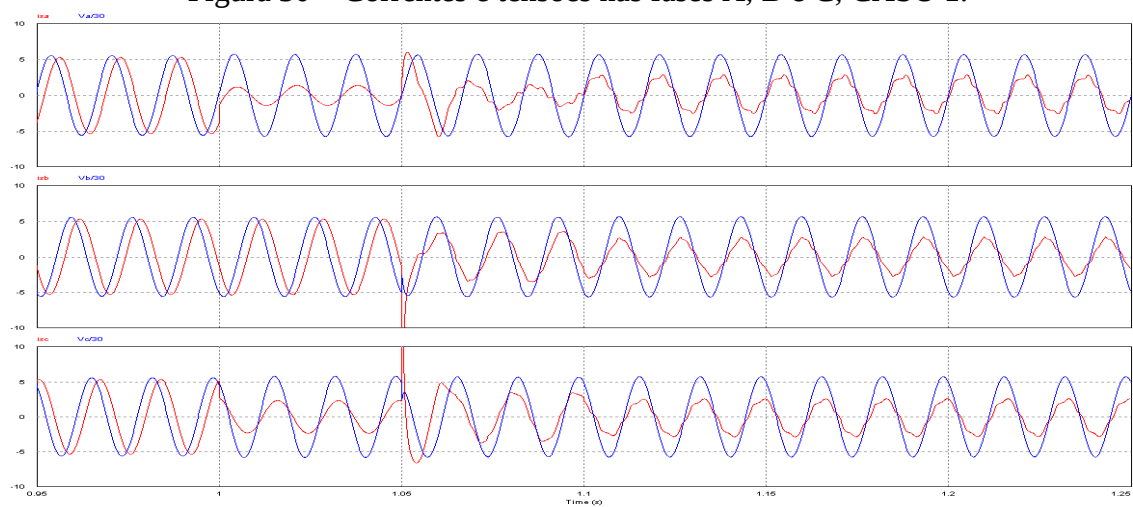
Fonte: o próprio autor

Figura 29 – Correntes no RCT (superior) e no SE (inferior), CASO 1.



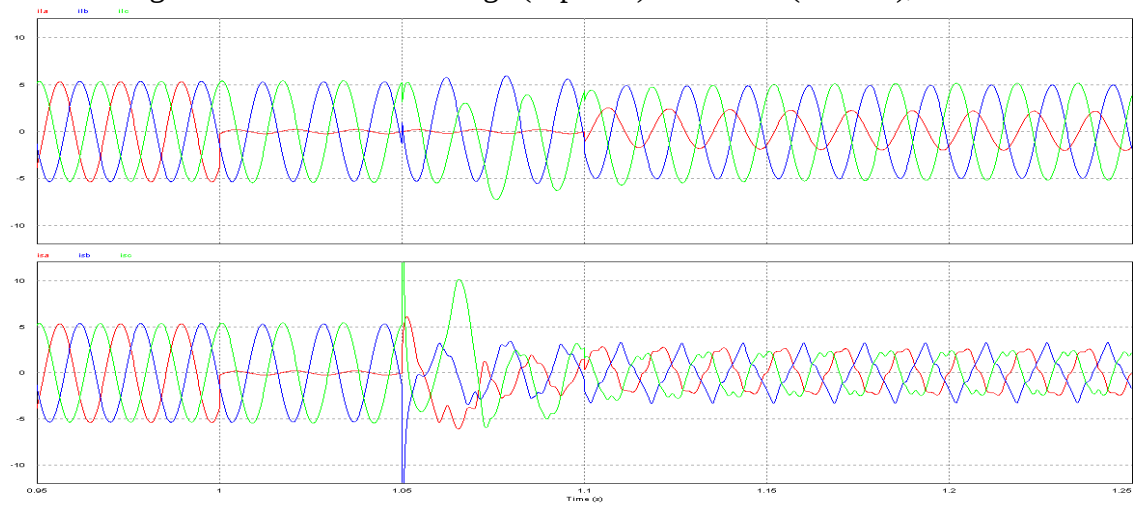
Fonte: o próprio autor

Figura 30 – Correntes e tensões nas fases A, B e C, CASO 1.



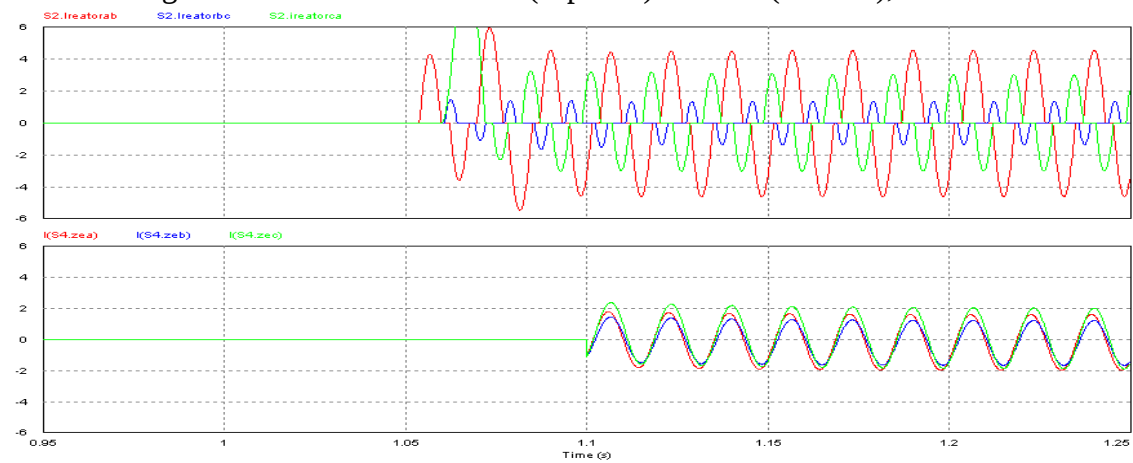
Fonte: o próprio autor

Figura 31 - Correntes na carga (superior) e na fonte (inferior), CASO 2



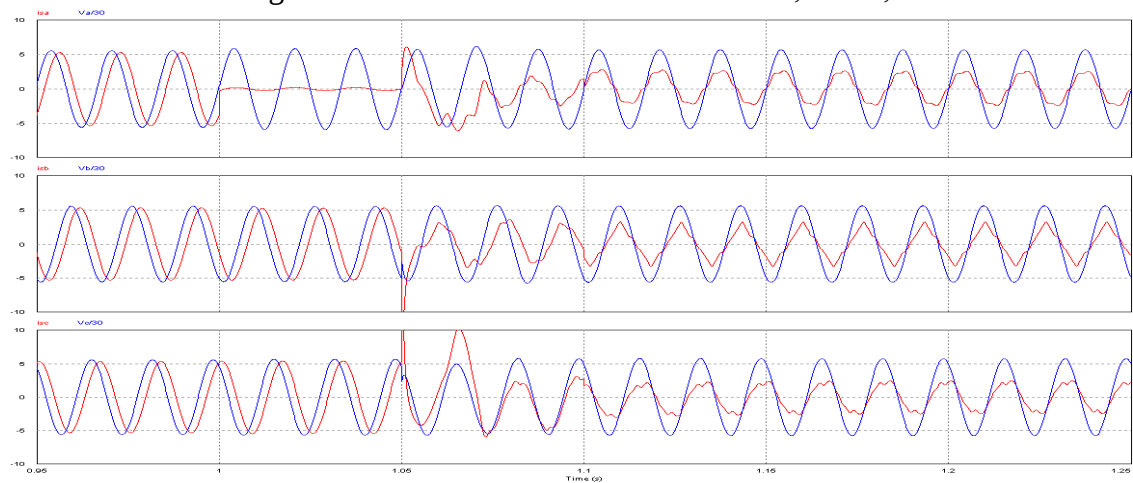
Fonte: o próprio autor

Figura 32 - Correntes no RCT (superior) e no SE (inferior), CASO 2.



Fonte: o próprio autor

Figura 33 - Correntes e tensões nas fases A, B e C, CASO 2.



Fonte: o próprio autor

4.5 Conclusões

Para a adequação dos níveis de desequilíbrios aos padrões preconizados pelo órgão controlador, muitas vezes se torna necessário o uso de equipamentos de compensação. Neste capítulo foram, inicialmente, discutidos os principais esquemas para compensação de desequilíbrios de correntes em redes elétricas, destacando-se as particularidades das diferentes topologias, suas vantagens, desvantagens e limitações operacionais.

Norteados pela concepção de um sistema de compensação direcionado a redes elétricas a quatro fios, normalmente de baixa tensão, os objetivos foram traçados com vistas à definição de uma estratégia de compensação favorável à utilização de equipamentos de baixo custo, robustos e com algum grau de resiliência. A busca e a concretização destes objetivos constituem a principal contribuição deste trabalho, sobretudo no tocante à sua originalidade.

Neste sentido apresenta-se como proposta o uso combinado de um compensador estático, do tipo reator controlado a tiristores associado a dispositivos eletromagnéticos para confinamento de componentes de sequência zero das correntes.

Foram avaliadas as características operacionais de cada um dos dispositivos no suprimento das parcelas de sequências negativa e zero das correntes de compensação, bem como as respectivas topologias e modelos matemáticos.

Na sequência e, baseado nos modelos disponíveis, foram realizadas simulações digitais em ambiente *PSIM® - Power Simulator*, com o objetivo de avaliar a aderência da metodologia proposta, bem como o comportamento dos equipamentos de compensação.

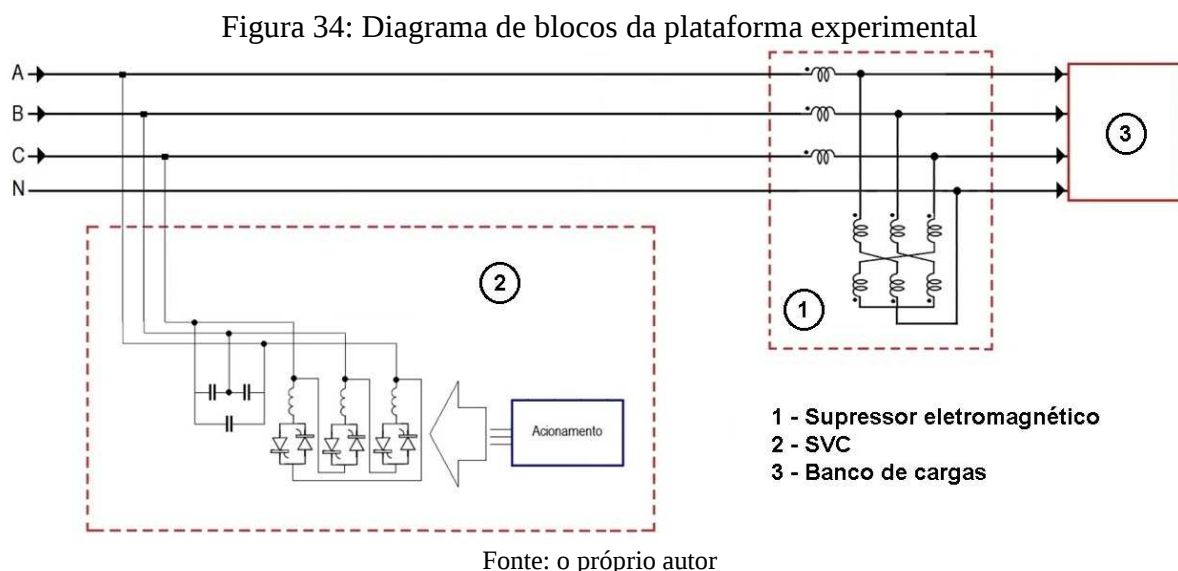
Os resultados obtidos comprovaram a eficácia da metodologia proposta e a viabilidade de implantação por meio dos dispositivos selecionados, notadamente um compensador estático e um supressor eletromagnético. Sob o ponto de vista quantitativo os resultados incorporados como exemplo neste trabalho demonstram a total aderência aos objetivos e metas concebidas na proposição desta tese.

5. DIMENSIONAMENTO, PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

Para o estudo experimental da solução proposta no trabalho, bem como aperfeiçoamento e realimentação dos modelos digitais utilizados, uma plataforma de ensaios foi implementada nas dependências do Laboratório de Qualidade da Energia Elétrica.

Tendo como base o desenvolvimento realizado nas etapas anteriores, obtidos a partir de resultados de simulações digitais e trabalhos desenvolvidos previamente, um arranjo eletromagnético, banco de cargas, bem como circuitos eletrônicos necessários para composição de um SVC, foram elaborados e construídos.

A Figura 34 abaixo mostra o diagrama de blocos da plataforma experimental implementada, destacando seus principais componentes.



A fim de otimizar sua implementação, a plataforma foi dividida, de forma geral, em três partes distintas e independentes, de forma a possibilitar uma montagem modular, com cada estágio sendo construído e testado de forma independente, sendo eles:

- Supressor eletromagnético
- Compensador estático de reativos (SVC)
- Banco de cargas

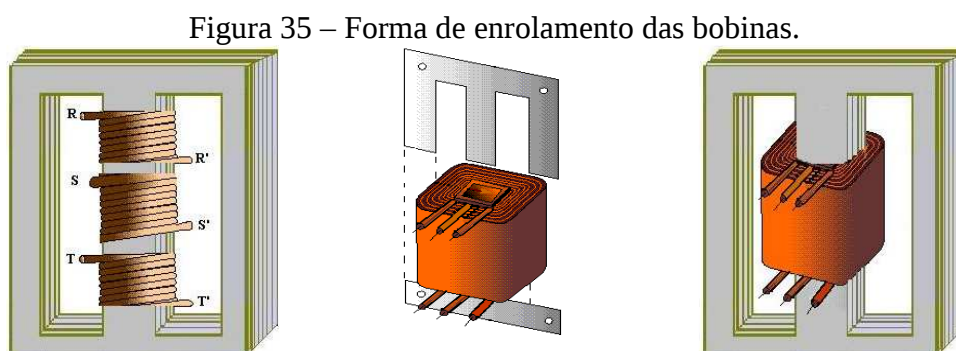
5.1 Supressor eletromagnético

O bloco denominado supressor eletromagnético é composto por dois dispositivos independentes, porém, operando de forma conjunta, denominados bloqueador eletromagnético de sequência zero e o filtro eletromagnético de sequência zero.

5.1.1 Bloqueador eletromagnético

O dispositivo bloqueador eletromagnético tem com função bloquear a passagem de componentes harmônicas de sequência zero, sendo visto pelas mesmas, como um dispositivo de alta impedância.

O processo de bloqueio é obtido através da construção de um conjunto eletromagnético constituído de um conjunto trifásico de bobinas, com mesmo número de espiras por fase, onde as mesmas são enroladas sobre um único núcleo magnético de forma concêntrica, formando camadas, ou seja, uma camada sobreposta à outra, com intuito de obter um bom acoplamento magnético entre elas, uma vez que a eficácia do processo de bloqueio depende do acoplamento entre as mesmas (OLIVEIRA, et al., 2010). A Figura 35 demonstra a forma do enrolamento das bobinas no núcleo magnético:



Fonte: Adaptado de FREITAS, 2010.

O arranjo proposto pela Figura 35, apresenta o arranjo trifásico de bobinas, onde cada bobina é conectada em série a cada uma das fases da rede de alimentação. Conforme descrito anteriormente, tais bobinas são enroladas formando camadas intercaladas, possibilitando, dessa maneira, um bom acoplamento entre as mesmas, o que irá contribuir para que as indutâncias mútuas e próprias sejam iguais (OLIVEIRA, et al., 2010).

Para dimensionamento do dispositivo, foi utilizado o procedimento descrito em (BUZO, 2016).

A Figura 36 mostra o dispositivo bloqueador de componentes de sequência zero utilizado durante os ensaios experimentais.

Figura 36 – Bloqueador eletromagnético de sequência zero.



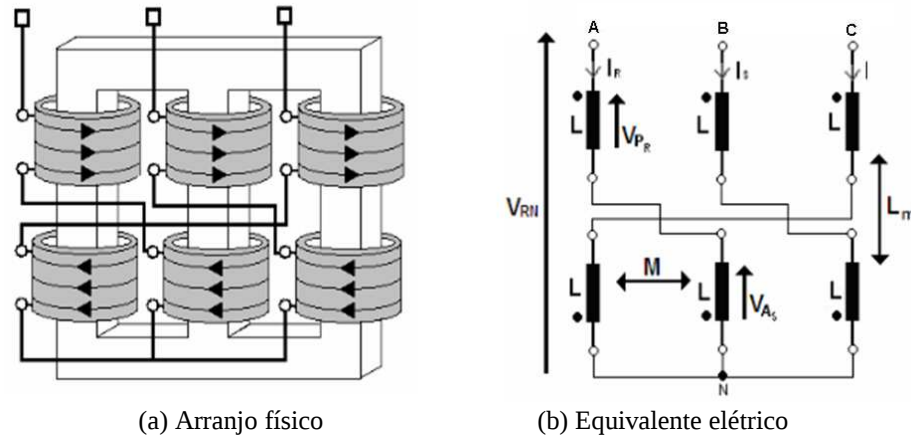
Fonte: Adaptado de RAVAGNANI, 2008.

5.1.2 Filtro eletromagnético

O arranjo eletromagnético utilizado na concepção do filtro eletromagnético de sequência zero é constituído por seis bobinas, com enrolamentos idênticos, denominadas como principais e auxiliares, dispostas em pares sobre cada coluna de um núcleo magnético tipo “E-I” simétrico.

A associação dos enrolamentos é realizada em série, com as bobinas principais conectadas diretamente a cada fase do sistema alimentador, e em oposição de fase as bobinas auxiliares de outro ramo magnético do núcleo. A interligação do conjunto de bobinas é efetuada em zigue-zague, compondo um sistema trifásico aterrado (OLIVEIRA, et al, 2010). A Figura 37 abaixo apresenta o arranjo utilizado.

Figura 37 – Arranjo eletromagnético do sistema de filtragem de sequência zero



(a) Arranjo físico

(b) Equivalente elétrico

Fonte: Adaptado de FREITAS, 2010.

Baseado no modelo proposto em (OLIVEIRA, et al., 2015), sabe-se que, independentemente da ordem harmônica das correntes, a indutância equivalente para a sequência zero tenderá à nulidade quando o fator de acoplamento magnético entre as bobinas de uma mesma coluna magnética for unitário. Por outro lado, a indutância nominal é projetada de modo a apresentar impedâncias de sequências positiva ou negativa suficientemente elevadas, com o objetivo de minimizar o impacto sobre fator de deslocamento final.

O dimensionamento do filtro eletromagnético foi realizado com base nos procedimentos apresentados em (OLIVEIRA, et al., 2015).

A Figura 38 mostra o filtro eletromagnético de sequência zero utilizado para os ensaios experimentais.

Figura 38 – Filtro eletromagnético de sequência zero



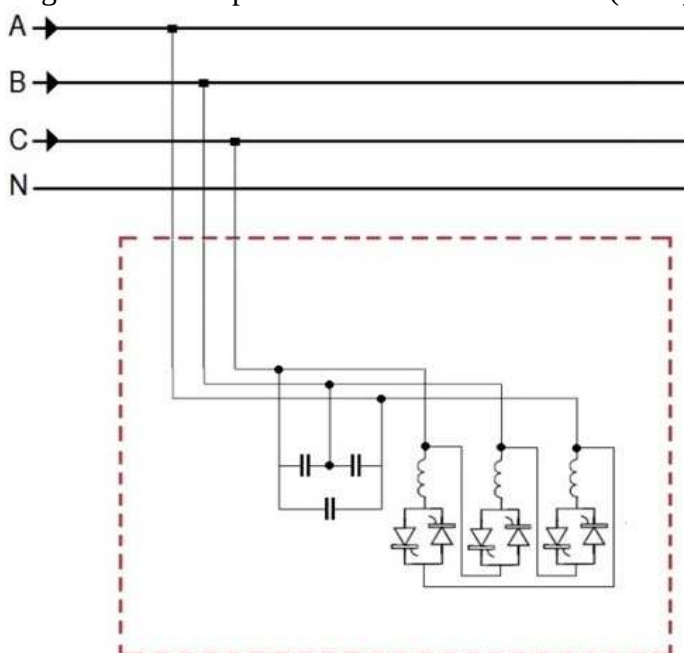
Fonte: adaptado de OLIVEIRA, 2014.

5.2 Compensador estático de reativos (SVC)

O compensador estático de reativos foi implementado com base em dois blocos fundamentais, sendo o primeiro um elemento passivo e o segundo trabalhando de forma ativa, nominalmente, um banco fixo de capacitores e um banco de reatores controlados por tiristores (RCT), ambos conectados à rede de alimentação em triângulo. A Figura 39 abaixo ilustra o arranjo utilizado no SVC, cujo dimensionamento dos reatores e capacitores foi realizado conforme procedimentos descritos em (OLIVEIRA, MENEZES, 2004).

Como descrito nos capítulos anteriores, através do controle dos ângulos de disparo dos tiristores, a corrente circulante através do ramo é controlada de forma que o arranjo se comporte como uma susceptância variável, abrangendo valores de indutivos a capacitivos.

Figura 39 – Compensador estático de reativos (SVC)

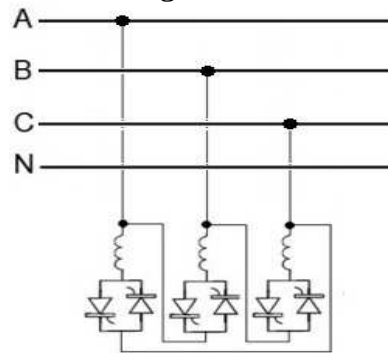


Fonte: o próprio autor

5.2.1 Reator controlado a tiristor (RCT)

Os reatores controlados por tiristores (RCT) são arranjos trifásicos, sendo que cada ramo é composto, eletricamente, por um indutor e dois tiristores ligados em antiparalelo, como mostrado na Figura 40 a seguir.

Figura 40 – Diagrama elétrico do RCT



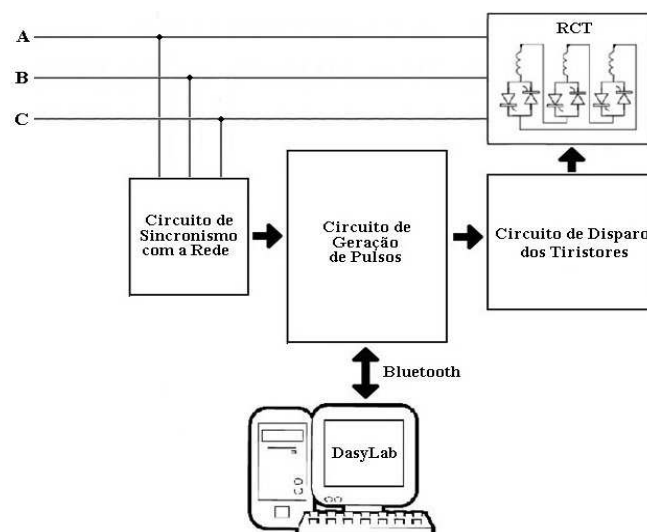
Fonte: o próprio autor

Conforme descrito, a variação da corrente drenada pelos indutores é realizada através do controle do disparo dos tiristores conectados ao ramo de interesse. Para tanto, são necessários dois pulsos distintos, sincronizados com relação à tensão aplicada sobre o ramo, e separados 180° entre si, garantindo que o pulso de disparo seja aplicado a cada tiristor enquanto o mesmo se encontra polarizado diretamente (THYRISTOR THEORY AND DESIGN CONSIDERATIONS, 2006).

Ainda, para que o disparo seja efetivamente realizado, é necessária a existência de um circuito de disparo, *driver*, o qual possui a função de isolar e condicionar o pulso de disparo de forma a propiciar um correto disparo e a sustentação da condução dos tiristores (APPLICATION NOTE 5SYA, 2006).

A Figura 41 abaixo mostra o diagrama de blocos, destacando-se os elementos básicos que compõem o RCT.

Figura 41: Diagrama de blocos do controle do RCT



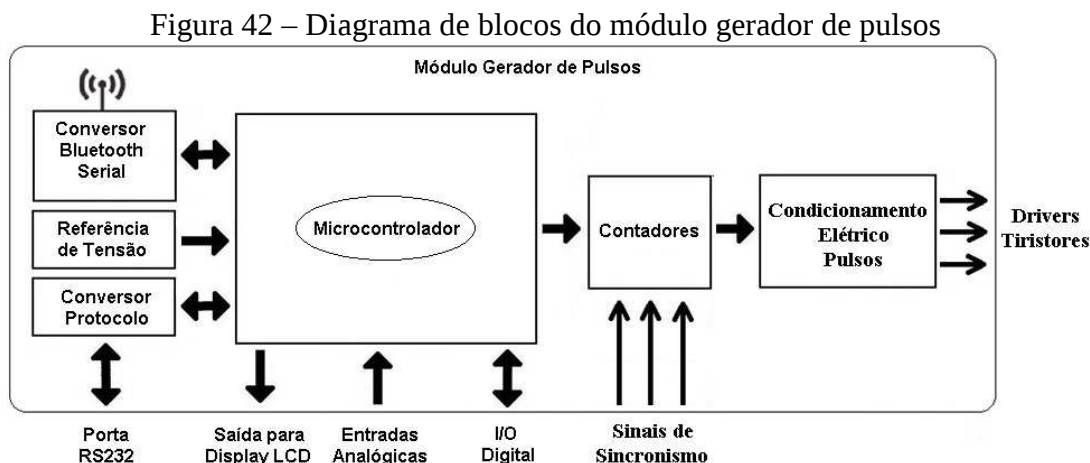
Fonte: o próprio autor

Com base no diagrama de blocos mostrado na Figura 41, serão apresentados a seguir os módulos e componentes que compõe os sistemas eletrônicos do RCT.

5.2.2 Módulo gerador de sinais

O circuito gerador de pulsos tem como finalidade primária a conversão dos valores dos ângulos de disparo enviados ao RCT via conexão sem fio, tipo Bluetooth, provenientes de uma aplicação desenvolvida no ambiente *DasyLab*, em pulsos utilizados para o disparo dos tiristores. Tais pulsos são sinais digitais do tipo TTL, sincronizados com um sinal trifásico de referência, proveniente da fonte de alimentação. Finalmente, os pulsos digitais serão condicionados por um driver de ataque e enviados aos tiristores.

Com vistas à continuidade do trabalho, tal circuito foi projetado prevendo a montagem de uma versão autônoma do SVC, contemplando o controle embarcado. Assim, foram incluídos periféricos tais como: entradas analógicas, referência de tensão de precisão, entradas e saídas digitais, porta de comunicação no padrão RS232 e saída para display tipo LCD. Na Figura 42 pode ser visto o diagrama de blocos do módulo gerador de sinais.



Fonte: o próprio autor

A fim de gerar os pulsos para disparo dos tiristores proporcionais ao ângulo de disparo desejado, os quais são transmitidos ao SVC através da aplicação desenvolvida com base no software *DasyLab*, sinais de sincronismo são enviados diretamente aos circuitos contadores, não passando pelo microcontrolador, como pode ser visto pelo diagrama de blocos mostrado anteriormente.

Desta forma, uma vez programados os contadores, em caso de falha no processador, os circuitos contadores podem trabalhar de forma autônoma, evitando-se assim disparos com ângulos indesejados, ficando o compensador travado no último ângulo válido programado.

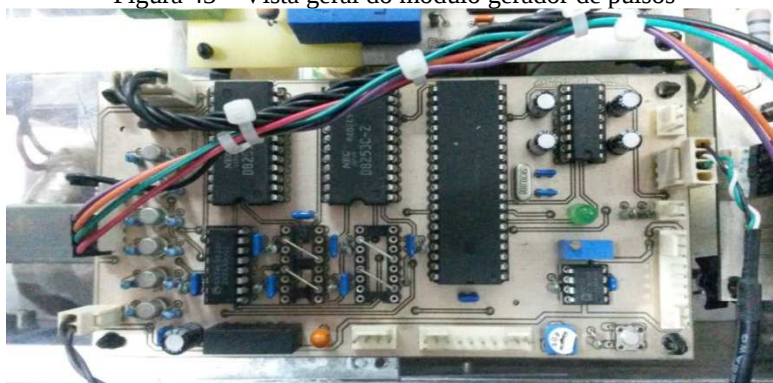
Os circuitos integrados utilizados como contadores são os 8253, os quais são constituídos por três contadores independentes entre si, de contagem decrescente, isto é, os contadores iniciam a contagem por um valor determinado pelo microcontrolador e a cada pulso de *clock*, também gerado pelo microcontrolador, decrementam este valor até zero. Os valores dos contadores são decrementados na transição de “1” para “0” do nível do sinal de *clock*. Cada contador possui 16 bits e sua contagem pode ser em modo decimal ou binário, dependendo de como foi programado, sendo que para esta aplicação todos os contadores foram programados para contagem do tipo binária e neste caso, o número máximo de contagem é 65.536, ou seja, de FFFF a 0000, (VISCONTI, 1986).

Cada contador é individualmente programado, sendo que para isso uma palavra de controle deve ser enviada pelo microprocessador ao CI 8253, a fim de selecionar qual modo será utilizado. No total, existem 5 tipos diferentes de contagem, porém somente o “modo 1” é utilizado nessa aplicação.

No modo 1, ao ser iniciada a contagem, a saída do contador vai para nível lógico “0”, assim permanecendo até que termine a contagem, retornando neste instante para o nível “1”. Um pulso no pino de *gate*, proveniente do circuito de sincronismo, provoca o reinício da contagem a partir do valor inicial, não necessitando uma nova programação do valor a ser contado.

A Figura 43 mostra a placa de circuitos implementada, denominada como módulo gerador de pulsos.

Figura 43 – Vista geral do módulo gerador de pulsos

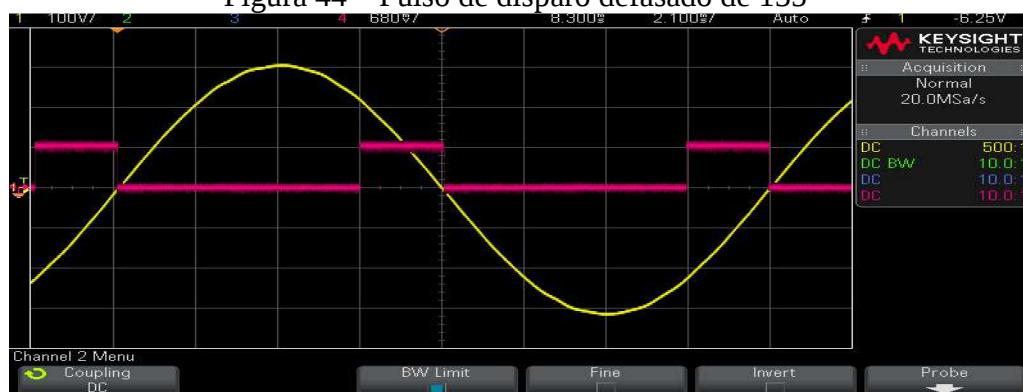


Fonte: o próprio autor

Na Figura 44 é mostrado um exemplo de sinal de disparo gerado, sendo que o ângulo de disparo programado foi com uma defasagem de 135° em relação ao cruzamento por zero da tensão de referência. Na Figura são mostrados os sinais de tensão de referência, aplicada sobre o ramo do RCT, e o pulso gerado, a ser enviado ao módulo driver.

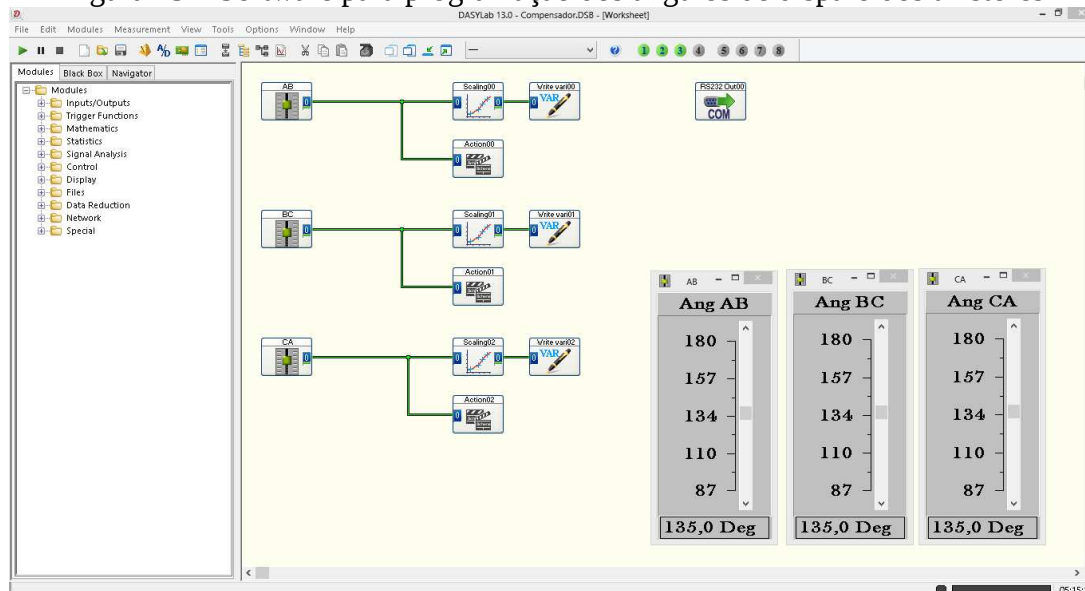
Para a programação dos ângulos de disparo desejados, foi implementado um software baseado na plataforma *DasyLab*®, da *National Instruments*, o qual permite fazer uma varredura de toda região de operação do compensador, de forma gradual, com resolução de $0,1^\circ$. A Figura 45 mostra o software implementado e sua interface com o usuário.

Figura 44 – Pulso de disparo defasado de 135°



Fonte: o próprio autor

Figura 45 – Software para programação dos ângulos de disparo dos tiristores



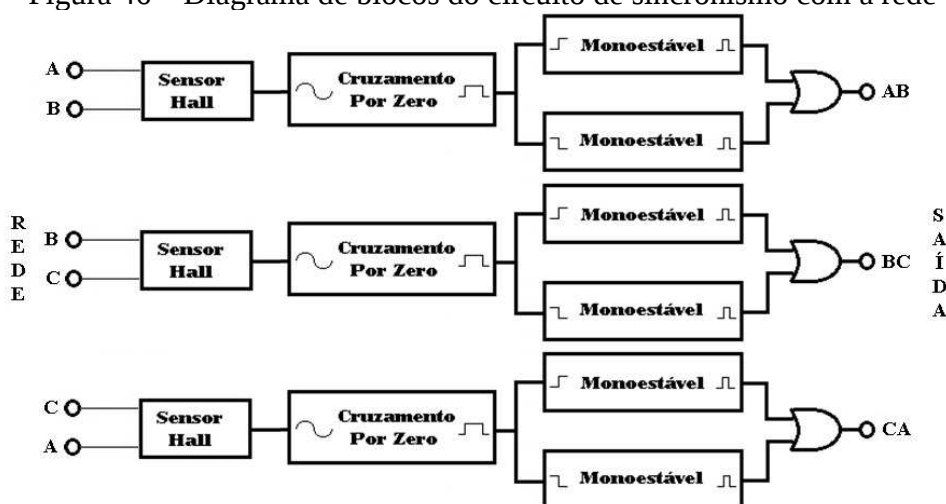
Fonte: o próprio autor

5.2.3 Circuito de sincronismo com a rede

Os pulsos de disparo dos tiristores conectados a cada ramo do RCT são gerados em relação aos sinais de sincronismo, criados a partir das tensões aplicadas sobre os respectivos ramos, sendo que tais sinais de sincronismo são gerados nos cruzamentos por zero, com derivadas positivas e negativas, das referidas tensões (GYUGI, 1978).

A Figura 46 apresenta o diagrama de blocos do circuito desenvolvido para propiciar o sincronismo com a rede de alimentação, sendo que como pode ser visto, dado o uso de transdutores de tensão baseados em efeito Hall, o circuito é eletricamente isolado da rede de alimentação.

Figura 46 – Diagrama de blocos do circuito de sincronismo com a rede

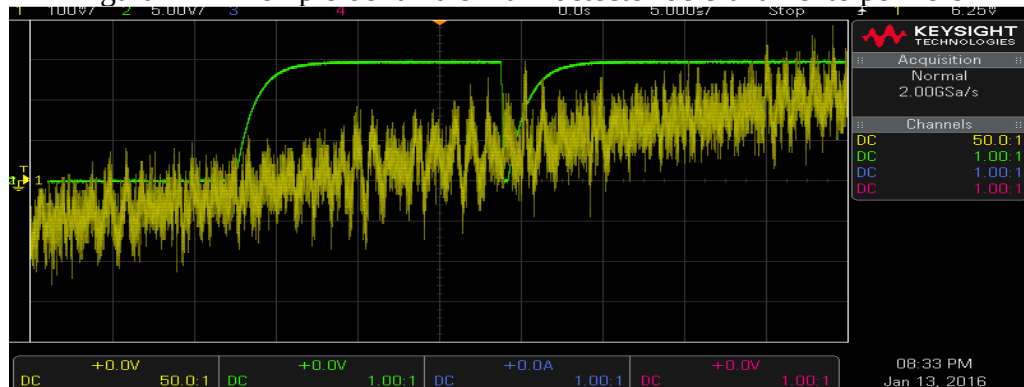


Fonte: o próprio autor

Do diagrama de blocos, nota-se que o elemento principal, por ramo, do circuito gerador de sincronismo é um detector de cruzamento por zero. Como sabido, tais circuitos são baseados em comparadores de tensão, os quais podem ser instáveis durante a comparação, dado o nível de ruído sempre presente no sinal a ser comparado, gerando assim múltiplos sinais de saída (APPLICATION NOTE 5SYA 2020-02, 2006).

Tal resultado pode ser visto na Figura 47 a seguir, onde o sinal em amarelo é a entrada a ser comparada com uma referência, no caso zero volts, e o sinal em verde é a saída do comparador.

Figura 47 - Exemplo de falha em um detector de cruzamento por zero



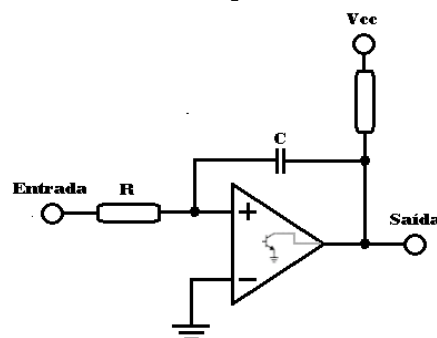
Fonte: o próprio autor

Uma possível solução para o problema emprega o uso de filtros passivos na entrada do circuito de detector, porém, tal estratégia leva ao acréscimo de uma fase ao sinal de saída, que pode variar com fatores externos, como a temperatura, e se tornar difícil de ser compensada (WEIDENBRUG, et al., 1993).

A fim de evitar tal problema, a solução empregada para os detectores empregados no trabalho foi utilizar uma malha de realimentação positiva ao sinal de entrada. Desta forma, somente um cruzamento por zero é detectado, evitando-se assim múltiplos inícios de contagem e, consequentemente, oscilações nos pulsos de disparo.

Na Figura 48 é mostrado, de forma sucinta, o detector de cruzamento por zero com realimentação positiva empregada. Tal topologia é também conhecida como detector de cruzamento por zero com histerese variável.

Figura 48 - Detector de cruzamento por zero com realimentação positiva

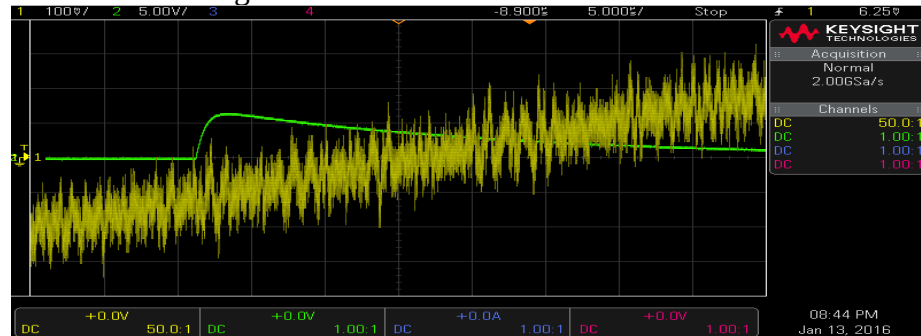


Fonte: o próprio autor

Na Figura 49 é mostrado o sinal de entrada a ser comparado com zero (amarelo) e o sinal presente na entrada não-inversora do comparador de tensão, já realimentado pela saída.

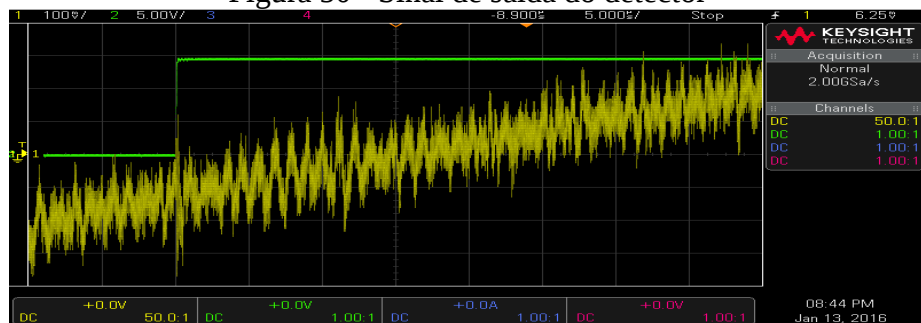
A Figura 50 mostra o sinal de saída do comparador (verde) proporcional a entrada, nota-se que existe somente uma detecção, eliminando o problema presente anteriormente. Vale ressaltar que os sinais utilizados em ambos os casos, com e sem realimentação, são compatíveis e de baixa amplitude, mais susceptíveis a falhas.

Figura 49 - Sinais de entrada do detector



Fonte: o próprio autor

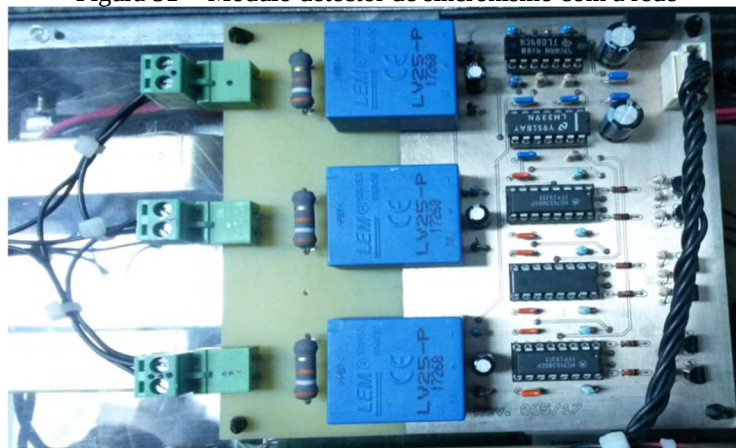
Figura 50 - Sinal de saída do detector



Fonte: o próprio autor

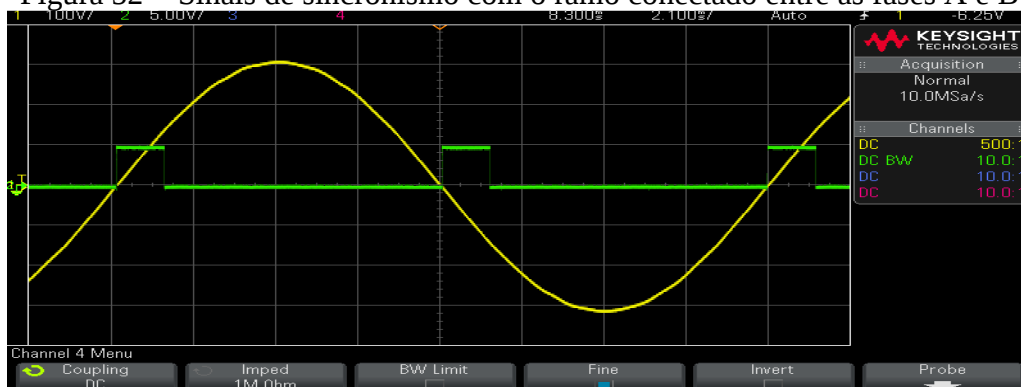
A Figura 51 mostra o circuito de sincronismo construído e a Figura 52 mostra o sinal de saída gerado para um dos ramos, no caso, fases A e B.

Figura 51 - Módulo detector de sincronismo com a rede



Fonte: o próprio autor

Figura 52 - Sinais de sincronismo com o ramo conectado entre as fases A e B



Fonte: o próprio autor

5.2.4 Driver para disparo dos tiristores

Para implementação do RCT, foram utilizados 3 módulos de tiristores modelo TT250N12KOF, fabricados pela empresa EUPEC. Cada módulo possui internamente dois tiristores, os quais podem ser facilmente conectados em antiparalelo, por meio das conexões aparafusadas presentes no módulo, dispostas de forma adequada para tal aplicação. Como características elétricas básicas, os valores nominais de corrente e tensão suportáveis pelo dispositivo são, respectivamente, 250A e 1200V. A Figura 53 mostra um dos módulos utilizados.

Figura 53 – Módulo de tiristores utilizado



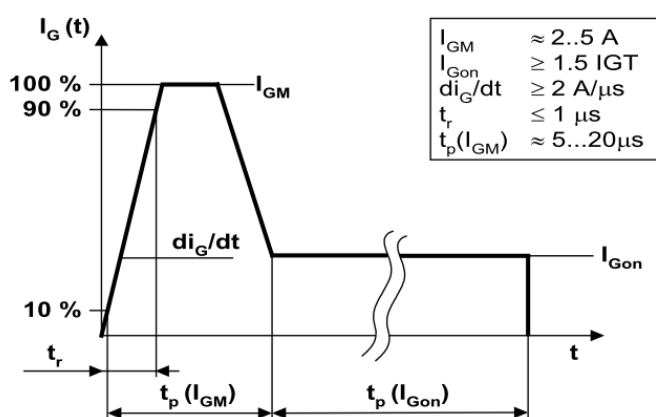
Fonte: o próprio autor

A fim de possibilitar o acionamento dos tiristores, um módulo contendo seis circuitos de disparo (drivers) foi implementado. Como base para o projeto dos circuitos, foi utilizada a referência fornecida pela empresa ABB (APPLICATION NOTE 5SYA 2034-02, 2006), a qual fornece diretrizes para o correto disparo de tiristores de potência, fornecendo parâmetros base para se estabelecer uma corrente de gatilho (*gate*) otimizada, sendo que para a aplicação em questão é utilizado um trem de pulsos de corrente, onde o primeiro pulso é de extrema

importância para o correto disparo e manutenção da vida útil do tiristor, o qual deve possuir uma elevada di/dt e valor de pico. A Figura 54 a seguir resume as recomendações presentes no documento.

Os valores e recomendações presentes no documento citado, e resumidos na Figura 53, foram adotados como referência, sendo ajustados para o módulo utilizado na montagem, tendo seus valores baseados nos dados presentes no *datasheet* fornecido pelo fabricante dos tiristores.

Figura 54 – Recomendações para disparo de tiristores de potência

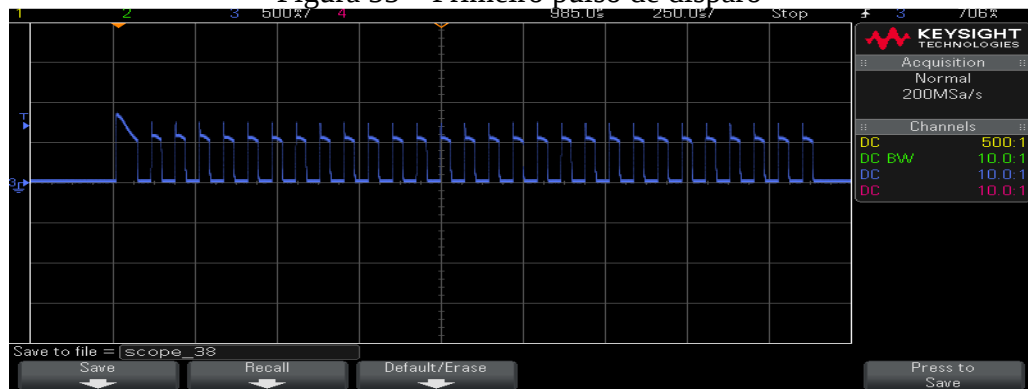


Fonte: Application note 5SYA 2034-02 - ABB

Para a aplicação em questão é utilizado um trem de pulsos de corrente, sendo que o primeiro pulso é de extrema importância para o correto disparo e manutenção da vida útil do tiristor, o qual deve possuir elevados di/dt e valor de pico (APPLICATION NOTE 5SYA 2020-02, 2006). Desta forma, o primeiro pulso de *gate* ficou com uma corrente de pico igual a 800mA, $T_r < 1\mu\text{s}$ e I_{Gon} igual a 600mA.

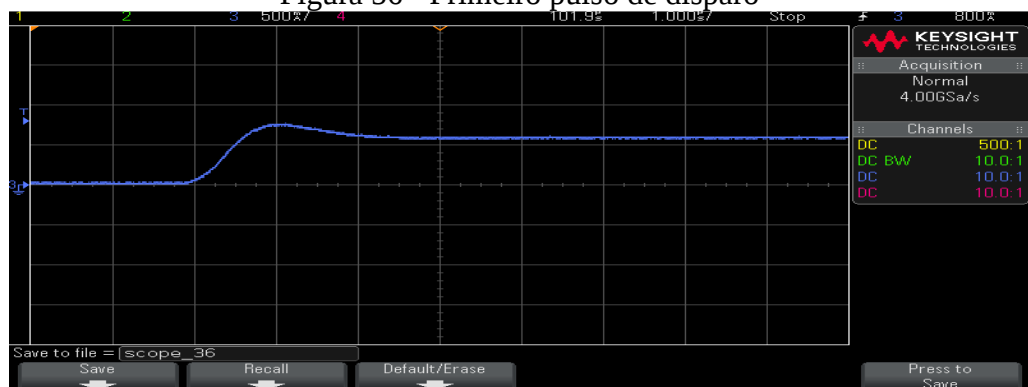
A seguir é mostrada a forma de onda da corrente de gatilho fornecida pelo driver a um dos tiristores do RCT. A Figura 55 mostra o trem de pulsos enquanto a Figura 56 detalha o primeiro pulso.

Figura 55 – Primeiro pulso de disparo



Fonte: o próprio autor

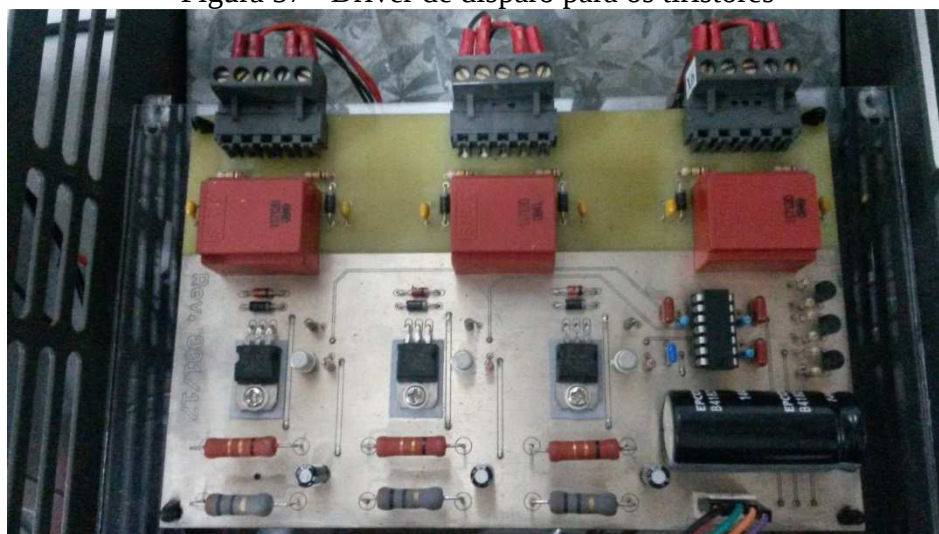
Figura 56 - Primeiro pulso de disparo



Fonte: o próprio autor

Apresenta-se na Figura 57 a foto da montagem da placa de acionamento dos tiristores.

Figura 57 - Driver de disparo para os tiristores



Fonte: o próprio autor

5.2.5 Ensaio experimental do RCT

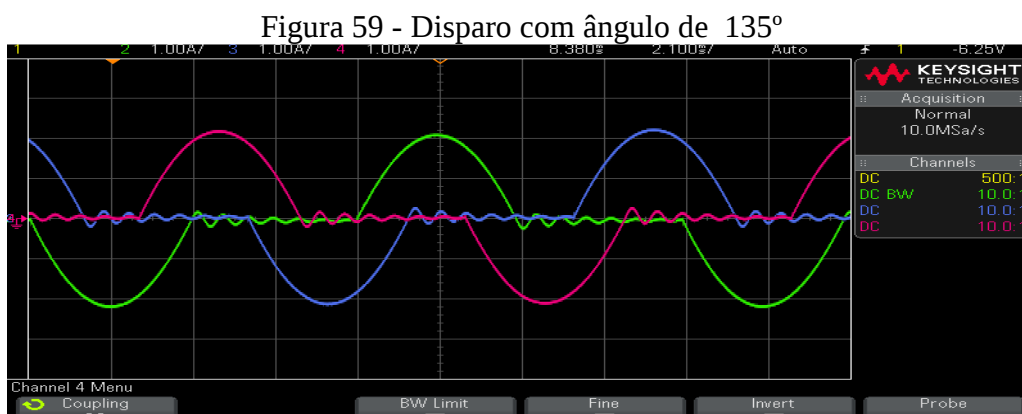
Com base no hardware e software desenvolvidos, foram realizados ensaios operacionais com o objetivo de validar o funcionamento do protótipo do RCT implementado para este trabalho. Foram realizados vários ensaios considerando-se toda a faixa de operação de ângulos de disparo, observando-se principalmente as correntes circulando pelos reatores e suas dependências com os ângulos de disparo.

A seguir, apresenta-se um dos resultados colhidos para um dos ramos do RCT, a título de ilustração. Particularmente o resultado escolhido foi para um ângulo de disparo de 135° , por ser de fácil visualização em relação ao reticulado do osciloscópio, Figura 58.



Fonte: o próprio autor

A seguir, na Figura 59 é mostrada a visualização das correntes trifásicas drenadas pelo RCT para o mesmo ângulo de 135°



Fonte: o próprio autor

5.3 Conclusões

As diretrizes e demais procedimentos técnicos envolvendo o projeto e a construção de um protótipo do compensador proposto foram os temas deste capítulo.

O dimensionamento do supressor eletromagnético foi abordado de forma simplificada uma vez que as particularidades e demais detalhes construtivos já foram objetos de discussões e análises apresentados em vários trabalhos anteriores desenvolvidos no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da FEIS-UNESP.

O dimensionamento do SVC, também foi conduzido conforme os fundamentos e diretrizes básicas estabelecidas em trabalhos anteriores. Entretanto os projetos e detalhes construtivos dos circuitos de controle, condicionamento de sinais, acionamento das chaves e respectivos ensaios, são contribuições específicas deste trabalho, pois atendem particularidades operacionais desta proposta.

Por outro lado, considerando-se os possíveis desdobramentos envolvendo a continuidade da mesma, algumas etapas do projeto e da construção das placas de controle já incorporam recursos adicionais para estes propósitos. Neste sentido também podem ser consideradas contribuições específicas e originais deste trabalho.

6. ESTUDOS EXPERIMENTAIS

As considerações teóricas, modelagens e configurações topológicas do sistema de compensação de desequilíbrios de correntes serão agora investigados sob o ponto de vista experimental. Esta atividade tem como um de seus propósitos dirimir a crescente dependência em simulações computacionais o que, em certos casos, pode ser preocupante, sobretudo no tocante à confiabilidade dos resultados obtidos.

Nas simulações digitais os resultados são unicamente vinculados com a qualidade dos modelos teóricos utilizados e, particularmente, em pesquisas associadas a prova de conceito, como é o caso deste trabalho, é imprescindível agregar alguma investigação experimental.

Os objetivos desta iniciativa são, portanto, não só ancorar as premissas conceituais, mas, sobretudo, fomentar o aperfeiçoamento dos modelos teóricos para futuros desenvolvimentos. Neste contexto, destaca-se também que esta iniciativa, além de necessária, colabora para multiplicar o uso de práticas experimentais e ajudar a reduzir o descompasso com a grande quantidade de trabalhos baseados exclusivamente em simulações digitais (MORAIS, et al., 2014).

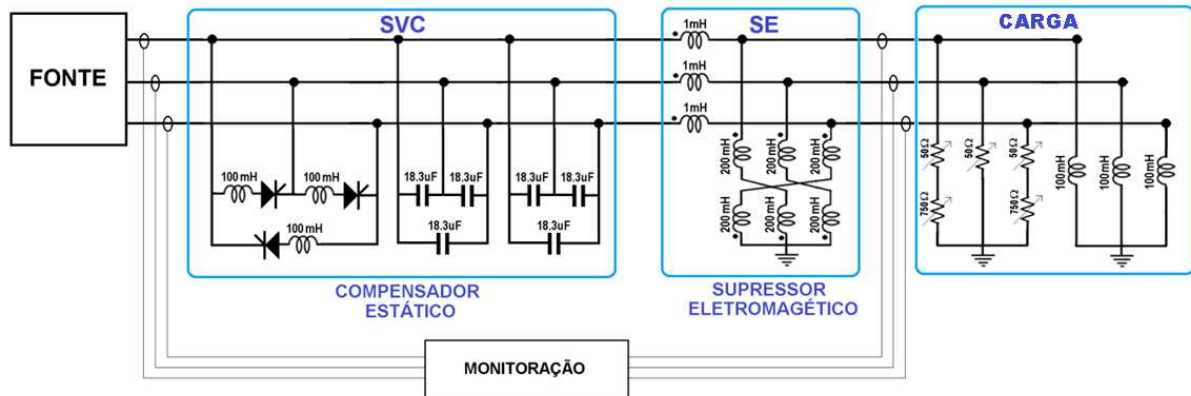
6.1 Plataforma experimental

Para conduzir as investigações experimentais desenvolveu-se uma plataforma de ensaios que agrega as principais componentes de uma instalação típica, constituída por uma fonte de alimentação, uma carga, e o sistema de compensação proposto neste trabalho.

O diagrama esquemático do sistema teste adotado é ilustrado na Figura 60, onde se destacam o equipamento de compensação, formado pelo reator controlado, o banco de capacitores e o supressor eletromagnético. Este último, por sua vez, constituído por um bloqueador e um filtro eletromagnéticos.

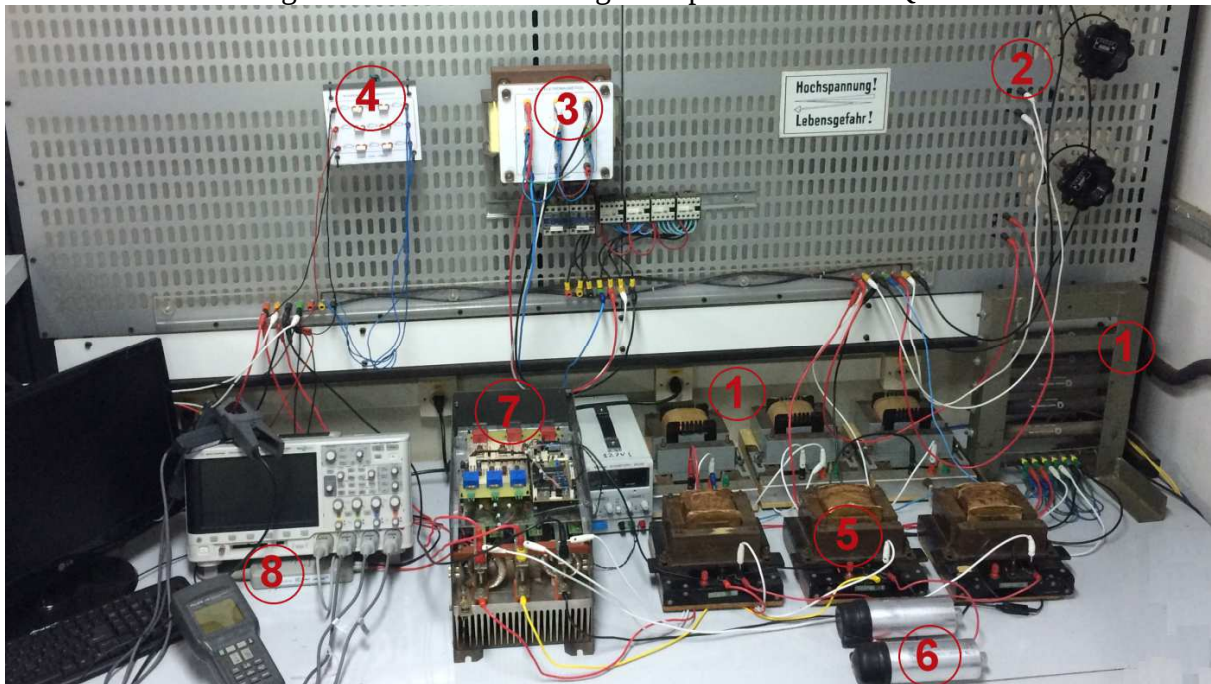
A foto do experimento montado no Laboratório de Qualidade de Energia da FEIS-UNESP (LQEE) é apresentada na Figura 61, onde são devidamente identificados os principais componentes, entre eles o protótipo do sistema de compensação dimensionado no capítulo anterior.

Figura 60 – Diagrama esquemático do circuito experimental.



Fonte: o próprio autor

Figura 61 – Foto da montagem experimental no LQEE.



Fonte: o próprio autor

Sendo:

- 1- Carga RL equilibrada
- 2- Resistores adicionais
- 3- Filtro eletromagnético
- 4- Bloqueador eletromagnético
- 5- Indutores do RCT
- 6- Capacitores do SVC
- 7- Chaves, circuitos de condicionamento e acionamento das chaves (tiristores)
- 8- Instrumentos de medida

Inicialmente definiu-se uma carga equilibrada padrão cujos parâmetros por fase foram fixados a partir de reatores com núcleos eletromagnéticos com gap's variáveis e reostatos conectados em paralelo. Adotou-se para esta configuração básica valores ajustados de indutância de aproximadamente 100 mH/fase e resistências 50 Ω /fase. Os parâmetros associados aos demais componentes do circuito experimental são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Principais parâmetros dos componentes do circuito.

DISPOSITIVOS	R(Ω)/fase	L (mH)/fase	C (μ F)/fase
Reatores Controlados	4	100	
Capacitores fixos			2 x 18,3
Filtro Eletromagnético	6	200	
Bloqueador eletromagnético	0,06	1	
Carga Equilibrada	50	100	

Fonte: o próprio autor

6.2 Procedimentos experimentais

A seguir foram investigadas diferentes configurações de desequilíbrio da carga com o objetivo de avaliar o desempenho do compensador por meio da observação das correntes de alimentação na carga e na fonte, seus valores eficazes e fatores de potência.

Do ponto de vista prático, os desequilíbrios da carga foram definidos a partir da inclusão das resistências variáveis adicionais conectadas em série nas fases A e C. Os valores das diferentes resistências adicionais são definidos por meio do reostato (0 - 750 Ω).

Naturalmente, como discutido anteriormente, os desequilíbrios impostos para avaliação do desempenho do compensador seguem as limitações estabelecidas com respeito ao dimensionamento prévio do SVC. Ou seja, baseado nas considerações teóricas, os desequilíbrios estão dentro da faixa de compensação compatível com o dimensionamento do compensador.

Uma vez atingido a condição de regime permanente, foram capturadas as correntes e respectivas tensões na carga e na fonte por meio do osciloscópio AGILENT modelo DSO-X 3114A. As diferenças entre as grandezas amostradas em cada linha do sistema de alimentação demonstram a ação do sistema de compensação adotado. Os valores eficazes das correntes, bem como os fatores de potência foram medidos utilizando um medidor-analisador digital de qualidade de energia elétrica FLUKE modelo 41B (FLUKE, 2008).

6.3 Resultados experimentais

Para realização dos ensaios experimentais considerou-se as mesmas condições operacionais impostas nos estudos envolvendo a simulação digital com o objetivo de estabelecer uma relação comparativa entre os resultados apurados. Desta forma, apresenta-se a seguir os resultados selecionados que, a exemplo dos procedimentos adotados na simulação digital, foram agrupados em dois casos.

CASO 1: *Desequilíbrio moderado na carga, contendo diferentes carregamentos por fase bem como fatores de potência distintos.*

Neste caso o desequilíbrio avaliado segue as mesmas diretrizes impostas na simulação do caso equivalente abordado no capítulo 4 desta tese. Desta forma para produzir o desequilíbrio citado foram acrescentadas uma resistência de 100Ω em série na fase A e uma resistência de 50Ω em série na fase C.

Na Figura 62, ilustram-se as correntes resultantes nesta configuração da carga, o que reflete com boa aproximação o caso equivalente na simulação, no intervalo $1s < t < 1,05s$, conforme mostrado na Figura 28. Na Tabela 7, estão registrados os valores eficazes das correntes desequilibradas, bem como os respectivos fatores de potência medidos.

A atuação do sistema de controle definiu as correntes compensatórias necessárias bem como ângulos de disparo dos tiristores. Para os reatores conectados às fases ab, bc e ca, os ângulos de disparo resultaram respectivamente em $\alpha_{ab} = 115^\circ$, $\alpha_{bc} = 129^\circ$ e $\alpha_{ca} = 109^\circ$.

Os resultados finais obtidos após a atuação do sistema de compensação são apresentados na Tabela 7 e Figura 63. Observa-se uma nova redistribuição das correntes por fase, levando o sistema praticamente ao equilíbrio. Os objetivos almejados para os fatores de potência finais também foram alcançados, sendo mantidos com valores praticamente unitários nas três fases.

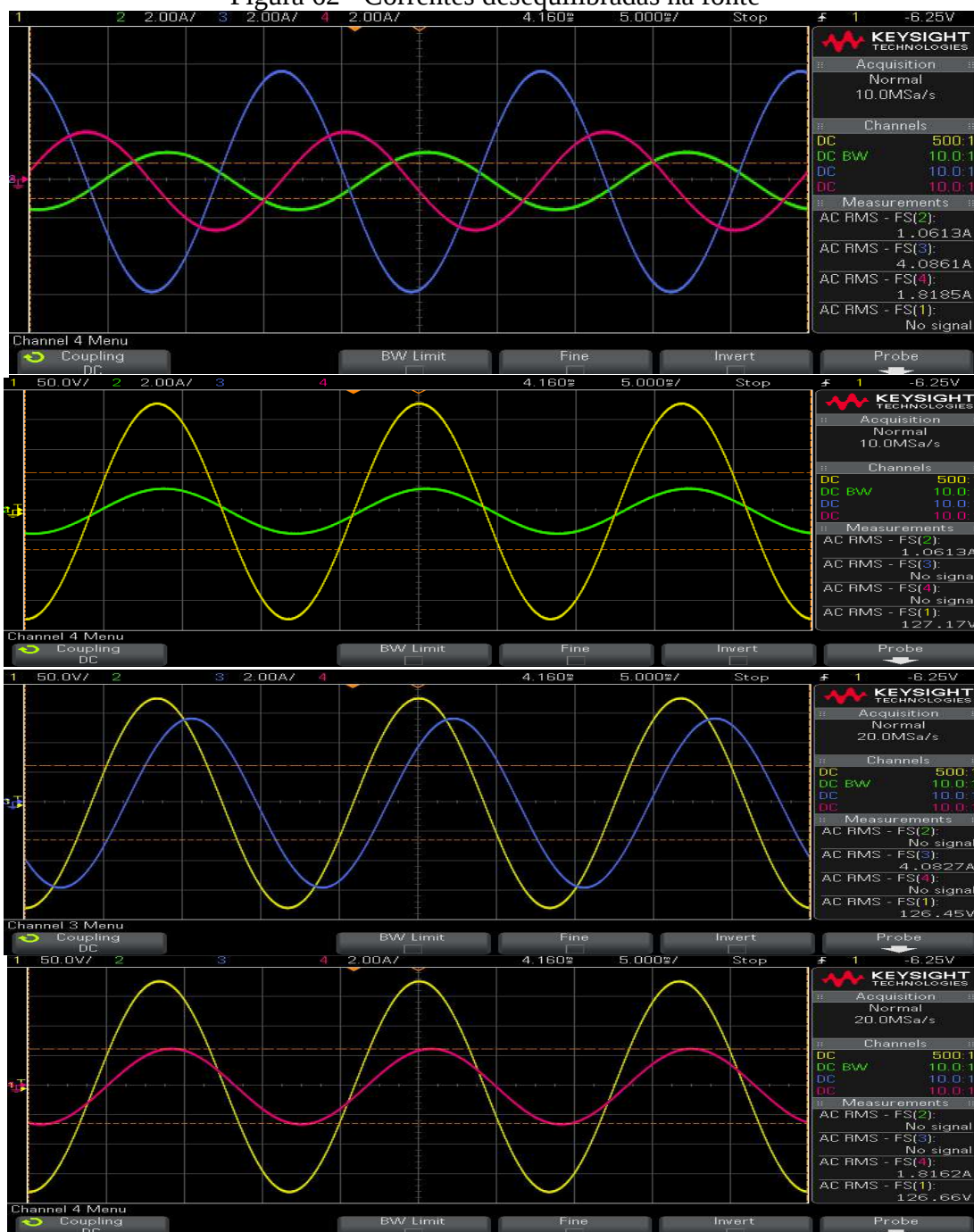
Observa-se nos resultados para as formas de onda das correntes compensadas, Figura 63, um conteúdo harmônico significativo, pois no caso experimental não foi implantado nenhum procedimento de filtragem. Quando comparadas as respectivas correntes simuladas é possível constatar a ação de filtragem promovida pela sintonia do banco de capacitores durante o processo de simulação.

Tabela 7 – Resultados experimentais para o CASO 1.

FONTE	Sem compensação	Com compensação
$I_{RMS A}$	1,06	2,12
$I_{RMS B}$	4,09	2,09
$I_{RMS C}$	1,82	2,15
FP_A	0,99i	0,99i
FP_B	0,70i	0,99i
FP_C	0,97i	0,99i

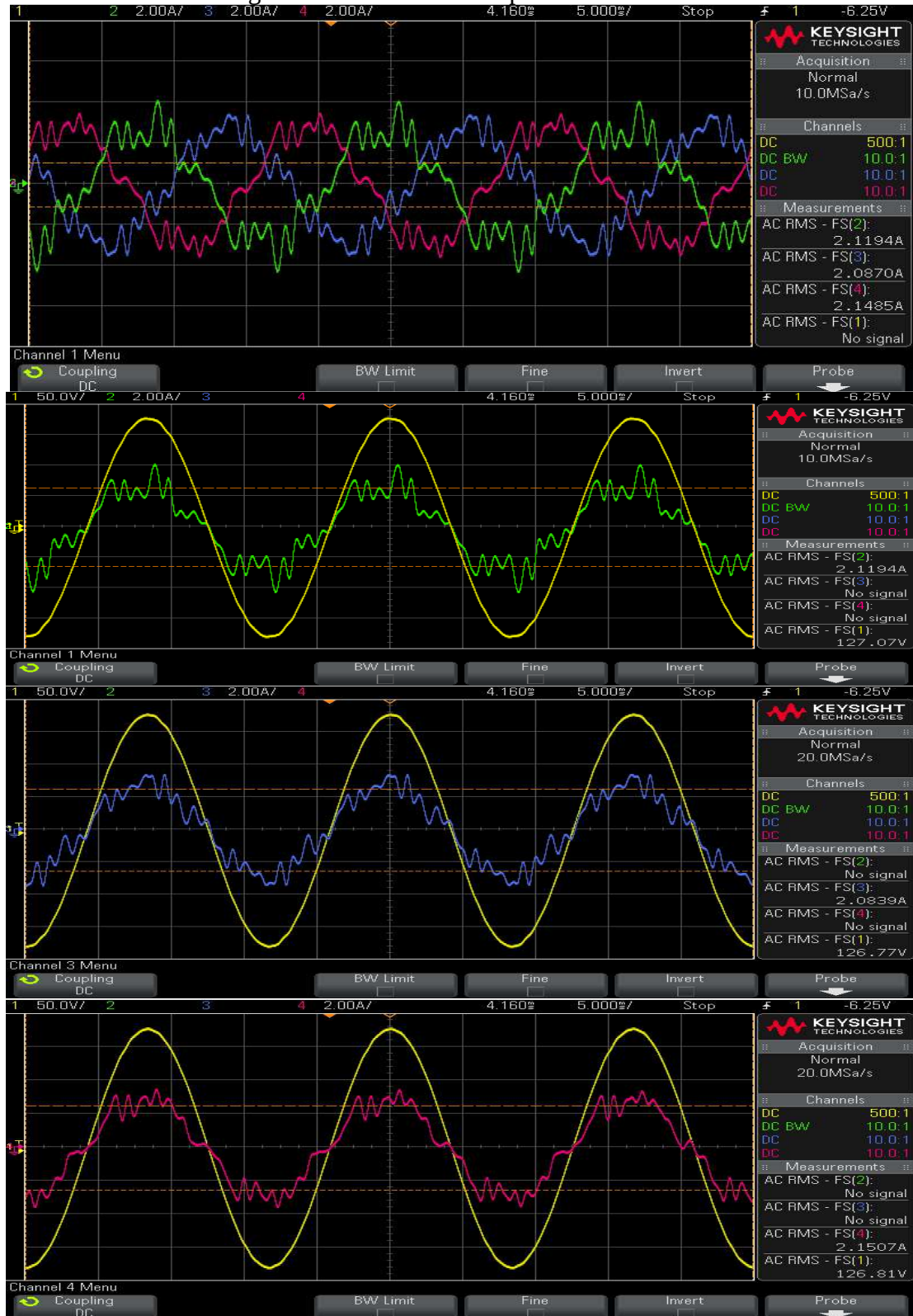
Fonte: o próprio autor

Figura 62 - Correntes desequilibradas na fonte



Fonte: o próprio autor

Figura 63 – Correntes compensadas na fonte



Fonte: o próprio autor

CASO 2: *Desequilíbrio acentuado na carga, provocado pelo desligamento de uma das fases, mantendo as demais fases com fator de potência original.*

Para manter condições operacionais semelhantes às aquelas adotadas no processo de simulação do caso correspondente ao estudo de simulação digital, o desequilíbrio desejado foi imposto por meio da inserção de uma resistência de 750Ω em série na fase A.

Apresenta-se na Figura 64, correntes desequilibradas resultantes equivalentes ao caso simulado, conforme ilustrado na Figura 31, intervalo $1s < t < 1,05s$. Os valores eficazes das correntes e respectivos fatores de potência medidos são apresentados na Tabela 8.

Para compensação deste desequilíbrio o sistema de controle estabeleceu ângulos de disparo de $\alpha_{ab} = 106^\circ$, $\alpha_{bc} = 136^\circ$ e $\alpha_{ca} = 125^\circ$ nos reatores conectados as fases ab, bc e ca, respectivamente.

Os resultados finais obtidos após a atuação do sistema de compensação são apresentados na Tabela 8 e Figura 65. Novamente constata-se uma nova redistribuição praticamente equilibrada das correntes por fase. Os fatores de potência convergiram para valores praticamente unitários nas três fases.

Apesar da boa aderência entre os resultados experimentais e simulados no tocante aos valores eficazes e fatores de potência, as formas de onda das correntes finais compensadas apresentam diferenças notáveis quando comparadas ao caso simulado equivalente. Estas, como destacado anteriormente se devem, na sua maior parte, à atuação dos filtros presentes no processo de simulação os quais não foram configurados na investigação experimental.

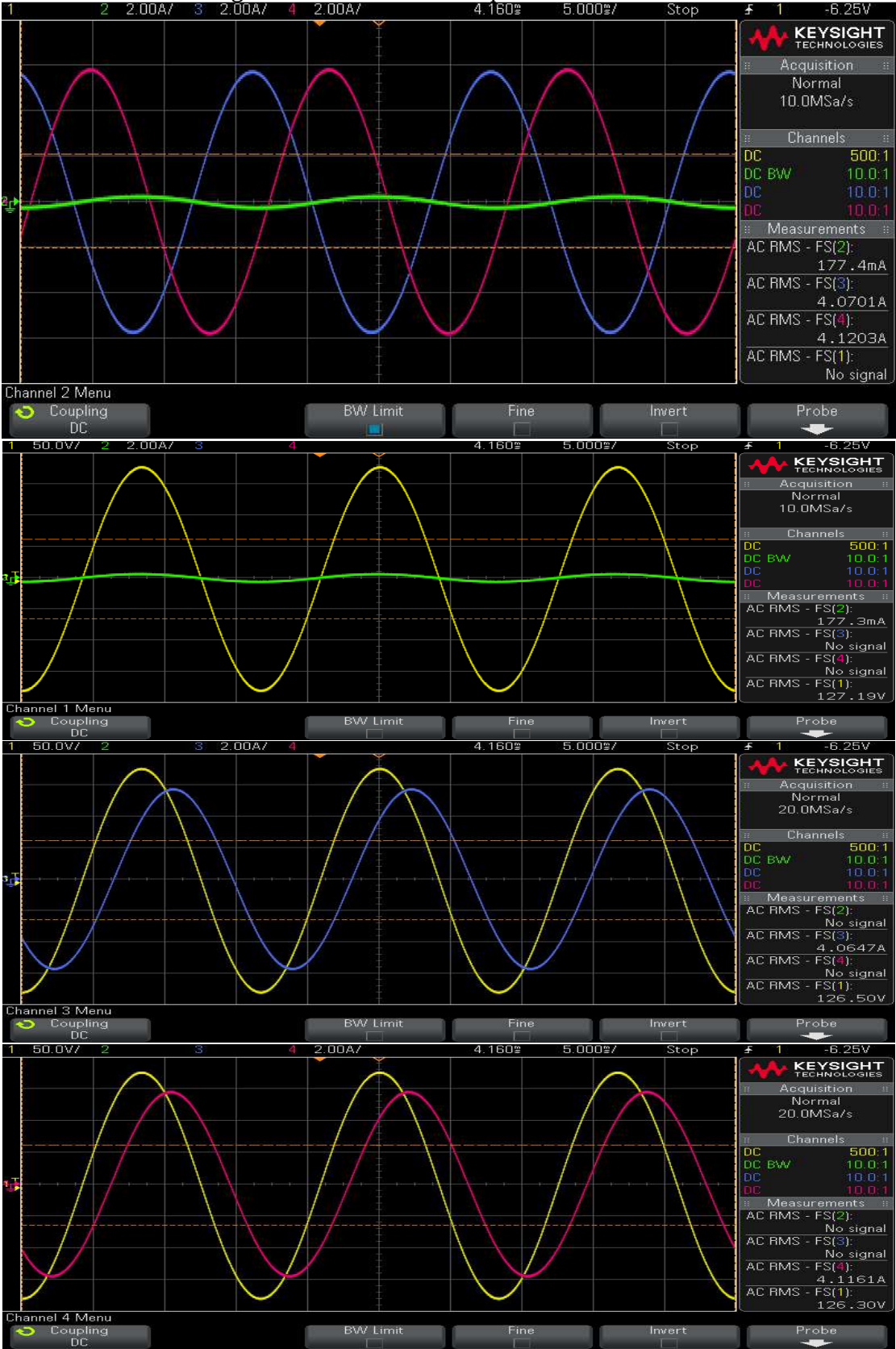
Por outro lado, presume-se que alguma divergência ainda pode ser atribuída ao fato de que no processo de simulação não foram incluídos os efeitos da não linearidade associada ao núcleo magnético dos reatores.

Tabela 8– Resultados experimentais para o CASO 2.

FONTE	Sem compensação	Com compensação
$I_{RMS\ A}$	0,18	2,23
$I_{RMS\ B}$	4,07	2,22
$I_{RMS\ C}$	4,13	2,24
FP_A	0,99i	0,99i
FP_B	0,71i	1,00
FP_C	0,74i	1,00

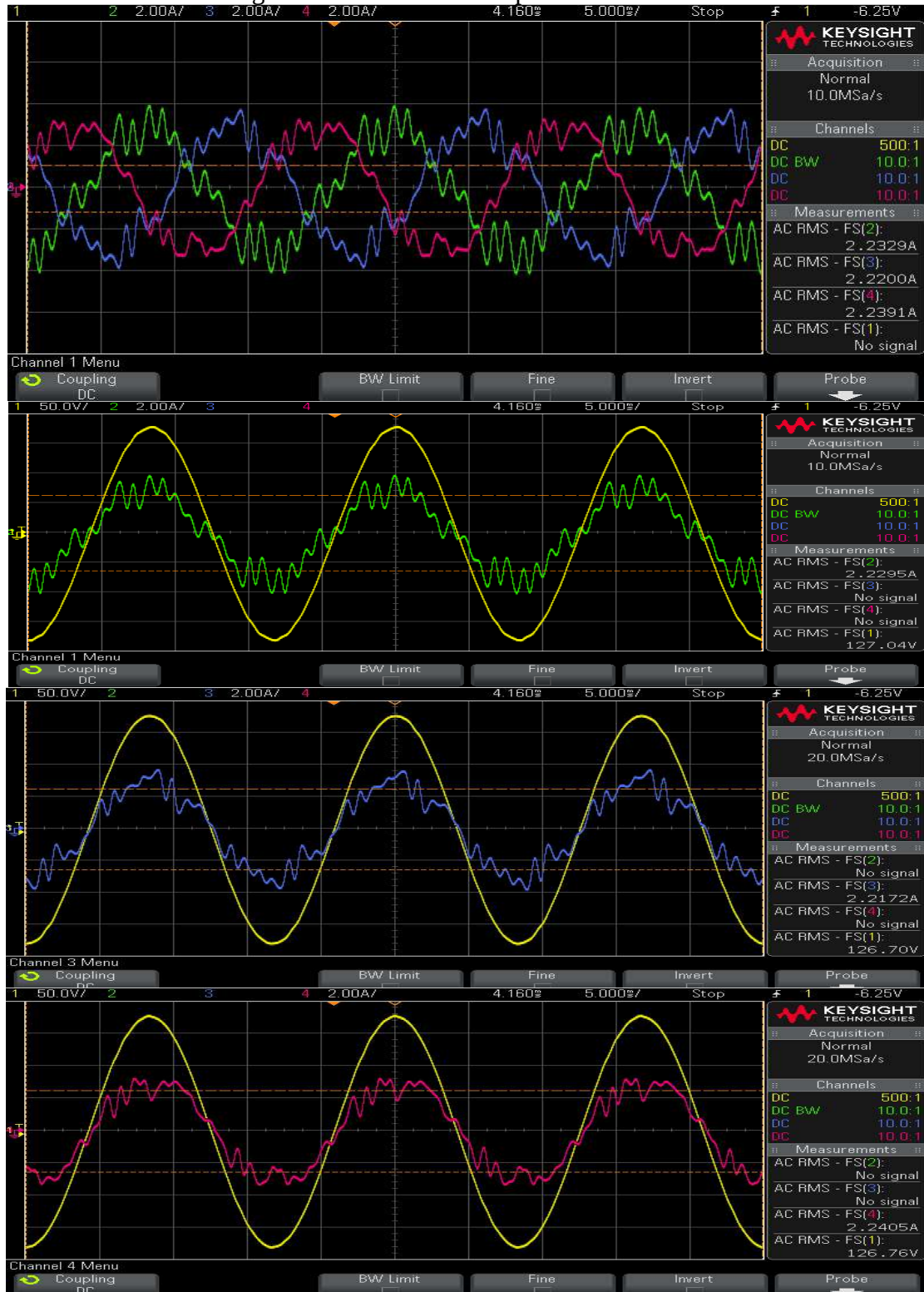
Fonte: o próprio autor

Figura 64 - Correntes desequilibradas na fonte



Fonte: o próprio autor

Figura 65 – Correntes compensadas na fonte



Fonte: o próprio autor

6.4 Conclusões

No presente capítulo abordou-se o comportamento do arranjo de compensação proposto neste trabalho, sob o ponto de vista experimental. Para tanto, foi montada uma plataforma de análise contendo o protótipo do compensador apresentado no capítulo anterior, os componentes para se obter as condições de desequilíbrio de carga almejadas, bem como os equipamentos de excitação e medição.

Foram investigadas várias condições operacionais com diferentes formas de desequilíbrios e, invariavelmente, pôde ser constatada a eficácia do compensador proposto no tocante à redistribuição equilibrada das correntes por fase e correção dos fatores de potência.

De um modo geral a aderência entre os resultados experimentais e teóricos simulados pode ser considerada muito boa. Como justificativas das divergências observadas, é possível identificar claramente aquelas consideradas mais impactantes. Inicialmente, sob o ponto de vista da montagem da plataforma experimental destacam-se as dificuldades inerentes na imposição de valores físicos idênticos para os componentes utilizados. Na sequência, durante a realização dos ensaios é também considerável os efeitos relacionados à alteração dos valores impostos com a temperatura, bem como os erros inerentes ao processo de medição das grandezas desejadas.

Com relação às formas de onda das correntes compensadas, as diferenças entre os resultados simulados e experimentais podem também ser consideradas aceitáveis. Por um lado, as não linearidades dos componentes físicos, notadamente os reatores com núcleos ferromagnéticos, não foram incluídas no processo de simulação e, por outro lado, os filtros utilizados no processo de simulação também não foram configurados na plataforma experimental. A inclusão dos filtros na simulação teve como propósito explícito apenas a ilustração de uma das técnicas de compensação de harmônicas que poderia ser incorporada ao arranjo de compensação sem, contudo, impactar de forma relevante o custo final da sua implantação física.

Destaca-se finalmente que os aspectos considerados mais relevantes deste trabalho estão diretamente relacionados com a prova de conceito da proposta inédita de um arranjo de compensação relativamente simples, pouco oneroso e robusto. Portanto, os demais aspectos relacionados com ajustes na composição harmônica das correntes compensadas poderão ser investigados com mais critérios em outros trabalhos direcionados para os procedimentos de dimensionamento e implantação prática deste sistema de compensação.

7. CONCLUSÕES FINAIS

Os desequilíbrios de tensão produzem reflexos imediatos nos custos operacionais dos equipamentos e sistemas elétricos podendo ocasionar grandes prejuízos financeiros. Neste contexto, destaca-se como exemplo a acentuada queda de rendimento dos motores elétricos mediante alimentação desequilibrada.

No contexto do mercado de energia elétrica, os agentes reguladores têm direcionado vários esforços para mediar as situações de conflito entre concessionários e consumidores, estabelecendo limites toleráveis para os níveis de desequilíbrios nas redes elétricas. Particularmente no Brasil, destacam-se neste sentido as ações promovidas pela ANEEL no documento PRODIST, que estabelece como limite aceitável 2% para o índice de desequilíbrio calculado a partir da relação entre as componentes de sequência negativa e positiva das tensões ou pela expressão alternativa proposta pelo CIGRÉ.

Mediante procedimentos operacionais relacionados principalmente com a redistribuição de cargas, recondutoramento de alimentadores, manobras nas redes e manutenção dos pontos de conexão, normalmente é possível controlar até determinados limites os níveis de desequilíbrios de tensão nas redes elétricas. Entretanto, quando as estratégias citadas não produzem os efeitos almejados, ou ainda diante da operação de alguma carga eletro intensiva cuja característica operacional impõe intuitivamente uma assimetria operacional com respeito ao padrão trifásico convencional, algum tipo de compensação suplementar torna-se necessário.

Neste contexto enquadram-se os denominados compensadores de desequilíbrios, geralmente, constituídos por equipamentos com procedimentos operacionais que agregam um substancial porcentual de eletrônica de potência embarcada. Em geral possuem custos de implantação relativamente elevados quando comparados com outros dispositivos de mesma classe de potência, sobretudo nas aplicações em redes de baixa tensão.

A partir do estudo das técnicas de compensação de correntes desequilibradas discutiu-se as diferentes possibilidades topológicas para os equipamentos de compensação, abordando seus elementos constituintes, flexibilidade operacional, custos de implantação, sensibilidade, robustez e resiliência.

Diante das possibilidades de uso dos diferentes equipamentos de compensação, bem como de avaliações preliminares do desempenho operacional de arranjos típicos, realizadas no contexto deste e de trabalhos anteriores, optou-se pela definição de uma estratégia e de um equipamento de compensação para atender sistemas elétricos de baixa tensão a quatro fios.

Neste foco enquadra-se a proposta desta tese que remete especificamente à formalização, prova do conceito, simulações digitais, construção de protótipo e implementação experimental de uma proposta alternativa para um equipamento de compensação de correntes desequilibradas e de fator potência em redes elétricas a quatro fios.

Para atender tal demanda, considerou-se o uso simultâneo de duas tecnologias já consagradas em algumas aplicações específicas relatadas em trabalhos anteriores e/ou correlatos. Para garantir os aspectos citados, notadamente, a robustez e o baixo custo de implantação, definiu-se como metas para o equipamento de compensação baixa sensibilidade a distúrbios da rede elétrica, baixo índice de manutenção, bem como a possibilidade de funcionamento precário, ou parcial, mesmo após contingências.

Neste cenário a opção feita neste trabalho consiste no uso de compensadores estáticos do tipo reator controlado por tiristores associados a dispositivos eletromagnéticos. A estratégia para compensação dos desequilíbrios foi concebida tratando-se separadamente os requisitos necessários para redução das componentes de sequências negativa e zero.

No caso específico das componentes de sequência negativa, estas são eliminadas, ou minimizadas, pela ação do compensador estático, tipo reator controlado por tiristores. Este equipamento, embora baseado no uso de chaves estáticas, possui tecnologia consagrada, pode ser operado a partir de um sistema de controle simples e estável, utilizando em sua concepção topológica componentes tradicionalmente utilizados nas redes elétricas, notadamente indutores e capacitores.

No tocante a eliminação ou redução das componentes homopolares das correntes, optou-se pelo uso de dispositivos de confinamento de sequência zero. Baseado na experiência adquirida em trabalhos anteriores, a proposta encaminhada neste trabalho foi para o uso de dispositivos eletromagnéticos, normalmente referenciados como filtros e bloqueadores eletromagnéticos. São dispositivos muito robustos, pois agregam apenas indutores na sua concepção topológica e, portanto, atendem perfeitamente às premissas e metas estabelecidas no escopo deste trabalho.

Foram inicialmente realizadas as provas de conceito a partir dos modelos já desenvolvidos em trabalhos anteriores os quais foram devidamente agrupados neste trabalho

sob uma nova concepção topológica o que, por si só, justifica a originalidade da proposta. Os resultados teóricos foram obtidos a partir de simulação digital em ambiente *PSIM*[®] - *Power Simulator*, os quais comprovaram de forma inequívoca a aderência da proposta aos objetivos previamente elencados.

Na sequência, os trabalhos foram direcionados para a concepção, projeto e construção de um protótipo de baixa potência a partir das especificações estabelecidas por meio de modelos teóricos bem como resultados computacionais colhidos previamente. Foram então especificados os bancos de reatores e capacitores do compensador estático, para atender uma determinada faixa de variação dos níveis de desequilíbrio de sequência negativa. Os circuitos de sincronismo e disparo dos tiristores foram também integralmente projetados e construídos para atender as demandas específicas deste trabalho. Os dispositivos eletromagnéticos foram dimensionados para suportar a máxima corrente de sequência zero originada do desequilíbrio das cargas. Naturalmente tais dimensionamentos foram também atrelados à disponibilidade de componentes e de equipamentos de medida e de excitação, disponíveis no Laboratório de Qualidade de Energia da FEIS-UNESP.

Os resultados experimentais obtidos na plataforma de ensaios implementada no Laboratório de Qualidade de Energia Elétrica da FEIS-UNESP demonstraram uma boa aderência às premissas de postuladas na proposta original deste trabalho. Comprovaram, portanto, a viabilidade técnica, aplicabilidade para compensação de correntes desequilibradas bem como correção de fator de potência em redes elétricas a quatro fios.

Convém destacar, finalmente, que, embora todo direcionamento da compensação tenha sido direcionada para sistemas a quatro fios, os sistemas isolados, ou a três fios, também podem ser atendidos sem nenhuma restrição, uma vez que se trata apenas de um caso particular de operação das redes a quatro fios.

Como propostas de continuidade, tomando-se por base a experiência adquirida durante a execução deste trabalho, destacam-se:

- Implementação de um sistema de controle em malha fechada para o cálculo mais preciso, e em tempo real, das correntes de compensação, bem como dos respectivos ângulos de disparo dos tiristores;
 - Implantação da metodologia de controle desenvolvida de forma embarcada, incluindo todo o condicionamento necessário para monitoração de tensões e correntes;
-

- Realizar testes utilizando cenários de tensão com níveis de distorção harmônica elevados, a fim de avaliar a sensibilidade do circuito de sincronismo utilizando detecção de cruzamento por zero;
 - Concepção de um novo protótipo tipo “cabeça de série”, visando o estabelecimento de diretrizes construtivas de um compensador híbrido autônomo e viável comercialmente;
 - Testes experimentais de alternativas topológicas que agreguem filtros sintonizados em conjunto com o banco de capacitores do SVC, tendo como objetivo reduzir o conteúdo harmônico das correntes compensadas;
-

8. REFERÊNCIAS

AFONSO, J. L.; AREDES, M.; WANATABE, E. H.; MARTINS, J. S. Shunt active filter for power quality improvement. In: INTERNATIONAL CONFERENCE USER INTERFACE ENGINEERING, 2000, Lisboa. **Proceeding of the...**Lisboa: [S.n.], 2000a, p.683-691.

AFONSO, J. L.; COUTO, C.; MARTINS, J.; Active filters with control based on the p-q theory. **IEEE Industrial Electronics Society Newsletter**, Piscataway, v. 47, n. 3, p. 5-10, 2000b.

AFONSO, J. L.; SILVA, H. J. R.; MARTINS, J. S. Active filters for power quality improvement. In: IEEE PORTO POWERTECH, 2001, Porto. **Proceeding of the...**Porto: [s.n], 2001, p. 10-13.

AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S.; FREITAS, M. J. S.; PINTO, E.; MORGADO, R.; SOUSA, J. A.; PREGITZER, R. L.; CARLOS, J. C.; FERNANDES, N.; CUNHA, J.; BATISTA, J. Projecto SINUS – Tecnologia para compensação dinâmica de harmônicos, factor de potência e desequilíbrios. In: ENGENHARIA ELETRÔNICA INDUSTRIAL E COMPUTADORES, 1, 2005, Guimarães. **Proceeding of the...** Guimarães: [S.n.], 2005, p. 33-34.

AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S.; FREITAS, M. J. S.; MORGADO, T. A.; PINTO, J. G.; PREGITZER, R. L.; CUNHA, J.; BATISTA, J.; PINTO, E. Projecto SINUS – Tecnologias para melhoria da eficiência da qualidade de energia em sistemas elétricos. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE ENERGIAS RENOVÁVEIS, 6., 2006, Figueira da Foz. **Proceeding of the...**Figueira da Foz: ENER'06, 2006. p. 101-106.

AKAGI H.; KANAGAWA Y., FUJITA, K. and NABAE A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in the three-phase circuits. **Electrical Engineering in Japan**, Tokio, v. 103, n. 4, p. 58–66, 1983.

APPLICATION NOTE 5SYA 2020-02 - **Design of RC Snubbers for Phase Control Applications**, ABB, 2006. Disponível em: <
https://library.e.abb.com/public/27552f27f7688d5cc12573e90032b2cb/Design%20of%20RC%20snubbers%20for%20PCT_5SYA%202020-02NewLay.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2017.

APPLICATION NOTE 5SYA 2034-02, ABB - **Gate-drive recommendations for phase control and bi-directionally controlled thyristors**, 2006. Disponível em: <
https://library.e.abb.com/public/fe9dd0f01cf7be78c12573ed0036e0b9/Gate-drive%20recommendations%20for%20PCT_%205SYA%202034_02NewLay.pdf>. Acesso em: 06 nov 2017

BARROS NETO, M. C. **Compensação de desequilíbrios em redes elétricas**. 2000. 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2000.

BELCHIOR, F. N.; FERREIRA, J. F. V.; OLIVEIRA, J. C.; BERNARDES, V. A.; OLIVEIRA, L. C. O. Zero sequence electromagnetic filter performance with non ideal conditions. In: IEEE-PES INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 12., 2006, Cascais. **Proceeding of the...** Cascais: IEEE Xplore digital library, 2006. p.1-6.

BUZO, R. F. ; FORTES, R. R. A. ; OLIVEIRA, LUÍS C. O. ; ALVAREZ, J. P. Operação combinada de dispositivos eletromagnéticos para confinamento de sequência zero. In: INDUSCON 2016 - IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 12, IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS, 12, 2016, Curitiba. **Proceedings of the...** Curitiba: IEEE, 2016.

CZARNECKI, L.; HALEY, P. M. **Reactive compensation in three-phase four-wire systems at sinusoidal voltages and currents**. Baton Rouge: International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), 2013.

CZARNECKI, L. S. Harmonic blocking compensator: an alternative for improving power quality, In: INTERNATIONAL CONFERENCE HARMONICS POWER SYSTEM, 6., 1994, Bologna. **Proceedings of the...** Bologna: IEEE Xplore digital library, 1994. p. 283-288.

CZARNECKI, L. S. Instantaneous reactive power p-q theory and power properties of three-phase systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Piscataway, v. 21, n. 1, p. 362-367, 2006.

DAHONO, P. A.; WIDJAYA, R. E.; MARSI, S.; QAMARUZZAMAN. A Practical Approach to Minimize the Zero Sequence Current Harmonics in Power Distribution Systems. In: POWER CONVERSION CONFERENCE, 1997, Nagaoka. **Proceeding of the...** Nagaoka: IEEE, 2002. p. 683-686.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H.W. **Electrical power systems quality**. 2. ed . New York: McGraw-Hill, 2003. 158 p.

EUROPEAN STANDARD. **EN 50160**: voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. Poland: Wroclaw University of Technology, 1994. 16 p.

FREITAS, S. C. L. ; OLIVEIRA, L. C. O ; SOUZA, J. B. ; OLIVEIRA, R. A. N. Experimental analysis and adherence test of the electromagnetic zero-blocking model. In: T&D IEEE / PES 2010 TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION LATIN AMERICA, 2010, São Paulo. **Proceedings of the...**São Paulo: IEEE, 2010. p. 589-593, 2010.

FREITAS, J. S. M. **Implementação de um filtro ativo de potência para otimização da interface entre a rede e outros sistemas elétricos**. 2004. 120 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Minho, Braga, 2004.

FREITAS, S. C. L. ; OLIVEIRA, L. C. O ; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, R. A. N.. Ensaios Experimentais de um supressor eletromagnético de harmonicas de sequencia zero. **Revista SODEBRAS**, v. 9, p. 216-223, 2014.

FREITAS, S. C. L. **Supressor eletromagnético de componentes harmônicas de sequência zero**. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011. Disponível em: <
http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/stefanifreitas_final.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2017.

FREITAS, S. C. L. ; OLIVEIRA, L. C. O. ; OLIVEIRA, P. S. ; AFONSO, J. L. ; EXPOSTO, B. Design and experimental investigation of the electromagnetic zero- sequence suppressor. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE GERAÇÃO, TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA, 10, 2013, Viña Del Mar. THE LATIN-AMERICAN CONGRESS ON ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 10, - CLAGTEE 2013, Viña Del Mar. **Proceedings of the...** Viña Del Mar: IEEE, 2013.

FREITAS, S. C. L. **Estudos teóricos e experimentais da operação conjunta do supressor eletromagnético e de um filtro ativo de potência**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <
<https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/111136/000800686.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

FLUKE. **434/435 Three phase power quality analyzer user's manual**. Netherlands: Fluke Corporation, 2008. 140 p.

GYUGYI, L.; OTTO, R. A.; PUTMAN, T. H. principle and applications of static thyristor-controlled shunt compensators. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Piscataway, v. PAS 97, n. 5, p. 1935 – 1945, 1978.

GYUGI, L.;STRYcula, E. C. Active AC power filter. In: IEEE-IAS ANNUAL MEETING, 1976, Orlando. **Proceedings of the...** Orlando: IEEE-IAS Annual Meeting, 1976. p. 529-535.

IEEE TASK FORCE. Effect of harmonics on equipments. **IEEE Transaction on Power Delivery**, Piscataway, v. 8, n. 2, p. 672-680, 1993.

JOU, H.; WU, K.; WU, CHIANG, W. A three-phase four-wire power filter comprising a three-phase three-wire active power filter and zig-zag transformer. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Piscataway, v. 23, n. 1, p. 252-259, 2008.

LINDEKE, D. **Projeto de um filtro ativo paralelo de 1kVA usando técnicas de controle analógico e digital**. 2003. 197 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <
<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/85549/194434.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 04 nov. 2017.

McLYMAN, C. W. T. **Transformer & inductors design handbook**. 3. ed. New York: CRC Press, 2004. p. 222-251.

MILLER, T. J. E. **Reactive power control in electric systems**. New York: John Wiley & Sons, 1982.

VISCONTI, A. C. **Microprocessadores 8080 E 8085: hardware**. 9. ed. São Paulo: Érica, 1986.

MORAIS, A. S. **Modelagem, controle e implementação de redistribuidor de potência complexa empregando conversor estático e utilizando DSP**. 2008. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/91548>>. Acesso em: 03 nov. 2017.

MORAIS, E. V.; OLIVEIRA, L. C. O. ; OLIVEIRA, R. A. N.; BOVOLATO, L. F. O Laboratório Remoto na Investigação Científica e na Atualização Profissional. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING AND TECHNOLOGY EDUCATION, 13, 2014, Guimarães. **Anais...**Guimarães: [S.n.], 2014.

OLIVEIRA, L.C.O. ; OLIVEIRA, R. A. N. ; Perin, W.B. ; SOUZA, J.B. A zero sequence harmonic blocking design: theoretical and experimental analysis. In: EUROPEAN CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND APPLICATIONS, 13, 2009, Barcelona. **Proceedings of the...** Barcelona: IEEE 2009a.

OLIVEIRA, L. C. O.; FREITAS, S. C. L; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, J. C. Modeling for performance analysis of electromagnetic zero sequence suppressor. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, ICHQP, 14, 2010, Bergamo. **Proceedings of the...** Bergamo: IEEE, 2010.

BELCHIOR, F. N. **Uma nova abordagem à filtragem de harmônicas através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica)- Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

OLIVEIRA, L. C. .; BARROS NETO, M. C. ; SOUZA, J. B. Using matlab-simulink for simulating load compensation in four-wire electrical power systems. In: IEEE-PES - TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2004, São Paulo, 2004. **Proceedings of the...** São Paulo: IEEE, 2004. p. 249-254.

OLIVEIRA, L. C. O.; BARROS NETO, M. C. Load compensation in four-wire electrical power systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY - POWERCON 2000, Perth. **Proceedings of the...** Perth: IEEE, 2000a. p. 1575-1580.

OLIVEIRA, L. C. O.; BARROS NETO, M. C. Methodology for load compensation in four-wire electrical power systems based on instantaneous sampling. In: IEEE-PES-ICHQP INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER, 2000, Orlando. **Proceedings of the...** Orlando: IEEE, 2000b. v. 2. p. 510-514

OLIVEIRA, L. C. O.; OLIVEIRA, J. C.; SOUZA, J. B. Frequency domain model for the zero sequence blocking filter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND POWER OF QUALITY, 13, 2008, Wollongong. **Proceedings of the...** Wollongong: IEEE, 2008.

OLIVEIRA, L. C. O.; RAVAGNANI, L. L.; OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F.; OLIVEIRA, R. A. N. Análise experimental das impedâncias características dos filtros eletromagnéticos de sequência zero. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 7., 2007, Santos. **Anais...** Santos: [S.n.], 2007b. p. 1-6.

OLIVEIRA, L. C. O.; RAVAGNANI, L. L.; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, J. C.; BELCHIOR, F. N. Método das transmitâncias sequenciais na avaliação de sistemas de filtragem harmônica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 8., 2009, Blumenau. **Anais...** Blumenau: Labplan/UFSC, 2009b. p. 1-8.

OLIVEIRA, L. C. O.; MENEZES, P. N. Z.. Dimensionamento otimizado da planta primária de sistemas de compensação estática tipo RCT. In: IEEE-PES - TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2004, São Paulo. **Proceedings of the...** São Paulo: IEEE, 2004.

OLIVEIRA, L. C. O.; OLIVEIRA, R. A. N.; SOUZA, J. B. ; FREITAS, S. C. L. Electromagnetic Zero-Sequence Harmonics Blocker: Modeling and Experimental Analysis. **Journal of Energy and Power Engineering**, New York, v. 8, p. 1425-1431, 2014

OLIVEIRA, J. C.; OLIVEIRA, L. C. O.; BELCHIOR, F. N.; OLIVEIRA, R. N.; BARBOSA, J. A. F. Frequency domain model for zero-sequence electromagnetic harmonic filter performance analysis. **International Transaction on Electric Energy**, Chichester, v. 25, n. 10, p. 2325-2339, 2015.

OMORI, J. S. **Aplicação de filtro ativo trifásico em sistemas de distribuição de baixa tensão**. 2007. 227 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007. Disponível em: <http://files.dirppg.ct.utfpr.edu.br/cpgei/Ano_2007/dissertacoes/Dissertacao_458_2007.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2017.

PENG, F. Z.; ADAMS, D. J. Harmonics sources and filtering approaches – series/parallel, active/passive, and their combined power filters. **IEEE Industry Applications Magazine**, Piscataway, v. 7, n. 4, p. 18-25, 2001.

PREGITZER, R.; COSTA, J.C.; MARTINS, J.S.; AFONSO, J.L. Simulation and implementation of a 3-phase 4-wire shunt active power filter. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND POWER QUALITY, Cascais. **Proceedings of the...** Cascais: IEEE, 2006. p. 1-6.

PRODIST - PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, PRODIST/Módulo 8, **Qualidade da energia elétrica**. Brasília: PRODIST, 2010. Módulo 8. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 01 nov. 2017.

RAVAGNANI, L. L. **Sistemas híbridos para mitigação de harmônicos: modelagem e estudos experimentais**. 2008. 152 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/100312/ravagnani_ll_dr_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 01 nov. 2017.

RIBEIRO, E. **Filtros ativos série para compensação de harmônicas de tensão**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003. Disponível em: <

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85123/194129.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 02 nov. 2017.

SINGH, B.; AL-HADDAD, K., CHANDRA, A. A review of active filters for power quality improvement. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Piscataway, v. 46, n. 5, p. 960-971, 1999.

TEODORO, R. G. **Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas**. 2005. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005. Disponível em: <
http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/141-dissertacao_ricardo_gouveia_teodoro.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2017.

THYRISTOR THEORY AND DESIGN CONSIDERATIONS. Handbook HBD855/D ,ON Semiconductor, Rev. 1, Nov-2006. Disponível em: <
https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2587503/mod_resource/content/2/Onsemi_Thyristor_Theory_and_Design_Considerations_Handbook_HBD855-D.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2017.

VENDRAMINI, J. F. **Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos de sequência zero através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

WATANABE, E. H.; AREDES, M.; PING, W. W.; PILOTT, L. A. S. O Estado da arte em eletrônica de potência. In: CIGRÉ/COPPE/CEPEL, 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: CIGRÉ, 1998.

WEIDENBRUG, R.; DAWSON, F. P.; BONERT, R. New synchronization method for thyristor power converters to weak AC-systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Piscataway, v. 40, n. 5, p. 505-511, 1993
