



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Algoritmo para Detecção Instantânea  
do Ângulo de Fase Aplicado ao  
Compensador Série**

Bruno Emmanuel de Oliveira Barros Luna

Dissertação de Mestrado

Campina Grande  
Março de 2010

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

## **Algoritmo para Detecção Instantânea do Ângulo de Fase Aplicado ao Compensador Série**

Bruno Emmanuel de Oliveira Barros Luna

*Trabalho apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.*

Orientadores *Cursino Brandão Jacobina  
Alexandre Cunha Oliveira*

Campina Grande  
Março de 2010

UFCG BIBLIOTECA

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
815	24-05-050

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

L961a Luna, Bruno Emmanuel de Oliveira Barros.

Algoritmo para detecção instantânea do ângulo de fase aplicado ao compensador série / Bruno Emmanuel de Oliveira Barros Luna. — Campina Grande, 2010.

64f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Dr. Cursino Brandão Jacobina, Dr. Alexandre Cunha Oliveira.

1. Filtros. 2. Filtro Ativo Série. 3. Algoritmo. 4. Ângulo de Fase - Detecção. 5. Harmônicos - Compensação. 6. Tensão – Compensação.  
I. Título.

CDU – 621.372.852.1

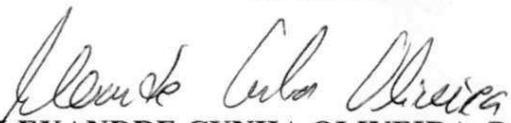
(043)

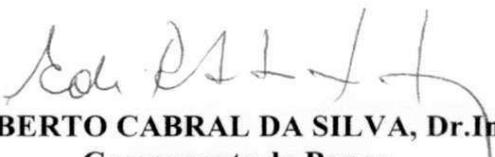
**ALGORITMO PARA DETECÇÃO INSTANTÂNEA DO ÂNGULO DE FASE  
APLICADO AO COMPENSADOR SÉRIE**

**BRUNO EMMANUEL DE OLIVEIRA BARROS LUNA**

Dissertação Aprovada em 12.03.2010

  
**CURSINO BRANDÃO JACOBINA, Dr.Ing., UFCG**  
Orientador

  
**ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG**  
Orientador

  
**EDISON ROBERTO CABRAL DA SILVA, Dr.Ing., UFCG**  
Componente da Banca

  
**EUZELI CIPRIANO DOS SANTOS JÚNIOR, D.Sc., UFCG**  
Componente da Banca

  
**DARLAN ALEXANDRIA FERNANDES, D.Sc., IFRN**  
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB  
MARÇO DE 2010

*À minha família.*

# Agradecimentos

- A minha mãe Maria de Lourdes de Oliveira Barros, por todo amor e suporte.
- A minha noiva Karolie Nobre Dantas Grassi por todo amor e carinho doado.
- Aos professores Alexandre Cunha Oliveira, Antônio Marcus Nogueira Lima e Cursino Brandão Jacobina por acreditarem na minha capacidade.
- Ao povo brasileiro, que por intermédio do CNPq, concedeu-me uma bolsa de estudos.
- A todos que contribuíram de forma positiva para a minha formação.

# Resumo

Este trabalho propõe um algoritmo para detecção instantânea do ângulo de fase baseado em componentes de sequência. O método dos mínimos quadrados recursivo ponderado é utilizado para estimar as componentes de sequência positiva e negativa. O ângulo de fase é determinado a cada iteração a partir da componente fundamental de sequência positiva. A operação do algoritmo é apresentada sob condições de qualidade de energia comuns ao sistema elétrico de potência. Ensaio experimentais sob tais condições são apresentados e analisados. O ângulo de fase estimado é aplicado nas estratégias de controle do compensador série para realizar as funções de restauração de tensão e compensação de harmônicos. Os resultados da operação do algoritmo e da aplicação são apresentados e analisados.

# Abstract

This work proposes an algorithm to detect instantaneous phase angle based on sequence components. The method of weighted recursive least squares is used to estimate the components of positive and negative result. The phase angle is determined at each iteration, from the fundamental component of positive sequence. The operation of the algorithm is presented considering power quality conditions which are usual in the electric power system. Experimental tests under such conditions are presented and analyzed. The estimated value of the phase angle is applied to the series compensator control strategies to perform the voltage restoration and harmonics compensation. The results of the algorithm operation and the application to the compensator are presented and analyzed.

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Motivação	2
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do trabalho	3
<b>2</b>	<b>Distúrbios da qualidade de energia e alternativas de mitigação</b>	<b>4</b>
2.1	Variações de tensão de longa duração	4
2.1.1	Sobretensão	4
2.1.2	Subtensão	5
2.1.3	Interrupção	5
2.2	Variações de tensão de curta duração	5
2.2.1	Elevações	5
2.2.2	Afundamentos	5
2.2.3	Interrupções	6
2.3	Distorções na forma de onda	7
2.3.1	Harmônicos	7
2.3.2	Interharmônicos	7
2.3.3	Entalhe	7
2.3.4	Ruído	7
2.4	Recomendações para classificação	8
2.4.1	Recomendação Brasileira	8
2.4.2	Recomendação Americana	9
2.5	Causas de afundamentos de tensão e interrupções	9
2.6	Métodos de Mitigação	11
2.7	Conclusão	13
<b>3</b>	<b>Compensador Série</b>	<b>15</b>
3.1	Modos de operação	15
3.2	Limitações	16

3.3	Estratégias de controle	17
3.3.1	Controle otimizado da amplitude da tensão	18
3.3.2	Controle otimizado da qualidade de tensão	19
3.3.3	Controle otimizado da energia	21
3.4	Tipos de controladores	25
3.4.1	Sistemas de controle em malha aberta	28
3.4.2	Sistemas de controle em malha fechada	29
3.5	Conclusão	32
<b>4</b>	<b>Algoritmo para detecção instantânea do ângulo de fase</b>	<b>34</b>
4.1	Estado atual de desenvolvimento	34
4.2	Método proposto	36
4.2.1	Modelagem do sistema	36
4.2.2	Algoritmo proposto	38
4.3	Conclusão	42
<b>5</b>	<b>Algoritmo para Detecção Instantânea do Ângulo de Fase Aplicado ao Compensador Série</b>	<b>47</b>
5.1	Compensador série	48
5.2	Resultados experimentais	53
5.3	Conclusão	55
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>61</b>

# Lista de Figuras

2.1	Variações de tensão de curta duração	6
2.2	Modelo simplificado do sistema elétrico.	10
2.3	Diagrama do controlador de tensão série.	12
2.4	Diagrama do controlador de tensão em derivação.	12
2.5	Diagrama do controlador de tensão derivação-série.	13
3.1	Diagrama de blocos do compensador série.	16
3.2	Controle otimizado da amplitude da tensão.	19
3.3	Controle otimizado da amplitude da tensão. (a) Tensão de fase fornecida; (b) Potência fornecida.	20
3.4	Controle otimizado da qualidade da tensão.	21
3.5	Controle otimizado da qualidade da tensão. (a) Tensão de fase fornecida; (b) Potência fornecida.	22
3.6	Controle otimizado da qualidade da tensão. (a) Tensão de fase fornecida; (b) Potência fornecida.	23
3.7	Controle otimizado da energia.	25
3.8	Controle otimizado da energia. (a) Tensões de fase fornecidas; (b) Potência fornecida.	26
3.9	Comparação entre as estratégias de controle. (a) Tensão de fase fornecida; (b) Potência fornecida.	27
3.10	Controle em malha aberta aplicado ao compensador série.	28
3.11	Controle em malha aberta. Tensão na carga $V_l$ com a entrada $V_i$ em degrau.	29
3.12	Controle em malha fechada aplicado ao compensador série.	30
3.13	Controle em malha fechada. Tensão na carga $V_l$ com a entrada $I_l$ em degrau.	31
3.14	Controle em malha fechada. Tensão na carga $V_l$ com a entrada $V_s$ em degrau.	32
3.15	Controle em malha fechada. Tensão na carga $V_l$ com a entrada $V_i$ em degrau.	33
4.1	Horizonte de memória para o fator de esquecimento $\lambda$	40
4.2	Tensões de fase.	41

4.3	Componentes de sequência positiva e negativa.	42
4.4	Senos do ângulo de fase estimado e referência senoidal.	43
4.5	Tensões de fase.	43
4.6	Componentes de sequência positiva e negativa.	44
4.7	Senos do ângulo de fase estimado e referência senoidal.	44
4.8	Espectro de frequências. (a) Tensões de Fase; (b) Seno do ângulo de fase estimado.	45
4.9	Componentes de Sequência. (a) Método proposto; (b) WLSE [1].	46
5.1	Diagrama de blocos do compensador série.	47
5.2	Diagrama de blocos para o sistema de controle da componente positiva.	50
5.3	Diagrama de blocos para o sistema de controle da componente negativa.	51
5.4	Diagrama de blocos para o sistema de controle da componente zero.	52
5.5	Resultados de simulação para a compensação de um afundamento monofásico. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.	53
5.6	Resultados de simulação para a compensação de um afundamento bifásico. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.	54
5.7	Resultados de simulação para a compensação de um afundamento trifásico. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.	55
5.8	Diagrama de blocos para a compensação de harmônicos.	56
5.9	Resultados de simulação para a compensação de harmônicos. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.	57
5.10	Resultados de simulação para a compensação de harmônicos e um afundamento trifásico. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.	57
5.11	Plataforma Experimental.	58
5.12	Tensões de fase.	58
5.13	Senos do ângulo de fase estimado e referência senoidal.	59
5.14	Espectro de frequências. (a) Tensões de Fase; (b) Seno do ângulo de fase estimado.	60

# Lista de Tabelas

2.1	Classificação para Variações de Curta Duração.	8
2.2	Classificação para Distorções Harmônicas Totais.	8
2.3	Classificação para Variações de Curta Duração.	9
2.4	Classificação para Distorções Harmônicas Totais.	9

## CAPÍTULO 1

# Introdução

A qualidade da energia elétrica tem se tornado uma preocupação crescente nas empresas de energia elétrica e para os consumidores de modo geral. O interesse progressivo pela qualidade da energia elétrica deve-se, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos eletro-eletrônicos, amplamente utilizados nos diversos segmentos de atividade industrial, comercial e residencial. Devido a estas novas demandas tecnológicas, pode-se dizer que os equipamentos eletro-eletrônicos atuais, ao incorporar mais funções de controle, tendem a se tornarem mais sensíveis a perturbações provenientes do sistema elétrico de potência [2].

Os sistemas de potência de corrente alternada são projetados para operar com uma tensão senoidal a uma dada frequência e magnitude. Qualquer desvio significativo em um destes parâmetros é um potencial problema na qualidade da energia. No entanto, há sempre uma relação entre tensão e corrente em um sistema de potência. Embora a geração forneça uma forma de onda de tensão quase senoidal, o fluxo de corrente na impedância do sistema pode causar perturbações à tensão. Portanto, se o interesse é voltado para forma de onda da tensão, deve-se considerar os fenômenos causados pela corrente para entender as bases de muitos problemas da qualidade da energia [3].

As principais categorias de distúrbios eletromagnéticos que degradam a qualidade de energia elétrica são: distorções na forma de onda, variações de frequência e variações de tensão de longa e curta duração.

As variações de curta duração representam atualmente os eventos de maior importância na avaliação da qualidade da energia elétrica do ponto de vista dos consumidores industriais, comerciais e domésticos, pois reduzem a segurança na operação e controle dos equipamentos eletro-eletrônicos [4].

Dentre as variações de curta duração, o afundamento de tensão é o distúrbio com maior importância, devido aos danos que pode causar. Do ponto de vista do consumidor, podem causar a parada de processos com prejuízos de produção, perda de material, perda na qualidade do produto, danos aos equipamentos e outras perdas não mensuráveis. Do ponto de vista da empresa fornecedora de energia, o afundamento de tensão pode diminuir a receita de venda de energia e degradar os índices de confiabilidade e de satisfação do consumidor.

Entre os dispositivos disponíveis para tornar as cargas sensíveis temporariamente imunes à perturbações, o compensador série com a função de restauração de tensão vem se consolidando como uma excelente alternativa para correções de afundamentos de tensão na carga [4].

## 1.1 Motivação

O ângulo de fase é um parâmetro importante para a operação de conversores de potência. O valor deste parâmetro é utilizado para sincronizar as variáveis de controle do dispositivo com o sistema elétrico e aplicada para a correção de variações de tensão, fator de potência, harmônicos e controle de potência ativa/reactiva. A existência de distúrbios da qualidade de energia degradam a detecção do ângulo de fase e diminui o desempenho das aplicações citadas.

Afundamentos de tensão, harmônicos e saltos de fase são distúrbios comuns no sistema elétrico [3]. Um método de detecção aplicado ao compensador série sob estas condições deve estimar o ângulo de fase sem distúrbios e no menor tempo possível.

Para a correção de afundamentos de tensão, o compensadores deve detectar as fases de cada uma das tensões individualmente. Não é eficaz detectar a fase de uma tensão e adicionar  $\pm 120^\circ$  para determinar as tensões de fase, pois geralmente os afundamentos estão associados a saltos de fase. A detecção individual de cada fase exige maior esforço computacional, uma vez que três algoritmos de detecção serão utilizados, com o cálculo das amplitudes individuais e as demais etapas de correção.

Os métodos baseados nas componentes de referência síncrona apresentam variáveis de controle com valores constantes, permitindo o uso de controladores simples [5][6]. O desempenho de cada método é função da largura de banda do controlador. A detecção do ângulo de fase utilizando um controlador com grande largura de banda é degradada por distorções na forma de onda. Entretanto a diminuição da largura de banda resulta em problemas na detecção de saltos de fase, devido a velocidade de resposta do controlador. A decomposição de componentes de sequência positiva e negativa a partir das componentes de referencial estacionário aumenta a robustez do método anterior [7][8].

A determinação das componentes de sequência através de filtros introduz atraso na detecção de fase, tornando o método não adequado para o compensador série com a função de restauração de tensão, no qual o tempo para correção deve ser o menor possível. O método baseado na estimação por mínimos quadrados recursivo ponderado permite, com bom desempenho, a determinação instantânea das componentes de sequência na presença de distúrbios, mas exige maior esforço computacional quando comparado ao método anterior [1].

No estado atual de desenvolvimento dos métodos apresentados na literatura, estes degradam a determinação do ângulo de fase na presença de harmônicos de baixa ordem.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é estabelecer uma metodologia para detecção instantânea do ângulo de fase. Esta metodologia é baseada em componentes de sequência e utiliza o método dos mínimos quadrados recursivo ponderado para estimar estas componentes. O ângulo de fase é determinado a cada iteração a partir da componente fundamental de sequência positiva.

Outro objetivo é avaliar o compensador série com a função de restauração de tensão e com a função de compensação de harmônicos. A restauração de tensão exige uma resposta dinâmica rápida, geralmente meio ciclo da tensão do sistema, e um ângulo de fase sem distorções. O desempenho do compensador série é função da estimação do ângulo de fase. Assim, a aplicação da metodologia proposta ao compensador série permite mostrar a sua efetividade sob as condições de rede comuns ao sistema elétrico.

## 1.3 Organização do trabalho

Para alcançar os objetivos propostos, organizou-se este trabalho de acordo com os seguintes capítulos:

- No capítulo 2 são apresentadas as definições para os distúrbios referentes à qualidade de energia elétrica, recomendações que quantificam os níveis de tolerância dos distúrbios e as alternativas de mitigação para estes distúrbios.
- No capítulo 3 são apresentadas os modos de operação, as limitações e as estratégias de controle para o compensador série.
- No capítulo 4 é apresentado o algoritmo para detecção instantânea do ângulo de fase. Resultados de simulação são apresentados e analisados.
- No capítulo 5 são apresentados o modelo para o compensador série. Resultados de simulação e experimentais são apresentados e analisados.
- No capítulo 6 são apresentadas as conclusões.

# Distúrbios da qualidade de energia e alternativas de mitigação

O objetivo deste capítulo é apresentar algumas definições para os distúrbios da qualidade de energia. Descrevem-se brevemente a origem dos afundamentos de tensão. Também as alternativas de mitigação para os afundamentos de tensão são apresentadas.

A terminologia adotada é baseada nas recomendações do ANEEL e IEEE. A recomendação adotada pelo IEEE está contida no documento *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality* [9]. A recomendação adotada pela ANEEL está contida no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [10].

## 2.1 Variações de tensão de longa duração

As variações de tensão são classificadas quanto a magnitude e duração. Variações de tensão que ocorrem em um intervalo de tempo maior que 1 min são classificadas como de longa duração. A magnitude destas variações geralmente está associada ao valor RMS da tensão e pode ser classificada em sobretensão, subtensão e interrupção sustentada.

### 2.1.1 Sobretensão

Uma sobretensão é um aumento da magnitude da tensão para um valor maior que 110% da tensão nominal durante um intervalo de tempo maior que 1 min. Sobretensões ocorrem devido ao desligamento de grandes cargas, energização de banco de capacitores ou devido a incapacidade do sistema de controle regular a tensão. Ajustes incorretos nos transformadores também provocam sobretensões.

### **2.1.2 Subtensão**

Uma subtensão é uma diminuição da magnitude da tensão para um valor menor que 90% da tensão nominal durante um intervalo de tempo maior que 1 min. Subtensões ocorrem devido a eventos opostos aos que causam sobretensões. Sistemas sobrecarregados também podem causar subtensões.

### **2.1.3 Interrupção**

Uma interrupção sustentada ocorre quando a magnitude da tensão é nula durante um intervalo de tempo maior que 1 min. Geralmente, interrupções sustentadas são permanentes e necessitam de intervenção humana para restauração do sistema.

## **2.2 Variações de tensão de curta duração**

As variações de curta duração são classificadas quanto à magnitude do evento em elevações, afundamentos e interrupções. Quanto à duração, os eventos são classificados em instantâneos, momentâneos e temporários.

### **2.2.1 Elevações**

Uma elevação é um aumento da magnitude da tensão para um valor maior que 110% da tensão nominal durante um intervalo de tempo menor que 1 min. Elevações de tensão ocorrem com uma frequência menor que outros eventos. Entretanto, faltas monofásicas podem elevar a tensão nas demais fases e a severidade da falta depende da impedância e do aterramento do sistema.

### **2.2.2 Afundamentos**

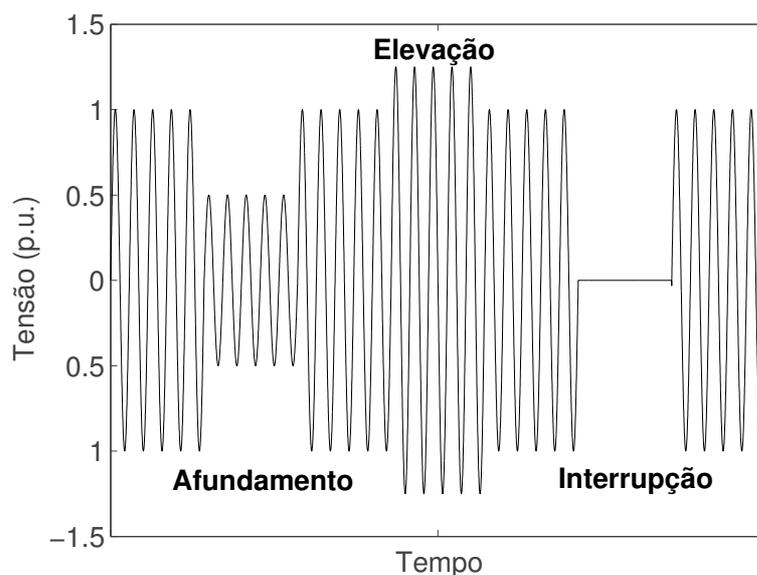
Um afundamento é uma diminuição da magnitude da tensão para um valor menor que 90% da tensão nominal durante um intervalo de tempo menor que 1 min. Entretanto, afundamentos com duração menor que meio ciclo não podem ser detectados a partir do cálculo do valor RMS da tensão. As durações definidas como instantânea, momentânea e temporária estão associadas aos tempos de operação dos dispositivos de proteção do sistema. Afundamentos de tensão geralmente estão associados a faltas e energização de cargas com correntes iniciais elevadas

com relação ao nível de curto-circuito do sistema.

### 2.2.3 Interrupções

Uma interrupção ocorre quando a magnitude da tensão é nula por um intervalo de tempo menor que 1 min. Este tipo de evento ocorre devido a faltas ou defeitos nos equipamentos do sistema elétrico. A duração da interrupção é função da velocidade de resposta dos equipamentos de proteção. Religamentos devido a faltas não permanentes causam interrupções com duração menor que 30 ciclos, instantâneas. Entretanto, atrasos nos religamentos podem causar interrupções momentâneas ou temporárias. A duração de uma interrupção devido ao mau funcionamento dos equipamentos pode ser irregular.

Interrupções podem ser precedidas por afundamentos quando ocorrem devido a faltas no sistema. O afundamento ocorre entre o instante da falta e o instante de operação do equipamento de proteção.



**Figura 2.1** Variações de tensão de curta duração

## 2.3 Distorções na forma de onda

Uma distorção na forma de onda é definida como um desvio com relação a um onda senoidal ideal em regime permanente. A distorção é fundamentalmente caracterizada pelo seu conteúdo espectral.

### 2.3.1 Harmônicos

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Uma componente harmônica é definida como uma onda senoidal que tem uma frequência igual a um múltiplo inteiro da frequência fundamental. Harmônicos ocorrem devido a características não-lineares de dispositivos e cargas conectados no sistema elétrico.

### 2.3.2 Interharmônicos

As componentes harmônicas múltiplas não inteiras da frequência fundamental são denominadas componentes interharmônicas. Geralmente ocorrem devido a conversão de frequência realizada por dispositivos de potência e não são constantes, pois variam em função da carga. Correntes interharmônicas podem ocorrer na frequência de ressonância do sistema.

### 2.3.3 Entalhe

Entalhe (do inglês *Notch*) é uma distúrbio periódico de tensão causada pela operação de dispositivos de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra. O entalhe ocorre de forma contínua e pode ser caracterizado através do espectro de frequências. Entretanto, geralmente é tratado como um caso especial.

### 2.3.4 Ruído

O ruído é um sinal aleatório com conteúdo espectral inferior a 200 kHz sobreposto a tensão ou corrente de fase.

## 2.4 Recomendações para classificação

A necessidade de estabelecimento de padrões uniformes para quantificar a qualidade de energia elétrica motivou organizações como o IEEE a elaborar padrões para determinados eventos que ocorrem no sistema elétrico. Entretanto algumas indústrias, como a de semicondutores, utilizam padrões próprios e específicos.

### 2.4.1 Recomendação Brasileira

A recomendação brasileira para qualidade de energia aprovada pela ANEEL foi desenvolvida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e está descrita no Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos indicadores de desempenho da rede básica e de seus componentes [10]. As recomendações para as redes de distribuição são preliminares e estão contidas no módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Na Tabela 2.1 é apresentada a classificação para as variações de tensão de curta duração. O símbolo  $c$  representa a duração em ciclos e  $s$  a duração em segundos. Na Tabela 2.2 é apresentada a classificação para distorções harmônicas totais contidas no PRODIST.

Classificação		Magnitude	Duração
Momentâneo	Elevação	$m > 1,1 \text{ pu}$	$1 \text{ c} < d < 3 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 < m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	$d < 3 \text{ s}$
Temporário	Elevação	$m > 1,1 \text{ pu}$	$3 \text{ s} < d < 60 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 < m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	

**Tabela 2.1** Classificação para Variações de Curta Duração.

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão
$V_N < 1kV$	10%
$1kV < V_N < 13,8kV$	8%
$13,8kV < V_N < 69kV$	6%
$69kV < V_N < 138kV$	3%

**Tabela 2.2** Classificação para Distorções Harmônicas Totais.

### 2.4.2 Recomendação Americana

A recomendação IEEE 1159 classifica os eventos de curta duração quanto a magnitude e duração [9]. Os intervalos definidos estão associados aos tempos de operação dos dispositivos de proteção do sistema e ao tempo de eliminação do efeito da falta em todos os barramentos. Entretanto a recomendação para a classificação de distorções na forma de onda estão contidas na IEEE 519. Na Tabela 2.3 é apresentada a classificação para as variações de tensão de curta duração. Na Tabela 2.4 é apresentada a classificação para distorções harmônicas totais.

Classificação		Magnitude	Duração
Instantâneo	Elevação	$1,1 < m < 1,8 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} < d < 30 \text{ c}$
	Afundamento	$0,1 < m < 0,9 \text{ pu}$	
Momentâneo	Elevação	$1,1 < m < 1,4 \text{ pu}$	$30 \text{ c} < d < 3 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 < m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	
Temporário	Elevação	$1,1 < m < 1,4 \text{ pu}$	$3 \text{ s} < d < 60 \text{ s}$
	Afundamento	$0,1 < m < 0,9 \text{ pu}$	
	Interrupção	$m < 0,1 \text{ pu}$	

**Tabela 2.3** Classificação para Variações de Curta Duração.

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão
$V_N < 69kV$	5%
$69kV < V_N < 138kV$	2,5%

**Tabela 2.4** Classificação para Distorções Harmônicas Totais.

## 2.5 Causas de afundamentos de tensão e interrupções

Afundamentos e interrupções são geralmente causados por faltas no sistema elétrico. Interrupções momentâneas causam uma perda completa de tensão e são resultantes das ações para extinguir faltas transitórias no sistema. Interrupções sustentadas geralmente se devem a faltas permanentes.

Afundamentos são menos danosos que uma interrupção. No entanto, a ocorrência de afundamentos é mais frequente que a de interrupções, e por conseguinte geram maiores danos. Um equipamento pode ser afetado mesmo que o afundamento ocorra a quilômetros de distância. Assim, um afundamento é um problema maior do que uma interrupção [3].

A maioria dos curto-circuitos em sistemas de potência são monofásicos ou bifásicos, ou seja, são faltas desequilibradas. As cargas podem sofrer seis tipos de afundamentos que são combinações de faltas fase-fase, fase-fase-terra e monofásicas, somando sete quando considerado a falta trifásica. A severidade do afundamento depende da topologia do sistema e da localização da falta.

Geralmente durante a falta, também ocorre um salto de fase devido a diferença na razão  $X/R$  da fonte e do alimentador, sendo  $X$  a reatância e  $R$  a resistência. A maioria dos equipamentos são imunes a saltos de fase, mas os que usam o parâmetro do ângulo de fase em seus algoritmos de controle podem ser afetados.

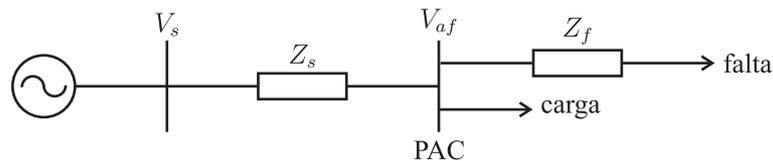
Um modelo simplificado para um sistema de transmissão é apresentado na Fig. 2.2. A tensão  $V_s$  é normalizada e igual a 1. A tensão no PAC é

$$\overline{V_{af}} = \frac{\overline{Z_f}}{\overline{Z_s} + \overline{Z_f}} \quad (2.1)$$

sendo  $\overline{Z_s} = R_s + jX_s$  e  $\overline{Z_f} = R_f + jX_f$ . O ângulo do salto de fase é

$$\Delta\phi = \tan^{-1}\left(\frac{X_f}{R_f}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{X_s + X_f}{R_s + R_f}\right). \quad (2.2)$$

O salto de fase ocorre se a relação  $X_s/R_s = X_f/R_f$  não for verificada.



**Figura 2.2** Modelo simplificado do sistema elétrico.

Um motor de indução de grande porte também pode provocar afundamentos de tensão, pois demanda uma corrente maior que a nominal durante sua partida. Esta corrente permanece elevada até o motor alcançar sua velocidade nominal, durante um intervalo de tempo de segundos a minutos. A severidade do afundamento depende dos parâmetros do sistema (como o nível de curto-circuito) e do método de partida do motor.

## 2.6 Métodos de Mitigação

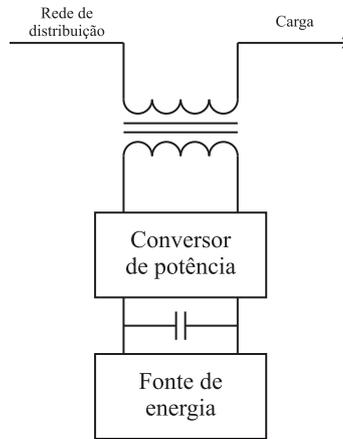
Os métodos de mitigação utilizam um conjunto de técnicas para assegurar a confiabilidade de operação do equipamento. As técnicas mais comuns são:

- Reduzir o número de curto-circuitos;
- Reduzir o tempo de extinção da falta;
- Modificar o sistema para diminuir a severidade dos eventos;
- Conectar equipamento de mitigação entre o equipamento sensível e a rede de fornecimento;
- Aumentar a imunidade do equipamento.

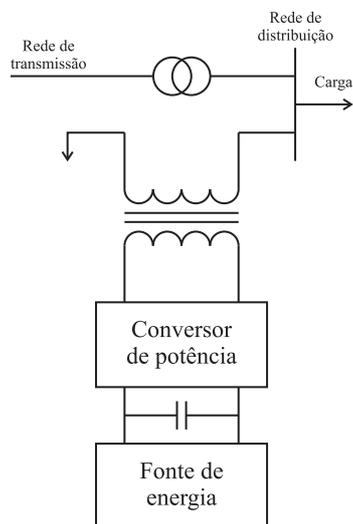
A interface entre o sistema e o equipamento é o ponto mais comum para a correção de afundamentos e interrupções. As técnicas aplicadas são baseadas em dispositivos eletrônicos de potência, sendo o conversor de potência do tipo fonte de tensão a parte fundamental. A classe de equipamentos de potência do tipo CP (do inglês *Custom Power*) vem se consolidando na função de suprimir, filtrar ou atenuar os distúrbios do sistema elétrico para os dispositivos sensíveis.

O compensador série é um dispositivo do tipo CP. O princípio básico de funcionamento consiste em fornecer uma tensão com a amplitude, fase e frequência solicitada. O compensador série pode restaurar a tensão na carga para uma amplitude e uma forma de onda desejadas em condições de desequilíbrio e distorção. O ângulo de fase pode ser ajustado para permitir o controle das potências ativa e reativa transferidas entre o compensador e o sistema. A Fig. 2.3 mostra o diagrama para o controlador de tensão série.

Outros dispositivos do tipo CP podem ser utilizados para compensar afundamentos de tensão. O controlador de tensão em derivação geralmente não é utilizado para mitigação de afundamentos de tensão, mas para controlar o fluxo de potência reativa e correntes harmônicas na carga. A saída do controlador é conectada ao sistema através de um transformador de acoplamento. A forma de onda fornecida é aproximadamente senoidal e está em fase com a tensão do barramento. Se a amplitude da tensão do controlador for maior que a do barramento, a corrente reativa circula do barramento para o controlador. Se a amplitude da tensão do controlador for menor que a do barramento, a corrente reativa circula do controlador para o barramento. A Fig. 2.4 mostra o diagrama para o controlador de tensão em derivação.



**Figura 2.3** Diagrama do controlador de tensão série.

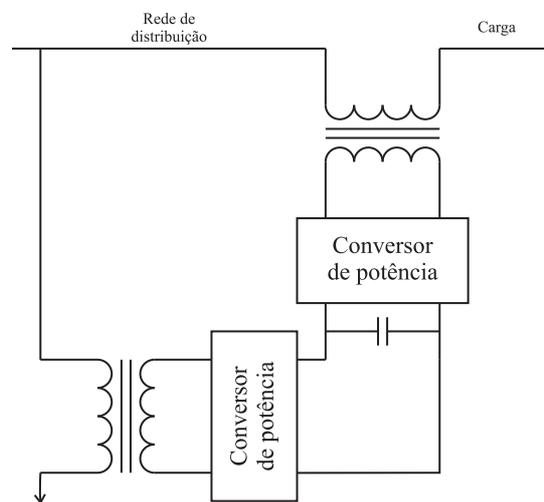


**Figura 2.4** Diagrama do controlador de tensão em derivação.

A compensação de afundamentos neste tipo de controlador é inviável, devido a corrente exigida pelo controlador. Um afundamento de 0,5 pu demanda uma corrente de 5 pu para sua compensação.

O controlador série utiliza uma fonte de energia para alimentar a carga durante o afundamento de tensão. A tensão remanescente no sistema pode ser utilizada para fornecer a energia ao controlador série através de um controlador conectado em derivação. A potência transferida entre os controladores deve ser igual à necessária para compensar o afundamento. A Fig. 2.5 mostra o diagrama para o controlador de tensão derivação e série combinados.

O controlador derivação-série geralmente tem menor custo, pois sua fonte de energia é o controlador em derivação. Entretanto a compensação de afundamentos de tensão severos demanda correntes de valor elevado do controlador em derivação.



**Figura 2.5** Diagrama do controlador de tensão derivação-série.

## 2.7 Conclusão

Neste capítulo foram abordadas as definições relacionadas à Qualidade de Energia Elétrica. Foram apresentadas algumas das principais características dos fenômenos causadores de distúrbios eletromagnéticos, segundo a classificação apresentada pelo IEEE e pela ANEEL. A norma internacional foi exposta com intuito informativo, pois permite a comparação com a norma brasileira apresentada pela ANEEL.

A utilização de sistemas de condicionamento de energia, mais precisamente os dispositivos do tipo CP, vem se consolidando como alternativa para suprimir, filtrar ou atenuar os distúrbios

do sistema elétrico. Entre os controladores apresentados para compensar afundamentos de tensão o tipo série é o mais adequado, pois pode promover uma solução local e imediata para os distúrbios.

## Compensador Série

O objetivo deste capítulo é descrever os modos de operação, as limitações e as estratégias de controle para o compensador série. A estrutura básica é dividida em fonte de energia, barramento c.c., conversor de potência do tipo fonte tensão, filtro e transformador de acoplamento, como mostrado na Fig. 3.1. Estas partes são necessárias para compensar afundamentos de tensão, mas cada uma pode ser implementada utilizando-se topologias e estratégias de controle diferentes.

Neste trabalho o filtro é composto por um capacitor e um transformador de acoplamento, de razão 1 : 1. O transformador é representado por uma resistência e pela reatância de dispersão. A combinação destes elementos compõem o filtro LC.

O sistema de controle pode ser em malha aberta ou em malha fechada. O primeiro é mais simples e apresenta um bom desempenho. Entretanto, o controle em malha fechada é mais rápido e exato na compensação dos distúrbios.

É importante observar previamente os modos de operação e as limitações do compensador série, pois estão diretamente relacionadas com a estratégia de controle.

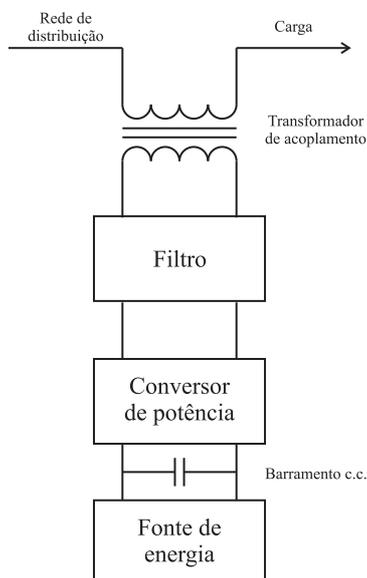
### 3.1 Modos de operação

O restaurador dinâmico de tensão pode operar em três modos:

- Modo *bypass*. O compensador série é desconectado do sistema elétrico durante a ocorrência de faltas a montante e durante procedimentos de manutenção.
- Modo *standby*. O sistema está próximo da condição ideal e o compensador série pode ter um modo de operação secundário.
- Modo *ativo*. O distúrbio é detectado e o compensador série fornece a tensão necessária para restabelecer a condição ideal do sistema.

No modo de operação secundário não há compensação de distúrbios até um determinado nível. Assim, na ocorrência de pequenas variações nas condições do sistema elétrico as perdas

devido à operação do conversor são minimizadas. Entretanto este modo de operação só pode ser usado em cargas que permitam estas variações.



**Figura 3.1** Diagrama de blocos do compensador série.

## 3.2 Limitações

A possibilidade de compensação de afundamentos pode ser limitada por vários fatores, incluindo diferentes condições de carga e os diferentes tipos de afundamentos. As limitações devem ser analisadas durante o projeto do compensador série, pois estão diretamente ligadas às estratégias de controle. As três principais limitações que devem ser observadas são [11] :

- Limite de tensão. O projeto do compensador série é limitado pela capacidade de fornecimento de tensão, com o objetivo de reduzir custos e a queda de tensão sobre o dispositivo em condição de operação normal. Quanto menor for a necessidade de fornecimento de tensão, menor é o custo associado ao compensador série.
- Limite de potência. A potência é fornecida ao compensador série através de um barramento c.c.. Um conversor adicional geralmente é utilizado para manter a tensão do barramento c.c. constante. Assim, os limites de potência do conversor adicional podem introduzir uma limitação para o compensador série.

- Limite de energia. A energia é utilizada para manter a tensão na carga constante e seu fornecimento é dimensionado para que seja a menor possível, com o objetivo de reduzir custos. Alguns tipos de afundamentos consomem mais esta energia e um controle adequado pode reduzir a possibilidade de colapso causado pela falta de energia.

### 3.3 Estratégias de controle

A capacidade de compensação de tensão do compensador série está relacionada, entre outras características, a seu método de fornecer potência ativa e reativa ao sistema. A estratégia de controle pode depender do tipo de carga conectada e do tipo de afundamento.

A estratégia de controle mais utilizada é a que dispõe a tensão do compensador série em fase com a tensão do sistema sem considerar o ângulo de fase da corrente de carga [11]. Entretanto, este método consome a energia armazenada rapidamente. Outros métodos de controle permitem melhorar a relação entre a tensão fornecida e a energia consumida. O controle otimizado da energia permite a melhor relação entre a tensão fornecida e a energia consumida [12].

Assumindo que o modo de operação do compensador série é o ativo, os três métodos de controle possíveis são [13]:

- Controle otimizado da qualidade de tensão. As tensões do sistema são compensadas para o nível pré-afundamento, sem considerar que pode ser um ponto de operação com elevado nível de injeção de tensão e desperdício de energia.
- Controle otimizado da amplitude de tensão. As tensão fornecidas são controladas de modo a minimizar sua respectiva magnitude.
- Controle otimizado da energia. Visando utilizar de forma eficiente a energia armazenada, parâmetros da corrente de carga são utilizados para minimizar o colapso da energia armazenada.

Todas as estratégias compensam as tensões de carga para os respectivos valores nominais. Assim, as tensões de carga devem permanecer constantes durante a ocorrência de afundamentos e os parâmetros de carga em regime permanente devem permanecer inalterados.

$$U_{carga} = constante, \quad (3.1)$$

$$I_{carga} = constante, P_{carga} = constante, Q_{carga} = constante. \quad (3.2)$$

A diferença entre os três métodos de controle consiste na potência e na tensão fornecida pelo compensador série. A intensidade do afundamento,  $U_{af}$ , e o salto de fase,  $\phi_{af}$ , são fatores que influenciam os métodos. Estes parâmetros estão relacionados por:

$$\overline{U_{af}} = U_{af} \angle(\phi_{af}) \quad (3.3)$$

sendo a condição de carga expressa pela potência aparente e pela corrente de carga, temos:

$$\overline{S_{carga}} = P_{carga} + jQ_{carga}, \quad (3.4)$$

$$\overline{I_{carga}} = I_{carga} \angle(\phi_{carga}) \quad (3.5)$$

A estratégia de controle pode depender do tipo de carga e de suas características com relação a mudanças de fase da tensão. Alguns tipos de cargas são sensíveis a saltos de fase e devem ser protegidas de forma eficiente. Outros tipos de cargas são mais tolerantes a saltos de fase e a função principal é a compensação da amplitude da tensão. Todavia a estratégia de controle deve ser capaz de corrigir os afundamentos, caso contrário pode inserir distúrbios adicionais à carga.

### 3.3.1 Controle otimizado da amplitude da tensão

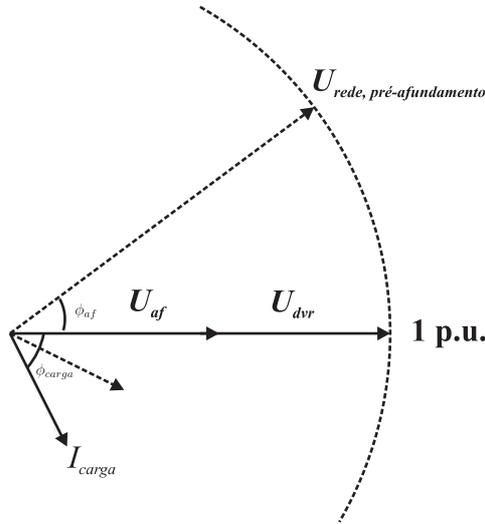
O controle otimizado da amplitude da tensão fornece tensões em fase com a tensão do sistema. O diagrama fasorial está apresentado na Fig.3.2. O cálculo da tensão e da potência pode ser efetuado como:

$$\overline{U_{dvr}} = (1 - U_{af}) \angle(\phi_{af}) \quad (3.6)$$

$$P_{dvr} = \sqrt{3} U_{dvr} I_{carga} \cos(\phi_{carga}) \quad (3.7)$$

$$P_{rede} = \sqrt{3} U_{af} I_{carga} \cos(\phi_{carga}) \quad (3.8)$$

A tensão de fase e a potência fornecida pelo compensador série sob três condições distintas de carga estão apresentadas na Fig.3.3. A tensão de fase fornecida é diretamente proporcional ao nível de afundamento. No entanto, a potência fornecida é depende do fator de potência da carga. Quanto maior o fator de potência da carga, maior será a potência fornecida pelo compensador série para restaurar a tensão de carga para o valor nominal. Assim, para cargas puramente resistivas esta estratégia consome rapidamente a energia armazenada no barramento c.c.



**Figura 3.2** Controle otimizado da amplitude da tensão.

### 3.3.2 Controle otimizado da qualidade de tensão

Nesta estratégia, as tensões de carga são compensadas para a amplitude e a fase pré-afundamento. A tensão e a potência fornecidas pelo compensador série são diretamente modificadas pelo salto de fase. O diagrama fasorial está apresentado na Fig.3.4. O cálculo da tensão e potência pode ser efetuado como:

$$\overline{U_{dvr}} = 1 - U_{af} \angle(\phi_{af}), \quad (3.9)$$

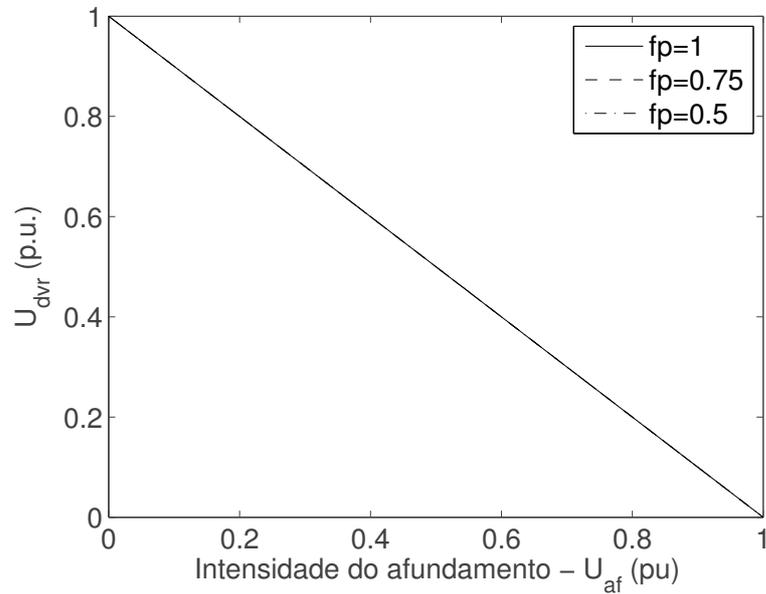
$$U_{dvr} = \sqrt{[1 - U_{af} \cos(\phi_{af})]^2 + [U_{af} \sin(\phi_{af})]^2}, \quad (3.10)$$

$$\theta_{dvr} = \tan^{-1} \frac{-U_{af} \sin(\phi_{af})}{1 - U_{af} \cos(\phi_{af})} \quad (3.11)$$

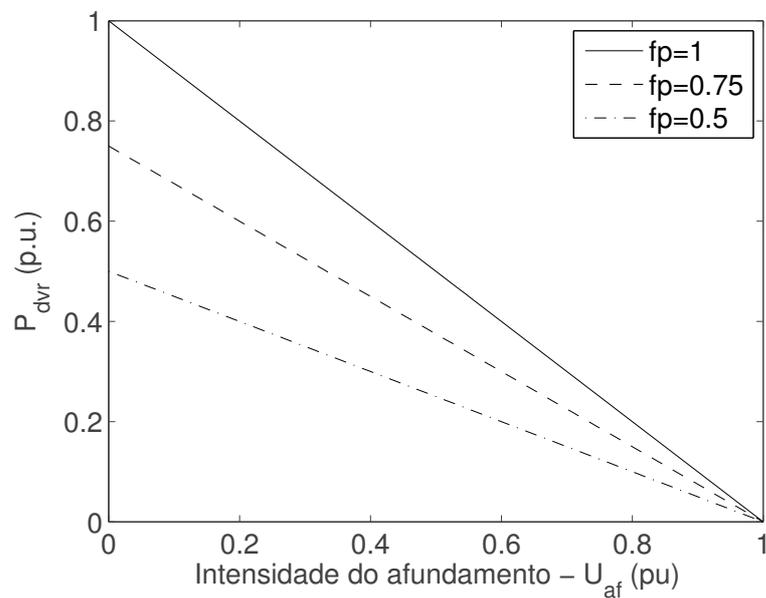
$$P_{dvr} = \sqrt{3} U_{dvr} I_{carga} \cos(\phi_{carga} + \theta_{dvr}) \quad (3.12)$$

A tensão de fase e a potência fornecida pelo compensador série sob três condições distintas de carga estão apresentadas na Fig.3.5. A tensão fornecida pelo compensador série não é função do fator de potência. No entanto, o valor da potência fornecida é função do fator de potência.

Um salto de fase aumenta significativamente a tensão a ser fornecida pelo compensador série. A Fig.3.6 mostra a tensão e potência fornecida pelo compensador a uma carga com fator de potência unitário sob três condições distintas de salto de fase. A necessidade de fornecimento de tensão do compensador série aumenta em função do salto de fase. Este fato limita a

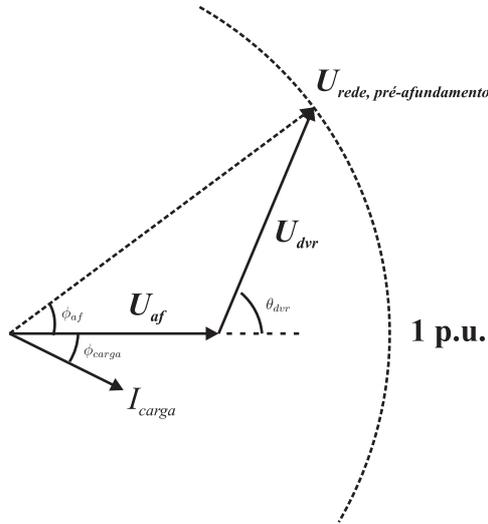


(a)



(b)

**Figura 3.3** Controle otimizado da amplitude da tensão. (a) Tensão de fase fornecida; (b) Potência fornecida.



**Figura 3.4** Controle otimizado da qualidade da tensão.

utilização desta estratégia, pois geralmente os compensadores são projetados de forma a minimizar o fornecimento de tensão, com uma tensão de barramento c.c. menor que a tensão nominal do sistema elétrico.

### 3.3.3 Controle otimizado da energia

O controle otimizado da energia é realizado em função das características da carga, mais especificamente do fator de potência. Os parâmetros utilizados podem ser extraídos da corrente de carga. O diagrama fasorial está apresentado na Fig.3.7. As potências da rede e carga podem ser calculadas respectivamente por:

$$P_{carga} = \sqrt{3} U_{carga} I_{carga} \cos(\phi_{carga}) \quad (3.13)$$

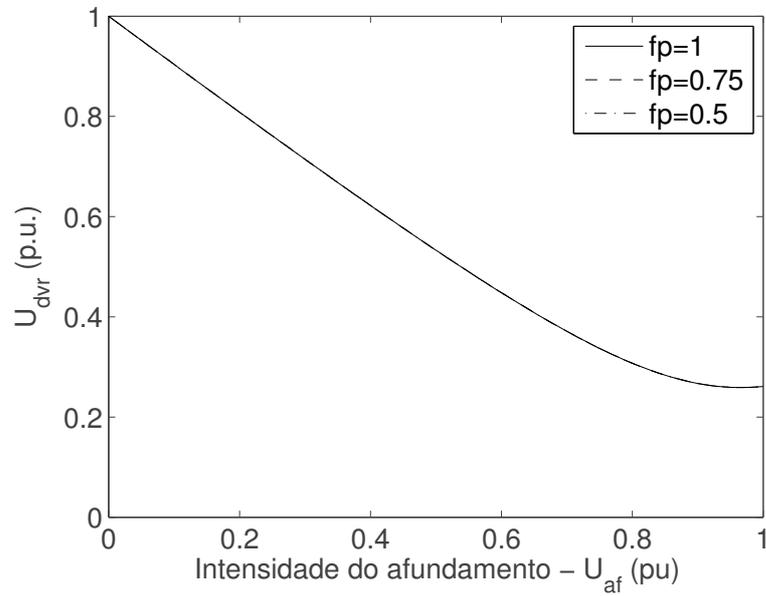
$$P_{rede} = \sqrt{3} U_{rede} I_{carga} \cos(\phi_{carga} - \theta_{dvr}) \quad (3.14)$$

. Assim, a potência fornecida pelo compensador série é:

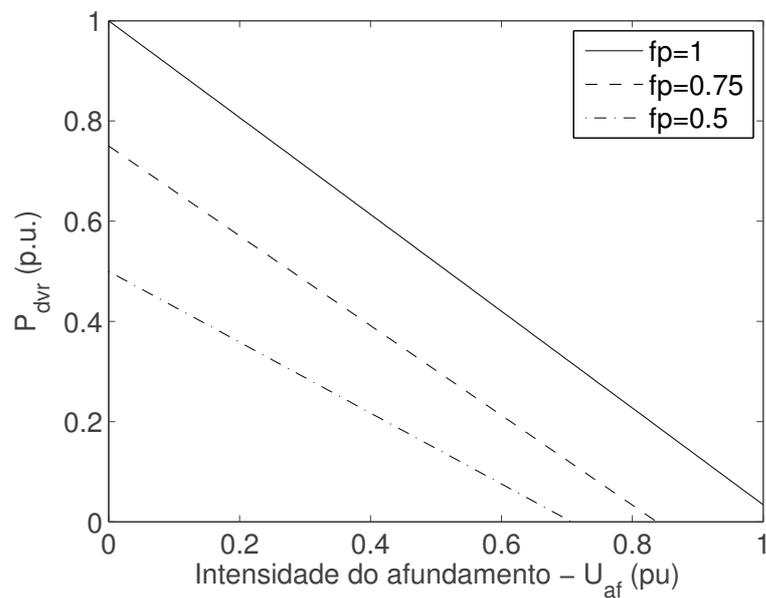
$$P_{dvr} = P_{carga} - P_{rede} \quad (3.15)$$

$$P_{dvr} = U_{carga} I_{carga} \left[ \cos(\phi_{carga}) - \frac{U_{rede}}{U_{carga}} \cos(\phi_{carga} - \theta_{dvr}) \right] \quad (3.16)$$

Considerando a tensão e a potência aparente da carga como grandezas de base, a potência

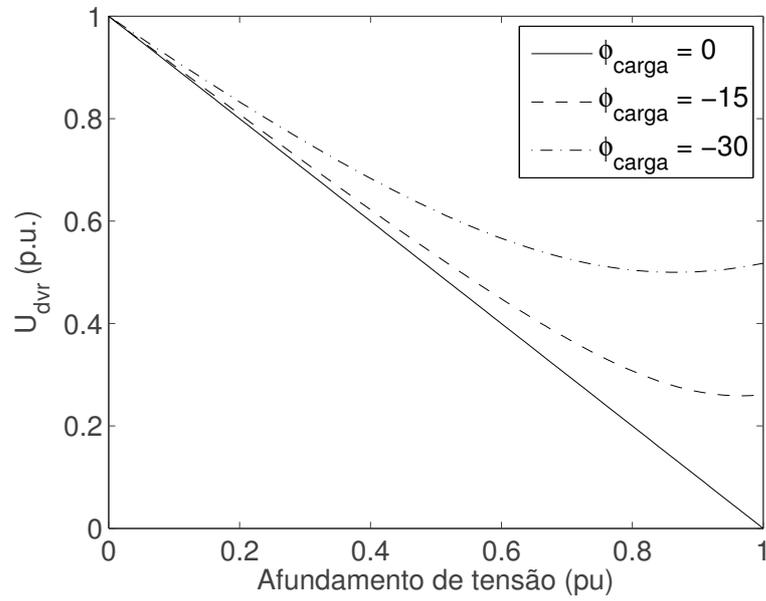


(a)

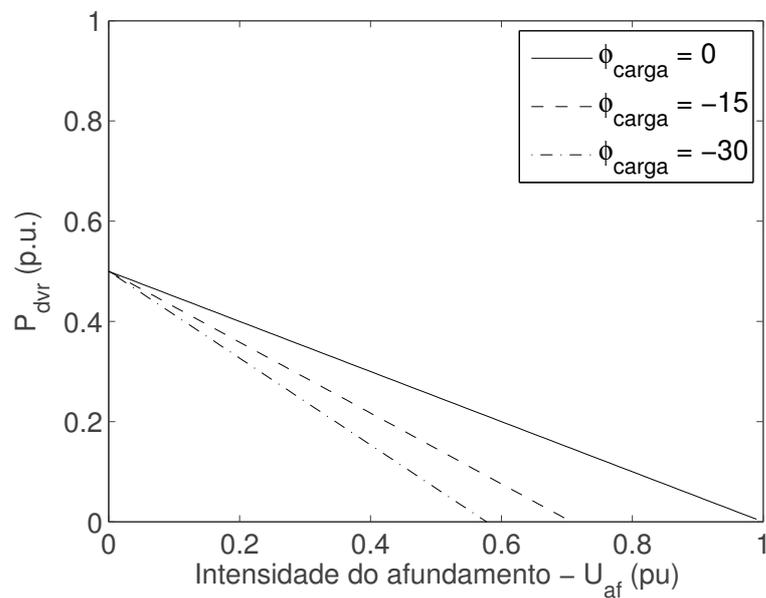


(b)

**Figura 3.5** Controle otimizado da qualidade da tensão. (a) Tensão de fase fornecida; (b) Potência fornecida.



(a)



(b)

**Figura 3.6** Controle otimizado da qualidade da tensão. (a) Tensão de fase fornecida; (b) Potência fornecida.

fornecida em p.u. é:

$$P_{dvr} = fp_{carga} - U_{rede} \cos(\phi_{carga} - \theta_{dvr}) \quad (3.17)$$

sendo  $fp_{carga} = \cos(\phi_{carga})$  o fator de potência da carga. A potência mínima é fornecida quando:

$$\cos(\phi_{carga} - \theta_{dvr}) = 1, \quad (3.18)$$

ou seja, quando  $(\phi_{carga} - \theta_{dvr}) = 0$  e  $\overline{U_{rede}}$  e  $\overline{I_{carga}}$  estão em fase.

O compensador série deve manter a tensão na carga em 1 p.u. Neste caso, a amplitude da tensão da rede pode ser escrita, em p.u., como:

$$U_{rede} = 1 - U_d \quad (3.19)$$

sendo  $U_d$  o nível de tensão do afundamento. Utilizando as equações (3.17), (3.18) e (3.19), a potência mínima fornecida pelo compensador série pode ser escrita como:

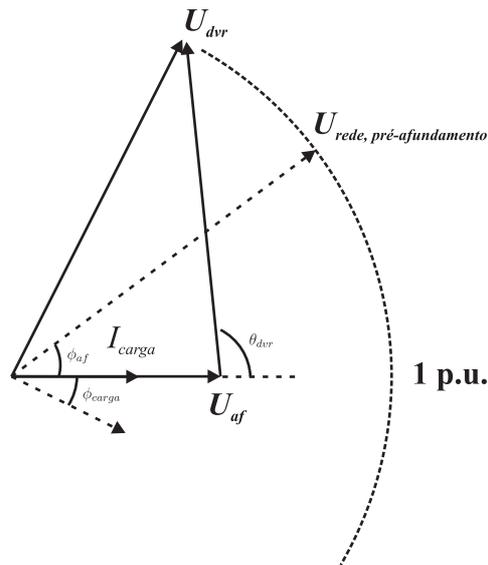
$$P_{dvr}^{min} = U_d - (1 - fp_{carga}) \quad (3.20)$$

Quando  $U_d < (1 - fp_{carga})$ ,  $P_{dvr}^{min}$  é negativa e a potência flui do sistema para o compensador série de forma a aumentar a tensão no barramento c.c. Esta condição pode não ser suportada pelo compensador série, devido a estratégia de controle da tensão do barramento c.c. e topologia. Assim, para tornar o fluxo de potência da rede para o compensador série nulo, ajusta-se o valor de  $\theta_{dvr}$  para:

$$\theta_{dvr} = \phi_{carga} - \cos^{-1} \left( \frac{fp_{carga}}{1 - U_d} \right) \quad (3.21)$$

A tensão e a potência fornecida pelo compensador série operando com o controle otimizado da energia estão apresentadas na Fig.3.8. A potência fornecida diminui em função da diminuição do fator de potência. Todavia, a tensão fornecida aumenta com a diminuição do fator de potência. Assim, este método é indicado para cargas com baixo fator de potência e que são insensíveis a deslocamentos de fase [12].

A tensão de fase e a potência fornecida pelo compensador série para as três estratégias de controle sob uma mesma condição do sistema estão apresentadas na Fig.3.9. A carga tem um fator de potência igual a 0,50 e a tensão de fase sofreu um salto de fase de  $-15^\circ$ . A comparação entre as estratégias mostra que o controle da amplitude (fornecimento de tensão em fase) consome energia do barramento c.c. sob qualquer nível de afundamento. As estratégias de controle da qualidade da tensão e da energia permitem a compensação da tensão de carga sem demandar



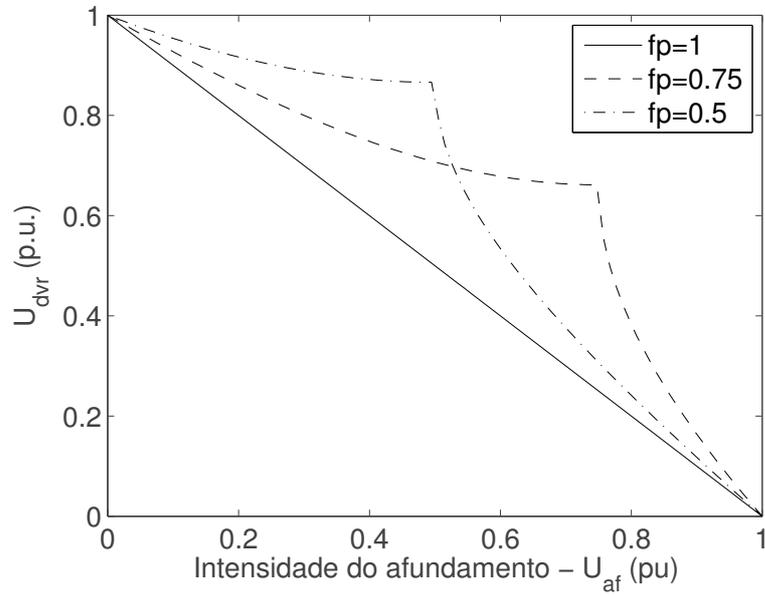
**Figura 3.7** Controle otimizado da energia.

energia do barramento c.c. em um intervalo que é função do fator de potência da carga. É importante notar que a estratégia do controle otimizado da energia opera com menor consumo de energia, mas não compensa o ângulo de fase da tensão de fase para o estado pré-afundamento. A tensão no barramento c.c. quando operando com a estratégia de controle otimizado da energia é a maior quando comparada com a exigida pelas outras estratégias. Assim, deve-se avaliar as perdas no conversor em função da tensão utilizada pelo barramento c.c.

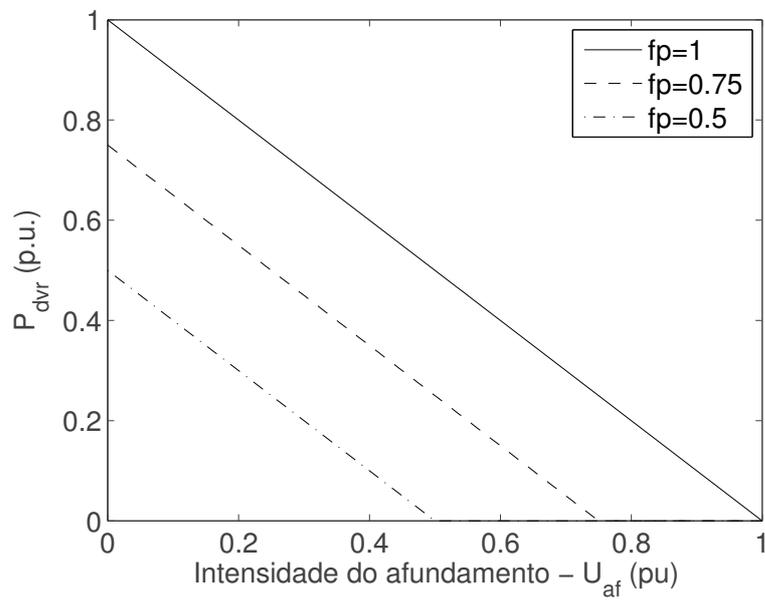
### 3.4 Tipos de controladores

Os dois principais tipos de controladores aplicados ao compensador série são o de malha aberta e o de malha fechada [14]. O controle em malha fechada apresenta o melhor desempenho, pois variações na carga modificam o modelo do sistema de controle e exigem um projeto mais complexo do controlador em malha aberta.

O controle multivariável é utilizado com um laço interno para o controle da corrente nos capacitores do filtro e um laço externo para o controle da tensão. Neste trabalho será utilizado um sistema de controle do tipo multivariável e seu desempenho será avaliado posteriormente.

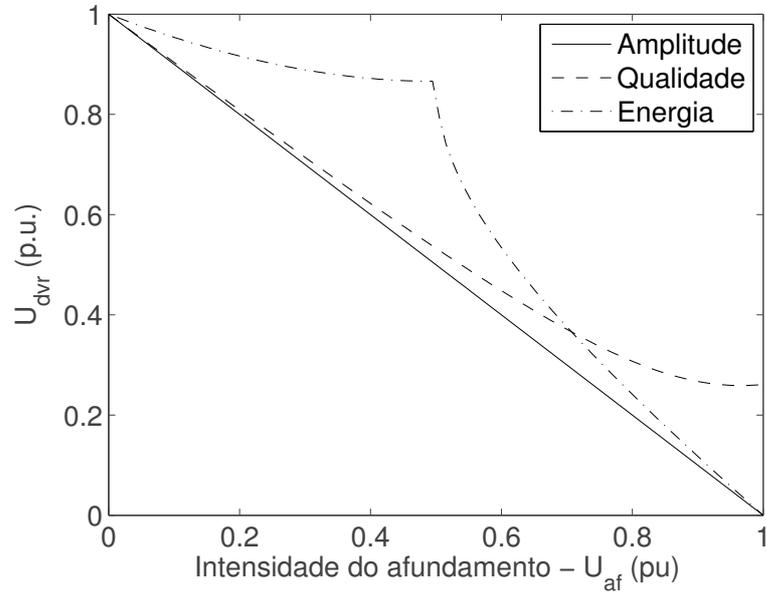


(a)

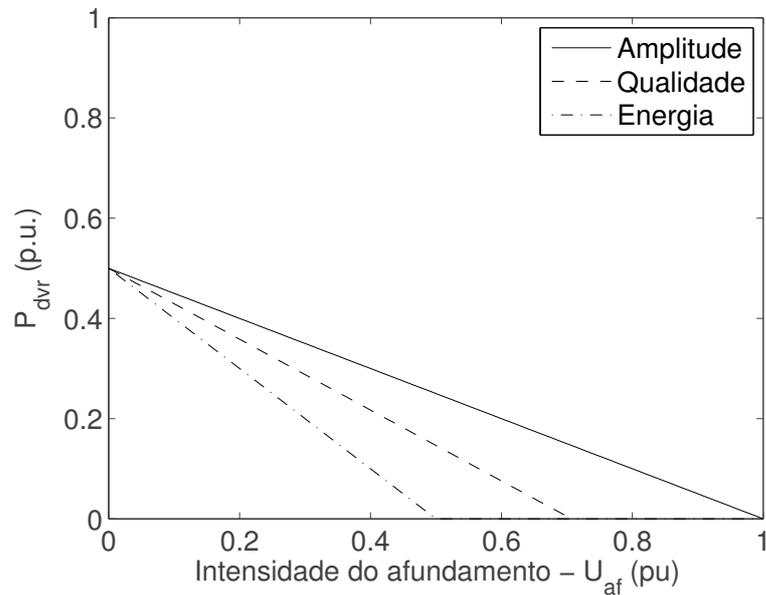


(b)

**Figura 3.8** Controle otimizado da energia. (a) Tensões de fase fornecidas; (b) Potência fornecida.



(a)

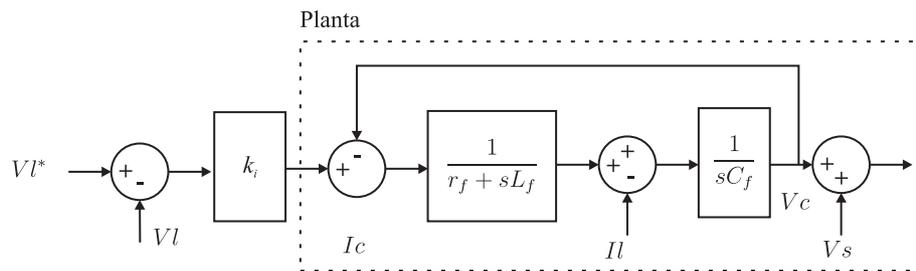


(b)

**Figura 3.9** Comparação entre as estratégias de controle. (a) Tensão de fase fornecida; (b) Potência fornecida.

### 3.4.1 Sistemas de controle em malha aberta

O princípio de operação do sistema de controle em malha aberta aplicado ao compensador série é apresentado na Fig. 3.10. As tensões de rede são comparadas com as de referência para a determinação da tensão necessária para restaurar o afundamento. No controle em malha aberta, o parâmetro de referência é a tensão desejada na carga,  $V_l^*$ . O ganho  $K_i$  é assumido para o inversor de tensão.



**Figura 3.10** Controle em malha aberta aplicado ao compensador série.

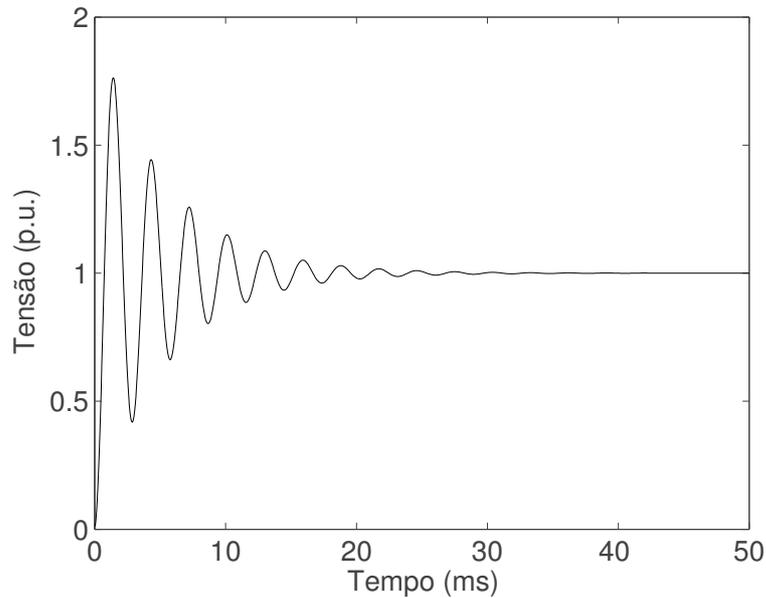
Em [15] são apresentados dois sistemas de controle: um em malha aberta e outro em malha fechada. A comparação entre os sistemas utiliza o fator de amortecimento como parâmetro. No sistema de controle em malha aberta, o fator de amortecimento é inadequado e provoca oscilações na tensão de carga, principalmente em sistemas com fator de potência menor que a unidade. O fator de amortecimento é representado por

$$\zeta = \frac{r_f}{2L_f\omega} \quad (3.22)$$

sendo  $r_f$  a resistência do filtro,  $L_f$  a indutância do filtro e  $\omega$  a frequência de oscilação [15].

A equação (3.22) mostra que o fator de amortecimento aumenta em função da resistência do filtro. No entanto o aumento da resistência do filtro aumenta as perdas. A Fig.3.11 mostra a tensão de carga  $V_l$  quando o sistema é submetido a um degrau de tensão  $V_s$ , sendo o valor final igual a tensão nominal da carga. O sistema atinge o regime permanente com oscilação e sobre-sinal. O tempo para atingir o regime permanente é maior que meio ciclo da tensão de fase. Também as oscilações degradam a forma de onda das tensões restauradas. Estes fatores limitam o uso do controle em malha aberta para a função de restauração de tensão, pois a resposta do compensador série deve acontecer em menos de meio ciclo e não deve adicionar distorções a forma de onda da tensão de carga.

É importante notar, que o fator de amortecimento apresentado é característica desta configuração do compensador série. Outra configuração pode apresentar fator de amortecimento



**Figura 3.11** Controle em malha aberta. Tensão na carga  $V_l$  com a entrada  $V_i$  em degrau.

diferente. Assim, a limitação observada pode não existir em outras configurações.

### 3.4.2 Sistemas de controle em malha fechada

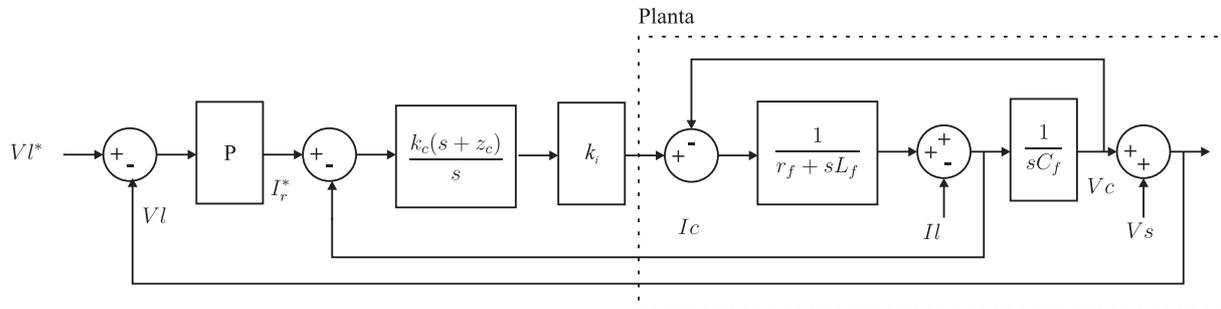
A utilização de uma malha de realimentação simples para o controle da tensão do compensador série é inadequada, devido à pequena margem de estabilidade do sistema [15]. Outra abordagem é a realimentação com um laço de corrente na malha interna e um laço de tensão na malha externa. O laço interno controla a corrente do capacitor do filtro ( $i_c = C_f dv_c/dt$ ), sendo a tensão do filtro função desta corrente. O fator de amortecimento é representado por

$$\zeta = \frac{r_f + k_c}{2L_f\omega} \quad (3.23)$$

sendo  $r_f$  a resistência do filtro,  $L_f$  a indutância do filtro,  $\omega$  a frequência de oscilação e  $k_c$  o ganho proporcional do controlador da malha interna. Geralmente este ganho é ajustado para garantir uma resposta dinâmica rápida, muito maior que o da malha externa. O valor do fator de amortecimento é uma constante suficientemente grande. No entanto, o ajuste da frequência de corte do controlador da malha interna modifica o valor do fator de amortecimento.

O laço interno de corrente, forma em conjunto com o laço externo de tensão, o esquema de controle do compensador série, apresentado na Fig. 3.12. A tensão de carga  $V_l$  é comparada à

tensão de referência  $V_l^*$  e o valor do erro é aplicado ao controlador P. A diferença entre a corrente do capacitor  $I_c$  e a saída do controlador P é utilizada pelo controlador PI para determinar a tensão a ser fornecida. O ganho  $K_i$  é assumido para o inversor de tensão.



**Figura 3.12** Controle em malha fechada aplicado ao compensador série.

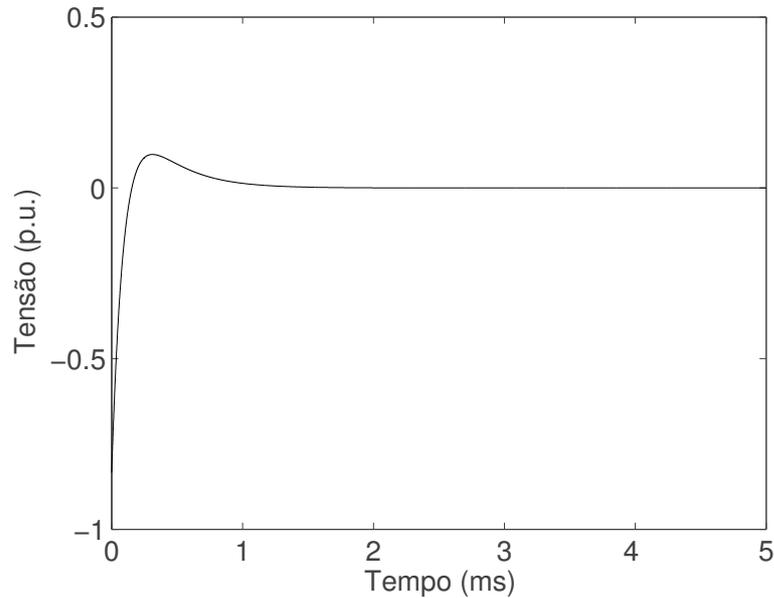
O valor da capacitância do filtro é geralmente estável em função do tempo, da temperatura e dos parâmetros da carga. Além deste fato, a corrente do capacitor é a diferença entre a corrente de carga e do filtro, permitindo a mudança instantânea da tensão do capacitor na ocorrência de variação na corrente de carga.

Através do ganho proporcional  $k_c$ , o controlador PI atua para aumentar o fator de amortecimento do filtro LC. O ganho integral  $k_c z_c$  permite rejeitar as correntes de perturbação da carga acima da frequência de corte. Para um ajuste adequado, a banda de passagem do laço interno deve ser de  $1/5$  a  $1/8$  da frequência de chaveamento do conversor de potência, de modo a manter as margens de fase e de ganho adequados. A banda de passagem do laço externo deve ser ajustada de  $1/5$  a  $1/8$  da banda de passagem da malha interna.

É possível estabelecer um controle em malha fechada com a utilização da tensão do capacitor ao invés da tensão de carga [16]. No entanto, o valor de referência para o controlador PI não é mais constante, pois a tensão  $V_c^*$  pode variar entre 10% e 90% da amplitude da tensão nominal.

Outra característica que deve ser considerada é a rejeição do sistema de controle à corrente de carga  $I_l$ . A tensão de carga  $V_l$  deve ser controlada rejeitando as variações na corrente de carga, pois esta pode modificar seus parâmetros em função do tempo. A Fig.3.13 mostra a tensão de carga  $V_l$  quando o sistema é submetido a um degrau de corrente  $I_l$  e as demais entradas do sistema são nulas. Observa-se que a tensão de carga é nula em regime permanente, ou seja, o sistema rejeita variações de corrente da carga  $I_l$ .

A tensão  $V_s$  pode modificar a resposta do sistema de controle, pois este parâmetro compõe a tensão de carga  $V_l$  da malha externa de controle. A Fig.3.14 mostra a tensão de carga  $V_l$  quando

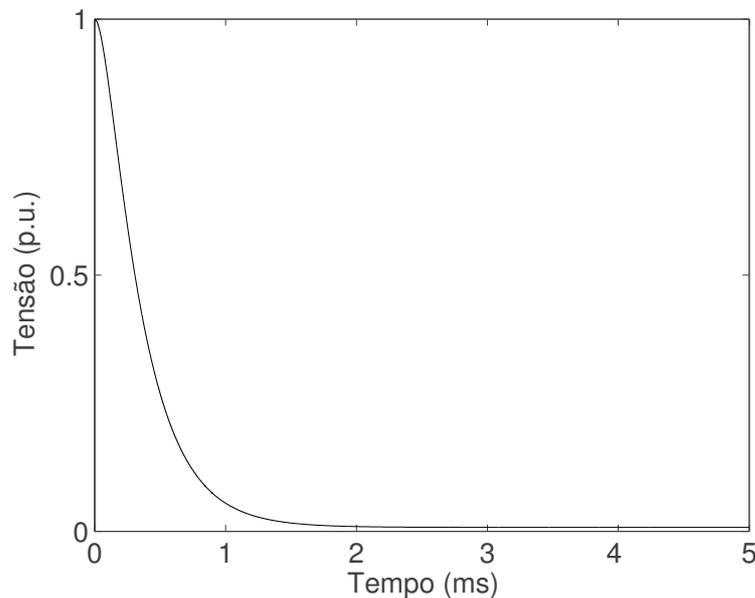


**Figura 3.13** Controle em malha fechada. Tensão na carga  $V_l$  com a entrada  $I_l$  em degrau.

o sistema é submetido a um degrau de tensão  $V_s$ , sendo o valor final igual a tensão nominal da carga e as demais entradas do sistema nulas. Observa-se que a tensão de carga é nula em regime permanente, ou seja, o sistema rejeita variações da tensão  $V_s$ .

O sistema de controle em malha fechada compensa a tensão na carga  $V_l$ , rejeitando distúrbios nos parâmetros de corrente de carga  $I_l$  e tensão  $V_s$ . A Fig.3.15 mostra a tensão de carga  $V_l$  quando o sistema é submetido a um degrau de tensão  $V_i$ , sendo o valor final igual a tensão nominal da carga. Observa-se que o sistema segue a referência de entrada e em regime permanente a tensão de carga  $V_l$  é igual a tensão  $V_i$ .

A resposta ao degrau do sistema em malha fechada é mais rápida quando comparada com a resposta do sistema em malha aberta. O valor de regime permanente é atingido sem overshoot ou oscilação, como observado no sistema de controle em malha aberta. Os distúrbios de corrente de carga  $I_l$  e tensão  $V_s$  são rejeitados em regime permanente. Assim, o sistema em malha fechada apresenta um desempenho superior ao sistema em malha aberta para esta configuração do compensador série.



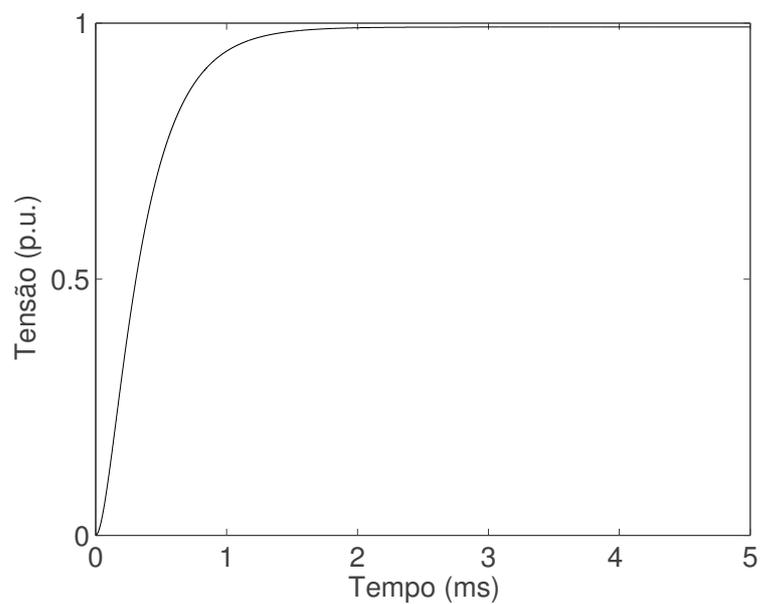
**Figura 3.14** Controle em malha fechada. Tensão na carga  $V_l$  com a entrada  $V_s$  em degrau.

### 3.5 Conclusão

O projeto do sistema de controle deve contemplar parâmetros que tornem o filtro ativo série eficaz em relação ao objetivo de controle. A escolha destes parâmetros é baseada no conhecimento prévio do comportamento do sistema elétrico sob análise dos tipos e intensidades dos distúrbios presentes. Também outros parâmetros devem ser adicionados como o tipo de carga a ser protegida, a potência e a tensão da fonte disponível.

Dentre as estratégias apresentadas para a restauração de tensão, o controle otimizado da qualidade da tensão pode ser utilizado em afundamentos menos severos, enquanto o controle otimizado da amplitude em afundamentos mais severos e com saltos de fase. O controle otimizado da energia requer um nível de tensão maior quando comparado as outras estratégias, mas requer menos energia da fonte disponível. A aplicação deste é indicada para cargas com baixo fator de potência e para afundamentos sem salto de fase.

Quanto ao tipo de controle, a implementação do sistema em malha aberta em um processador digital é simplificada, devido a menor número de operações e variáveis de entrada. Esta implementação pode fornecer bons resultados mas não elimina as influências de perturbações e não compensa queda de tensão nos transformadores. Também pode apresentar baixa sensibilidade em relação ao tipo de carga. Assim, o controle em malha fechada deve ser implementado



**Figura 3.15** Controle em malha fechada. Tensão na carga  $V_l$  com a entrada  $V_i$  em degrau.

para mitigar essas deficiências, pois pode promover a obtenção de uma resposta rápida e correta quando comparado ao controle em malha aberta.

# Algoritmo para detecção instantânea do ângulo de fase

O ângulo de fase é um parâmetro crítico para a operação do compensador série. Este parâmetro é utilizado para sincronizar as variáveis de controle do dispositivo para a correção das variações de tensão. Entretanto, a existência de distúrbios da qualidade de energia degradam a detecção do ângulo de fase.

Afundamentos de tensão, harmônicos, saltos de fase e *notches* são condições comuns no sistema elétrico. Assim, um método de detecção aplicado ao compensador série sob estas condições deve estimar o ângulo de fase com baixa distorção e no menor tempo possível.

Atualmente os métodos de detecção de fase aplicados ao compensador série apresentam um fraco desempenho na presença de harmônicos de baixa ordem [17][6][18][5][8][1]. No entanto, os trabalhos apresentados em [7], [5], [8] e [1] descrevem métodos com melhor desempenho na filtragem da componente harmônica de segunda ordem presente durante afundamentos de tensão desequilibrados.

Este capítulo apresenta um algoritmo para estimação do ângulo de fase baseado em componentes de sequência. O método dos mínimos quadrados recursivo ponderado é utilizado para estimar os componentes de sequência. A operação do algoritmo é avaliada sob condições comuns do sistema elétrico. Resultados de simulação são apresentados.

## 4.1 Estado atual de desenvolvimento

Entre os trabalhos apresentados na literatura para detecção de fase aplicados ao compensador série o método mais simples para obter o valor do parâmetro fase é detectar o cruzamento por zero das tensões do sistema [19]. Entretanto, os pontos de passagem por zero são detectados apenas a cada meio ciclo das tensões do sistema e, conseqüentemente, o desempenho dinâmico do método é baixo. Também na presença de distúrbios o desempenho é degradado.

O ângulo de fase do sistema pode ser obtido através da filtragem das tensões de fase. Dependendo do referencial adotado, duas estruturas podem ser obtidas: filtragem no referencial

estacionário e filtragem no referencial síncrono.

Em [20] os diferentes tipos de filtros são avaliados no referencial estacionário. Os resultados são apresentados para o regime permanente sem distorções na forma de onda. No entanto, o uso de filtros introduz atrasos que não são permitidos na detecção do ângulo de fase.

Um controlador de dupla sequência sintonizado na frequência de operação do sistema é apresentado em [18] como uma alternativa para substituição do filtro passa-faixa apresentado em [21] e [22]. Entretanto o controlador não elimina os harmônicos de baixa ordem e não elimina o atraso para a detecção do ângulo de fase.

A filtragem no referencial síncrono é mais vantajosa pois apresenta variáveis de controle com valores constantes, permitindo o uso de controladores simples e a aplicação de mais técnicas de filtragem em comparação com as que foram aplicadas no referencial estacionário [23]. Estas técnicas são apontadas como o estado da arte.

As estruturas para detecção de fase em malha fechada implementadas no referencial síncrono aplicadas ao compensador série são apresentadas em [5][17][24]. Estes métodos realizam uma transformação de coordenadas para o referencial síncrono e a detecção de fase é realizada ajustando a componente do eixo  $q$  para zero.

O PLL consiste em um detector do ângulo de fase e um controlador PI. O ângulo de fase é obtido após a integração do sinal de saída do filtro. No entanto, o desempenho do PLL é determinado pela banda de passagem do controlador PI e, portanto, o ajuste é um compromisso entre o desempenho da filtragem e o atraso na determinação do ângulo de fase. É importante observar que o ajuste dos parâmetros do controlador modifica a resposta dinâmica do PLL.

Durante afundamentos de tensão desequilibrados, a componente de sequência negativa contém uma componente harmônica de segunda ordem que é propagada da transformação para o filtro e degrada a detecção do ângulo de fase. Todavia, em outros trabalhos como o apresentado em [8], apenas a componente de sequência positiva é utilizada para detecção do ângulo de fase, eliminando a propagação da componente harmônica de segunda ordem.

As estruturas para detecção de fase em malha fechada apresentadas são avaliadas nos respectivos trabalhos na presença de distúrbios de rede. Todavia, quando submetidas à forma de onda com harmônicos de baixa ordem apresentam distorção no ângulo de fase. A severidade da distorção depende da magnitude das componentes harmônicas. Também a aplicação destas estruturas ao compensador série está limitada pela resposta dinâmica do filtro, pois a diminuição da banda de passagem para filtrar harmônicos de baixa ordem aumenta o atraso na determinação do ângulo de fase.

Uma alternativa para mitigar este problema é apresentada em [7]. Um algoritmo para estimar componentes de sequência a partir das tensões do sistema. Este algoritmo é uma variação

do método dos mínimos quadrados ponderado. A vantagem do algoritmo está no bom desempenho quando submetido a sinais ruidosos.

Uma variação do algoritmo anterior é apresentada em [1] e utiliza uma versão recursiva do método dos mínimos quadrados recursivo ponderado, sendo a matriz de covariância e ganho comum para a estimação das componentes de sequência positiva e negativa. Também é estimado o valor da componente c.c. das tensões do sistema a cada iteração.

Durante transitórios nas tensões do sistema os valores estimados para as componentes de sequência não correspondem aos valores esperados. Todavia, o ângulo de fase é estimado com erro nulo em meio ciclo da tensão do sistema, a partir das componentes de sequência. O algoritmo é avaliado sob condições de afundamento de tensão desequilibrados, ruído, saltos de fase e nível c.c.. Entretanto, na presença de distorções na forma de onda o ângulo de fase estimado é degradado e a severidade depende da magnitude das componentes harmônicas.

## 4.2 Método proposto

O algoritmo proposto é baseado em componentes de sequência. A estimação dos componentes de sequência utiliza o método dos mínimos quadrados recursivo ponderado similar ao apresentado em [1].

O método proposto apresenta um desempenho melhorado com relação ao apresentado em [1]. A modelagem do sistema e a operação do método sob condições comuns no sistema elétrico são apresentados a seguir.

### 4.2.1 Modelagem do sistema

O sistema elétrico de potência pode ser representado por uma componente fundamental e componentes harmônicas de ordem ímpar:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{a_1} \\ v_{b_1} \\ v_{c_1} \end{bmatrix} + \sum_{k=3,5,7,\dots} \begin{bmatrix} v_{a_k} \\ v_{b_k} \\ v_{c_k} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

sendo  $v_x$  a tensão de fase,  $v_{x_1}$  a componente fundamental,  $v_{x_k}$  a  $k$ -ésima componente harmônica e  $x = a, b, c$ .

A igualdade (4.1) pode ser reescrita em função das componentes de sequência zero, positiva e negativa utilizando a matriz de Fortescue e convertida para o referencial estacionário

utilizando a transformação  $(0\alpha\beta)$  [25]. O vetor  $(v_\alpha + jv_\beta)$  pode ser representado por:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha_1} \\ v_{\beta_1} \end{bmatrix} + \sum_{k=3,5,7,\dots} \begin{bmatrix} v_{\alpha_k} \\ v_{\beta_k} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

onde as componentes positivas e negativas da fundamental e harmônicas são:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha_1} \\ v_{\beta_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t + \phi_{p_1}) & \cos(\omega_1 t + \phi_{n_1}) \\ \cos(\omega_1 t + \phi_{p_1}) & -\cos(\omega_1 t + \phi_{n_1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{p_1} \\ v_{n_1} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha_k} \\ v_{\beta_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_k t + \phi_{p_k}) & \cos(\omega_k t + \phi_{n_k}) \\ \cos(\omega_k t + \phi_{p_k}) & \cos(\omega_k t + \phi_{n_k}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{p_k} \\ v_{n_k} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

sendo  $\omega_1$  a frequência angular da fundamental,  $\omega_k$  a frequência angular da k-ésima harmônica,  $\phi_{x_1}$  a fase inicial da fundamental,  $\phi_{x_k}$  a fase inicial da k-ésima harmônica,  $v_{x_1}$  a componente fundamental,  $v_{x_k}$  a k-ésima componente harmônica e  $x = 0, p, n$ .

Expandindo a igualdade (4.3) em senos e cossenos, tem-se:

$$v_{\alpha_1} = (v_{p\alpha_1} + v_{n\alpha_1}) \cos(\omega_1 t) - (v_{p\beta_1} + v_{n\beta_1}) \sin(\omega_1 t) \quad (4.5)$$

$$v_{\beta_1} = (v_{p\beta_1} - v_{n\beta_1}) \cos(\omega_1 t) + (v_{p\alpha_1} - v_{n\alpha_1}) \sin(\omega_1 t) \quad (4.6)$$

sendo  $v_{p\alpha_1} = v_{p_1} \cos(\phi_{p_1})$ ,  $v_{n\alpha_1} = v_{n_1} \cos(\phi_{n_1})$ ,  $v_{p\beta_1} = v_{p_1} \sin(\phi_{p_1})$  e  $v_{n\beta_1} = v_{n_1} \sin(\phi_{n_1})$ . Aplicando o mesmo procedimento para a igualdade (4.4), tem-se:

$$v_{\alpha_k} = (v_{p\alpha_k} + v_{n\alpha_k}) \cos(\omega_k t) + (v_{p\beta_k} + v_{n\beta_k}) \sin(\omega_k t) \quad (4.7)$$

$$v_{\beta_k} = (v_{p\beta_k} + v_{n\beta_k}) \cos(\omega_k t) + (v_{p\alpha_k} + v_{n\alpha_k}) \sin(\omega_k t) \quad (4.8)$$

sendo  $v_{p\alpha_k} = v_{p_k} \cos(\phi_{p_k})$ ,  $v_{n\alpha_k} = v_{n_k} \cos(\phi_{n_k})$ ,  $v_{p\beta_k} = v_{p_k} \sin(\phi_{p_k})$  e  $v_{n\beta_k} = v_{n_k} \sin(\phi_{n_k})$ .

Substituindo as equações (4.5) a (4.8) na igualdade (4.2), tem-se:

$$v_\alpha = X_0 + X_1 \cos(\omega_1 t) + X_2 \sin(\omega_1 t) + \sum_{k=3,5,7,\dots} (X_k \cos(\omega_k t) + X_{k+1} \sin(\omega_k t)) \quad (4.9)$$

$$v_\beta = Y_0 + Y_1 \cos(\omega_1 t) + Y_2 \sin(\omega_1 t) + \sum_{k=3,5,7,\dots} (Y_k \cos(\omega_k t) + Y_{k+1} \sin(\omega_k t)) \quad (4.10)$$

sendo  $X_0$  e  $Y_0$  termos constantes,  $X_1 = (v_{p\alpha_1} + v_{n\alpha_1})$ ,  $X_2 = -(v_{p\beta_1} + v_{n\beta_1})$ ,  $Y_1 = (v_{p\beta_1} - v_{n\beta_1})$ ,  $Y_2 = (v_{p\alpha_1} - v_{n\alpha_1})$ .

Assumindo que  $v_\alpha$  e  $v_\beta$  são amostradas a uma taxa fixa e adequada, as equações (4.9) e (4.10) podem ser escritas na forma matricial como segue:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(0) \\ v_\alpha(2T_s) \\ \vdots \\ v_\alpha(\eta T_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & \dots & \cos(\theta_k) & \sin(\theta_k) \\ 1 & \cos(2\theta_1) & \sin(2\theta_1) & \dots & \cos(2\theta_k) & \sin(2\theta_k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\eta\theta_1) & \sin(\eta\theta_1) & \dots & \cos(\eta\theta_k) & \sin(\eta\theta_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ \vdots \\ X_k \\ X_{k+1} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\begin{bmatrix} v_\beta(0) \\ v_\beta(2T_s) \\ \vdots \\ v_\beta(\eta T_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & \dots & \cos(\theta_k) & \sin(\theta_k) \\ 1 & \cos(2\theta_1) & \sin(2\theta_1) & \dots & \cos(2\theta_k) & \sin(2\theta_k) \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(\eta\theta_1) & \sin(\eta\theta_1) & \dots & \cos(\eta\theta_k) & \sin(\eta\theta_k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ \vdots \\ Y_k \\ Y_{k+1} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

sendo  $T_s$  o período de amostragem,  $t = 0, T_s, 2T_s, \dots, \eta T_s$ ,  $\theta_1 = \omega_1 T_s$  e  $\theta_k = \omega_k T_s$ . As igualdades (4.11) e (4.12) podem ser escritas na forma compacta:

$$v_\alpha = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X} \quad (4.13)$$

$$v_\beta = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Y} \quad (4.14)$$

A determinação de  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$  nas igualdades (4.14) e (4.13) pode ser realizada através do método dos mínimos quadrados recursivo [26].

#### 4.2.2 Algoritmo proposto

A falta de conhecimento sobre o estado inicial do sistema quando da execução do método dos mínimos quadrados exige que os parâmetros do método sejam inicializados. Uma possibilidade é atribuir para  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$  o valor zero. Desta forma, a matriz de covariância deve ser ajustada para um múltiplo de uma matriz identidade,  $\mathbf{P} = N \mathbf{I}$ . A constante  $N$  é um número positivo grande o suficiente, geralmente maior que 100. Este valor permite um grau elevado de correção para as estimativas iniciais, garantindo que o valor estimado atinja o regime permanente em poucas iterações.

O algoritmo para a estimação por Mínimos Quadrados Recursivo Ponderado está descrito a seguir.

1. Definir inicialmente  $\mathbf{X} = \mathbf{0}$  e  $\mathbf{Y} = \mathbf{0}$ ; a matriz de covariância  $\mathbf{P} = N \mathbf{I}$ , sendo  $\mathbf{I}$  uma matriz

identidade e  $N$  um número grande o suficiente. É razoável escolher  $N = 100$ .

2. Fazer  $j$  variar de 1 até  $\eta$ :

(a) Escrever o vetor de regressores:

$$\boldsymbol{\varphi} = [1 \cos(\theta_{1_j}) \sin(\theta_{1_j}) \cdots \cos(\theta_{k_j}) \sin(\theta_{k_j})];$$

(b) Calcular o escalar:

$$r = 1 + \boldsymbol{\varphi} \mathbf{P} \boldsymbol{\varphi}';$$

(c) Calcular a matriz de ganho:

$$\mathbf{L} = \frac{1}{r} \mathbf{P} \boldsymbol{\varphi}';$$

(d) Atualizar a matriz de covariância:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\lambda} \{\mathbf{P} - \mathbf{L} \boldsymbol{\varphi} \mathbf{P}\};$$

(e) Calcular  $\mathbf{X}$  e  $\mathbf{Y}$ :

$$\mathbf{X} = \mathbf{X} + (v_\alpha - \boldsymbol{\varphi} \mathbf{X}) \mathbf{L},$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y} + (v_\beta - \boldsymbol{\varphi} \mathbf{Y}) \mathbf{L};$$

(f) Calcular a partir de  $\mathbf{X} = [X_0 \ X_1 \ X_2 \ \cdots \ X_k \ X_{k+1}]$  e  $\mathbf{Y} = [Y_0 \ Y_1 \ Y_2 \ \cdots \ Y_k \ Y_{k+1}]$ :

$$\begin{aligned} v_{p\alpha_1} &= v_{p1} \cos(\phi_{p1}) = \frac{1}{2}(X_1 + Y_2), & v_{n\alpha_1} &= v_{n1} \cos(\phi_{n1}) = \frac{1}{2}(X_1 - Y_2), \\ v_{p\beta_1} &= v_{p1} \sin(\phi_{p1}) = \frac{1}{2}(Y_1 - X_2), & v_{n\beta_1} &= v_{n1} \sin(\phi_{n1}) = -\frac{1}{2}(X_1 + Y_2); \end{aligned}$$

(g) Calcular os componentes de sequência positiva e negativa:

$$v_{p1} = \sqrt{v_{p\alpha_1}^2 + v_{p\beta_1}^2}, \quad v_{n1} = \sqrt{v_{n\alpha_1}^2 + v_{n\beta_1}^2};$$

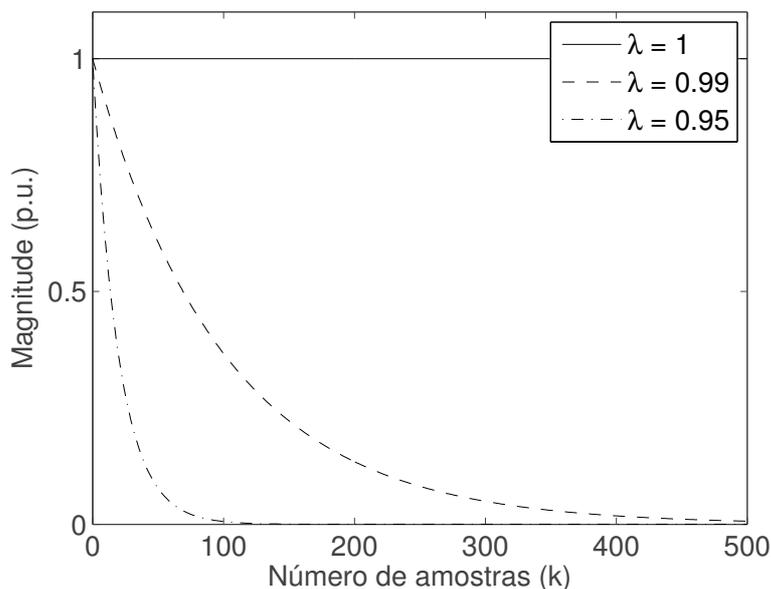
(h) Calcular o ângulo de fase:

$$\sin(\theta_1 + \phi_{p1}) = \left( v_{p\beta_1} \cos(\theta_1) + v_{p\alpha_1} \sin(\theta_1) \right) / v_{p1}.$$

Os ângulos do vetor de regressores são  $\theta_{1_j} = (j-1) \theta_1$  e  $\theta_{k_j} = (j-1) \theta_k$ .

A constante  $\lambda$  é o fator de esquecimento. Esta constante atribui um peso às amostras mais recentes em função do seu valor. A Fig.4.1 mostra o horizonte de memória para o fator de esquecimento  $\lambda$  sob três condições distintas. A contribuição das amostras anteriores sobre o valor atual estimado aumenta em função de  $\lambda$ . Assim, de forma grosseira, para  $\lambda$  igual a 0.95 o sistema utiliza 95% da amostra anterior para estimar o valor atual. Neste trabalho  $\lambda$  foi ajustada para 0.94.

O tamanho da matriz de covariância é modificado em função do número de harmônicas que se deseja eliminar (adicionam-se duas linhas e duas colunas para cada harmônica a ser



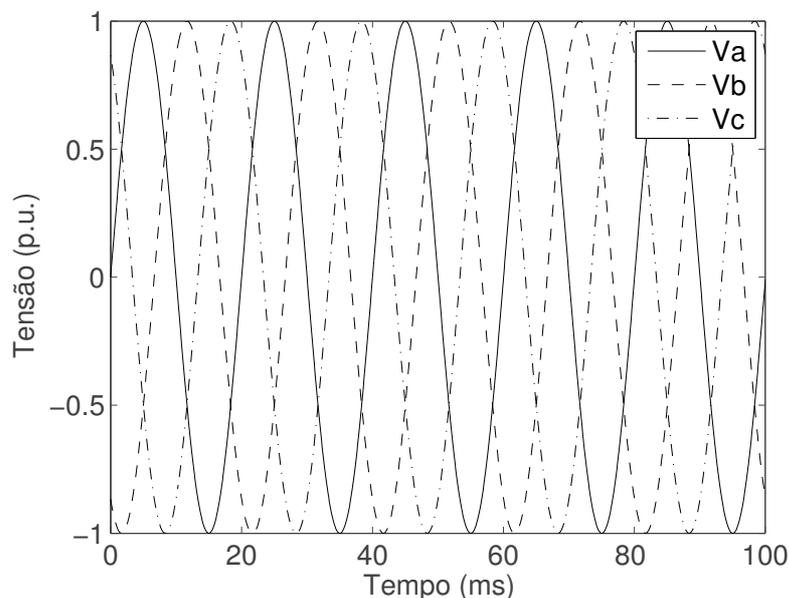
**Figura 4.1** Horizonte de memória para o fator de esquecimento  $\lambda$

eliminada). Para limitar a dimensão da matriz de covariância é recomendável o uso de filtros passa-baixa para harmônicas de ordem superior à quinze.

Para verificação do algoritmo inicialmente o sistema elétrico está sob uma condição ideal, sem qualquer distúrbio, como apresentado na Fig.4.2. As componentes de sequência são estimadas no intervalo de meio ciclo ou 80 períodos de amostragem. O transitório inicial observado na Fig.4.3 é semelhante ao apresentado em [1] sob as mesmas condições. As diferenças calculadas entre as referências e os valores estimados para as componentes de sequência em regime permanente são nulas. O ângulo de fase observado na Fig.4.4 segue a referência senoidal instantaneamente.

Para simular uma condição extrema de operação, não correspondente a realidade do sistema elétrico, as tensões de fase apresentam formas de onda distorcidas por componentes harmônicas de ordem ímpar e considera-se um salto de fase de  $\pi/4$  para cada uma das fases. A Fig.4.5 mostra as tensões de fase do sistema.

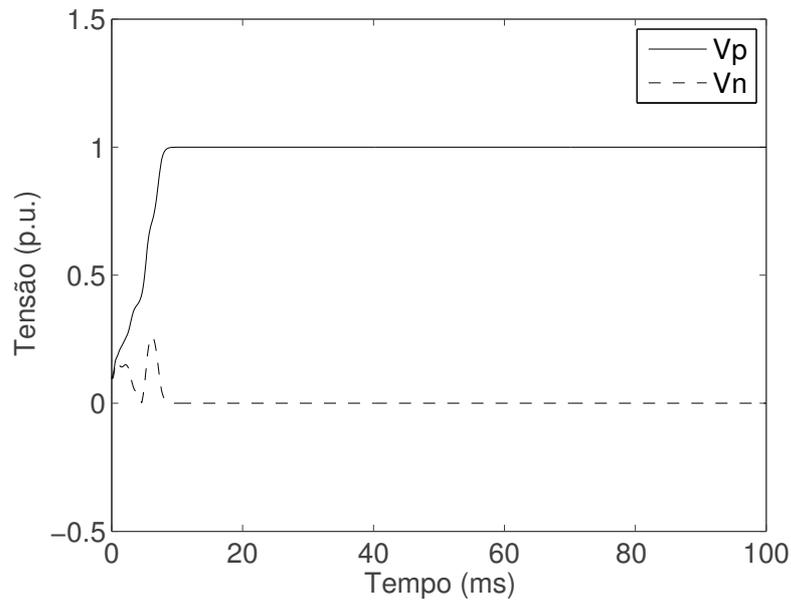
As componentes de sequência positiva e negativa são estimadas sem distorções e estão apresentadas na Fig.4.6. Os transitórios observados são extintos em um intervalo de meio ciclo da tensão do sistema. As diferenças calculadas entre as referências e os valores estimados são nulas. O ângulo de fase observado na Fig.4.7 segue a referência senoidal sem distorções após os transitórios.



**Figura 4.2** Tensões de fase.

Na Fig.4.8 é mostrado o espectro de frequência das tensões de fase e do seno do ângulo de fase em regime permanente. Na Fig.4.8(a) é apresentado o espectro de frequência da tensão de fase distorcida. Entretanto, na Fig.4.8(b) o espectro do seno do ângulo estimado contém apenas a componente fundamental. O método proposto efetivamente elimina todas as componentes harmônicas de ordem superior a dois sem degradar sua resposta dinâmica sob condições extremas de operação.

Para simular uma condição real do sistema elétrico, definida no Módulo 8 do PRODIST adotado pela ANEEL, as tensões de fase apresentam forma de onda distorcidas por componentes harmônicas e considera-se um salto de fase de  $\pi/4$  para cada uma das fases. A comparação entre componentes de sequência estimadas para o método proposto e o descrito em [1] são apresentadas na Fig.4.9. As distorções observadas nas componentes estimadas são apresentadas na Fig.4.9(b) e degradam a estimação do ângulo de fase. O uso de filtro para eliminar harmônicas de ordem menor que 5 torna o método descrito em [1] lento. Assim, o desempenho do algoritmo proposto é superior sob as mesmas condições de operação.



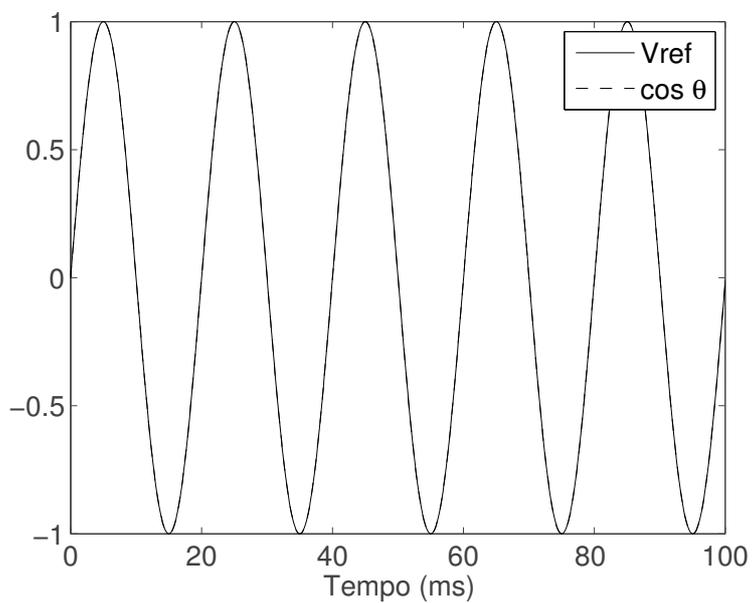
**Figura 4.3** Componentes de sequência positiva e negativa.

### 4.3 Conclusão

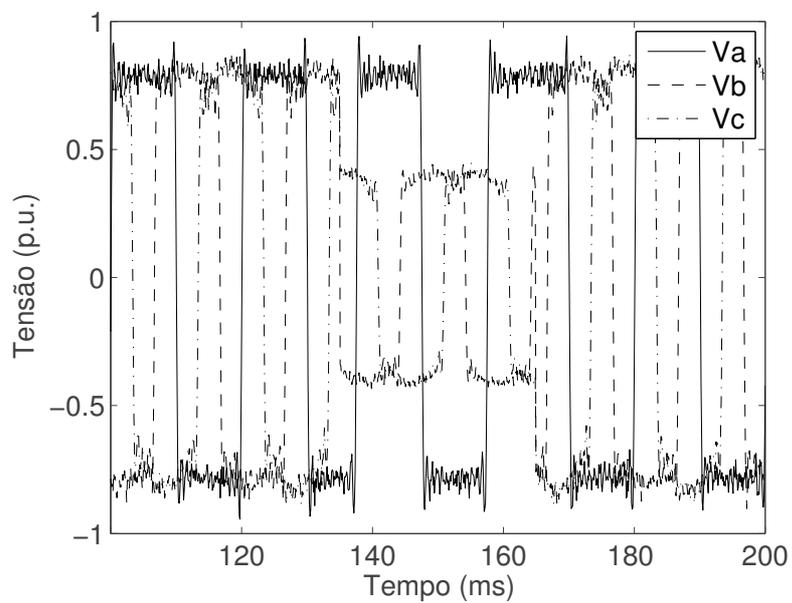
Neste capítulo foi apresentado um método para a detecção instantânea do ângulo de fase com a rápida dinâmica de detecção e baixa sensibilidade à distorções na forma de onda.

A componente de sequência positiva foi estimada através do método dos mínimos quadrados recursivo ponderado. Eliminou-se completamente as harmônicas de baixa ordem, nível c.c. e componente de segunda harmônica presente durante desequilíbrios de tensão devido a componente de sequência negativa. O ângulo de fase não contém distorções e foi estimado em meio ciclo da componente fundamental do sinal amostrado.

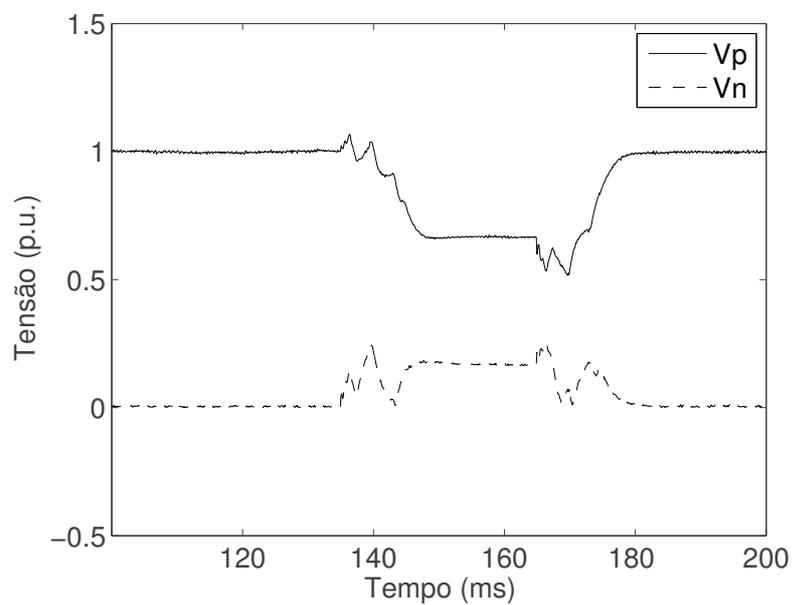
A viabilidade do método proposto foi verificada através da simulação e resultados experimentais.



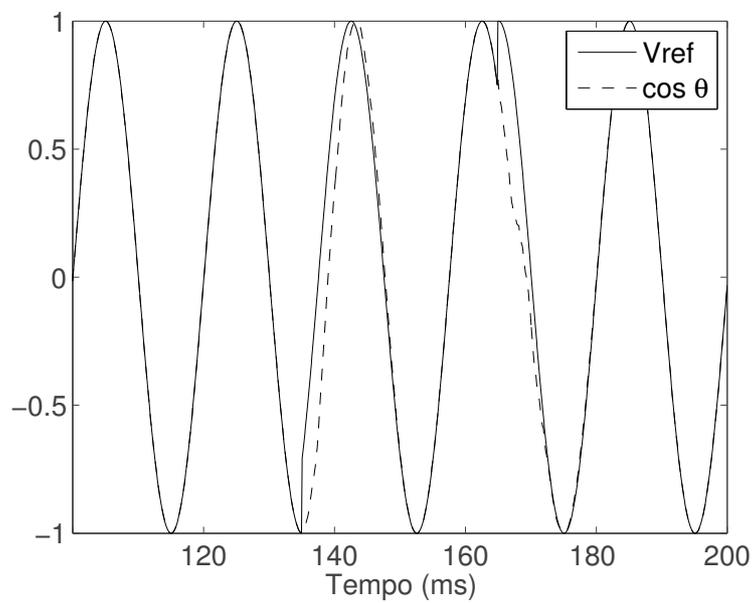
**Figura 4.4** Seno do ângulo de fase estimado e referência senoidal.



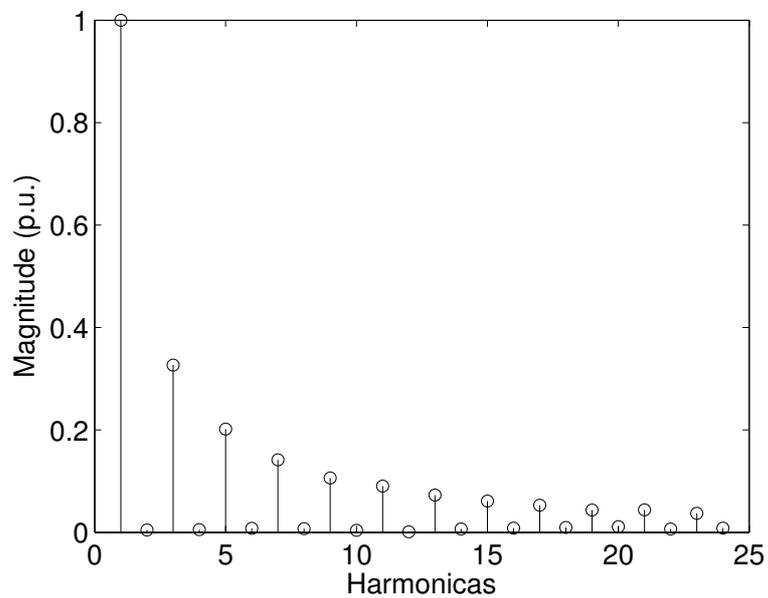
**Figura 4.5** Tensões de fase.



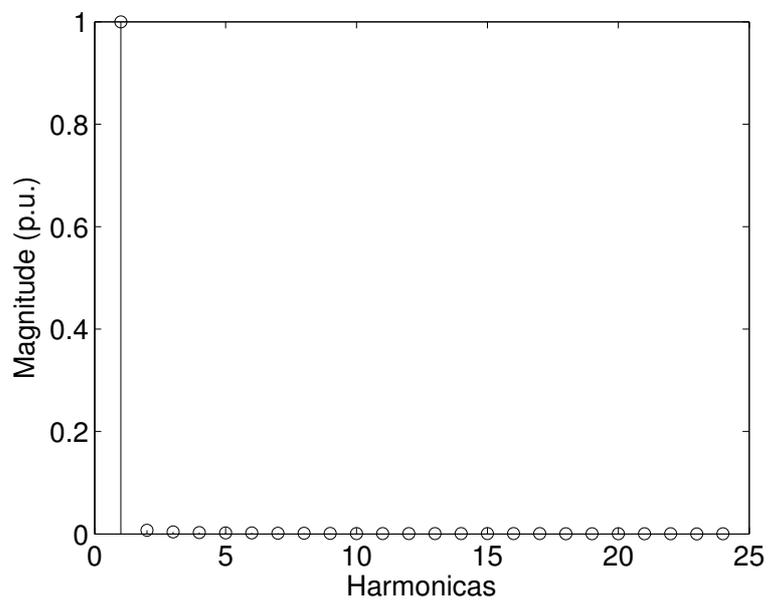
**Figura 4.6** Componentes de sequência positiva e negativa.



**Figura 4.7** Seno do ângulo de fase estimado e referência senoidal.

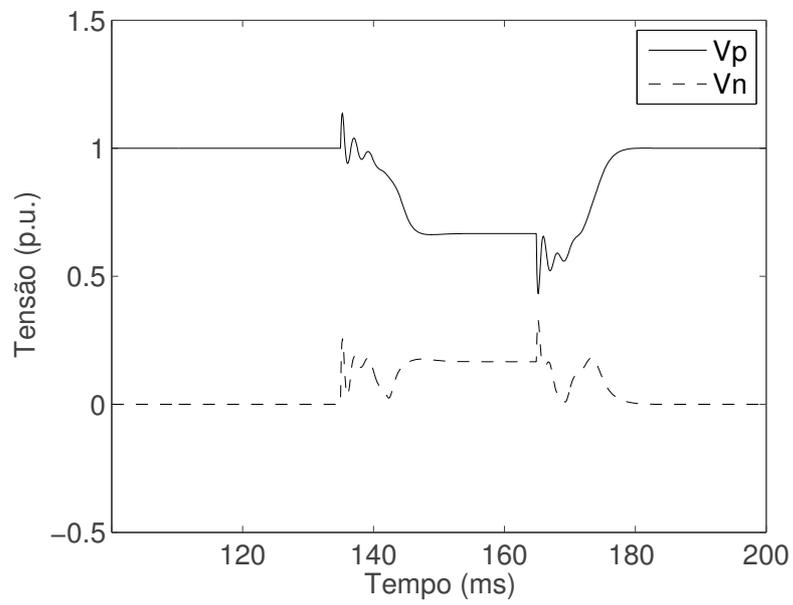


(a)

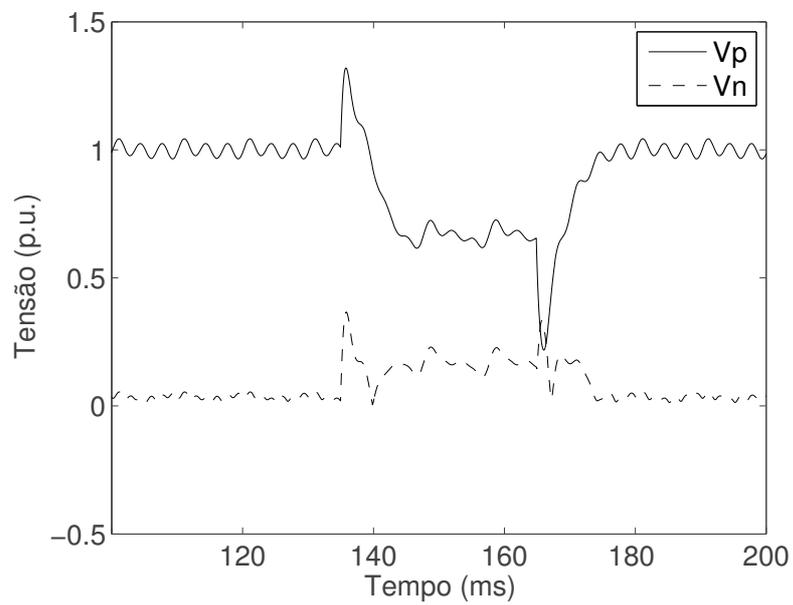


(b)

**Figura 4.8** Espectro de frequências. (a) Tensões de Fase; (b) Seno do ângulo de fase estimado.



(a)

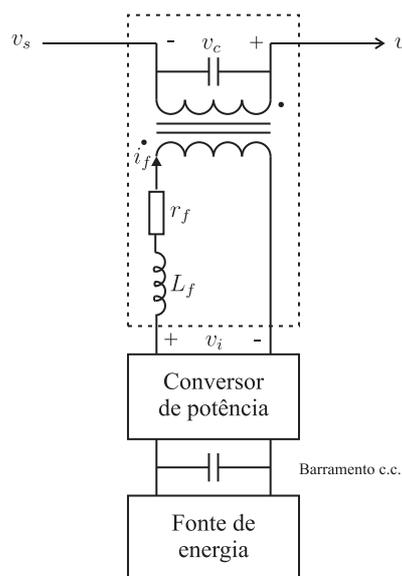


(b)

**Figura 4.9** Componentes de Sequência. (a) Método proposto; (b) WLSE [1].

# Algoritmo para Detecção Instantânea do Ângulo de Fase Aplicado ao Compensador Série

O objetivo deste capítulo é apresentar o modelo do compensador série, os resultados de simulações e experimentais. Um algoritmo implementado no MATLAB foi utilizado para verificação do método proposto, no qual a cada instante de amostragem são estimados o ângulo de fase e as componentes de sequência positiva e negativa. O período de amostragem em todas as simulações é de  $100\mu s$ . Também é apresentada a validação experimental do método proposto.



**Figura 5.1** Diagrama de blocos do compensador série.

Os resultados da aplicação do algoritmo para detecção instantânea do ângulo de fase ao compensador série são apresentados.

## 5.1 Compensador série

A estrutura básica do compensador série adotado consiste em uma fonte de energia, um barramento c.c., um conversor de potência do tipo tensão, um filtro LC e um transformador de acoplamento, como mostrado na Fig.5.1. O filtro é composto por uma resistência, uma indutância, um capacitor e um transformador ideal de razão 1 : 1. O transformador é representado por uma resistência e pela reatância de dispersão. A combinação destes elementos compõem o filtro LC.

Um sistema de controle em malha fechada é adotado. Os parâmetros de controle são as componentes de sequência positiva e negativa no referencial síncrono. A componente de sequência zero é controlada separadamente. O controle no referencial síncrono utiliza parâmetros constantes e permite controladores com estruturas simples. A estrutura do compensador série é semelhante a estratégia de controle apresentada em [1]. Assim, as equações no referencial síncrono podem ser obtidas como:

$$\begin{bmatrix} v_{i_a} \\ v_{i_b} \\ v_{i_c} \end{bmatrix} = L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{f_a} \\ i_{f_b} \\ i_{f_c} \end{bmatrix} + r_f \begin{bmatrix} i_{f_a} \\ i_{f_b} \\ i_{f_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{c_a} \\ v_{c_b} \\ v_{c_c} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_{f_a} \\ i_{f_b} \\ i_{f_c} \end{bmatrix} = C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{c_a} \\ v_{c_b} \\ v_{c_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{l_a} \\ i_{l_b} \\ i_{l_c} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} v_{l_a} \\ v_{l_b} \\ v_{l_c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s_a} \\ v_{s_b} \\ v_{s_c} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{c_a} \\ v_{c_b} \\ v_{c_c} \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Utilizando a transformação  $0\alpha\beta$  para as igualdades (5.1) a (5.3), tem-se:

$$(v_{i_\alpha} + jv_{i_\beta}) = L_f \frac{d}{dt} (i_{f_\alpha} + ji_{f_\beta}) + r_f (i_{f_\alpha} + ji_{f_\beta}) + (v_{c_\alpha} + jv_{c_\beta}) \quad (5.4)$$

$$(i_{f_\alpha} + ji_{f_\beta}) = C_f \frac{d}{dt} (v_{c_\alpha} + jv_{c_\beta}) + (i_{l_\alpha} + ji_{l_\beta}) \quad (5.5)$$

$$(v_{l_\alpha} + jv_{l_\beta}) = (v_{s_\alpha} + jv_{s_\beta}) + (v_{c_\alpha} + jv_{c_\beta}) \quad (5.6)$$

As variáveis complexas das igualdades (5.4) a (5.6) são decompostas em componentes de

sequência positiva e negativa aplicando a seguinte transformação [1]:

$$(x_\alpha + jx_\beta) = (x_{p\alpha 0} + jx_{p\beta 0})e^{j\omega t} + (x_{n\alpha 0} - jx_{n\beta 0})e^{-j\omega t} \quad (5.7)$$

sendo  $\omega$  a frequência angular da componente fundamental.

Após a separação em componentes de sequência as igualdades são transformadas para o referencial síncrono, com o eixo d alinhado com o vetor de tensão de sequência positiva do sistema. As equações para a componente de sequência positiva são representadas por:

$$(v_{i_{pd}} + jv_{i_{dq}}) = L_f \left[ \frac{d}{dt}(i_{f_{pd}} + ji_{f_{pq}}) + j\omega(i_{f_{pd}} + ji_{f_{pq}}) \right] + r_f(i_{f_{pd}} + ji_{f_{pq}}) + (v_{c_{pd}} + jv_{c_{pq}}) \quad (5.8)$$

$$(i_{f_{pd}} + ji_{f_{pq}}) = C_f \left[ \frac{d}{dt}(v_{c_{pd}} + jv_{c_{pq}}) + j\omega(v_{c_{pd}} + jv_{c_{pq}}) \right] + (i_{l_{pd}} + ji_{l_{pq}}) \quad (5.9)$$

$$(v_{l_{pd}} + jv_{l_{pq}}) = (v_{s_{pd}} + j0) + (v_{c_{pd}} + jv_{c_{pq}}) \quad (5.10)$$

O mesmo procedimento é adotado para a representação da componente negativa. A diferença está no fato de que para a determinação das seguintes equações, toma-se o conjugado das variáveis complexas para convertê-la em um sistema de sequência positivo equivalente, e assim tornando possível utilizar um único sistema de controle para estas componentes.

$$(v_{i_{nd}} + jv_{i_{nq}}) = L_f \left[ \frac{d}{dt}(i_{f_{nd}} + ji_{f_{nq}}) + j\omega(i_{f_{nd}} + ji_{f_{nq}}) \right] + r_f(i_{f_{nd}} + ji_{f_{nq}}) + (v_{c_{nd}} + jv_{c_{nq}}) \quad (5.11)$$

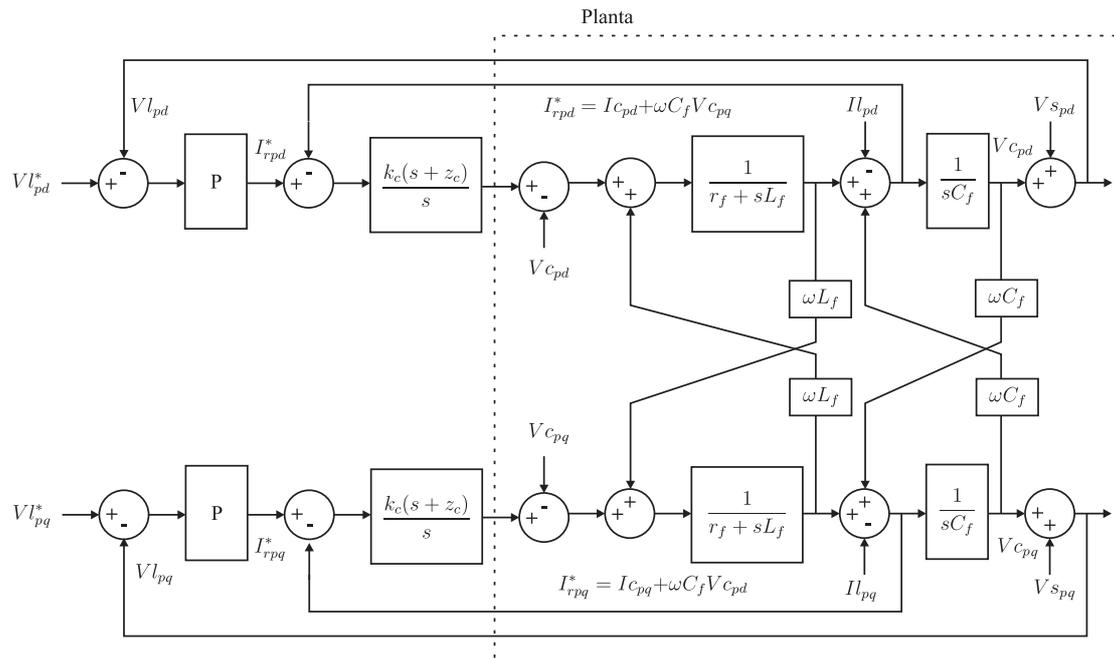
$$(i_{f_{nd}} + ji_{f_{nq}}) = C_f \left[ \frac{d}{dt}(v_{c_{nd}} + jv_{c_{nq}}) + j\omega(v_{c_{nd}} + jv_{c_{nq}}) \right] + (i_{l_{nd}} + ji_{l_{nq}}) \quad (5.12)$$

$$(v_{l_{nd}} + jv_{l_{nq}}) = (v_{s_{nd}} + j0) + (v_{c_{nd}} + jv_{c_{nq}}) \quad (5.13)$$

O diagrama de blocos para o sistema de controle da componente positiva está apresentado na Fig.5.2. A planta do sistema apresenta termos de acoplamento cruzado, ou seja, componentes do eixo q aparecem no parâmetros do eixo d. Um controlador proporcional é adotado para a malha externa e um controlador proporcional-integral é adotado para malha interna de corrente.

O sistema de controle para a componente negativa está apresentado na Fig.5.3. O diagrama é igual ao da componente positiva, pois as equações desta sequência é o conjugado da sequência negativa.

A Fig.5.4 mostra o diagrama para o sistema de controle da sequência zero. Não há termos de acoplamento na planta do sistema. No entanto, a componente de sequência zero tem os



**Figura 5.2** Diagrama de blocos para o sistema de controle da componente positiva.

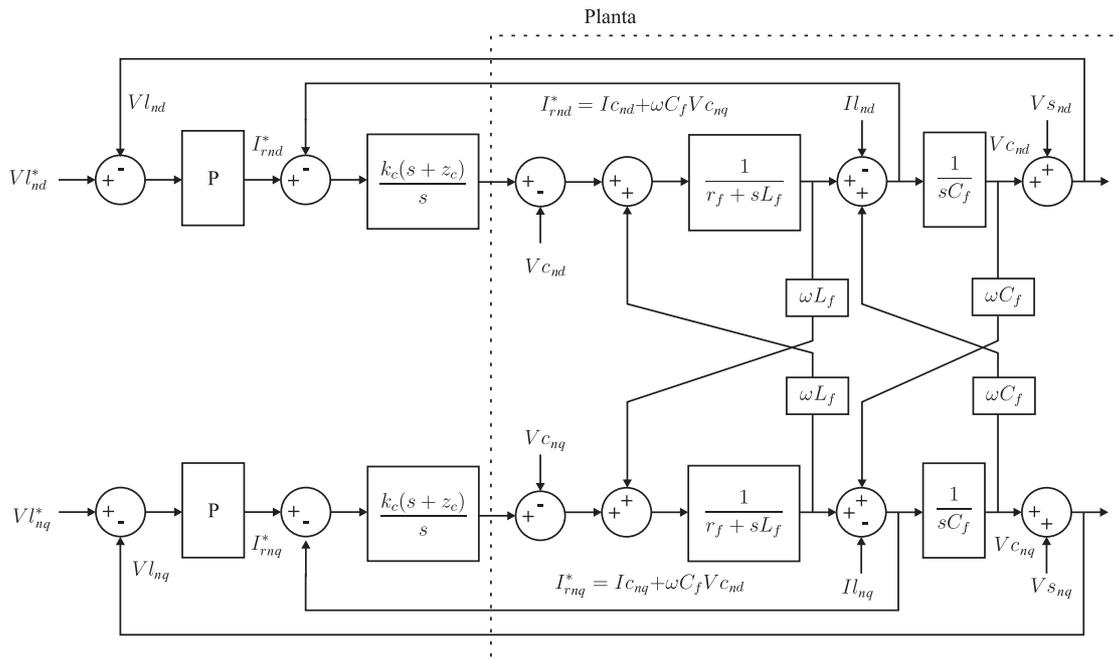
mesmos parâmetros das outras componentes.

A tensão de carga é compensada pelo controlador proporcional da malha externa. A referência para esta malha é a componente de sequência positiva no eixo síncrono d ajustada para o valor nominal da carga. O valor de referência para o eixo q é zero.

Os parâmetros dos controladores são determinados a partir da escolha da largura de banda das malhas internas e externas, tomando como referência a frequência de chaveamento do conversor, 10 kHz. A largura de banda da malha interna é ajustada para 1/6 da frequência de chaveamento. Para a malha externa a largura de banda é ajustada para 1/5 da frequência do laço interno.

Para validar a estratégia de controle inicialmente o compensador série está operando com a função de compensação de tensão. O algoritmo para detecção instantânea do ângulo de fase fornece as estimativas das componentes de sequência positiva e negativa no referencial síncrono para os controladores nos respectivos eixos.

Na Fig.5.5 é apresentado um afundamento de tensão monofásico, as tensões de fase fornecidas pelo compensador série e as tensões de carga. As formas de ondas estão distorcidas por componentes harmônicas de terceira, quinta e sétima ordem. O valor da distorção harmônica total é de 2,5%. O afundamento de tensão foi compensado sem transitórios na tensão de carga sob condições normais do sistema elétrico.



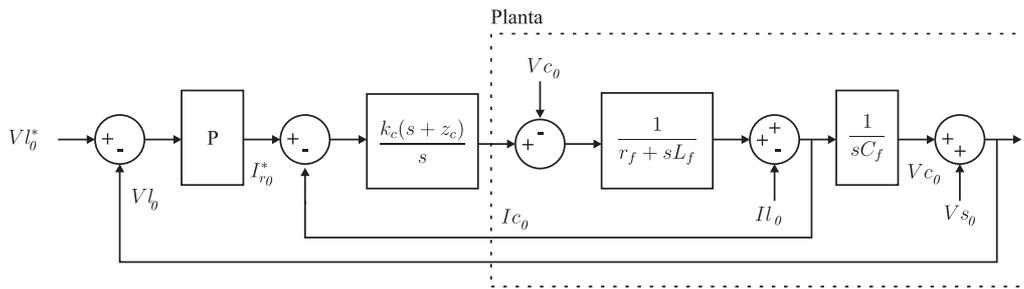
**Figura 5.3** Diagrama de blocos para o sistema de controle da componente negativa.

As Fig.5.6 e Fig.5.7 mostram afundamentos de tensão desequilibrados. As tensões de fase na carga são compensadas. Entretanto, há um transitório com um elevamento de tensão. Este fato ocorre devido ao transitório para que o ângulo estimado siga a referência senoidal, meio ciclo da tensão do sistema ou 80 períodos de amostragem.

Esta estrutura de controle permite a compensação de harmônicos como uma função secundária. Na Fig.5.8 é apresentado o diagrama de blocos para a compensação de harmônicos. O algoritmo proposto pode determinar a componente fundamental das tensões de fase do sistema a partir do ângulo estimado e das componentes de sequência. As componentes harmônicas das tensões de fase podem ser determinadas a partir da subtração das tensões de fase e as componentes fundamentais de cada fase. O resultado da subtração é inserido em um bloco inversor. A saída deste bloco é adicionada à compensação de tensão. É importante notar que a estratégia de controle da tensão não está associada a compensação de harmônicos.

Na Fig.5.9 são apresentadas as tensões de fase fornecidas pelo compensador série e as tensões de carga. As formas de onda da tensão do sistema estão distorcidas por componentes harmônicas de terceira, quinta e sétima ordem. O valor da distorção harmônica total é de 10%. As componentes harmônicas das tensões de fase são eliminadas.

O compensador série pode operar com as duas funções simultaneamente: a compensação de tensão e a compensação de harmônicos. Na Fig.5.10 é apresentado um afundamento de



**Figura 5.4** Diagrama de blocos para o sistema de controle da componente zero.

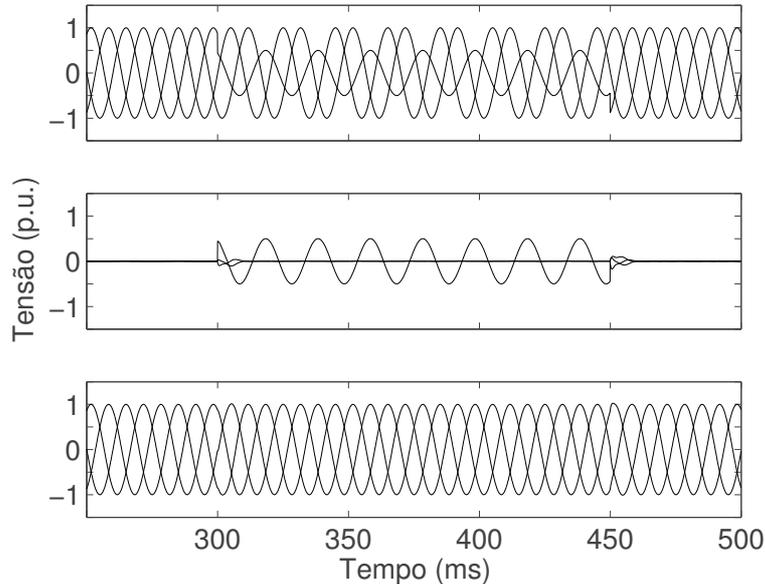
sequilibrado para formas de onda distorcidas. As tensões de fase são compensadas quanto a amplitude e quanto a harmônicos. Entretanto, este modo de operação consome mais energia do barramento c.c., pois deve fornecer energia para compensar harmônicos e afundamento. Também, as perdas por chaveamento são aumentadas devido a característica de regime permanente das componentes harmônicas.

Geralmente a fonte de energia para o compensador série com a função de compensação de tensão é um conversor de potência adicional. Entretanto, outras topologias utilizam apenas o capacitor do barramento c.c. como fonte de energia. A aplicação desta topologia está limitada pelo tipo de carga, pois o aumento fator de potência da carga reduz a capacidade de compensação de tensão.

O compensador série sem a fonte energia externa, apenas com o capacitor do barramento c.c., pode operar sob a condição de potência nula. Nesta condição o ângulo de fase da tensão fornecida é controlado de forma a compensar a tensão de carga sem demandar potência ativa do barramento c.c. Não é possível operar sob esta condição em regime permanente, pois as perdas de chaveamento levam ao colapso de energia no barramento c.c.

O controle da energia do barramento c.c. pode ser realizado modificando-se a amplitude da tensão fornecida pelo compensador série. Todavia, este método insere uma flutuação de tensão indesejada na carga. Outra alternativa é ajustar o ângulo de fase da tensão fornecida para controlar o fluxo de potência ativa entre o sistema elétrico e o compensador série. As estratégias de controle otimizado da qualidade de tensão e otimizado da energia permitem o ajuste do ângulo de fase. O controle da qualidade da tensão compensa a tensão de carga para o estado pré-afundamento, ou seja, fornece uma tensão com amplitude e fase de modo a restaurar o estado anterior. O controle otimizado da energia não compensa a tensão de carga para o estado pré-afundamento.

É possível utilizar a estratégia de controle otimizado da energia para regular a tensão do barramento c.c. O ângulo de fase da tensão fornecida deve ser ajustado a cada iteração de



**Figura 5.5** Resultados de simulação para a compensação de um afundamento monofásico. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.

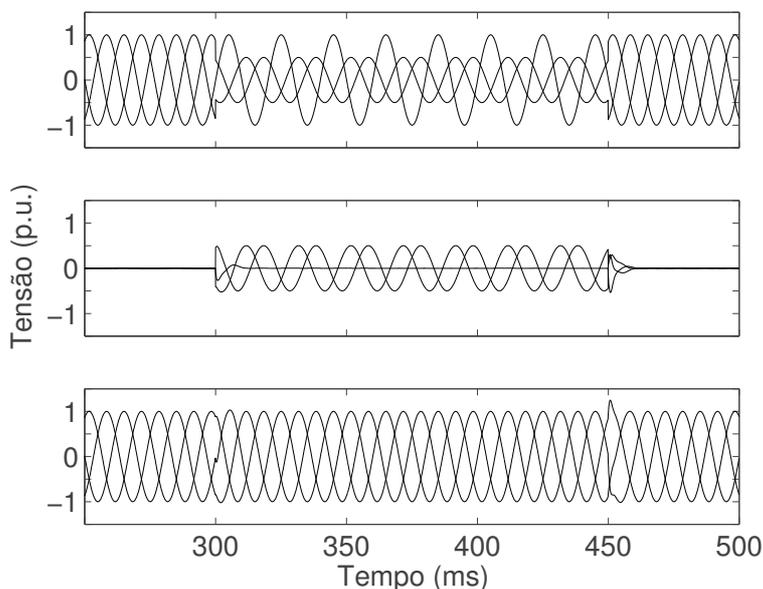
forma a controlar o fluxo de potência ativa do sistema elétrico para o compensador série, e por conseguinte controlar a tensão do barramento c.c. O ajuste do ângulo de fase pode ser implementado utilizando outras estratégias, inclusive o controle em malha aberta e em malha fechada.

## 5.2 Resultados experimentais

O sistema apresentado na Fig.5.11 foi validado em uma plataforma experimental. Esta consiste em 12 chaves do tipo IGBT, uma ponte retificadora trifásica, um banco de capacitores, seis sensores de corrente, seis sensores de tensão, um computador dedicado para a execução do algoritmo de controle e uma placa para o acionamento das chaves e leitura dos sensores, conectada ao barramento ISA do computador dedicado.

Uma fonte programável trifásica (California Instruments, modelo 3001Lx) foi utilizada como rede elétrica para o sistema. A fonte foi configurada para fornecer tensões de fase equilibradas e com forma de onda distorcida. As tensões de fase distorcidas pela terceira harmônica e quinta harmônica são apresentadas na Fig.5.12.

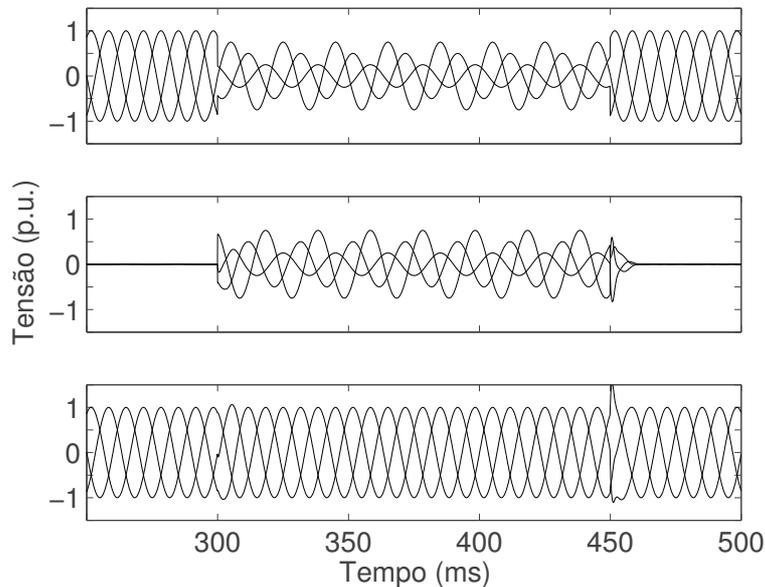
Os sensores foram calibrados e utilizados para a aquisição das tensões de fase. Os valores



**Figura 5.6** Resultados de simulação para a compensação de um afundamento bifásico. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.

lidos foram utilizados como entrada para o método proposto. Este foi ajustado para eliminar até a quinta harmônica sem filtragem adicional para componentes de ordem superior a cinco. O ângulo de fase estimado não contém distorções e é apresentado na Fig.5.13. Na Fig.5.14 são apresentados os espectros de frequência para as tensões de fase e o ângulo de fase estimado. As tensões de fase são distorcidas por componentes harmônicas de ordem ímpar e par. Todavia, as componentes harmônicas de ordem par não são fornecidas pela fonte programável. O espectro de frequência para o seno do ângulo de fase estimado está apresentado na Fig.5.14(b). É importante notar a eliminação das componentes harmônicas de ordem superior a cinco, pois ocorreu sem o ajuste do método. Este fato ocorre devido às características de estimação por mínimos quadrados recursivo, especialmente em função da constante  $\lambda$ . Na prática a estimação das componentes de sequência pode ser realizada ajustando-se o método para eliminar até a décima harmônica e um filtro adicional para componentes de ordem superior a dez.

Diferente do apresentado na experimentação, o algoritmo pode ser implementado em um processador digital de sinais (DSP) de 32 bits com mínimo impacto na utilização de recursos de hardware. O uso de memória RAM é de 3,6% para o TMS320F28335. Além disso, o tempo de ocupação do processador é reduzido com a utilização de bibliotecas para operações em ponto flutuante. Devido a característica linear da estimação por mínimos quadrados recursivo, o algoritmo pode ser implementado utilizando aritmética de ponto fixo. Neste caso a matriz de



**Figura 5.7** Resultados de simulação para a compensação de um afundamento trifásico. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.

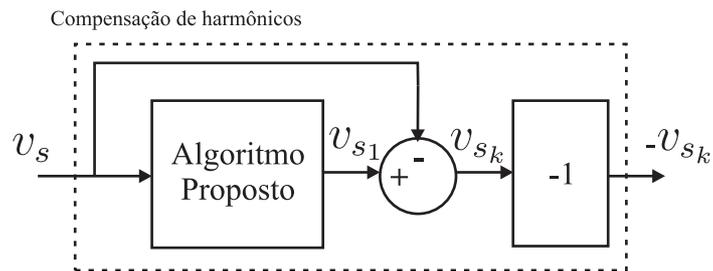
regressores contém valores constantes a cada iteração e que se repetem a cada período da forma de onda da entrada, ou seja, são constantes e periódicos, previamente calculados em função da taxa de amostragem. Assim, é necessário armazenar apenas a tabela de cossenos da fundamental. Os cossenos com parâmetros múltiplos da frequência fundamental utilizam interpolação. O desempenho das implementações deve ser semelhante ao apresentado nas simulações.

### 5.3 Conclusão

Neste capítulo foi apresentado o modelo para o compensador série. Assim, a planta do sistema ficou definida, e conseqüentemente, o sistema de controle em malha aberta.

A decomposição instantânea em componentes de sequência através do algoritmo proposto permitiu o controle individual de cada uma destas componentes. A simplificação das estratégias de controle e a redução da complexidade do algoritmo de controle.

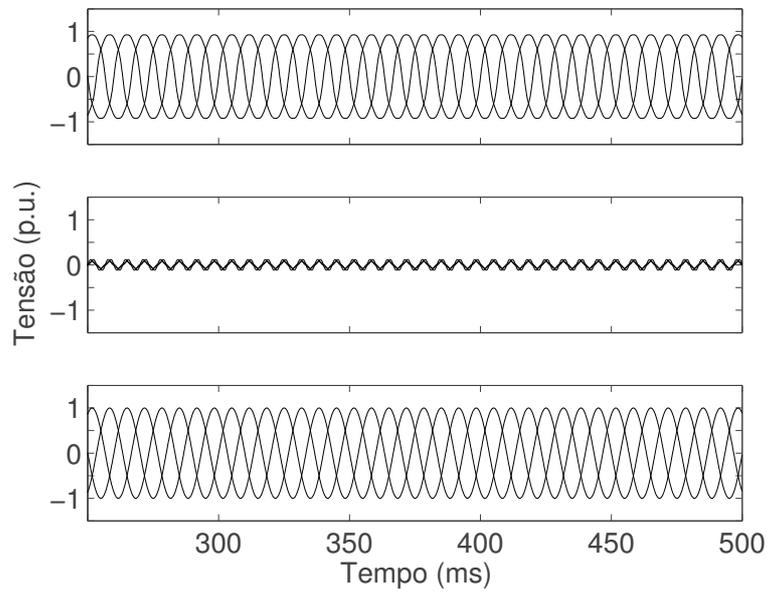
O sistema de controle em malha fechada foi definido por duas malhas de realimentação. Um controlador proporcional para malha externa de tensão e um controlador proporcional-integral para a malha interna de corrente. As variáveis associadas a cada controlador modificam diretamente os níveis de tensão a serem fornecidos pelo compensador série. Como observado,



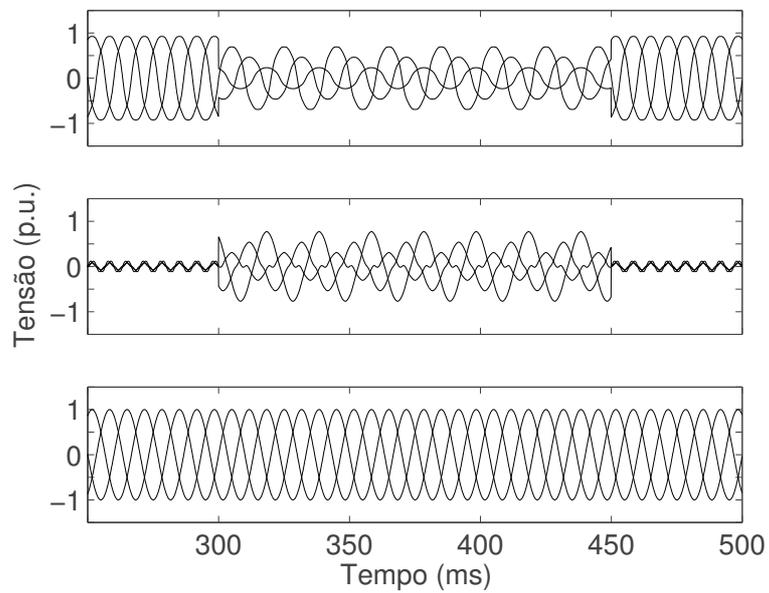
**Figura 5.8** Diagrama de blocos para a compensação de harmônicos.

este sistema de controle é utilizado para cada componente de sequência.

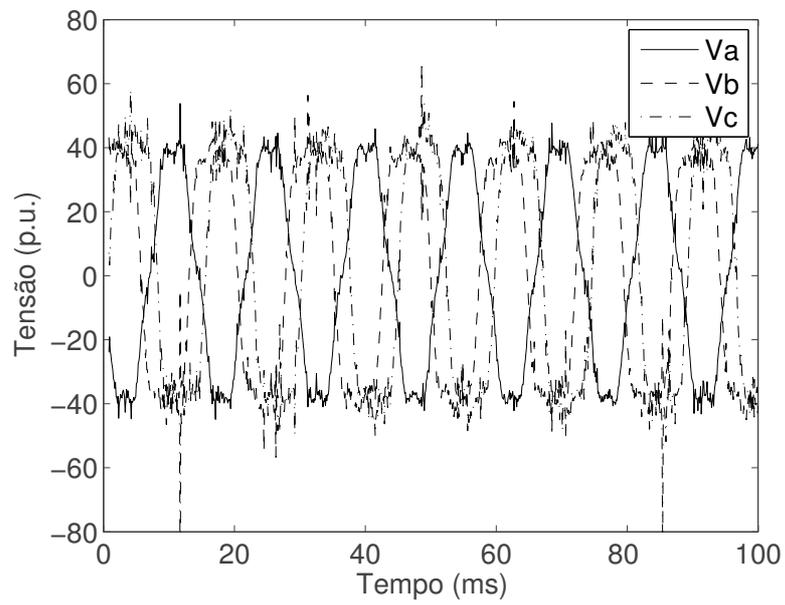
Resultados de simulação do sistema de controle em malha fechada foram apresentados. Combinações para afundamentos ocorridos nas três fases foram apresentados. As tensões de carga em todas as combinações foram restauradas para os valores nominais de amplitude. Também foi apresentado a compensação de harmônicos. Os resultados e suas respectivas . Também a compensação



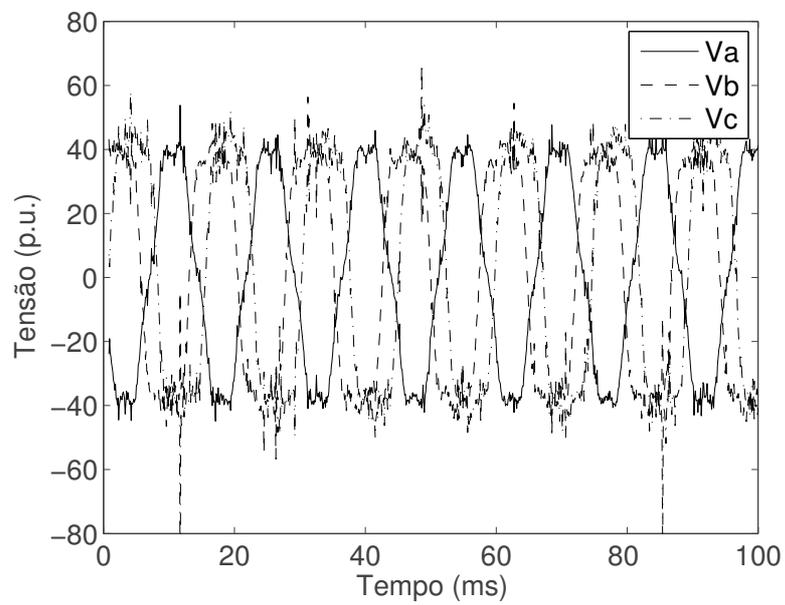
**Figura 5.9** Resultados de simulação para a compensação de harmônicos. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.



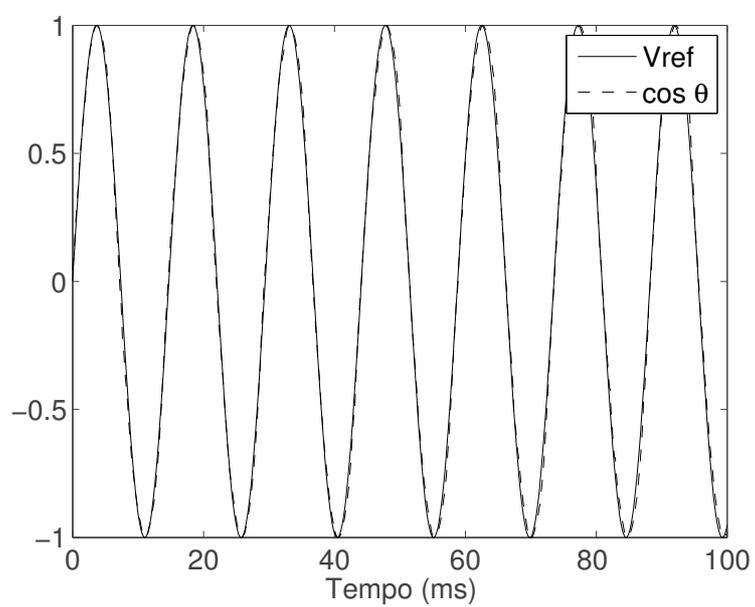
**Figura 5.10** Resultados de simulação para a compensação de harmônicos e um afundamento trifásico. (a) Tensões de fase do sistema; (b) Tensões de fase do compensador; (c) Tensões de fase da carga.



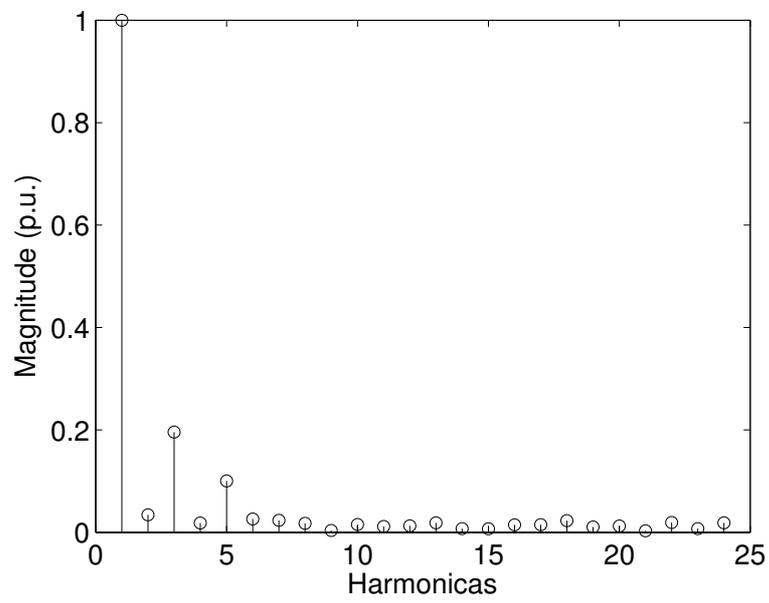
**Figura 5.11** Plataforma Experimental.



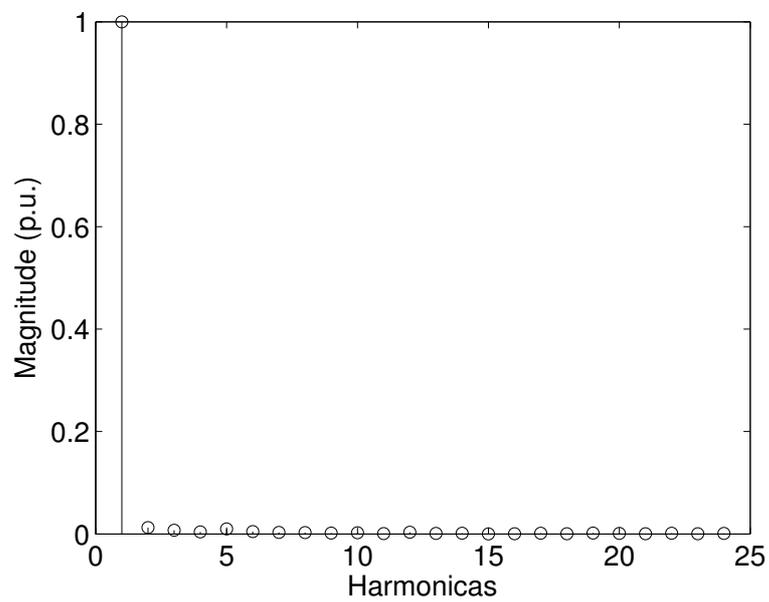
**Figura 5.12** Tensões de fase.



**Figura 5.13** Seno do ângulo de fase estimado e referência senoidal.



(a)



(b)

**Figura 5.14** Espectro de frequências. (a) Tensões de Fase; (b) Seno do ângulo de fase estimado.

## CAPÍTULO 6

# Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um algoritmo para detecção instantânea do ângulo de fase com baixa sensibilidade a distorções na forma de onda.

As componentes de sequência positiva e negativa foram estimadas através do método dos mínimos quadrados recursivo ponderado. Com relação a outros métodos de estimação e com relação ao método utilizado, a principal contribuição deste trabalho foi a eliminação de distorções na forma de onda da estimação do ângulo de fase.

Através das simulações, avaliou-se a validade do algoritmo tanto sob condições de distorção extrema como sob condições normais do sistema elétrico. Aplicou-se o algoritmo a um compensador série operando com duas funções: a compensação de tensão e a compensação de harmônicos. Nos experimentos, confirmou-se a efetividade do algoritmo para a eliminação de distorções, no que se observou a eficácia do mesmo. Os resultados foram apresentados e analisados.

## Referências

- [1] D. Fernandes, S. Naidu, and C. Coura, “Instantaneous Sequence-Components Resolution of 3-Phase Variables and Its Application to Dynamic Voltage Restoration,” in *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2007. IMTC 2007*, pp. 1–4, 2007.
- [2] J. Stones and A. Collinson, “Power quality,” *Power Engineering Journal*, vol. 15, no. 2, pp. 58–64, 2001.
- [3] R. Dugan, S. Santoso, M. McGranaghan, and H. Beaty, *Electrical power systems quality*. McGraw-Hill Professional, 2002.
- [4] A. Ghosh and G. Ledwich, *Power quality enhancement using custom power devices*. Kluwer Academic Pub, 2002.
- [5] L. Arruda, S. Silva, and B. Filho, “PLL structures for utility connected systems,” in *Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference*, vol. 4, pp. 2655–2660, 2001.
- [6] V. Kaura and V. Blasko, “Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions,” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, no. 1, pp. 58–63, 1997.
- [7] H. Song, H. Park, and K. Nam, “An instantaneous phase angle detection algorithm under unbalanced line voltage condition,” in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf*, vol. 1, pp. 533–537, 1999.
- [8] S. Naidu, A. Mascarenhas, and D. Fernandes, “A software phase locked loop for unbalanced and distorted utility conditions,” in *Power System Technology, 2004. PowerCon 2004. 2004 International Conference on*, vol. 2, 2004.
- [9] I. 1159.[S.I.], “Recommended practices on monitoring electric power quality,” 1995.
- [10] ANEEL.[S.I.], “Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional (prodist), módulo 8 - qualidade de energia elétrica,” 2007.

- [11] J. Nielsen, F. Blaabjerg, and N. Mohan, “Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2001. APEC 2001. Sixteenth Annual IEEE*, vol. 2, 2001.
- [12] D. Vilathgamuwa, A. Perera, and S. Choi, “Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 928–936, 2003.
- [13] D. Fernandes, *Um Restaurador Dinâmico de Tensão para Correções de Variações de Tensão de Curta Duração em Redes Elétricas Trifásicas*. Tese de Doutorado. UFCG, 2008.
- [14] M. Vilathgamuwa, A. Ranjith Perera, S. Choi, and K. Tseng, “Control of energy optimized dynamic voltage restorer,” in *IECON Proceedings*, vol. 2, pp. 873–878, 1999.
- [15] M. Vilathgamuwa, R. Perera, and S. Choi, “Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current-mode control,” *IEEE transactions on power electronics*, vol. 17, no. 5, pp. 824–834, 2002.
- [16] B. Wang, G. Venkataramanan, and M. Illindala, “Operation and control of a dynamic voltage restorer using transformer coupled H-bridge converters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 4, pp. 1053–1061, 2006.
- [17] S. Chung, “A phase tracking system for three phase utility interface inverters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 15, no. 3, pp. 431–438, 2000.
- [18] A. Timbus, M. Liserre, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, “Synchronization methods for three phase distributed power generation systems. An overview and evaluation,” in *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, vol. 36, p. 2474, 2005.
- [19] F. Gardner, *Phaselock techniques*. Wiley-Blackwell, 2005.
- [20] J. Svensson, *Grid-Connected Voltage Source Converter*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, 1998.
- [21] H. Kim, S. Lee, and S. Sul, “Reference wave generation in dynamic voltage restorers by use of PQR power theory,” in *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE*, vol. 3, 2004.

- [22] S. Lee, H. Kim, S. Sul, and F. Blaabjerg, “A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 814–827, 2004.
- [23] G. Saccomando and J. Svensson, “Transient operation of grid-connected voltage source converter under unbalanced voltage conditions,” in *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*, vol. 4.
- [24] S. Chung, “Phase-locked loop for grid-connected three-phase power conversion systems,” *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 147, no. 3, pp. 213–219, 2000.
- [25] P. Krause and S. Wasynczuk, O. Sudhoff, *Analysis of electric machinery and drive systems*. IEEE press, 2002.
- [26] J. Norton, “An introduction to identification,” 2009.