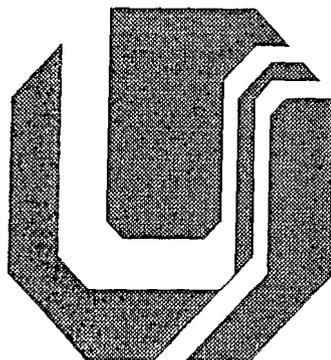


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

1991  
5213  
023/02  
1401/1998



**ANÁLISE DE UNIDADES UPFC SOB O ENFOQUE DA**  
**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia por **Silmário Batista dos Santos**, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em engenharia Elétrica; aprovada em 26/02/1998 pela seguinte banca examinadora:

José Carlos de Oliveira, PhD (UFU) - Orientador

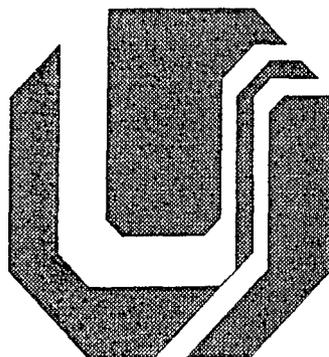
José Wilson Resende, PhD (UFU) - Co-Orientador

Luis Carlos Origa de Oliveira, Dr. (UNESP)

Antônio Carlos Delaiba, Dr. (UFU)

Uberlândia, 26 de Fevereiro de 1998

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**ANÁLISE DE UNIDADES UPFC SOB O ENFOQUE DA**  
**QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA**

**DIRBI/UFU**



1000186959

**Silmário Batista dos Santos**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em engenharia Elétrica.

---

José Carlos de Oliveira  
Orientador

---

Darizon Alves de Andrade  
Coordenador da Pós-Graduação

À minha esposa e meus filhos,  
pela compreensão e carinho, e  
em especial aos meus pais, que  
me proporcionaram os estudos.

## AGRADECIMENTOS

Ao professor PhD. **José Carlos de Oliveira** meu mais profundo agradecimento, pela confiança depositada, amizade, paciência, compreensão às minhas limitações e orientação segura, que fez com que metas fossem atingidas e este trabalho realizado.

Ao professor PhD. **José Wilson Resende**, pelas constantes sugestões e apoio no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao amigo **Marcelo Fandi**, mestrando em engenharia elétrica, pelo companheirismo e inestimável auxílio na elaboração deste trabalho.

Aos amigos **Aguinaldo de Marchi Lopes**, **Kleiber David Rodrigues**, **Olívio Carlos Nascimento Souto**, **Sérgio Ricardo de Jesus Oliveira**, **Alfen F. S. Junior**, mestres em engenharia elétrica, e **Anderson L. A. Vilaça**, mestrando em engenharia elétrica, e também ao professor Dr. **Antônio Carlos Delaiba**, pelos esclarecimentos e prestatividade durante a realização deste trabalho.

Aos amigos da pós-graduação e funcionários da UFU, pelas valiosas sugestões, contribuições e atenção despendidas.

A Deus pela minha existência.

## SUMÁRIO

• CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL	001
• CAPÍTULO II – TECNOLOGIA DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS – FACTS	
2.1 – Considerações Iniciais	004
2.2 – “Flexible AC Transmission Systems – FACTS”	005
2.2.1 – Exemplo Simplificado da Aplicação dos FACTS	006
2.3 – Controle de Fluxo de Potência através dos FACTS	011
2.3.1 – Compensador “Shunt” Ideal	012
2.3.2 – Compensador Série Ideal	015
2.3.3 – Controlador de Ângulo de Fase Ideal	018
2.4 – Equipamentos Aplicados aos FACTS	021
2.4.1 – Reator Controlado a Tiristores (RCT)	021
2.4.2 – Compensador Estático de Reativos (SVC)	024
2.4.3 – Capacitor Chaveado a Tiristores ( CCT)	024
2.4.4 – Compensador Síncrono	027
2.4.5 – Reator a Núcleo Saturado	027
2.4.6 – Disjuntor Dinâmico	029
2.4.7 – Capacitor Série Controlado a Tiristores (TCSC)	030
2.4.8 – Capacitor Série Chaveado a Tiristores (TSSC)	031
2.4.9 – Defasadores (“Phase-Shifters”)	031
2.5 – Considerações Finais	033

•	CAPÍTULO III – UNIDADES “UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER – UPFC” APLICADAS AOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS - FACTS	
	3.1 – Considerações Iniciais	035
	3.2 – Conceção Básica do UPFC	036
	3.3 – Características Gerais de Operação do UPFC	037
	3.3.1 – Operação do Conversor “Shunt” do UPFC	043
	3.3.2 – Operação do Conversor Série do UPFC	048
	(a) – Aplicação do Conversor Série ao Controle da Magnitude da tensão	050
	(b) – Aplicação do Conversor Série ao Controle Combinado da Magnitude da Tensão e da Compensação Série	051
	(c) – Aplicação do Conversor Série ao Controle Combinado da Magnitude da Tensão e Ângulo de Fase	052
	(d) – Aplicação do Conversor Série ao Controle Combinado da Magnitude da Tensão, Compensação Série e Ângulo de Fase	054
	3.3.3 – Aspectos Gerais a Respeito do Sistema de Controle do UPFC	055
	3.4 – Operação do UPFC como Controlador Generalizado	058
	3.5 – Considerações Finais	062

•	CAPÍTULO IV – ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UNIDADES UPFC SOB O ENFOQUE DOS EFEITOS NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	
	4.1 – Considerações Iniciais	063
	4.2 – O <i>Software</i> “Saber”	064
	4.3 – Modelagem do Sistema	065
	4.3.1 – <i>Template</i> Unidade de Potência do Conversor	066
	4.3.2 – <i>Template</i> Unidade de Controle	068
	4.4 – Casos Estudados	073
	4.4.1 – Caso 1 – Sistema Básico	074
	4.4.2 – Caso 2 – Sistema com a Presença do UPFC	077
	4.4.3 – Caso 3 – Sistema com UPFC Atuando Diante de um Afundamento de Tensão	082
	4.4.4 – Caso 4 – Sistema com UPFC Atuando Diante de uma Elevação de Tensão	088
	4.4.5 – Caso 5 – Simulação da Operação do UPFC diante de um Sistema com Suprimento Distorcido e Afundamento Temporário de Tensão	094
	4.4.6 – Caso 6 – Simulação da Operação do UPFC diante de um Sistema com Desequilíbrio de Tensão	099
	4.5 – Considerações Finais	103
•	CAPÍTULO V – CONCLUSÕES GERAIS	105
•	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

## RESUMO

Os sistemas de energia elétrica, tem experimentado, nos tempos atuais, problemas com relação ao carregamento das linhas de transmissão, devido à crescente demanda do consumo. Neste particular, os FACTS tem surgido como uma alternativa de grande potencial. Associado a estes fatores, um equipamento concebido recentemente, denominado “UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER-UPFC” tem sido apontado como um dos dispositivos mais promissores para utilização nos FACTS. Em face do exposto, e levando-se em consideração os aspectos relacionados com o princípio de funcionamento do UPFC, surge esta dissertação de mestrado, a qual, dentre outros propósitos, apresenta e discute resultados de investigações computacionais conduzidas com vistas à operação deste equipamento sob o enfoque da “QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA”.

## ABSTRACT

Nowadays, due to the increase in power consumption, the electrical systems have experimented different problems related to the transmission system operation. In order to provide means to improve most of them, several proposals have been suggested by the literature and the well known FACTS technology has emerged as quite a promising one. Focusing in this direction, a new device known as UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER-UPFC appears to be one of the most attractive solution for different operational problems. Due to lack of knowledge concerning this device, this dissertation goes towards the physical principles for the UPFC, as well as the corresponding steady state computational simulation to analyse the equipment operation as far as Power Quality is concerned.

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO GERAL

Os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil, tem operado atualmente, muito próximos de seus limites de carregamento. Este fato é decorrente da crescente demanda de energia elétrica imposta aos sistemas e da falta de investimentos na construção de novas linhas. Além destes aspectos, vale a pena destacar que o emprego cada vez maior de equipamentos sofisticados, com operação e controle baseados na eletrônica de potência, tem obrigado os fornecedores de energia elétrica a manter um alto padrão de qualidade do suprimento energético.

Reconhecendo-se este quadro, emergiram na década de 80 as primeiras publicações a respeito dos “FACTS”, ou “**Sistemas de Transmissão CA Flexíveis**”, cuja finalidade é proporcionar alternativas de transporte de energia elétrica pelos sistemas de potência em operação, melhorando assim, dentre outros fatores, a confiabilidade dos sistemas. Com base nesta evolução, diversos trabalhos contribuíram para o desenvolvimento de um moderno equipamento aplicável aos FACTS, denominado “**Unified Power Flow Controller - UPFC**”. Este equipamento possui, inerentemente, as características dos compensadores Série, “Shunt” e Defasadores, simultaneamente.

A maioria dos equipamentos aplicados aos FACTS, funcionam com base no princípio da comutação forçada de semicondutores [1]. Diversas concepções de dispositivos, com possibilidades de utilização nos sistemas de transmissão flexíveis, são brevemente comentadas em [2], assim como as vantagens de se empregar esta filosofia de transmissão de energia elétrica. Os

---

conceitos básicos dos compensadores Série, “Shunt” e Defasadores, empregados nesta nova concepção de transmissão de energia elétrica, são discutidos em [3]. Simulações são apresentadas em [4], envolvendo alguns tipos de compensadores, no sentido de melhorar a estabilidade e também controlar o fluxo de potência de um sistema elétrico fictício.

Em função das unidades UPFC terem sido concebidas recentemente, ainda pouco se divulgou a seu respeito. No âmbito internacional, algumas publicações, muito superficialmente, se dedicam a detalhar o equipamento. No Brasil, praticamente nada foi encontrado. As referências [5] e [6] ilustram os princípios básicos de operação do UPFC, assim como realizam comparações deste equipamento com relação a outros tipos de compensadores. As referências [7-9], dedicam-se a estudos como dimensionamento, modelagem para estudos estáticos e dinâmicos, relacionados ao dispositivo em questão, enquanto que a referência [10], destaca as limitações operacionais deste equipamento.

Dentro deste contexto, surge este trabalho, com o objetivo de verificar os impactos na Qualidade da Energia Elétrica, oriundos da operação de unidades UPFC nos sistemas de potência. Diante dessa proposta, esta dissertação foi elaborada obedecendo a seguinte estrutura:

- **Capítulo II - Sistemas de Transmissão CA Flexíveis - “FACTS”**

Este capítulo é dedicado a apresentar uma síntese a respeito da teoria dos FACTS. Neste sentido, inicialmente são explanados os princípios básicos de funcionamento dos sistemas de transmissão CA flexíveis. Subsequentemente, são relacionados e discutidos alguns equipamentos aplicados aos FACTS, como o Reator Controlado a Tiristores, o Capacitor Série Controlado a tiristores, o controlador de ângulo de fase, entre outros.

---

- **Capítulo III - Unidades “Unified Power Flow Controller - UPFC” aplicadas aos Sistemas de transmissão CA Flexíveis - FACTS**

O UPFC é uma inovação tecnológica da engenharia elétrica. Sendo assim, a teoria geral a respeito deste equipamento ainda é razoavelmente desconhecida. Neste particular, o capítulo III é dedicado a fazer uma análise detalhada a respeito destes dispositivos, sendo discutido, inicialmente, o seu princípio básico de funcionamento. Na sequência, as diversas características de operação por ele oferecidas são também discutidas.

- **Capítulo IV - Análise Computacional dos Efeitos de Unidades UPFC na Qualidade da Energia Elétrica**

Considerando-se a importância dos estudos computacionais nas análises da qualidade da energia, este capítulo apresenta resultados de simulações conduzidas em um sistema elétrico hipotético, com e sem a presença de um UPFC. A plataforma computacional utilizada é o *software* “SABER”. Suas características básicas são também apresentadas.

- **Capítulo V - Conclusões**

Finalmente, este capítulo apresenta, de uma maneira sucinta e generalizada, um panorama global do trabalho desenvolvido, sendo tecidos comentários a respeito de cada capítulo. Além disso, são ressaltadas questões associadas às contribuições efetivas deste trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

---

## CAPÍTULO II

# TECNOLOGIA DOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS - FACTS

### 2.1 Considerações Iniciais

Atualmente, os investimentos em geração e transmissão de energia elétrica têm sido bastante sacrificados e, não obstante, tem-se constatado um gradativo crescimento da demanda de energia elétrica, devido à implantação de novos parques industriais e aumento da utilização de dispositivos eletroeletrônicos domésticos.

Buscando soluções alternativas para os problemas de suprimento elétrico, algumas pesquisas tem sido direcionadas a fim de tornar os sistemas de transmissão de energia elétrica mais aproveitáveis, e portanto, postergando a necessidade de investimentos no setor energético. Neste sentido, vem sendo aplicada uma proposta denominada "Flexible AC Transmission Systems - FACTS" [2], que é uma filosofia de transporte de energia elétrica por Sistemas de Transmissão CA Flexíveis. Esta estratégia é explanada, em linhas gerais, no transcorrer deste capítulo, sendo também apresentados alguns equipamentos necessários à implantação desta nova concepção de transmissão de energia elétrica.

## 2.2 "Flexible AC Transmission Systems - FACTS"

A implantação a curto e médio prazos de novas unidades geradoras para atender a crescente demanda de energia é bastante inviável, devido aos longos períodos de tempo requeridos para construção destas. Somado a isto, existem as restrições impostas pelos órgãos de preservação do meio ambiente quanto aos impactos provocados à natureza, oriundos da construção destas usinas geradoras. Estes fatores, aliados ao elevado custo de cada kVA gerado, girando atualmente em torno de 2000 a 4000 US\$, tem impulsionado pesquisas na direção dos FACTS. Esta solução apresenta vantagens do ponto de vista econômico, não provoca impacto ambiental e não requer grande demora em implantação. Além disso, cada kVA disponibilizado pelos FACTS fica em torno de 100 a 200 US\$ [2].

Desde 1988, tem sido difundidas idéias a respeito dos FACTS [11] [12]. Esta metodologia tem como principal objetivo, a otimização dos sistemas de transmissão CA já existentes e direciona-se, fundamentalmente, no sentido de criar possibilidades de interferência e controle das grandezas relacionadas ao fluxo de potência por trechos de linhas de transmissão, culminando em ajustes desejáveis dos pontos de operação dos sistemas interligados de energia elétrica.

O desenvolvimento dos FACTS tem sido garantido pelo avanço tecnológico da eletrônica de potência, a qual se faz presente em praticamente todos os equipamentos aplicados à tal filosofia de transmissão. Além das tecnologias classicamente disponíveis, atualmente pode-se encontrar "GTO's" com nível de isolamento em 6 kV e capacidade de condução de corrente de 4 kA [13], permitindo o desenvolvimento de equipamentos eletrônicos para sistemas de potência da ordem de 24 MVA. Estas perspectivas, abrem novos horizontes

---

no que tange ao desenvolvimento de equipamentos a serem aplicados aos FACTS.

Como será verificado no prosseguimento deste capítulo, a aplicação dos FACTS disponibiliza maior capacidade de transmissão, tornando possível o transporte de maiores blocos de energia das unidades geradoras até os centros consumidores. Assim, na sequência, apresentar-se-á um tratamento didático para melhor elucidação do tema FACTS.

### 2.2.1 Exemplo Simplificado da Aplicação dos FACTS

O fluxo de potência pelas linhas de transmissão, nos sistemas interligados, é definido pelas leis de "KIRCHOFF". Então, por vezes, pode ocorrer uma indesejável circulação de blocos de potência por caminhos desnecessários, ocasionando sobrecarga em alguns trechos do sistema e, sub-utilização de outros. Assim, o controle de fluxo de potência pode trazer benefícios operacionais aos sistemas elétricos.

A figura (2.1) apresenta um sistema genérico com duas barras "i-j" e uma linha interconectando-as.

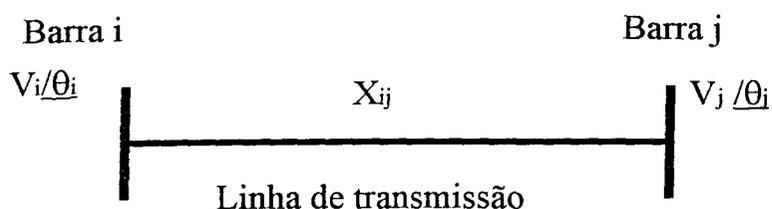


Figura 2.1 - Representação de duas barras interligadas por uma linha de transmissão "i-j"

Desprezando-se a resistência ôhmica, as condições operacionais dessa linha de transmissão "i-j" podem ser definidas de acordo com a equação (2.1).

$$P_{ij} = \frac{V_i V_j}{X_{ij}} \text{sen } \delta \quad (2.1)$$

onde:

$P_{ij}$  - Potência que flui da barra "i" para a barra "j"

$V_i$  - tensão na barra "i"

$V_j$  - tensão na barra "j"

$\theta_i$  - ângulo de fase da tensão  $V_i$

$\theta_j$  - ângulo de fase da tensão  $V_j$

$\delta$  - ângulo de carga ( $\theta_i - \theta_j$ )

$X_{ij}$  - Impedância do trecho de linha "ij"

Da expressão (2.1) verifica-se as seguintes possibilidades para a alteração da potência:

- Ângulo de transmissão
- Magnitude de tensão
- Impedância do sistema

Os FACTS caracterizam-se exatamente pela sua intervenção nestas grandezas citadas.

O comportamento da potência elétrica que flui da barra "i" para a barra "j" em função do ângulo de carga  $\delta$ , é representado na figura (2.2).

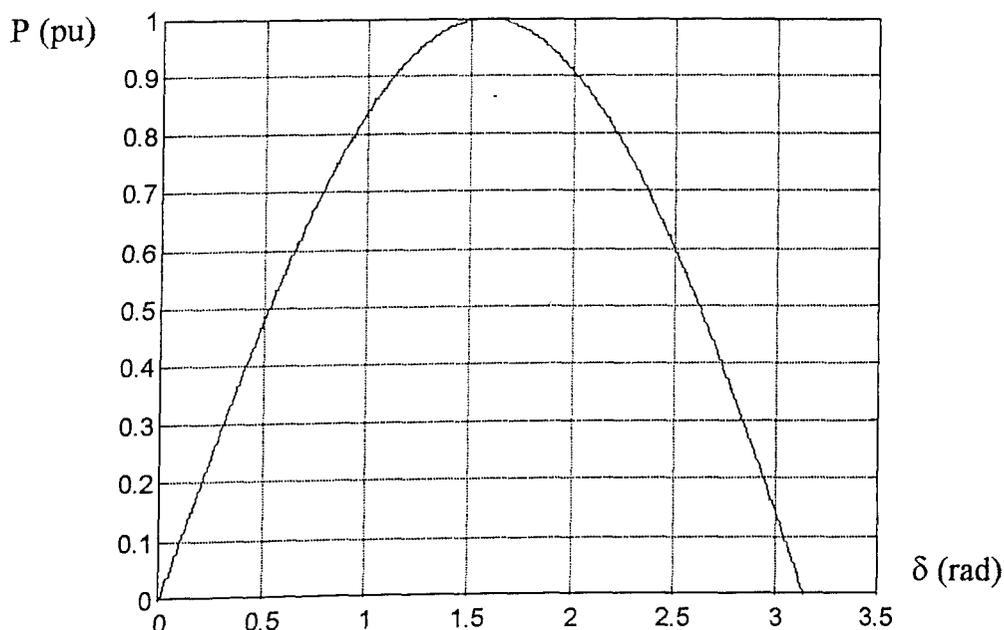


Figura 2.2 - Comportamento da Potência Ativa em função da Variação do Ângulo de Carga da Linha de transmissão "i-j"

Observa-se, na figura, que a máxima potência está associada ao ângulo de carga de  $90^\circ$ . O carregamento da linha provocando ângulos de carga maiores que  $90^\circ$ , causa sérios problemas, como a perda de estabilidade da transmissão.

Um exemplo de um sistema em anel contendo duas barras geradoras e uma barra de carga, extraído da referência [2], é apresentado na figura (2.3). As potências dos geradores, da carga e das linhas também são apresentadas, sendo também indicadas as potências nominais de cada linha. A distribuição de potências ilustrada é determinada pelas leis de "KIRCHOFF". Desta forma, nota-se que os trechos (1-3) e (1-2) do sistema estão sub-utilizados, comparando-se suas capacidades nominais aos valores de potência fluindo por eles. Por outro lado, o trecho (2-3) tem capacidade nominal de 1250 MW e a potência estabelecida é de 1600 MW, caracterizando uma sobrecarga.

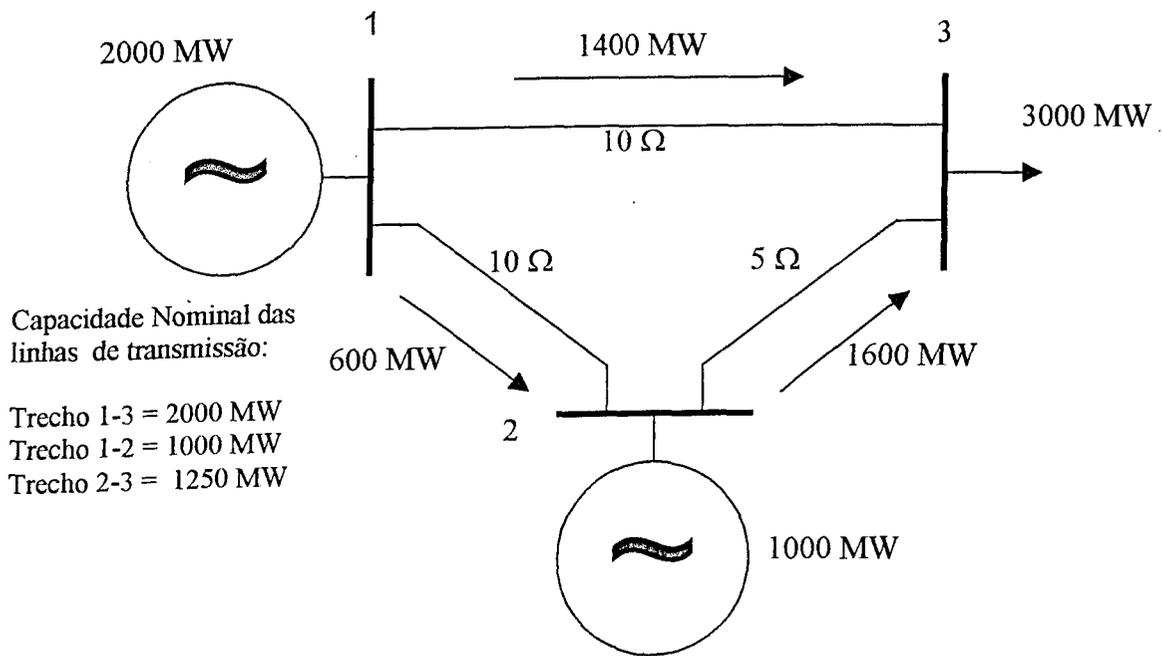


Figura 2.3 - Representação de um sistema de potência contendo dois geradores e uma barra de carga

A eficácia dos FACTS pode ser ilustrada através da figura (2.4), onde é apresentado um capacitor em série ao trecho (1-3) de impedância  $-j5 \Omega$ , caracterizando uma diferenciação da figura (2.3), o que resulta numa impedância total deste ramo de  $5 \Omega$ . Em consequência desta modificação, uma nova distribuição de fluxo se apresenta. O trecho (1-3) passa a transportar uma maior quantidade de potência, porém sem ultrapassar seu carregamento nominal. O fluxo de potência pelo trecho (1-2) sofre uma redução e, finalmente, o trecho (2-3) apresenta um carregamento igual ao nominal.

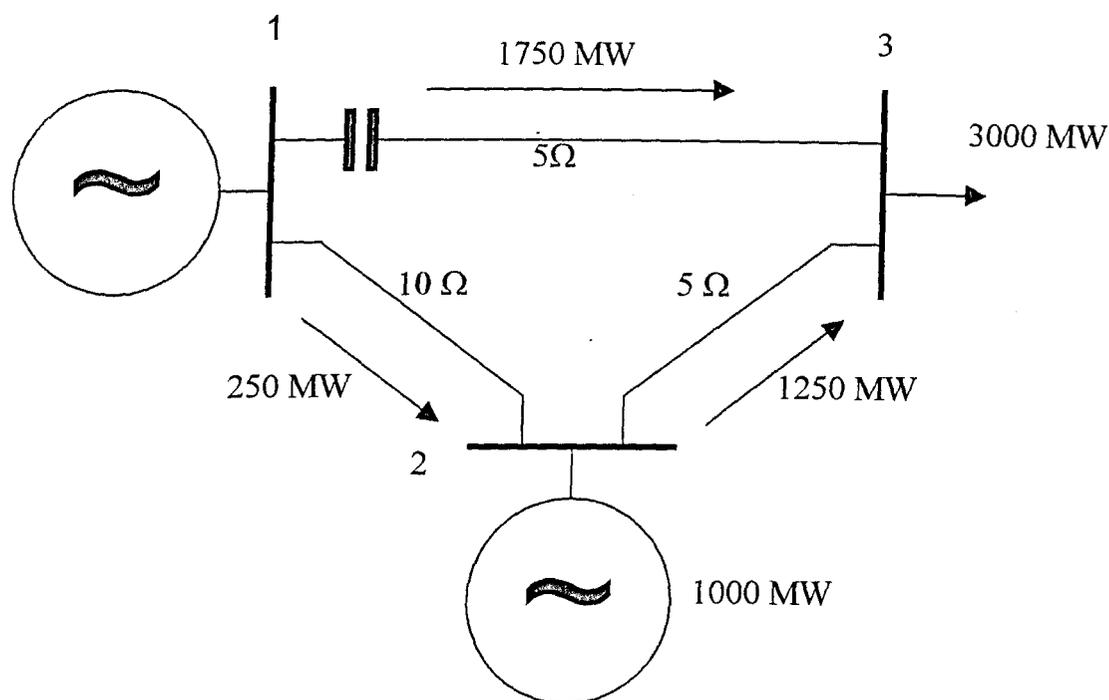


Figura 2.4 - Representação de um Sistema de Potência contendo dois geradores, uma barra de carga e um capacitor série no trecho 1-3.

Esta exemplificação simplificada, tem a pretensão apenas de ilustrar a fundamentação básica dos FACTS, sem, no entanto, trazer detalhes mais profundos a respeito do tema. Além disso, não é tão somente através da inserção de um capacitor em série que se define FACTS. Outras formas de ação também produzem efeitos similares ao apresentado na explanação, como poderá ser verificado mais adiante.

Após tais considerações, pode ser dito então, que dentre outras características, esta facilidade de alterar a operação dos sistemas é que tem tornado os FACTS atrativos. Desta forma, uma linha de conduta direcionada a tal filosofia, pode surtir efeitos positivos na operação dos sistemas de transmissão e até mesmo na distribuição de energia elétrica.

Com a utilização dos dispositivos voltados à filosofia dos FACTS, de acordo com a referência [2], os sistemas interligados podem ser otimizados, culminando em:

- Maior controle do fluxo de potência.
- Carregamento seguro das linhas de transmissão, que podem atingir níveis próximos de seus limites térmicos de operação.
- Maior habilidade em transferir potência entre redes interligadas, podendo então diminuir a margem de reserva de geração, que é tipicamente em torno de 18%, passando a 15% ou menos.
- Prevenção contra o efeito "cascata", haja visto que com um controle mais apurado do fluxo de potência, diante de alguma necessidade de atuação da operação para sanar algum problema, tal providência pode ser tomada de maneira mais eficiente.
- Amortecimento das oscilações dos sistemas de potência, que podem causar danos a equipamentos e/ou limitar a capacidade de transmissão do sistema.

### 2.3 Controle do Fluxo de Potência através dos FACTS

Como apresentado anteriormente, de acordo com a equação (2.1), os FACTS atuam no sentido de controlar as seguintes grandezas relacionadas ao fluxo de potência em linhas de transmissão:

- (a) Impedância equivalente de trechos de linhas de transmissão.
- (b) Magnitude e ângulo de fase das tensões nas barras de trechos de linhas de transmissão.

Com relação ao caso (a), o controle da impedância é realizado através de dispositivos para compensação série e/ou "shunt" das linhas de transmissão. No

caso (b), o controle da magnitude e ângulo de fase das tensões é realizado fundamentalmente através da utilização de controladores de ângulo de fase. Assim, a seguir, será apresentada uma síntese da operação ideal desses tipos de compensação, extraída da referência [3], e logo após, serão apresentados alguns equipamentos utilizados pelos FACTS.

### 2.3.1 Compensador "Shunt" Ideal

A fim de discutir o princípio básico de operação dos compensadores "shunt", seja o sistema CA apresentado na figura (2.5), composto por duas máquinas interligadas por um trecho de linha de transmissão. Notar que as perdas são desprezadas.

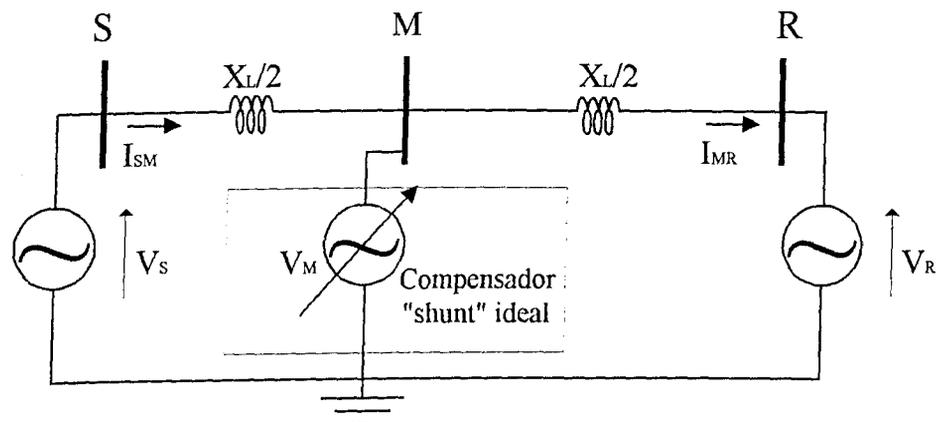


Figura 2.5 - Sistema elétrico com compensador "shunt" ideal no meio da linha.

Na figura, há uma fonte de tensão controlada, conectada exatamente ao meio da linha de transmissão, com o objetivo de controlar o fluxo de potência. Para essa análise, deve-se assumir que as tensões  $V_S$  e  $V_R$  são fixas, possuem a mesma magnitude e estão defasadas por um ângulo de carga genérico " $\delta$ ".

Observando-se o sistema apresentado na figura (2.5), é possível traçar o diagrama fasorial na figura (2.6), onde a tensão  $V_M$  tem a mesma magnitude das tensões  $V_S$  e  $V_R$ .

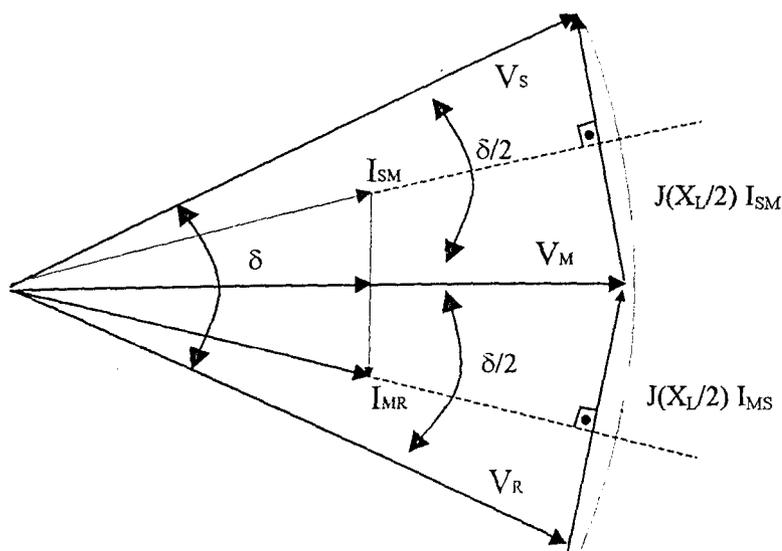


Figura 2.6 - Diagrama fasorial do sistema com compensação "shunt"

Neste caso, sendo  $V$  a tensão definida anteriormente,  $\delta$  a abertura angular entre as tensões  $V_S$  e  $V_R$ , e  $X_L$  a reatância total da linha, a potência transferida da barra "S" para a barra "R" é dada por:

$$P_{sr} = 2 \frac{V^2}{X_L} \text{sen}\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.2)$$

Considerando-se as características apresentadas, é possível concluir que, quando a diferença angular entre  $V_S$  e  $V_M$  é " $\delta/2$ ", o fasor corrente de linha está em quadratura com a queda de tensão na reatância de cada semi-trecho de linha [3]. Em consequência disso, não existe potência ativa fluindo através da fonte "shunt", ou seja, somente potência reativa flui através da fonte "shunt"  $V_M$ .

Se não houvesse compensação, a potência seria dada pela expressão (2.1) apresentada anteriormente, e ilustrada na curva "1" da figura (2.7). Por outro lado, o comportamento da potência com a presença de compensação "shunt" mostrada na figura (2.5), está representado na curva "2" da mesma figura.

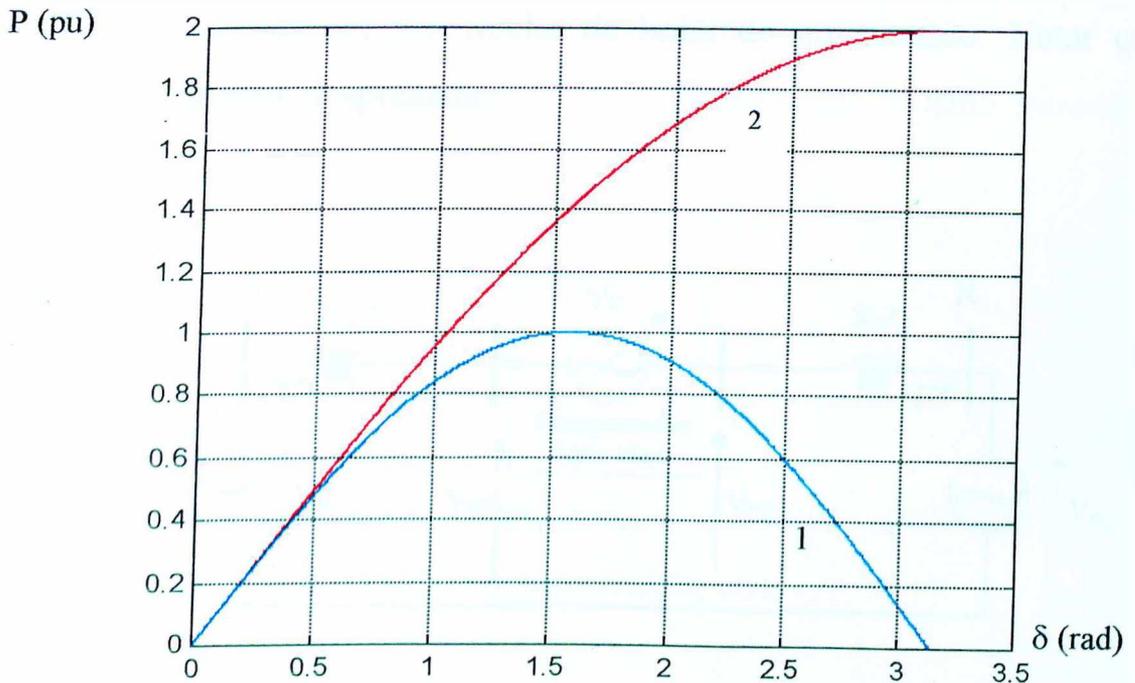


Figura 2.7 - Curvas do comportamento da potência em função do ângulo de carga (1) sem compensação e (2) com Compensação "shunt"

Observando-se o gráfico, é possível verificar que, com a presença da compensação, há um incremento na estabilidade do sistema, bem como um ganho na máxima potência transmitida.

Dentro das considerações apresentadas, fica claro que a compensação "shunt" reativa aumenta a capacidade de transferência da potência da linha.

### 2.3.2 Compensador Série Ideal

Com a finalidade de discutir o princípio básico de operação dos compensadores série, seja o sistema CA da figura (2.8), composto por duas máquinas interligadas por um trecho de linha de transmissão. Notar que as perdas são novamente desprezadas.

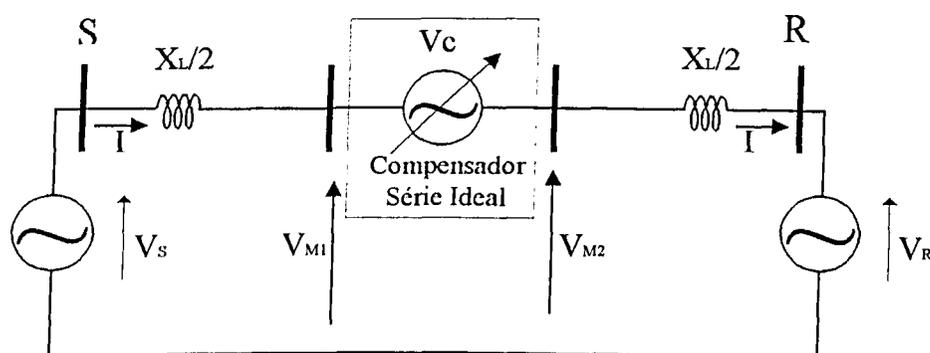


Figura 2.8 - Compensador Série Ideal conectado ao meio da linha de transmissão

Na figura, há um compensador série ideal, conectado exatamente ao meio da linha de transmissão, representado pela fonte de tensão  $V_C$ , com o objetivo de controlar a reatância equivalente da linha. Para essa análise, deve-se assumir que as tensões  $V_S$  e  $V_R$  são fixas, possuem a mesma magnitude e estão defasadas por um ângulo de carga genérico " $\delta$ ".

Se a tensão  $V_C$  está em quadratura com relação à corrente de linha, o compensador série não absorve nem fornece potência ativa, ou seja, nos terminais da fonte  $V_C$ , há somente potência reativa [3]. Isto significa que a fonte de tensão  $V_C$ , neste caso, pode ser substituída por uma impedância equivalente, capacitiva ou indutiva.

Para o caso apresentado, a potência através da linha de transmissão é dada por [3]:

$$P_s = \frac{V^2}{X_L(1-s)} \text{sen } \delta \quad (2.3)$$

onde, "s" é a taxa de compensação imposta ao sistema através dos compensadores série, definida por:

$$s = \frac{X_c}{X_L}, \quad 0 \leq s \leq 1 \quad (2.4)$$

A equação (2.3) permite concluir que, a potência transferida pode ser aumentada consideravelmente pela compensação série.

Analisando o circuito da figura (2.8), com compensação série, pode-se traçar o diagrama fasorial ilustrado na figura (2.9).

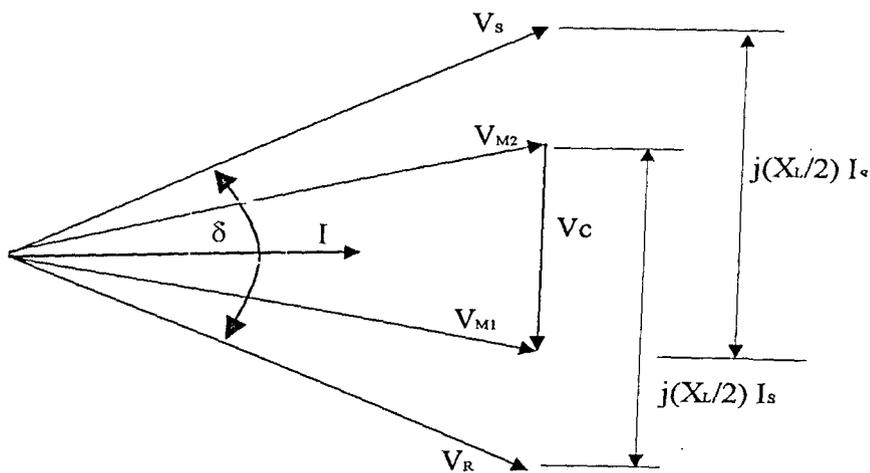


Figura 2.9 - Diagrama fasorial do sistema com compensação série capacitiva

Para a situação ilustrada no diagrama, assume-se que a fonte de tensão  $V_C$  está realizando compensação capacitiva. Nestas condições, a corrente de linha está adiantada de  $90^\circ$  da tensão  $V_C$ .

O comportamento da potência em função do ângulo de carga " $\delta$ ", para o sistema com compensação série, está representado na figura (2.10), com a variação da taxa de compensação " $s$ ".

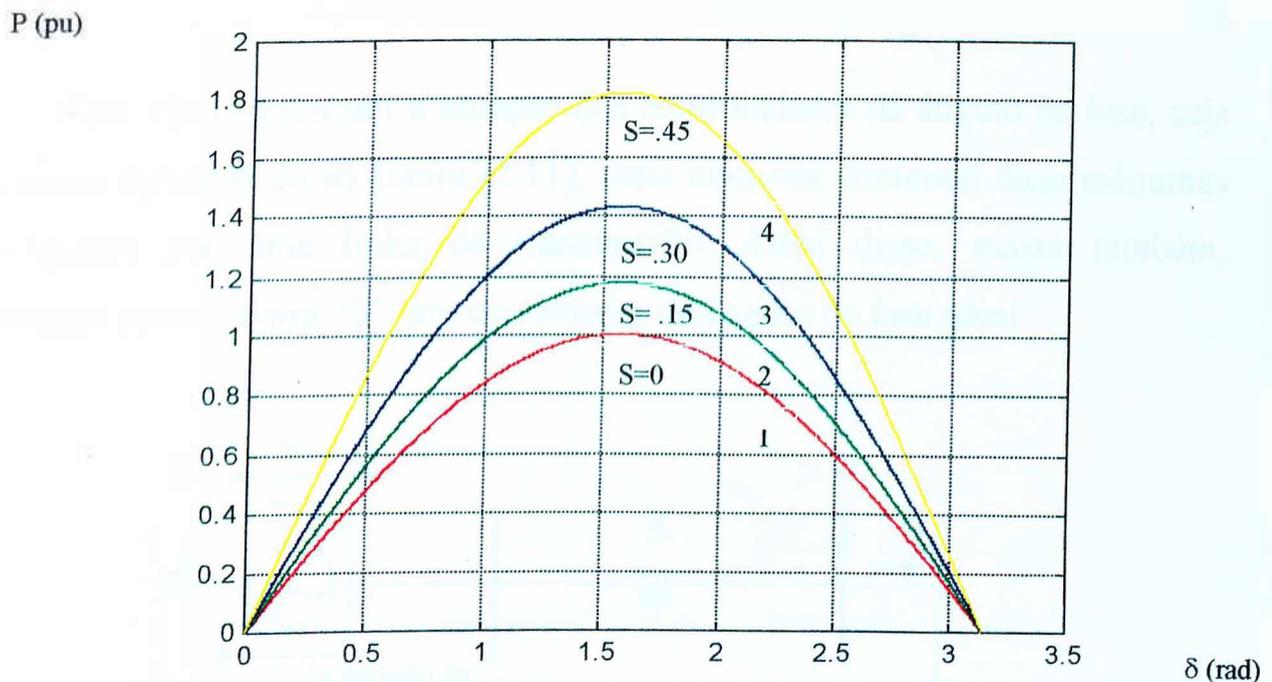


Figura 2.10 - Comportamento da potência em função do ângulo de carga (1) sem compensação e (2,3 e 4) com compensação série controlada

Observando-se a figura, verifica-se que, a potência máxima transmissível, está situada no ponto  $90^\circ$ . No entanto, quanto maior a taxa " $s$ " de compensação, maior o incremento na máxima potência transmitida pelo sistema. As curvas (2), (3) e (4) são, respectivamente, geradas a partir de aumentos da taxa de compensação " $s$ ".

### 2.3.3 Controlador de Ângulo de Fase Ideal

Conforme mencionado, outra forma de aplicação do conceito FACTS para o controle do fluxo de potência, consiste no emprego de equipamentos que atuem sobre as tensões terminais das linhas, alterando seus módulos e/ou suas defasagens angulares. Esse tipo de compensador, é um caso especial dentro da classe dos compensadores série.

Com vistas a discutir a atuação dos controladores de ângulo de fase, seja o sistema apresentado na figura (2.11), mais uma vez contendo duas máquinas interligadas por uma linha de transmissão. Além disso, existe também, conectado junto à barra "S", um controlador de ângulo de fase ideal.

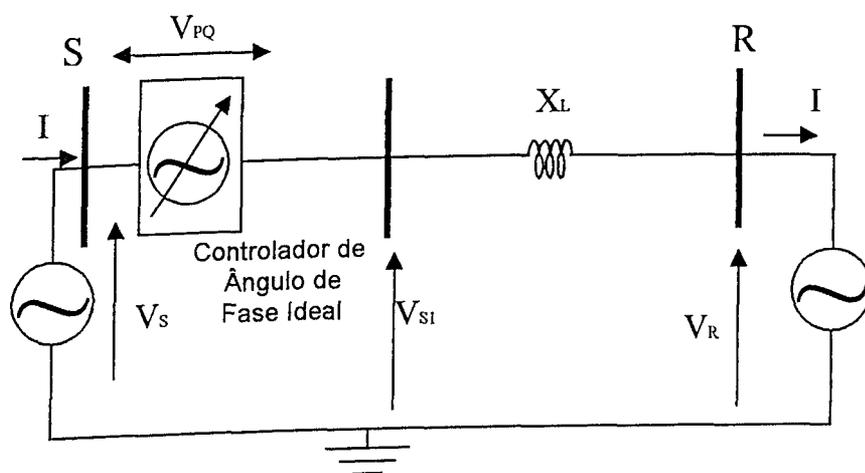


Figura 2.11 - Sistema elétrico contendo um Controlador de Ângulo de Fase Ideal

Esses compensadores controlam a diferença de fase entre as barras "S" e "R". A consequência disso, é o controle do fluxo de potência entre os dois sistemas. Com a presença de controladores de ângulo de fase em sistemas elétricos, o comportamento da potência através das linhas pode ser expresso por [3]:

$$P_L = \frac{V^2}{X_L} \text{sen}(\delta - \alpha) \quad (2.5)$$

onde,  $\alpha$  é o ângulo de controle de fase, produzido pelo dispositivo defasador, em função da tensão  $V_{pq}$ . Quanto mais próxima de  $90^\circ$  for mantida a diferença  $(\delta - \alpha)$ , através da atuação do controlador, maior é a potência transferida.

Com base no circuito da figura (2.11), pode-se traçar o diagrama fasorial apresentado na figura (2.12).

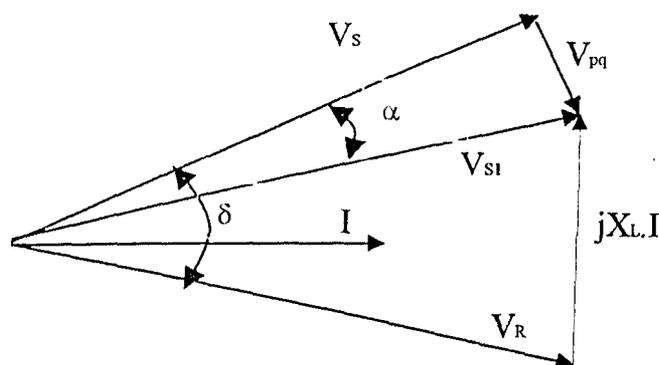


Figura 2.12 - Diagrama fasorial do sistema CA compensado por defasador

Observando-se o diagrama, verifica-se a presença do fasor  $V_{pq}$  produzido pelo controlador, que pode ser controlado em magnitude e ângulo de fase, com relação à corrente de linha  $I$ . Isso significa que o controlador pode suprir ou absorver potência ativa, assim como também gerar ou absorver potência reativa [3]. Nas condições descritas, pode-se concluir que o ângulo de carga, com a presença de defasadores, vale  $(\delta - \alpha)$ , e variando-se o ângulo  $\alpha$ , é possível controlar o fluxo de potência.

O comportamento da potência contra o ângulo de carga " $(\delta - \alpha)$ ", pode ser verificado através do gráfico da figura (2.13).

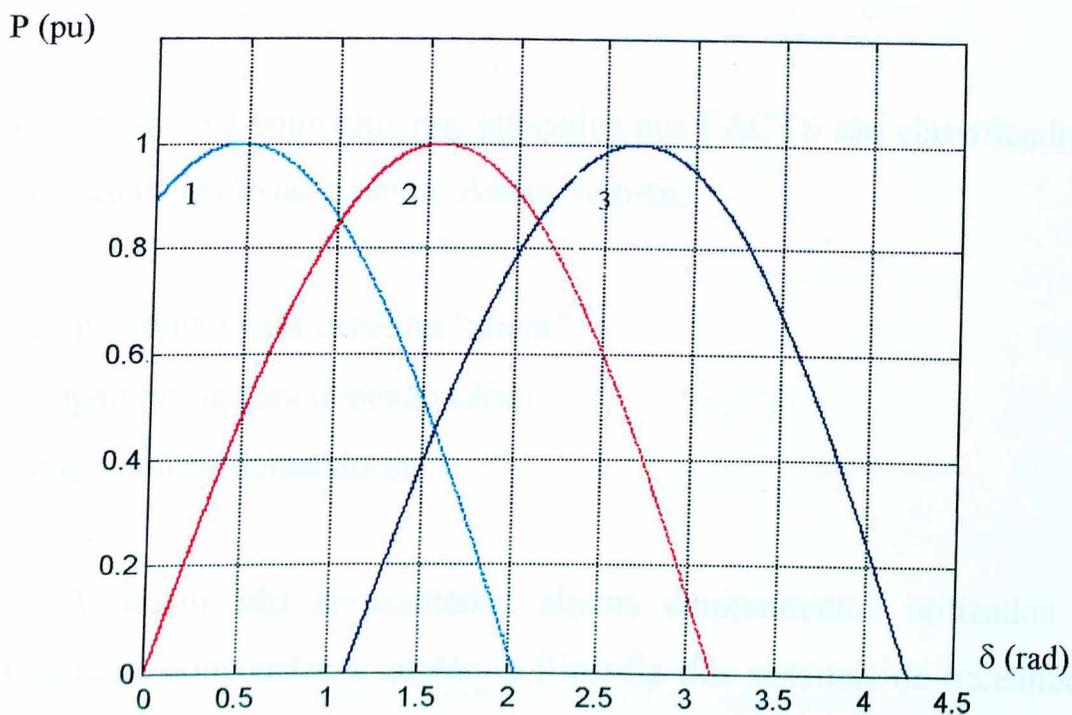


Figura 2.13 - Comportamento da potência em função do ângulo de carga com atuação do defasador

Com base na equação (2.5), a curva designada por (1), representa a potência para um valor qualquer de  $\alpha_{\text{máximo}}$ . A curva (2) ilustra o comportamento da potência para  $\alpha = 0$ , e a curva (3) mostra como se comporta a potência para um dado valor de  $\alpha_{\text{mínimo}}$ . Deste modo, observando-se a figura (2.13), é possível verificar que a curva gerada pela equação (2.5), pode ser deslocada, tanto para a direita quanto para a esquerda, no eixo horizontal, em função do ângulo  $\alpha$  ser definido para valores positivos ou negativos. Em consequência disso, nota-se que a estabilidade do sistema pode ser incrementada, tornando possível a operação do sistema com ângulo de carga bem próximo de  $90^\circ$ . No entanto, o ângulo  $\alpha$  não pode crescer demasiadamente, pois torna a potência do controlador muito elevada [14]. Admite-se então, que  $\alpha$  possa variar dentro de limites pré-determinados ( $\alpha_{\text{min}}$  e  $\alpha_{\text{máx}}$ ).

## 2.4 Equipamentos aplicados aos FACTS

Basicamente, os equipamentos aplicados aos FACTS são classificados de acordo com sua conexão ao sistema. Assim, tem-se:

- Equipamentos para conexão "shunt"
- Equipamentos para conexão série
- Equipamentos defasadores

A seguir são apresentados alguns equipamentos utilizados em sistemas elétricos, com vistas a adotar a filosofia dos sistemas de transmissão flexíveis.

### 2.4.1 Reator Controlado a Tiristores (RCT)

A figura (2.14) representa um sistema de potência, ao qual encontra-se conectado um Reator Controlado a Tiristores (RCT) [15]. Este equipamento é largamente conhecido e utilizado em conexão "shunt" nos sistemas elétricos, e a sua velocidade de resposta é um dos principais fatores a torná-lo atrativo do ponto de vista de utilização. Esta concepção de equipamento é anterior ao aparecimento do conceito dos FACTS.

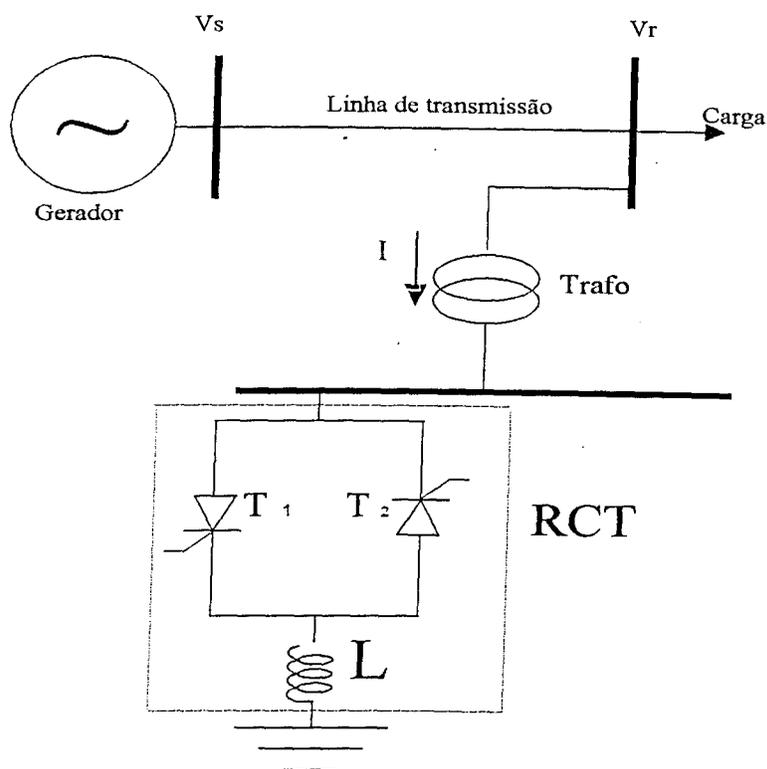


Figura 2.14 - Representação esquemática de um RCT conectado ao sistema de potência

A aplicação do RCT aos FACTS tem por objetivo controlar o perfil de tensão em uma determinada barra onde este está conectado, via absorção maior ou menor de reativos. Este equipamento consiste, basicamente, de reatores conectados em paralelo ao sistema. Os elementos de controle de cada unidade do RCT caracterizam-se por duas válvulas de tiristores, em anti-paralelo, representadas em série com o indutor "L". Cada válvula conduz meio ciclo da corrente elétrica "I" no equipamento. A absorção de reativos é controlada pelas válvulas, e consiste na passagem de maior ou menor quantidade da corrente pelo reator.

Os comportamentos da tensão e corrente no RCT estão ilustrados na figura (2.15). O ângulo  $\alpha$  representado na figura indica o instante de disparo dos tiristores. Tal ângulo é contado a partir de um valor nulo da tensão. O ângulo " $\alpha$ " está compreendido entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$  [14].

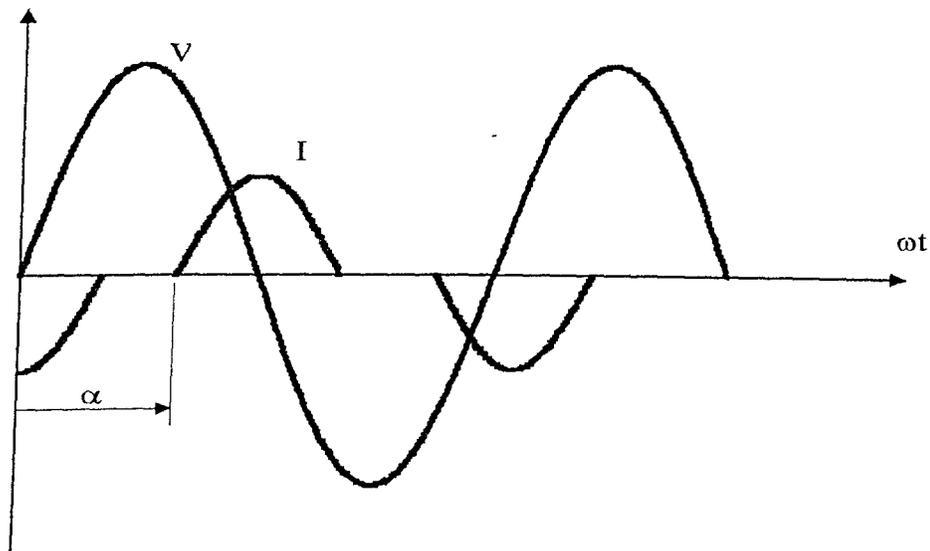


Figura 2.15 - Formas de onda da tensão e corrente no RCT

O valor eficaz da componente fundamental da corrente é dado por:

$$I = \sqrt{2} \frac{V}{X} \left( \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \right) \quad (2.6)$$

onde:

V - valor eficaz da tensão aplicada aos terminais do RCT;

X - reatância dada por  $\omega L$ ;

$\alpha$  - ângulo de disparo dos tiristores.

O valor mínimo de I é obtido para  $\alpha = 180^\circ$  e o máximo em  $\alpha = 90^\circ$ . Nesta última condição, a corrente é puramente senoidal.

É sabido que o conteúdo harmônico da corrente I é relativamente elevado. Assim, há a preocupação em minimizar o impacto desta poluição harmônica. Para tanto, utiliza-se esquemas de compensadores de 12 pulsos, além de filtros passivos [16].

## 2.4.2 Compensador Estático de Reativos (SVC)

Na figura (2.16), tem-se o denominado RCT e um banco de capacitores em paralelo ao grupo de reatores. Este banco de capacitores pode ser fixo ou variável e sua potência é definida em função da máxima potência reativa a ser suprida. O conjunto assim obtido, é conhecido por "Static VAR Compensator" ou "SVC" [17], e pode atuar fornecendo ou absorvendo reativos, dependendo da estratégia de controle adotada em função da necessidade do sistema. Esta é a diferença característica entre este equipamento e o RCT, que só atua consumindo reativos [15].

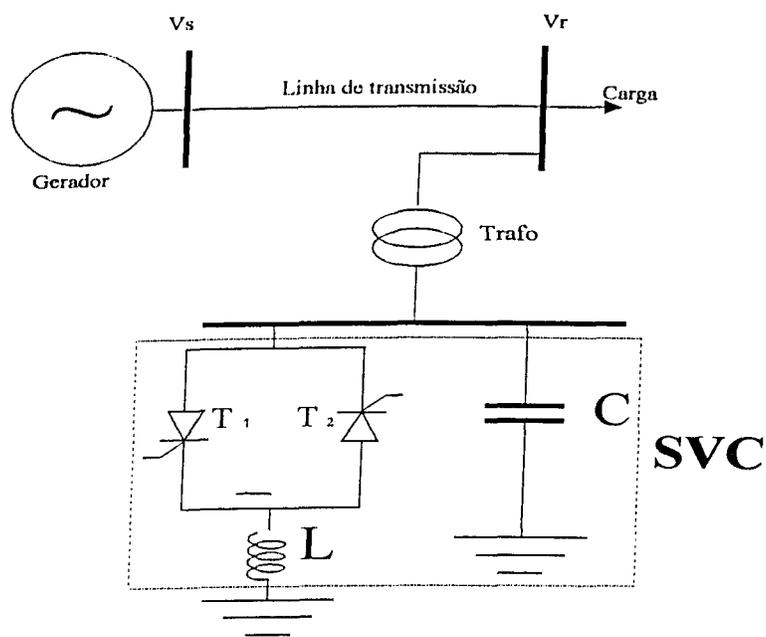


Figura 2.16 - Esquema representativo de um SVC conectado ao sistema de transmissão

## 2.4.3 Capacitor Chaveado a Tiristores (CCT)

Este equipamento está representado em conexão "shunt" na figura (2.17). De maneira idêntica ao RCT, há a presença de tiristores que são conectados em

anti-paralelo. A grande diferença operacional entre os tiristores deste arranjo com relação ao RCT, está no fato que não há controle de disparo para este caso. Os tiristores atuam apenas como chaves [14].

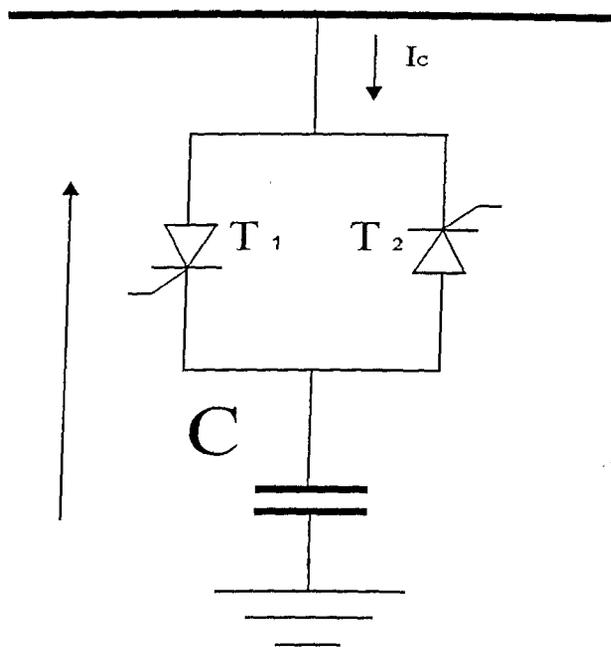


Figura 2.17 - Esquema representativo do Capacitor Chaveado a Tiristor

As formas de onda de tensão e corrente ideais neste equipamento estão ilustradas na figura (2.18). Os tiristores do CCT operam apenas em dois estados, bloqueados ou em condução total. Assim, só há circulação de corrente no equipamento caso os tiristores estejam em condução total, em caso contrário, não há circulação de corrente. O chaveamento do CCT é feito com tensão nula nos seus terminais (conceito "Zero Voltage Switching"), com a finalidade de evitar sobrecorrentes de chaveamento nos tiristores.

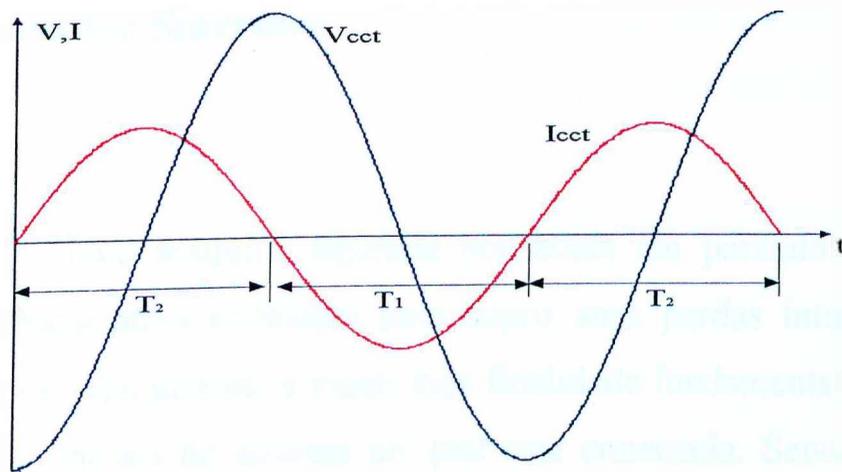


Figura 2.18 formas de onda típicas do Capacitor Chaveado a Tiristores

Do exposto, verifica-se que o CCT ou está inserido totalmente ao sistema ou está fora dele, ou seja, não há controle de capacitor e sim chaveamento deste. Quando se necessita de capacitores variáveis, uma alternativa é utilizar vários capacitores chaveados em paralelo, como ilustra a figura (2.19).

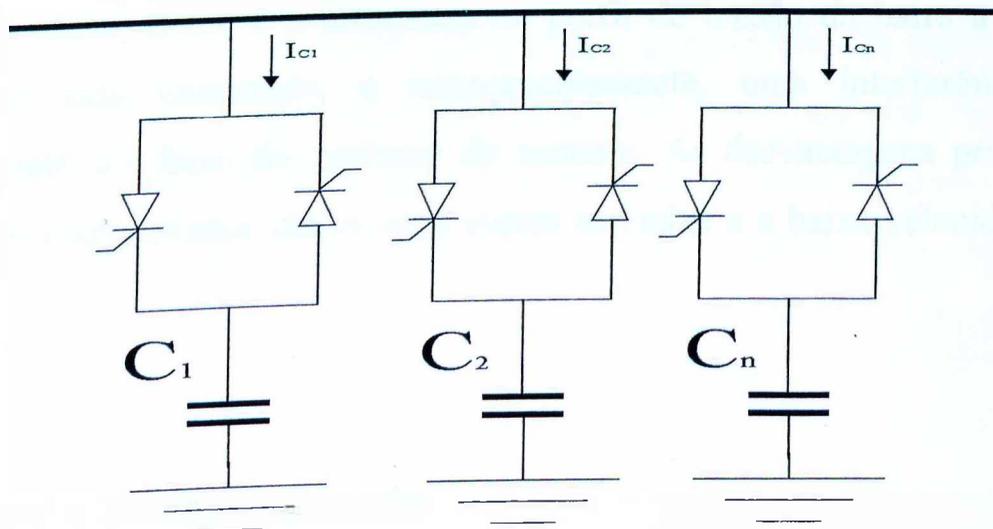


Figura 2.19 - Várias unidades CCT em paralelo

Esta solução consiste em se selecionar o valor da capacitância através do chaveamento de blocos de capacitores, de acordo com a necessidade do sistema.

## 2.4.4 Compensador Síncrono

Trata-se de uma máquina síncrona conectada em paralelo ao sistema, absorvendo potência ativa suficiente para suprir suas perdas internas (atrito, ventilação, etc), ou seja, girando a vazio, cuja finalidade fundamental é realizar a compensação de reativos no sistema ao qual está conectada. Sendo assim, na maioria dos casos onde a aplicação é somente com este fim, a máquina é desprovida de eixo para acoplamento mecânico.

Como pode ser verificado na teoria de máquinas elétricas, o compensador síncrono atua absorvendo uma corrente de linha que pode ser controlada em magnitude e ângulo de fase, dentro de uma determinada faixa de potência. O controle da característica da corrente absorvida pelo dispositivo se dá em função do grau de excitação do campo do rotor. Isso significa dizer que, a máquina pode atuar tanto como um capacitor quanto como um reator, controláveis [18][19]. O efeito disso, é a influência no perfil de tensão da barra à qual o equipamento está conectado, e conseqüentemente, uma interferência no comportamento do fluxo de potência do sistema. As desvantagens principais deste tipo de compensador são os seus custos elevados e a baixa velocidade de resposta.

## 2.4.5 Reator a Núcleo Saturado

Este equipamento é utilizado no sentido de manter a tensão o mais constante possível na barra à qual está conectado, e trata-se de um reator que opera na região de saturação do seu núcleo magnético . Assim, este tipo de

---

compensador atua somente absorvendo reativos, ou seja, sua contribuição é com vistas a evitar flutuações de tensão para valores acima do nominal [20].

Na figura (2.20), está ilustrada a curva característica de operação do reator a núcleo saturado.

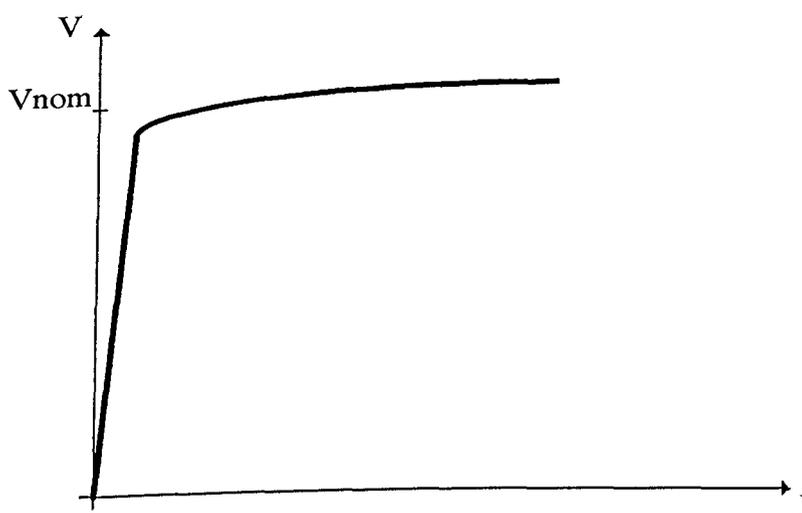


Figura 2.20 - Curva Característica de Operação do Reator a Núcleo Saturado

Analisando a figura, pode-se verificar que, para valores de tensão até o nominal, a corrente absorvida pelo compensador é muito pequena. Por outro lado, para valores de tensão a partir do nominal, a corrente passa a ser significativa, pronunciando assim, o efeito do reator ao sistema. Em condições balanceadas, a geração de correntes harmônicas é baixa. Porém, com tensões desbalanceadas, a produção de harmônicos pode ser grande.

## 2.4.6 Disjuntor Dinâmico

O disjuntor dinâmico é uma carga resistiva controlável através de tiristores, conectada em paralelo ao sistema. A figura (2.21) ilustra este equipamento.

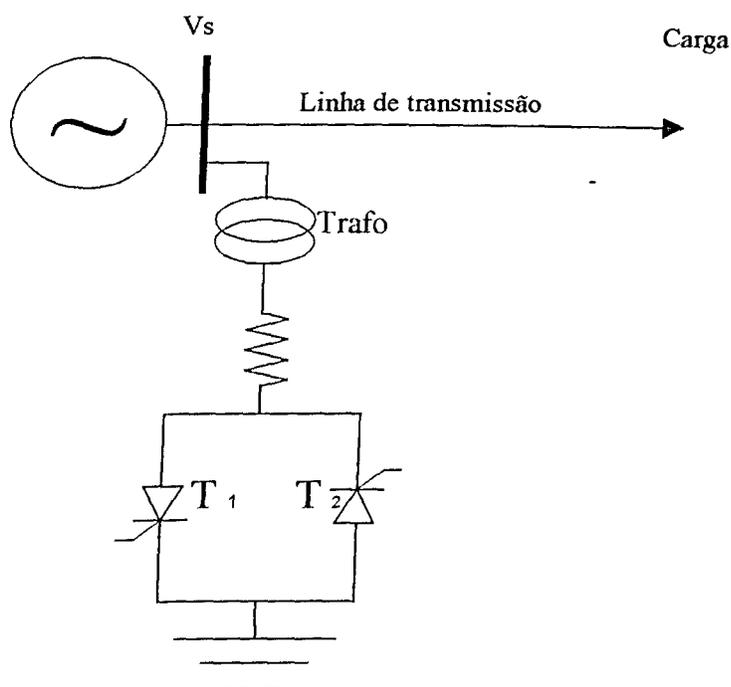


Figura 2.21 - Disjuntor dinâmico

A carga resistiva do Disjuntor Dinâmico pode ser aplicada seletivamente ao sistema em cada meio ciclo da frequência da tensão, atuando no sentido de amortecer possíveis oscilações no fluxo de potência. Deste modo, as unidades geradoras correm menores riscos de perda de sincronismo. Como resultado disto, mais potência pode ser transferida em sistema sujeitos a limitações de estabilidade [2].

## 2.4.7 Capacitor Série Controlado a Tiristores (TCSC)

Um módulo TCSC [21] consiste basicamente de um capacitor de valor fixo ligado em paralelo a um Reator Controlado a Tiristor (RCT). Também em paralelo ao capacitor são geralmente colocados Varistores de Óxido Metálico (MOV) a fim de, em condições de falta, limitar o valor da tensão sobre o mesmo. Com a finalidade de proteger o equipamento em casos de faltas próximas às instalações, bem como para sua manutenção, existe um disjuntor que pode isolar o "TCSC" do sistema de potência ("bypass"). O diagrama genérico do TCSC é ilustrado na figura (2.22), omitindo alguns detalhes citados.

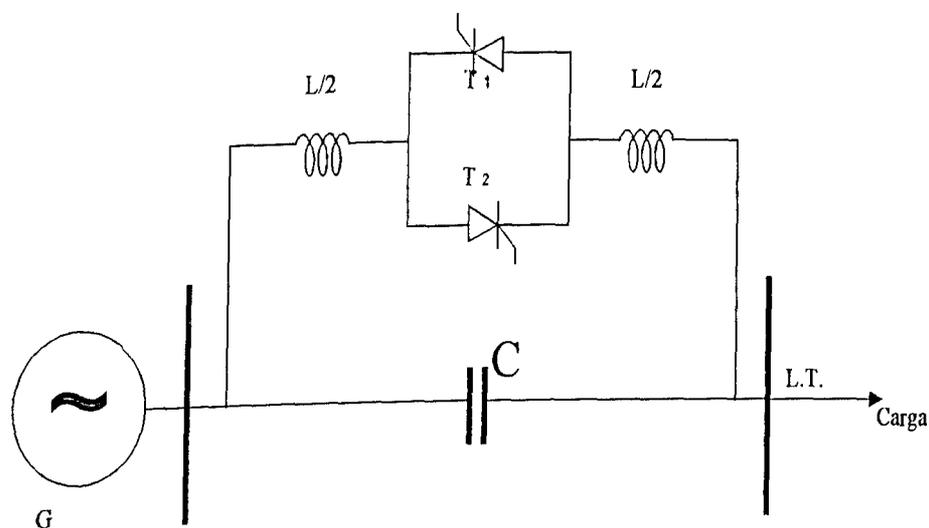


Figura 2.22 - Representação esquemática de um TCSC

Com os tiristores bloqueados, ou seja, para  $\alpha=180^\circ$ , o TCSC se comporta como uma compensação série convencional (capacitor fixo). Com os tiristores conduzindo continuamente ( $\alpha=90^\circ$ ), o TCSC se comporta como uma indutância de pequeno valor. Então, para se variar a reatância desde indutiva até capacitiva, basta operar os tiristores entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ .

## 2.4.8 Capacitor Série Chaveado a Tiristores (TSSC)

O módulo TSSC [14] é similar ao TCSC, como pode ser verificado na figura (2.23). A diferença fundamental entre eles é a maneira de operação. Enquanto que no TCSC é feito controle do ângulo de disparo dos tiristores, o TSSC opera com suas válvulas apenas em dois estados, bloqueados ou em total condução. Quando os tiristores estão bloqueados, o TSSC opera como um capacitor série convencional. Quando os tiristores estão em condução total, o capacitor está fora do sistema. O TSSC apresenta uma saída discretizada ou em degraus. Assim, um esquema de compensação série controlada pode ser feito através de vários blocos de capacitores, sendo que uma progressão geométrica define o valor de cada bloco de capacitores, afim de se obter de maneira otimizada, vários pontos de operação.

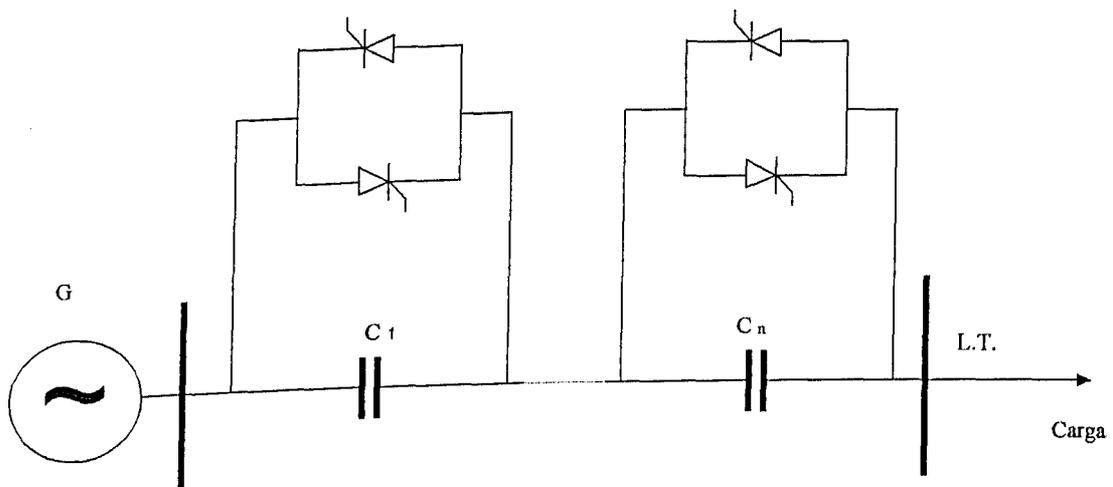


Fig 2.23 - Representação esquemática do TSSC

## 2.4.9 Defasadores ("Phase-Shifters")

Estes equipamentos atuam no sentido de alterar a diferença angular das tensões entre as barras às quais estão conectados. Este controle pode ser

obtido utilizando-se várias concepções, como aquelas apresentadas nas referências [5][22][23]. A título de exemplificação, a figura (2.24) ilustra a concepção proposta em [5]. Esta, permite adicionar ou subtrair uma tensão de magnitude variável e em quadratura com a tensão de linha. O princípio de funcionamento desta proposta, consiste na obtenção do defasamento angular através de um transformador defasador trifásico com "taps" secundários, e da variação do módulo da tensão de cada "tap" por meio do controle do ângulo de disparo de cada grupo de tiristores associados a estes.

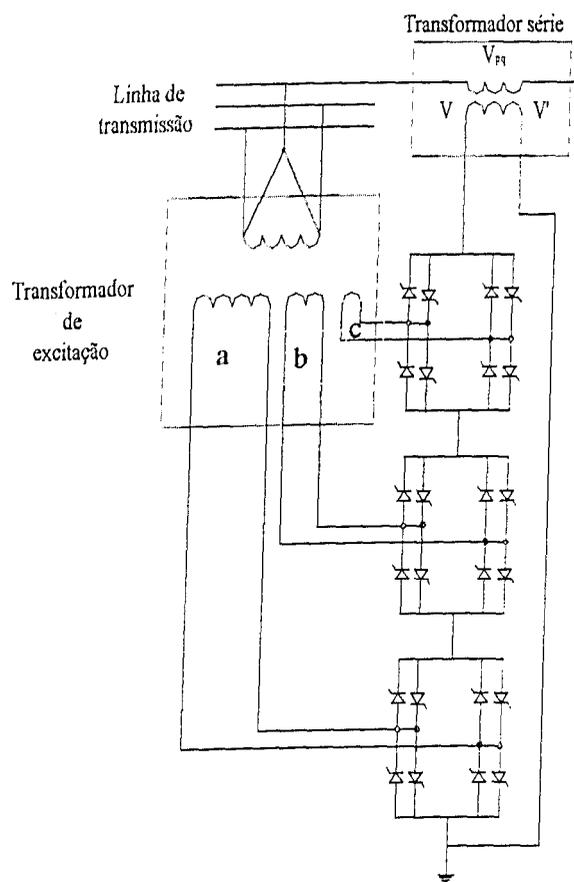


Figura 2.24 - Esquema representativo de um Defasador

De acordo com a figura, os três enrolamentos secundários, designados por "a", "b" e "c" proporcionam a definição da magnitude máxima de tensão a ser injetada por cada "tap", e os grupos de conversores específicos de cada "tap" são

responsáveis pela variação da magnitude compreendida na relação de transformação de cada "tap".

A composição fasorial da tensão resultante, após a injeção da tensão ( $V_{pq}$ ) em quadratura, é representada na figura (2.25).

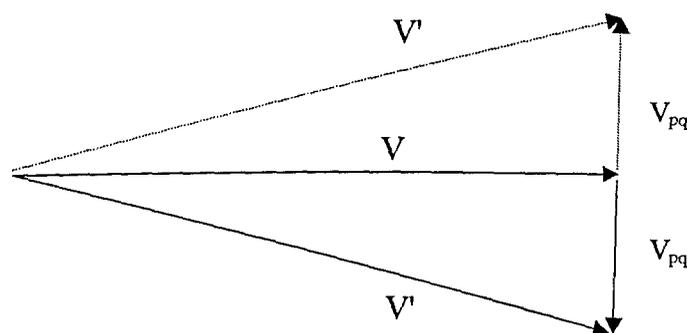


Figura 2.25 - Diagrama fasorial da variação do ângulo da tensão provocada pelo Defasador.

No diagrama, está indicado que a tensão  $V_{pq}$  injetada à tensão de linha, é ortogonal e com polaridade positiva ou negativa. Em consequência disso, a tensão  $V$  pode ter seu ângulo de fase ligeiramente alterado, para valores positivos ou negativos, resultando na tensão  $V'$  ilustrada.

## 2.5 Considerações Finais

Este capítulo foi desenvolvido no sentido de proporcionar uma visão geral a respeito do tema FACTS. Para tanto, inicialmente foi apresentado um exemplo simplificado ilustrando o propósito da filosofia de transporte de energia por sistemas de transmissão flexíveis.

Foram discutidas três maneiras distintas de aplicação do conceito FACTS para controle do fluxo de potência, que são:

- Compensação "shunt" das linhas de transmissão
- Compensação série das linhas de transmissão
- Utilização de defasadores

Verificou-se que os compensadores "shunt" e série atuam sobre a impedância equivalente das linhas, possibilitando o aumento da capacidade de transporte de energia elétrica das mesmas. Por outro lado, observou-se que os defasadores controlam o módulo e ângulo das tensões terminais das linhas, melhorando a estabilidade dos sistemas e, conseqüentemente, proporcionando carregamento das linhas a ângulos de transmissão maiores que  $90^\circ$ .

Outro objetivo do capítulo foi apresentar, de maneira sucinta, alguns equipamentos aplicados à tecnologia FACTS. Verificou-se que tais dispositivos, podem ser classificados quanto à sua forma de conexão ao sistema.

O próximo capítulo, será dedicado à análise de um moderno equipamento aplicado aos FACTS, denominado "UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER - UPFC". A atenção diferenciada dada a este equipamento reside no fato da necessidade de se conhecer melhor as características de tal equipamento, haja visto que este trabalho de mestrado se propõe a analisar os impactos na qualidade da energia elétrica provocados pela operação de unidades "UPFC" nos sistemas de energia elétrica.

---

## CAPÍTULO III

# UNIDADES “UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER-UPFC” APLICADAS AOS SISTEMAS DE TRANSMISSÃO CA FLEXÍVEIS - FACTS

### 3.1 Considerações Iniciais

Os FACTS, cujos conceitos básicos de operação foram apresentados no capítulo II, se utilizam fundamentalmente de equipamentos desenvolvidos a partir da tecnologia e dispositivos empregados nos sistemas HVDC, tais como tiristores de alta potência, centros de controle avançados e elos de comunicação entre os sistemas[1] [2]. Esses equipamentos atuam no sentido de controlar em tempo real os parâmetros que definem o fluxo de potência nos sistemas interligados. Contudo, esses dispositivos, devido à particularidade de aplicação, se tornam caros, ocupam grande espaço físico e tem limitações quanto à velocidade de operação impostas pelo chaveamento dos tiristores.

A partir do conceito dos FACTS, um equipamento de alta tecnologia e com proposta revolucionária está sendo desenvolvido por pesquisadores norte-americanos e europeus, com o objetivo de inovar ainda mais o controle de fluxo de potência em sistemas CA. Assim surge o denominado “UNIFIED POWER FLOW CONTROLLER - UPFC”, que associa as três maneiras de controle de fluxo de potência em um único equipamento, permitindo redução de custo, diminuição de espaço físico necessário para instalação e possui velocidade de

operação mais elevada. Assim, as próximas seções deste capítulo visam esclarecer os aspectos gerais de funcionamento e aplicações deste equipamento.

### 3.2 Concepção Básica do UPFC

O UPFC, em sua estrutura básica, é ilustrado na figura (3.1), onde é também representado o contexto do sistema elétrico onde este está inserido. Na figura, constata-se a presença de um gerador, uma barra à qual está conectado o UPFC, um trecho de linha e uma barra de carga. O compensador é constituído por dois conversores trifásicos, interligados através de um capacitor em paralelo. A estrutura é de um conversor CA-CA com parâmetros de entrada e saída independentemente controlados. O conversor 1 indicado no desenho, está conectado ao sistema através de um transformador em paralelo, enquanto o conversor 2 está acoplada ao sistema através de um transformador ligado em série à linha de transmissão. Devido a essas conexões, a ponte 1 é vista pelo sistema como uma fonte de corrente e a ponte 2 como uma fonte de tensão.

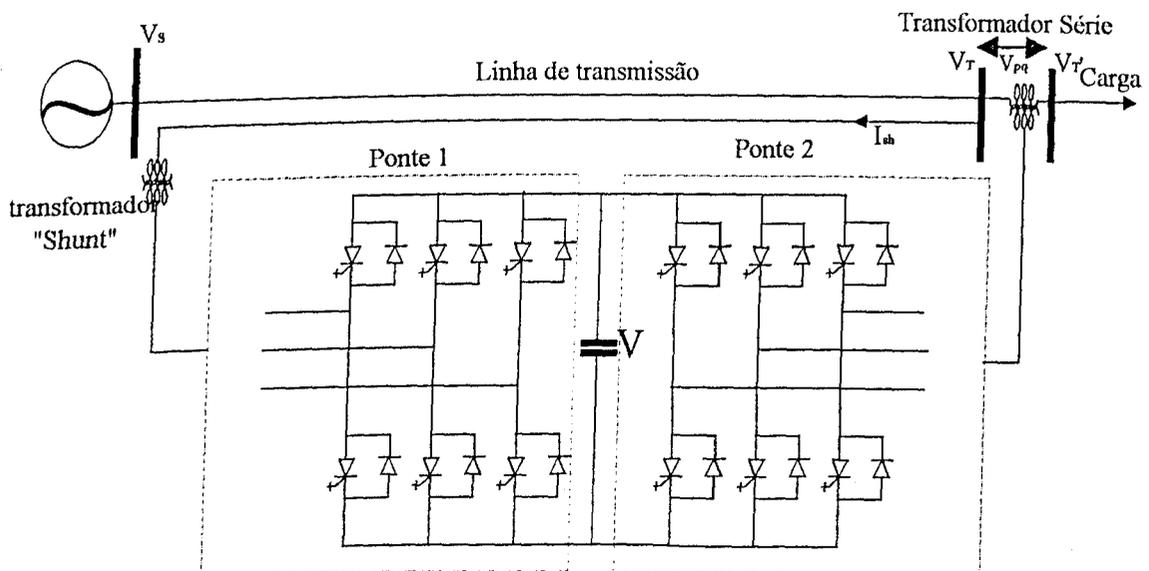


Fig. 3.1 - Representação esquemática da estrutura básica do "UPFC"

As pontes 1 e 2 são conversores “PWM” que utilizam válvulas de tiristores “GTO” para funcionamento, com uma frequência de chaveamento da ordem de 3 kHz [5]. Algumas referências estudam o comportamento do UPFC em função do tipo de “PWM” utilizado nos conversores, onde pode-se destacar a modulação senoidal, a sobremodulação, e ainda a modulação por vetor espacial [25].

Embora as estruturas das duas pontes sejam idênticas, elas executam funções diferentes. Os detalhes operacionais de cada uma delas são discutidos a seguir.

### 3.3 Características Gerais de Operação do UPFC

Com o objetivo de tornar a análise da operação mais didática, o UPFC será desmembrado em duas partes, sendo feita a verificação da operação de cada uma das unidades conversoras separadamente. A primeira unidade conversora, que na figura (3.1) se apresenta como ponte 1, é chamada ponte “shunt” pelo fato de estar conectada ao sistema CA através do transformador em paralelo. A segunda unidade conversora, que é a ponte 2 da figura (3.1), é chamada ponte série, pelo fato do transformador série fazer sua conexão ao sistema CA.

Uma das funções da ponte 1 é suprir a potência ativa requerida para a operação da ponte 2. Assim, a potência ativa é absorvida do sistema CA pela ponte 1 e transferida à ponte 2 através do elo C.C.. O controle da potência ativa absorvida é realizado através do defasamento entre os ângulos da tensão de suprimento e da tensão CA que a ponte 1 é capaz de produzir, graças ao nível

---

C.C. garantido pelo capacitor do elo C.C.. Deste modo, no caso em que é desejável absorver potência ativa do sistema CA, a tensão na saída da ponte 1 é produzida atrasada e com mesma magnitude, com relação à tensão do sistema, definindo o sentido do fluxo de potência ativa como sendo do conversor 1 para o elo C.C.. Além disso, a ponte 1 pode também fornecer potência ativa ao sistema CA, desde que a tensão de saída do conversor 1 seja produzida adiantada e com mesma magnitude, com relação à tensão do sistema CA. Esta operação é possível desde que haja um adequado dimensionamento do capacitor do elo CC, que deve armazenar a energia vinda do próprio sistema, já que o equipamento não possui capacidade própria de geração de potência ativa.

As considerações apresentadas no parágrafo anterior, com relação à potência ativa, podem ser verificadas através da equação (2.1) do capítulo II, que define o fluxo de potência ativa em sistemas elétricos, e também com o auxílio do circuito equivalente da figura (3.2) e dos diagramas fasoriais da figura (3.3).

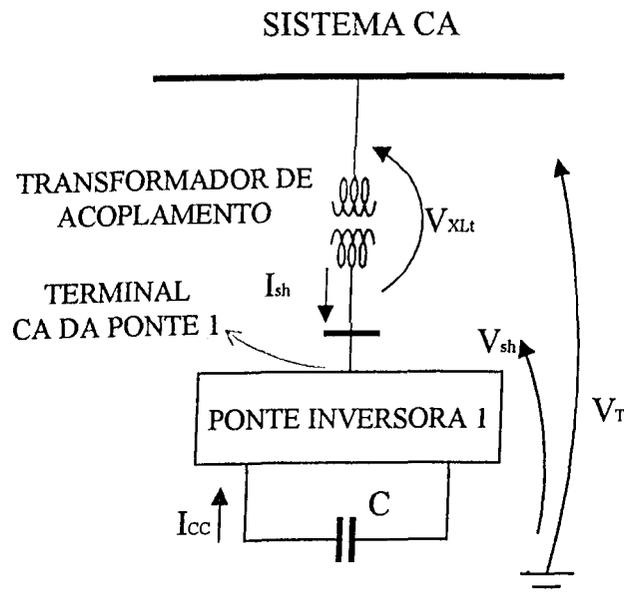


Figura 3.2 - Circuito esquemático monofásico da ponte 1

Em ambos os diagramas fasoriais da figura (3.3),  $V_T$  representa a tensão do sistema CA,  $V_{sh}$  é a tensão que a ponte 1 fornece e  $V_{XLt}$  é a queda de tensão na reatância indutiva de acoplamento do conversor 1 ao sistema CA, que usualmente é a reatância do transformador "shunt". Do circuito monofásico da figura (3.2), tem-se que a tensão  $V_T$  é a soma fasorial das tensões  $V_{sh}$  e  $V_{XLt}$ . Pelo diagrama fasorial (a), nota-se que a tensão  $V_{sh}$  está atrasada da tensão  $V_T$  de um relativamente pequeno ângulo  $\delta_{sh}$ . Nestas condições, a queda de tensão  $V_{XLt}$ , que é provocada pela corrente  $I_{sh}$ , está praticamente em quadratura à tensão  $V_T$  do sistema CA. Sabe-se que a corrente em uma reatância indutiva está atrasada  $90^\circ$  da queda nesta. Desta forma, nota-se que a corrente  $I_{sh}$  está praticamente em fase com a tensão  $V_T$  do sistema, caracterizando assim, a absorção de potência ativa. De forma análoga, quando a tensão  $V_{sh}$  é produzida adiantada da tensão  $V_T$ , a corrente que circula no ramo "shunt" está em oposição à tensão do sistema, caracterizando assim o fornecimento de potência ativa.

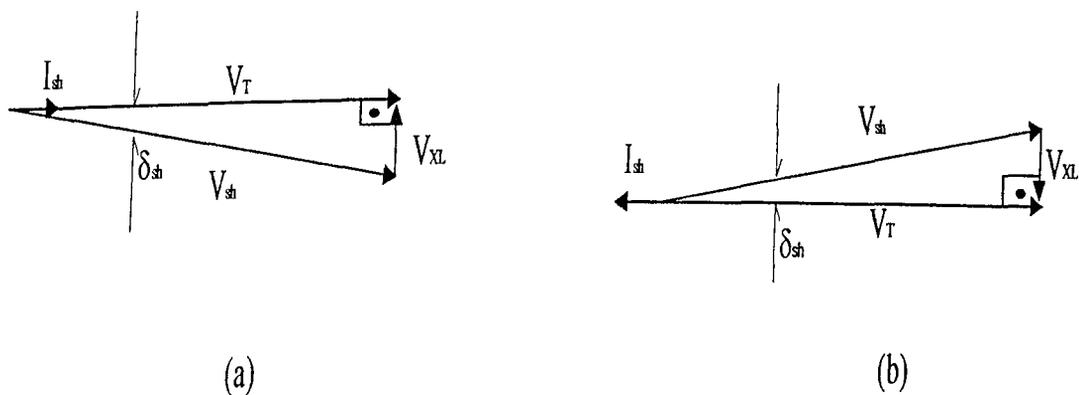


Figura 3.3 - Diagrama fasorial da Ponte "Shunt" (a) absorvendo P e (b) fornecendo P

Um outro fato que merece ser comentado, é que o ângulo  $\delta_{sh}$  de defasagem entre as tensões  $V_T$  e  $V_{sh}$ , para os casos citados de absorção ou fornecimento de potência ativa, não pode ser muito grande, caso contrário, a potência reativa também será influenciada, o que não é desejável. Neste sentido, valores típicos situam-se em torno de  $15^\circ$  a  $20^\circ$  [5].

Independentemente da permuta de potência ativa, o conversor 1 pode também interagir com o sistema CA, fornecendo ou absorvendo potência reativa, operando como um Compensador Estático Avançado, realizando assim, uma regulação de tensão na linha de transmissão, através dos terminais em paralelo do UPFC. A potência reativa absorvida ou fornecida pela ponte 1 é controlada através da manipulação da amplitude da tensão produzida na saída conversor 1 ( $V_{sh}$ ) com relação à tensão do sistema CA ( $V_T$ ). Se a diferença entre as amplitudes das tensões do sistema e da saída do lado “shunt” do UPFC é nula, então a troca de potência reativa também é nula. O diagrama fasorial da figura (3.4) representa esta situação, onde a tensão do supridor está representada com mesma amplitude e em fase com a tensão gerada pelo conversor 1. Nestas condições, no ramo paralelo do UPFC, não há circulação de corrente, caracterizando assim, um estado inoperante do lado “shunt” do UPFC.

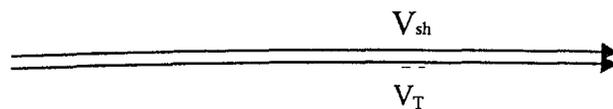


Figura 3.4 - Diagrama fasorial da Ponte “Shunt” produzindo  $V_{sh}$  com mesma magnitude de  $V_T$  – Troca nula de potência reativa

Considere-se agora o caso da ocorrência de uma diferença negativa, ou seja, a tensão na saída da ponte 1 ( $V_{sh}$ ) é maior que a tensão do sistema CA ( $V_T$ ), porém ainda em fase. Para esta situação, a ponte 1 fornece reativos ao sistema CA, como pode ser verificado no diagrama fasorial da figura (3.5). Neste diagrama, nota-se que a corrente que circula no ramo paralelo ( $I_{sh}$ ) está atrasada de  $90^\circ$  da queda de tensão por ela produzida na reatância indutiva de acoplamento do ramo “shunt” ( $I_{sh}X_{LTsh}$ ). Em consequência disso, pelo ramo paralelo circula uma corrente adiantada de  $90^\circ$  com relação à tensão do sistema

CA, caracterizando uma corrente capacitiva, com relação a tensão do sistema CA.

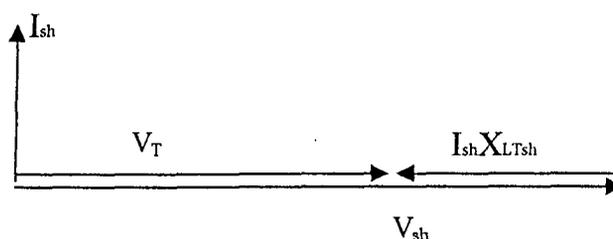


Figura 3.5 - Diagrama Fasorial da Ponte “Shunt” fornecendo Potência reativa

Finalmente, seja o caso em que a diferença entre as magnitudes das tensões de saída do conversor e do sistema é positiva. Para este caso, a ponte 1 absorve reativos do sistema CA, como pode ser verificado através do diagrama fasorial da figura (3.6). Mais uma vez, a corrente que circula no ramo paralelo ( $I_{sh}$ ), está  $90^\circ$  em atraso com relação à queda de tensão sobre a reatância indutiva de acoplamento deste ramo. Verifica-se, no entanto, que essa corrente que circula pelo ramo paralelo está  $90^\circ$  atrasada da tensão do sistema CA, caracterizando a operação do UPFC como absorvendo potência reativa.

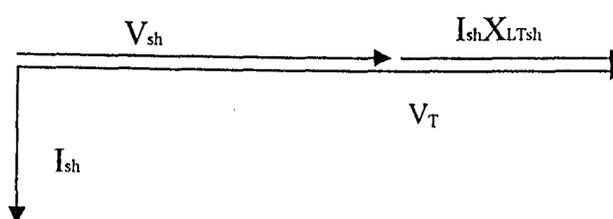


Figura 3.6 - Diagrama Fasorial da Ponte “Shunt” absorvendo potência reativa

A máxima troca de potência reativa é definida para um valor típico da diferença entre as amplitudes das tensões de  $\pm 15\%$  [5]. Por essa razão, o capacitor do elo CC deve ter uma tensão nominal que permita fornecer uma

tensão na saída do conversor 1 ( $V_{sh}$ ) com amplitude de 15% maior que a tensão no secundário do transformador de acoplamento.

A ponte conversora 2, representada na figura (3.1), é usada para gerar, em sua saída CA, uma tensão  $v_{pq}(t) = V_{pq}\text{sen}(\omega t - \phi_{pq})$ , na frequência fundamental, com amplitude controlável entre  $0 \leq V_{pq} \leq V_{pq\text{máx}}$ , e ângulo de fase também variável, entre  $0 \leq \phi_{pq} \leq 2\pi$ . Essa tensão  $v_{pq}$  é adicionada à tensão do sistema através do transformador de acoplamento série, atuando como uma fonte de tensão CA, realizando controle de tensão, compensação série e controle do ângulo de potência do sistema. Esse item, em particular, será discutido mais adiante.

A potência aparente nominal da fonte de tensão injetada em série à linha de transmissão é dada pelo produto da corrente do sistema pela máxima tensão injetada. Deve-se lembrar que a corrente é definida pela carga e pela reatância da linha de transmissão. Essa potência aparente é formada de duas componentes, uma máxima potência ativa, obtida pelo produto da máxima corrente da linha de transmissão pela máxima componente de tensão em fase com essa corrente, e outra, associada à máxima potência reativa, que é obtida pelo produto dessa corrente pela componente da máxima tensão em quadratura com essa corrente. Essa ponte conversora (ponte 2) pode gerar ou absorver potência reativa internamente, através do controle da tensão injetada  $v_{pq}$  [5], determinando o tipo de compensação a ser realizado, se de tensão, impedância ou ângulo de fase. A razão entre a potência reativa e ativa é determinada pelo ângulo de fase entre a tensão injetada e a corrente da linha [5].

O controle de disparo dos "GTOs" dos conversores 1 e 2, é feito em malha fechada, aceitando externamente sinais de referencia pré-estabelecidos, de acordo a com prioridade de compensação a ser realizada pelo UPFC. Esses

sinais de referência fazem as pontes conversoras produzirem tensões CA na entrada (ponte 1) e na saída (ponte 2), as quais definem a compensação imposta ao sistema CA. O controle também atua para manter a tensão necessária no capacitor de acoplamento e assegura uma transferência mais suave de potência ativa entre as pontes conversoras 1 e 2 [6].

### 3.3.1 Operação do Conversor "Shunt" do UPFC

O conversor "shunt" do UPFC está representado na figura (3.7), onde aparece também o capacitor do elo CC.

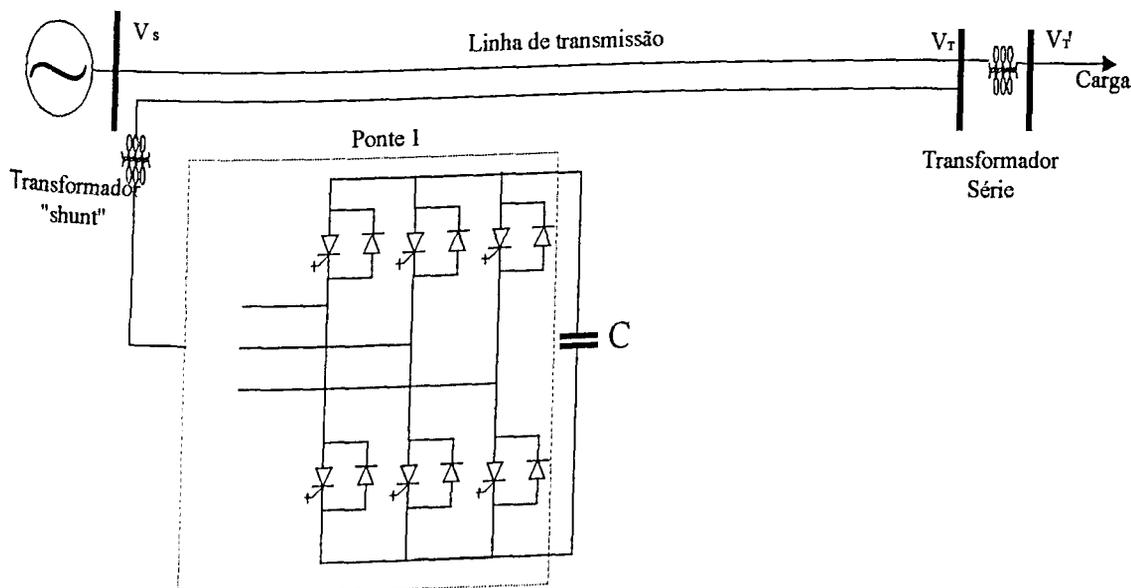


Figura 3.7 - Representação do conversor "shunt" do UPFC

Como discutido anteriormente neste capítulo, as funções fundamentais da ponte 1 são:

- Absorver potência ativa do sistema CA para alimentar a ponte 2.

- Proporcionar compensação "shunt" para controlar o valor da tensão na barra à qual o UPFC está conectado.

Deve-se ainda ressaltar que essas funções podem ser realizadas simultaneamente [6]. Outro fato a ser considerado é que, apesar do sistema CA ser trifásico, o princípio básico de operação da ponte "shunt" pode ser explorado com o auxílio do circuito elementar monofásico da figura (3.8), sem que isso venha causar prejuízos à análise. Para o sistema trifásico, as conclusões serão as mesmas, porém guardados os relativos defasamentos entre as grandezas envolvidas.

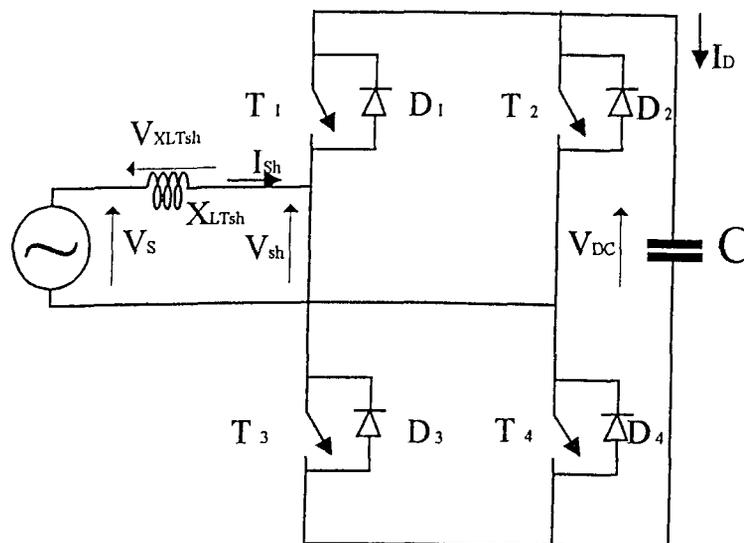


Figura 3.8 - Circuito monofásico da ponte "shunt" do UPFC

Na figura (3.8), a ponte "shunt" do UPFC é acoplada ao sistema através de uma reatância indutiva ( $X_L$ ) que é usualmente a reatância de dispersão do transformador usado para ligar o equipamento à rede de alta tensão. Essa reatância, comparada com aos parâmetros do sistema, pode ser considerada pequena. A análise do comportamento da corrente absorvida pelo ramo "shunt" é feita com base na queda de tensão nesta indutância. A compensação "shunt" é

feita através da comparação entre as amplitudes das tensões do conversor e do sistema CA, como discutido anteriormente.

A análise da operação da ponte "shunt" é realizada com o auxílio de diagramas fasoriais e do circuito equivalente de "Thevenin" de um sistema de potência, como apresentado a seguir na figura (3.9). Notar que as grandezas elétricas utilizam a notação do domínio da frequência, em que os fasores tensão, corrente, e demais fasores apresentados, são representados por  $V$ ,  $I$ , etc.

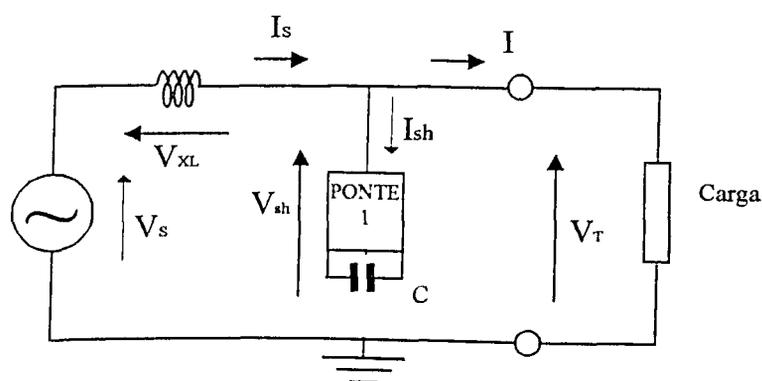


Figura 3.9 - Equivalente de Thevenin de um sistema de potência

Da figura, tem-se:

$V_s$  - Tensão no barramento do gerador

$V_{XL}$  - Queda de tensão na reatância de dispersão do transformador

$I_{sh}$  - Corrente na entrada da ponte "shunt"

$V_T$  - Tensão na barra do UPFC

$I_s$  - Corrente de linha anterior ao "UPFC"

$I$  - Corrente de linha após o UPFC

$X_L$  - Reatância indutiva de acoplamento

Tomando como referência a tensão no final do segmento da linha ( $V_T$ ), as equações a seguir podem ser obtidas pela simples análise do circuito equivalente da figura (3.9).

$$\begin{aligned} I_S &= I_{sh} + I \\ V_S &= V_{XL} + V_T \end{aligned} \quad (3.1)$$

O diagrama fasorial para o sistema apresentado na figura (3.9), considerando a corrente  $I_{sh}$  igual a zero, ou seja, sem compensação, está representado na figura (3.10).

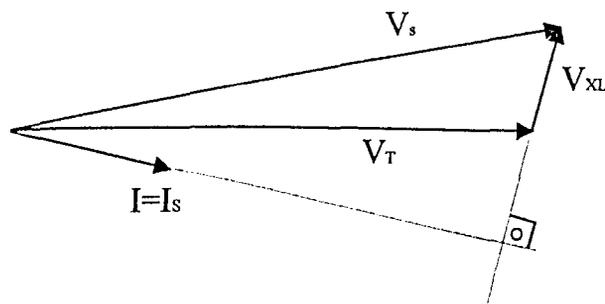


Figura 3.10 - Diagrama fasorial para Equivalente de Thevenin sem Compensação

O diagrama fasorial da figura (3.11a), representa a situação em que há a necessidade do UPFC fornecer potência reativa, face a uma pequena diminuição de tensão na barra à qual ele está conectado, ou seja, a ação do compensador é de suprir potência reativa para aumentar a amplitude de  $V_T$ . Por outro lado, o diagrama fasorial da figura (3.11b) ilustra o caso em que o UPFC absorve potência reativa junto ao sistema, diante de algum acréscimo da tensão  $V_T$ .

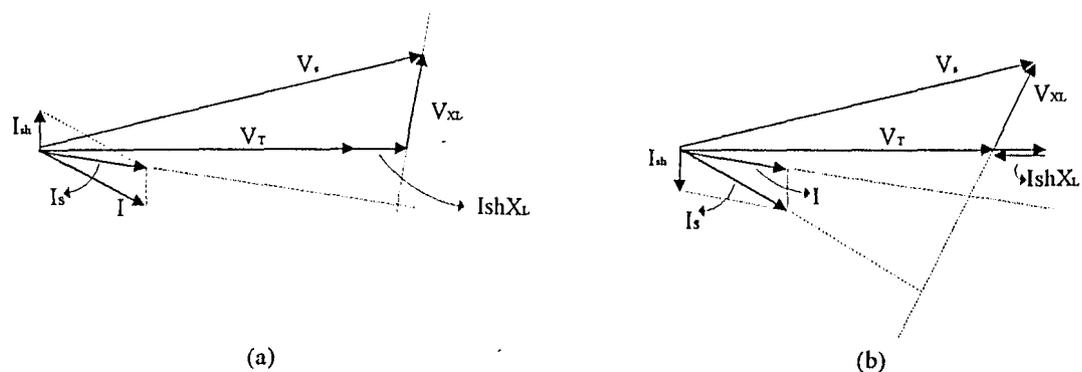


Figura 3.11 - Diagramas fasoriais (a) suprindo potência reativa e (b) absorvendo potência reativa

Com relação à construção dos diagramas fasoriais da figura (3.11), algumas considerações devem ser feitas. Inicialmente, é que a corrente que flui através da ponte 1 até o capacitor C, pelas próprias características do circuito da figura (3.9), é perpendicular à tensão  $V_T$ . Como consequência, a queda de tensão provocada por  $I_{sh}$  na reatância  $X_L$  estará na mesma direção que o fasor  $V_T$ , aumentando ou diminuindo a sua amplitude de um fasor  $I_{sh} \cdot X_L$ , em conformidade com o sentido de  $I_{sh}$ . Se a corrente  $I_{sh}$  está entrando na ponte 1, a tensão  $V_T$  é reduzida, ou seja, o UPFC está absorvendo potência reativa. No entanto, se esta corrente está saindo da ponte 1, a tensão  $V_T$  é aumentada. Outro aspecto que merece ser comentado, é o fato de que o fasor que corresponde à queda de tensão  $V_{XL}$  na reatância  $X_L$ , devido à circulação de  $I_s$ , sofre pouca alteração com a circulação de  $I_{sh}$ , devido ao fato que, comparativamente à corrente  $I_s$  do sistema,  $I_{sh}$  é muito pequena.

Diante dessas considerações, conclui-se, com o auxílio dos diagramas fasoriais da figura (3.11), que a ponte 1 do UPFC tem grande capacidade para compensar variações de tensão, seja absorvendo potência reativa, tendo como consequência uma diminuição da tensão no terminal  $V_T$  (figura 3.11b), ou ainda fornecendo potência reativa ao sistema, para aumentar a tensão terminal  $V_T$  (figura 3.11a). Por outro lado, nota-se que a ponte 1 tem capacidade praticamente nula para variar o ângulo de transmissão, uma vez que a queda de

tensão na reatância do segmento de linha ( $V_{XL}$ ) não sofre variações significativas com a variação de  $I_{sh}$ .

Como as válvulas "GTO" possibilitam um rápido processo de chaveamento, a ponte conversora 1 permite uma troca rápida de potência ativa e reativa, promovendo a estabilidade dinâmica e transitória do sistema CA com grande eficiência [6].

### 3.3.2 Operação do Conversor Série do UPFC

O conversor série, isolado do restante da estrutura do UPFC, está representado na figura (3.12), onde também aparece o capacitor do elo CC. Como mencionado anteriormente, este capacitor garante o nível CC necessário à operação das pontes série e "shunt".

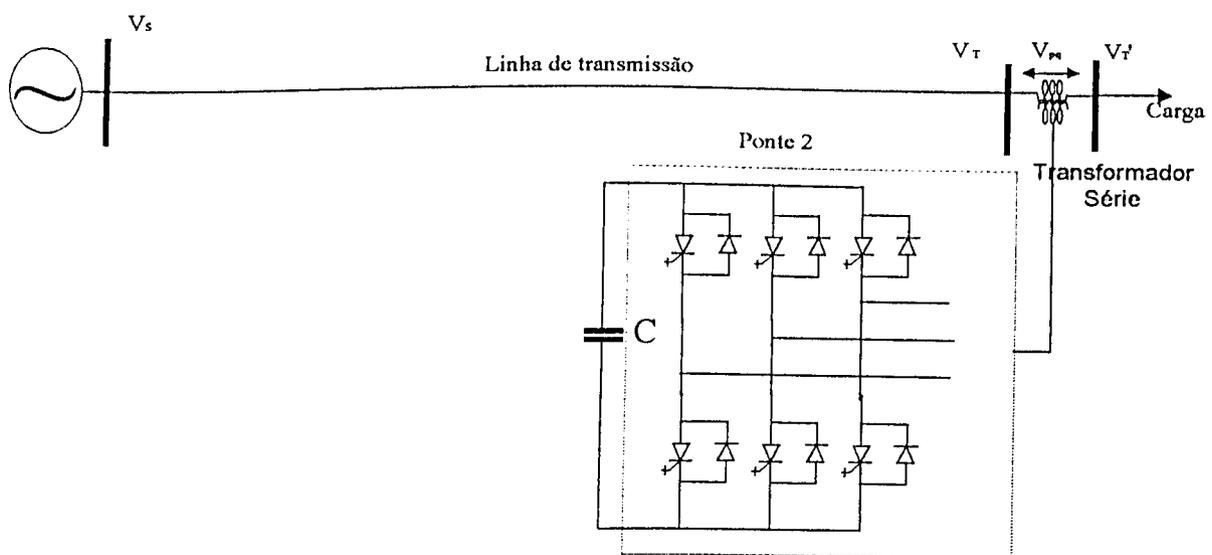


Figura 3.12 - Representação esquemática do conversor série do UPFC

Este conversor atua gerando uma tensão  $v_{pq}(t) = V_{pq}\text{sen}(\omega t - \alpha_{pq})$ , na frequência fundamental ( $\omega$ ), com amplitude variável ( $0 \leq V_{pq} \leq V_{pq\text{máx}}$ ) e ângulo de fase também variável ( $0 \leq \alpha_{pq} \leq 2\pi$ ). Essa tensão é adicionada à tensão terminal  $v_T(t)$  do sistema CA através de um transformador série de acoplamento, conforme ilustrado na figura (3.12).

A corrente que flui através da fonte de tensão série ( $V_{pq}$ ) é a própria da linha de transmissão, que é função da potência transmitida e da impedância da linha de transmissão. Dessa maneira, a máxima potência nominal em VA da ponte conversora 2 do UPFC é dada pelo produto da máxima tensão série a ser injetada e a máxima corrente que o controle do fluxo de potência permite fluir através da linha de transmissão.

A componente real da potência aparente é convertida para o terminal CC pelo conversor de forma positiva ou negativa, e a componente reativa é gerada internamente pelo conversor [30]. Assim, a ponte série pode atuar no sistema das seguintes maneiras:

- Controle da magnitude de tensão
- Controle da magnitude de tensão e Compensação Série
- Controle da magnitude da tensão e Defasador
- Controle da magnitude da tensão, Compensação Série e Defasador

A seguir, serão apresentados cada um destes itens com maiores detalhes, buscando, deste modo, uma compreensão mais aprofundada do assunto.

## (a) Aplicação do Conversor Série ao Controle da Magnitude da Tensão

Um esquema representativo de um sistema de potência genérico é ilustrado na figura (3.13), onde tem-se uma linha de transmissão com uma reatância  $X_L$  interligando duas máquinas, com tensão  $V_S$  no barramento emissor e tensão  $V_R$  no barramento receptor. Neste caso, o UPFC está posicionado no centro da linha, com o objetivo de simplificar e facilitar o entendimento da interação do equipamento com o sistema CA.

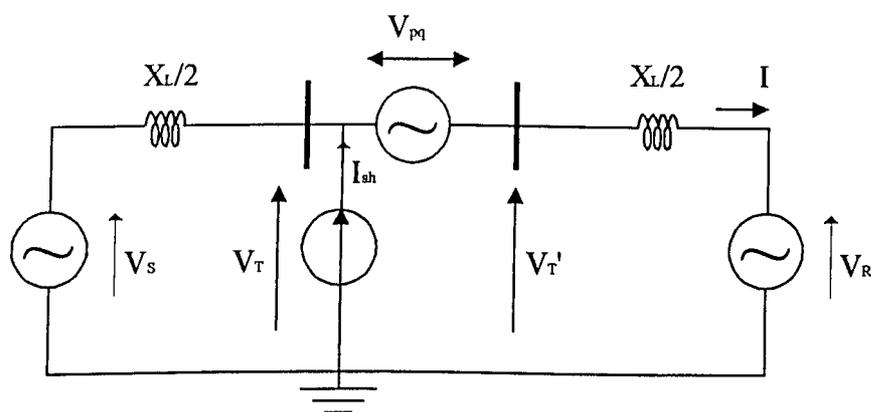


Figura 3.13 - Esquema representativo de um sistema de potência contendo um UPFC no centro da linha

Com a finalidade de verificar-se a operação do UPFC no controle da magnitude de tensão, seja feita a consideração que a corrente injetada pelo conversor “shunt” é nula ( $I_{sh} = 0$ ), ou seja, não há compensação “shunt”. Seja considerada também a tensão  $V_T$  e a corrente  $I$  sempre constantes. A tensão  $V_{pq}$  indicada na figura (3.13) pode ser injetada ao sistema com amplitude e ângulo de fase controláveis. Com base nestes argumentos, o diagrama fasorial da figura (3.14), ilustra a situação onde o UPFC adiciona um fasor de tensão ( $\Delta V_o$ ) em fase com a tensão  $V_T$  do sistema, tendo como referência a tensão  $V_T'$  também indicada na figura (3.13), e que é a resultante após a contribuição do UPFC.

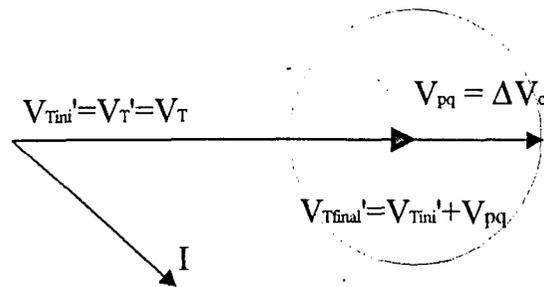


Figura 3.14 - Diagrama fasorial da ponte série controlando a magnitude de tensão

No diagrama,  $V_{Tini}'$  representa a tensão à direita do UPFC, e é inicialmente igual a  $V_T$ , com o compensador desligado ( $I_{sh} = 0$ ,  $V_{pq} = 0$ ). Quando a tensão  $V_{pq} = \Delta V_0$  é adicionada em fase à tensão da linha, tem-se um aumento de  $V_{Tini}'$ , resultando uma tensão final  $V_{Tfinal}' = V_{Tini}' + V_{pq} > V_{Tini}'$ , caracterizando assim a atuação do UPFC no aumento da magnitude da tensão. Ainda na figura (3.14), a circunferência apresentada, cujo raio é a amplitude máxima de  $V_{pq}$ , representa a possibilidade de rotação do fasor tensão  $V_{pq}$  injetado ao sistema. Se a tensão  $V_{pq}$  é injetada a  $180^\circ$  de  $V_T$ , tem-se uma redução no valor de  $V_T'$ . O efeito da tensão série injetada em ângulos diferentes de  $0^\circ$  e  $180^\circ$  é verificado nas seções seguintes.

### (b) Aplicação do Conversor Série ao controle combinado da Magnitude da Tensão e da Compensação Série

A análise desta função do conversor série requer o auxílio da figura (3.13). Considere-se, inicialmente, que a tensão  $V_T$  e a corrente  $I$  sejam constantes, além da corrente no ramo "shunt" igual a zero ( $I_{sh} = 0$ ). Tomando como base estas considerações, o diagrama fasorial ilustrado na figura (3.15),

representa o comportamento do sistema diante da aplicação da ponte série do UPFC no controle da tensão e compensação série simultaneamente.

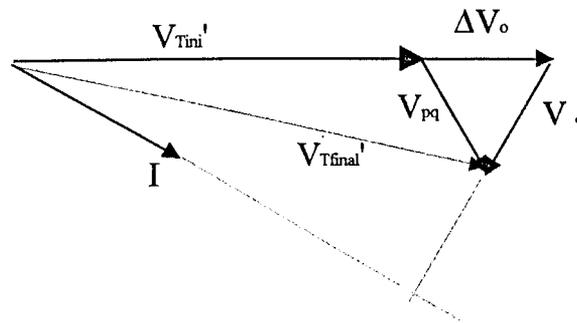


Figura 3.15 - Diagrama fasorial da ponte série com compensação série e magnitude de tensão

Na figura, apresenta-se a tensão inicial  $V_{Tini}'$ , à qual é adicionada em fase uma componente  $\Delta V_o$ , caracterizando um incremento na magnitude da tensão inicial  $V_{Tini}'$ . Além disso, verifica-se uma componente de tensão  $V_c$  adicionada em quadratura à corrente de linha  $I$ , definindo a compensação série. A soma fasorial das tensões  $\Delta V_o$  e  $V_c$  determina o ângulo e amplitude da tensão  $V_{pq}$  a ser injetada pelo conversor série, a fim de se produzir o efeito desejado de ganho na amplitude e compensação série. O resultado disto, está representado pelo fasor  $V_{Tfinal}'$ , diferente de  $V_{Tini}'$  em magnitude e ângulo de fase.

### (c) Aplicação do Conversor Série ao controle combinado da Magnitude da Tensão e Ângulo de Fase

Considere-se novamente a figura (3.13), com a tensão  $V_T$  e a corrente  $I$  constantes e a inexistência de compensação "shunt" ( $I_{sh} = 0$ ). Partindo-se destas considerações, a aplicação da ponte série interferindo na magnitude e ângulo de fase da tensão do sistema está representada na figura (3.16).

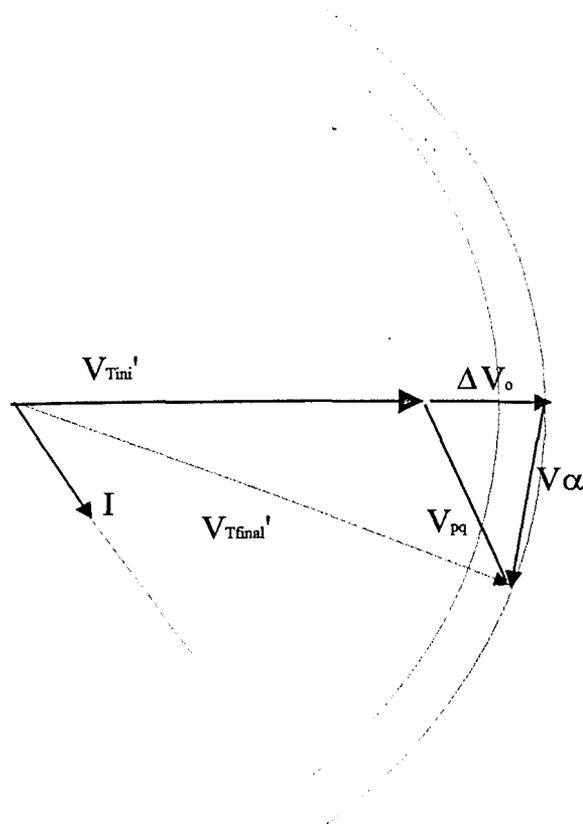


Figura 3.16 - Diagrama fasorial da ponte série com defasagem angular e magnitude de tensão

Na figura tem-se a tensão inicial  $V_{Tini}'$ , à qual é adicionada em fase uma componente  $\Delta V_o$ , caracterizando um incremento na magnitude da tensão inicial  $V_{Tini}'$ . Pode ser notada também, uma componente de tensão  $V_\alpha$ , cuja função é deslocar o fasor tensão “ $V_{Tini}' + \Delta V_o$ ” de um ângulo  $\alpha$  desejado. A soma fasorial das tensões  $\Delta V_o$  e  $V_\alpha$  determina o ângulo e amplitude da tensão  $V_{pq}$  a ser injetada pelo conversor série, a fim de se produzir o efeito desejado de ganho na amplitude e defasamento angular. O resultado disto, está representado pelo fasor  $V_{Tfinal}'$ , diferente de  $V_{Tini}'$  em magnitude e ângulo de fase.

A tensão  $V_\alpha$  é definida por  $V_\alpha = 2V_T' \text{sen}(\delta/2) \cdot e^{\pm j(\pi/2 - \alpha/2)}$ , devendo ainda garantir que  $V_{Tfinal}' = V_{Tini}' + \Delta V_o$ , ou seja, enquanto houver mudança no ângulo de fase, não ocorre nenhuma mudança na tensão terminal controlada.

### (d) Aplicação do Conversor Série ao controle combinado da Magnitude da Tensão, Compensação Série e Ângulo de Fase

Nesta última aplicação da ponte série, mais uma vez faz-se necessária a consideração da figura (3.13), com a tensão  $V_T$  e a corrente  $I$  constantes, e ainda compensação "shunt" nula ( $I_{sh} = 0$ ). Observando-se estas considerações, a aplicação da ponte série atuando no controle da magnitude da tensão, Compensação série e defasamento está representada no diagrama fasorial da figura (3.17).

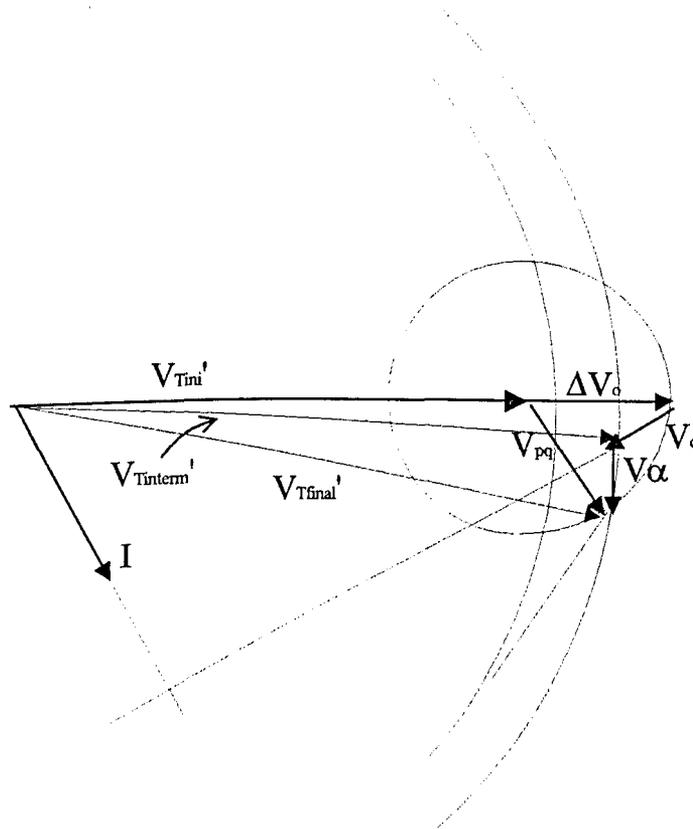


Figura 3.17 - Diagrama fasorial do ponte série executando defasagem angular, compensação série e controle da magnitude de tensão

À tensão inicial  $V_{Tini}'$  da figura, é adicionada, em fase, uma componente  $\Delta V_o$ , caracterizando um incremento na magnitude da tensão inicial  $V_{Tini}'$ . Pode ser notada também, uma componente de tensão  $V_c$  em quadratura à corrente de

linha, definindo a compensação série. Deste modo, o fasor  $V_{Tinterm}'$  é a tensão resultante do efeito da atuação da ponte série na magnitude e compensação série. O fasor tensão  $V_\alpha$  do diagrama controla o ângulo de fase da tensão  $V_{Tinterm}'$ . O fasor tensão  $V_{pq}$  é a resultante da soma das tensões  $\Delta V_o$ ,  $V_c$  e  $V_\alpha$ . É esta tensão  $V_{pq}$  que a ponte série do UPFC injeta ao sistema. Desta maneira, a tensão  $V_{Tfinal}$  se apresenta sofrendo os efeitos de incremento de magnitude, compensação série e defasagem angular.

### 3.3.3 Aspectos Gerais a respeito do Sistema de Controle do UPFC

A operação do UPFC é definida por um sistema interno de controle. Esse sistema de controle estabelece o comando de disparo dos “GTO”, de maneira que as duas pontes conversoras possam desempenhar suas funções designadas corretamente, sob condições normais. Além disso, o sistema de controle também é responsável por agir no sentido de evitar que o equipamento atinja pontos de operação indesejáveis ao sistema ou que ofereça risco de dano ao dispositivo [7].

Como mencionado anteriormente, durante a operação do conversor “shunt”, o controle do UPFC regula a saída CA para absorver o desejável nível de corrente da linha. Essa corrente tem uma componente ativa, requerida para regular a tensão no elo CC, e uma componente reativa, para regular a tensão da barra à qual o conversor “shunt” está conectado. O controle automático de tensão é muito similar ao que é usualmente empregado aos compensadores estáticos convencionais, provendo uma tensão de referência na saída do sistema de controle e um fator de queda, que determina o erro de tensão versus a corrente reativa de carga do conversor “shunt”.

Com relação ao conversor série, sob condições normais de operação, o sistema de controle do UPFC determina a tensão a ser injetada em série com a linha de transmissão. A tensão injetada é um fasor de sequência positiva com determinado módulo e ângulo de fase, cujo propósito é influenciar o fluxo de potência ativa e reativa na linha de transmissão. O ângulo de fase dessa tensão injetada é escolhido com base no ângulo de fase da tensão de sequência positiva da barra onde o UPFC está conectado. A tensão injetada e a corrente de linha podem ser separadas em duas componentes cada,  $V_p$  e  $I_p$ , que são em fase com a tensão do sistema CA, e  $V_Q$  e  $I_Q$ , que são atrasadas de  $90^\circ$  da tensão do sistema CA. Assim, a tensão injetada do conversor série  $V_i (=V_i|\theta_i)$ , é calculada como segue:

$$V_i = \sqrt{V_p^2 + V_Q^2} \quad e \quad \theta_i = \tan^{-1}\left(\frac{V_Q}{V_p}\right) \quad (3.2)$$

O sistema de controle realiza esses objetivos através de algoritmos de controle de realimentação automático. Esses algoritmos são executados em processadores digitais de alta velocidade, com intervalo de amostragem de poucos décimos de microsegundos. A rapidez das ações do controle, permite a atuação do UPFC sem limite de tempo de resposta com respeito a transitórios e oscilações dinâmicas nos sistemas de potência.

O diagrama de blocos representativo do sistema de controle do UPFC é apresentado na figura (3.18). Funções dentro dos blocos denominados controle dos conversores "shunt" e série podem ser escolhidas para a operação coordenada dos dois conversores e manter a carga do barramento CC.

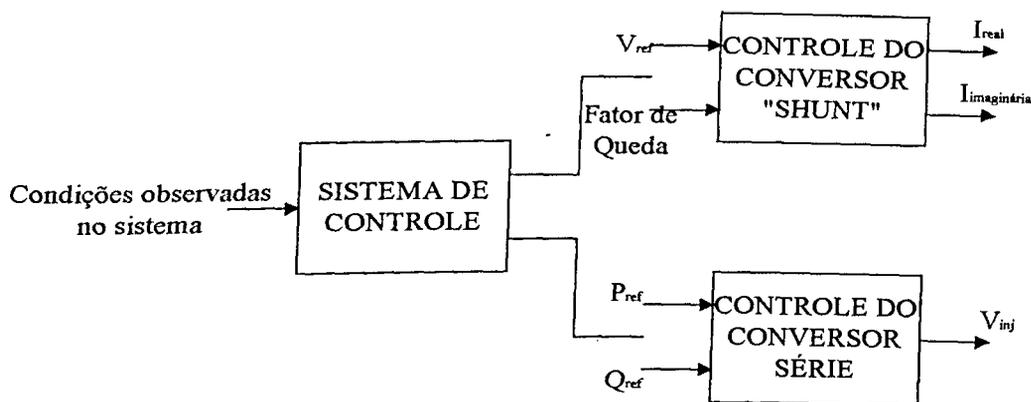


Figura 3.18 - Diagrama de Blocos do Controle do "UPFC"

O bloco intitulado sistema de controle pode ser usado para definir funções dinâmicas adicionais ao controle das pontes série e "shunt". Desde que essas funções são computadas usando processadores digitais, elas podem ser selecionadas a fim de atender necessidades específicas, como por exemplo, amortecimento de oscilações inter-áreas.

Para estudos de sistemas de potência usando simuladores de estabilidade dinâmica e transitórios, o controle das pontes "shunt" e série pode ser representado através da figura (3.19 a e b).

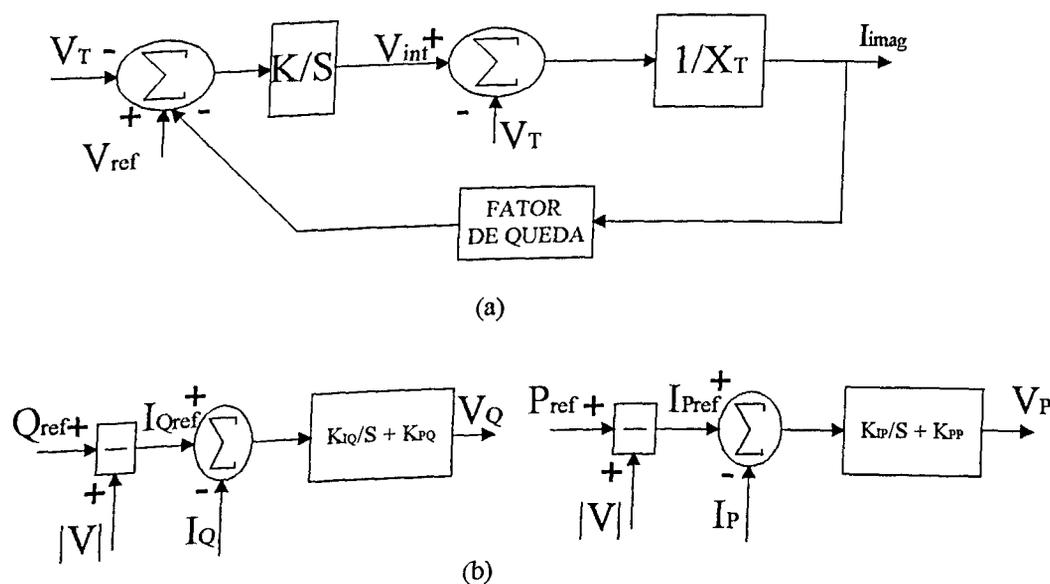


Figura 3.19 - Diagrama de blocos do (a) controle de tensão do conversor "shunt" e (b) controle de potência do conversor série

### 3.4 Operação do UPFC como Controlador Generalizado

Do exposto nas seções anteriores deste capítulo, verifica-se a grande versatilidade do UPFC. No entanto, faz-se necessário uma análise da operação deste equipamento no sentido de proporcionar ao sistema, os quatro casos clássicos de transmissão de potência, que são:

- (a) Linha sem compensação
- (b) Linha com compensação série capacitiva
- (c) Linha com compensação "shunt"
- (d) Linha com defasador

No sentido de proporcionar um melhor entendimento da exposição a seguir, seja considerada inicialmente, o circuito equivalente anteriormente apresentado na figura (3.13).

No caso (a), seja assumido que a tensão  $V_{pq}$  injetada em série e a corrente  $I_{sh}$  são iguais a zero (neste caso, o UPFC está inoperante). Nestas condições, a potência transmitida entre a barra emissora e a barra receptora (considerando  $V_R=V_S=V$ ) pode ser expressa por [6] :

$$P_{(a)} = \frac{V^2}{X_{ij}} \text{sen } \delta \quad (3.3)$$

onde o ângulo  $\delta$  é a diferença angular entre os ângulos das tensões  $V_S$  e  $V_R$ . A potência  $P_{(a)}$  plotada contra o ângulo  $\delta$  está apresentada na curva (1) da figura (3.20).

Para o caso (b), seja assumida a corrente  $I_{sh}$  igual a zero ( $I_{sh} = 0$ ) e a tensão  $V_{pq} = -jkXI$ , ou seja, a tensão injetada em série está atrasada de  $90^\circ$  da corrente de linha  $I$ . Nestas circunstâncias, o UPFC atua como um compensador série capacitivo. O grau de compensação série é definido pelo coeficiente  $k$  ( $0 \leq k \leq 1$ ). Deste modo, a potência  $P$  torna-se [6]:

$$P_{(b)} = \frac{V^2}{X_{ij}(1-K)} \text{sen } \delta \quad (3.4)$$

A curva (2) da figura (3.20) retrata o comportamento de  $P_{(b)}$  em função do ângulo de carga  $\delta$ .

Para o caso (c), é assumido que a tensão série injetada  $V_{pq}$  é igual a zero e  $I_{sh} = -j(4V/X)[1-\cos(\delta/2)]$ , isto é, a corrente injetada pela ponte "shunt" é modulada de tal forma a se manter a tensão  $V_T$  no meio da linha, igual à tensão  $V_S$ . Nesta situação, o UPFC atua como um compensador "shunt" que segmenta a linha em duas partes independentes, onde cada uma tem impedância  $X/2$ . Para uma compensação "shunt" no meio da linha, a potência  $P$  pode ser expressa por [6]:

$$P_{(c)} = 2 \frac{V^2}{X_{ij}} \text{sen } \frac{\delta}{2} \quad (3.5)$$

A potência  $P_{(c)}$  plotada contra o ângulo  $\delta$  é ilustrada na curva (3) da figura (3.20).

No último caso (d), é assumido que a corrente  $I_{sh}$  é igual a zero e a tensão  $V_{pq} = \pm jV_T \tan \alpha$ , isto é, a tensão  $V_{pq}$  com amplitude  $\pm V_T \tan \alpha$  é adicionada em quadratura à tensão no meio da linha ( $V_T$ ), com a finalidade de produzir o

desejável defasamento angular  $\alpha$  (adiantado ou atrasado). Adotando esta estratégia de controle, o UPFC atua como um defasador, garantindo à potência transmitida uma relativa independência do ângulo de carga  $\delta$ , haja visto que este pode ser alterado. A equação de potência, para esta situação, pode ser expressa por [6]:

$$P_{(d)} = \frac{V^2}{X_{ij}} \text{sen}(\delta - \alpha) \quad (3.6)$$

A potência  $P_{(d)}$  em função do ângulo de carga  $\delta$  está representada na curva (4) da figura (3.20).

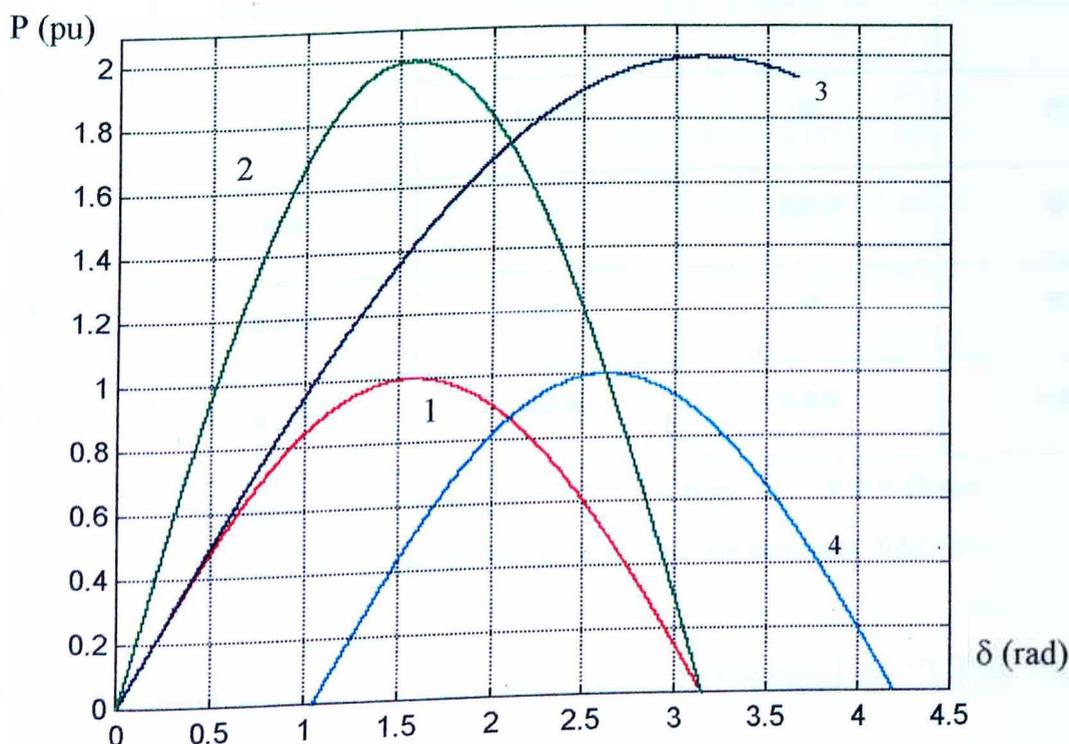


Figura 3.20 - Curva da Potência contra o ângulo de carga ( $\delta$ ) para um trecho de linha contendo um UPFC (1) inoperante, (2) como compensador série, (3) como compensador "shunt" capacitivo e (4) como defasador.

Assim, a figura (3.20) sintetiza as curvas características do comportamento da potência sem compensação, com compensação série e "shunt", e também com defasador, todas obtidas à partir da operação do UPFC.

Deve-se ressaltar que o UPFC, além de todas essas combinações de compensação, permite ainda uma mudança em tempo real de um tipo de compensação para outra, de acordo com as exigências do sistema.

Ainda a título de análise operacional, é apresentada a tabela (3.1), extraída da referência [26], relacionando as características técnicas de alguns equipamentos aplicados aos "FACTS".

Equipamentos \ Atributo	Controle do fluxo de potência	Controle da Tensão	Estabilidade Transitória	Amortecimento das oscilações
SVC	●	●●●	●	●●
TCSC	●●	●	●●●	●●
DEFASADOR	●●●	●●	●	●●
UPFC	●●●	●●●	●●●	●●●

Legenda ● Regular ●● Bom ●●● Ótimo

Tabela 3.1- Comparação da operação entre equipamentos "FACTS"

Observa-se pela tabela, a predominância operacional do "UPFC" sobre os demais equipamentos apresentados.

### 3.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou uma abordagem didática de um equipamento recentemente desenvolvido para aplicação aos FACTS, chamado “Unified Power Flow Controller”, ou Controlador de Fluxo de Potência Unificado.

Inicialmente, foi feita uma explanação geral a respeito do princípio de operação do UPFC. No entanto, devido à complexidade da estrutura do equipamento, as particularidades operacionais foram apresentadas com o equipamento dividido em duas partes, a primeira, chamada ponte conversora 1 ou “shunt”, e a segunda, chamada ponte conversora 2 ou série.

Na análise feita, foi verificado que a ponte “shunt” tem por fundamental objetivo suprir a potência ativa requerida para a operação da ponte 2, mas também pode, simultaneamente, fazer compensação “shunt”, atuando como um compensador estático de reativos. Por outro lado, verificou-se ainda, que a ponte série é utilizada para fazer regulação de tensão, compensação série e controle do ângulo de fase das tensões nas barras entre as quais o UPFC está inserido.

Assim, do exposto neste capítulo, conclui-se que, de acordo com as características de operação do UPFC, que fundamentalmente é composto por dois conversores, há a necessidade de se investigar possíveis impactos na qualidade dos suprimentos elétricos, oriundos da operação de unidades UPFC nos sistemas elétricos. Neste sentido, o próximo capítulo é desenvolvido com vistas a analisar, computacionalmente, do ponto de vista da “QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA”, o comportamento de um sistema de potência na presença de uma unidade UPFC.

## CAPÍTULO IV

# ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UNIDADES UPFC SOB O ENFOQUE DOS EFEITOS NA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

### 4.1 Considerações Iniciais

A crescente utilização de cargas elétricas não lineares em sistemas de potência, associado a uma série de outros fatores, tem resultado em prejuízos consideráveis à **Qualidade da Energia Elétrica**. Em decorrência disso, tem aumentado consideravelmente as investigações direcionadas a temas como Distorções Harmônicas, Desequilíbrios, Variações de tensão, etc.

Dentro deste contexto, e após levar-se em consideração as abordagens anteriores, este capítulo tem por meta principal, estudar aspectos relacionados à operação do UPFC em sistemas elétricos, com respeito à **Qualidade da Energia Elétrica**. Para tanto, mais adiante, apresentar-se-ão os resultados obtidos de análises computacionais, enfocando a simulação da operação do UPFC em um sistema elétrico submetido a diversas situações.

Para os estudos computacionais conduzidos, foi utilizado o *software* "SABER". As simulações foram realizadas no sentido de verificar o comportamento do equipamento em regime permanente, ou seja, não foi implementado nenhum tipo de malha de controle. Assim sendo, as análises terão

---

caráter estáticas e são ilustrativas apenas para destacar a natureza das formas de onda envolvidas no processo.

## 4.2 O *Software* “SABER”

Como comentado anteriormente, a ferramenta computacional utilizada na análise da operação do UPFC, foi o simulador “SABER”. Este *software* emprega como estratégia de simulação, a modelagem das grandezas elétricas através de técnicas no domínio do tempo. Suas principais características são:

- possui elementos de circuitos elétricos (R, L e C) em sua biblioteca padrão;
- possibilita a representação de um equipamento/sistema através da conexão “física” dos componentes;
- além da biblioteca padrão disponível, pode-se gerar estruturas próprias, denominadas de *templates*;
- possui elevados recursos de processamento, com diversos métodos de integração numérica;
- permite a modelagem de equipamentos elétricos ou mecânicos através de suas equações diferenciais, como é o caso dos motores elétricos, geradores, transformadores, bombas centrífugas, etc;
- para a análise dos resultados das simulações, o simulador “SABER” possui um ambiente gráfico com calculadora, a qual possibilita diversas operações com as curvas obtidas, como por exemplo, a multiplicação de uma tensão pela corrente num dado ponto do sistema, dando origem à potência elétrica;

- após o processamento, de acordo com os propósitos da simulação, é possível efetuar um pós-processamento das curvas obtidas, como é o caso das análises de Fourier, análise de ruídos, etc.

### 4.3 Modelagem do Sistema

Para a realização das simulações propostas nesse trabalho, foi utilizado o sistema de energia genérico apresentado na figura (4.1). Em alguns casos, as simulações foram realizadas com a ausência do UPFC conectado ao circuito, ou seja, sem a presença dos transformadores “shunt” e série, e do UPFC propriamente dito.

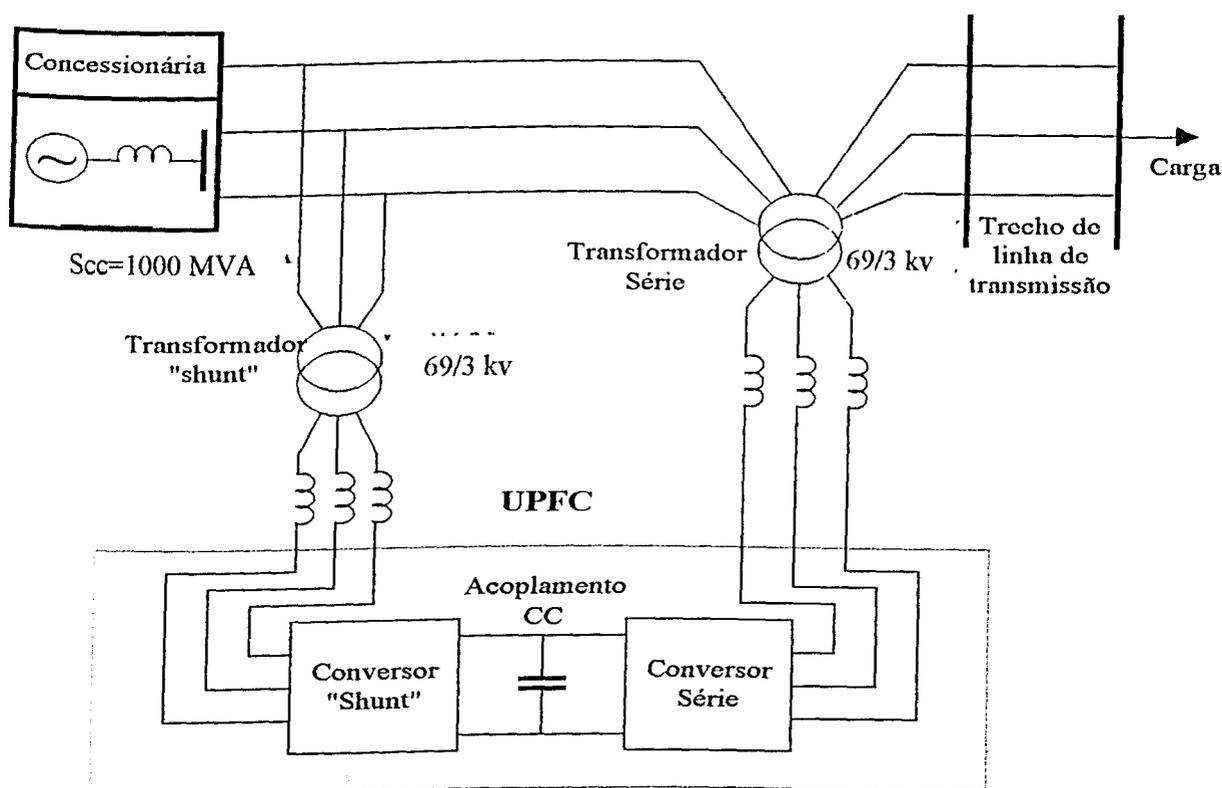


Figura 4.1 - Sistema utilizado para simulação do UPFC

O simulador “SABER”, como mencionado anteriormente, foi a plataforma computacional empregada na realização das simulações, sendo que alguns dos componentes do sistema implementado, já estavam disponíveis em *templates* desenvolvidos em trabalhos de pesquisas anteriores. Neste sentido, de acordo com a figura (4.1), pode-se destacar as seguintes unidades básicas já implementadas em [27]:

- Concessionária;
- Transformadores série e “shunt”;
- Carga;
- Linha de transmissão.

Após as considerações expostas, verifica-se que, fundamentalmente, o desenvolvimento da modelagem restringiu-se à elaboração de dois *templates*. Um deles dedicado a simular o circuito de potência do conversor, e o outro, com vistas a produzir a lógica de disparo necessária à operação do “UPFC”, Deste modo, a seguir, é feita uma explanação a respeito destas unidades.

### 4.3.1 *Template* Unidade de Potência do Conversor

Como amplamente discutido no capítulo III, o UPFC é composto, basicamente, por dois conversores “back-to-back”, conectados através de um elo CC. O primeiro conversor, ou ponte 1, é conectado ao sistema via transformador “shunt”, enquanto a ponte 2 é acoplada ao sistema via transformador série, conforme a figura (4.1). O primeiro conversor interage com o sistema em função da diferença do nível por ele produzida, em relação à tensão do sistema. Por

---

outro lado, a ponte 2 é responsável por injetar uma tensão em série à linha de transmissão. As chaves utilizadas nos conversores, são “GTO’s” de potência, com capacidade de altas frequências de chaveamento, como apresentado anteriormente. Deste modo, este *template* foi desenvolvido no sentido de simular um conversor de frequência “PWM”, cuja frequência de chaveamento implementada foi de 1,8 khz. Para tanto, inicialmente, foi montado o circuito apresentado na figura (4.2), onde “GTO’s” são representados pelas chaves “S”.

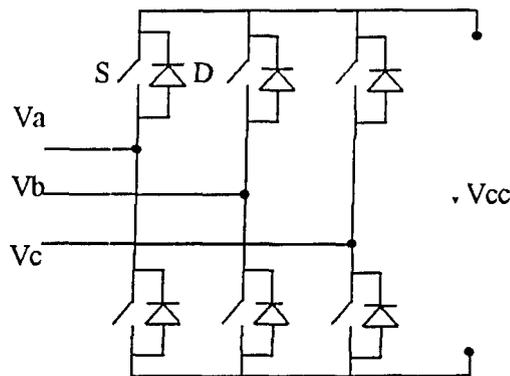


Figura 4.2 – Circuito de Potência de um Conversor

Da figura (4.2), verifica-se a existência basicamente de diodos, denotados por “D”, e chaves, designadas por “S”. Os diodos, fazem parte da biblioteca do simulador e seu princípio de funcionamento é o clássico conhecido na literatura. Vale a pena destacar que, para o circuito em questão, estes são usados como “roda-livre” [5]. Por outro lado, a operação de cada chave (S) merece alguns comentários adicionais, como segue. Tome-se como base a figura (4.3) como referência.

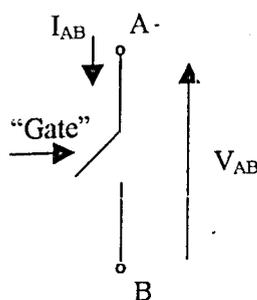


Figura 4.3 – Circuito da chave de potência do conversor

- Se “gate” for igual a “1”, o programa considera a resistência entre os pontos A e B igual a  $1n \Omega$ .
- Se “gate” for igual a “zero”, a resistência entre os pontos A e B é infinita.

A seguir, apresenta-se a unidade de controle implementada, com vistas a obter o funcionamento desejado dos conversores “PWM” do UPFC.

### 4.3.2 *Template* Unidade de Controle

A unidade de controle de disparo das chaves dos conversores trabalha com a filosofia “PWM Senoidal” [28], ou seja, os disparos ocorrem em função da comparação de uma onda triangular com relação a uma onda senoidal. Neste caso específico, a onda triangular tem frequência de 1,8 khz, amplitude de 11 v, enquanto a onda senoidal tem frequência de 60 hz e amplitude 10 v. A figura (4.4) ilustra esta situação.

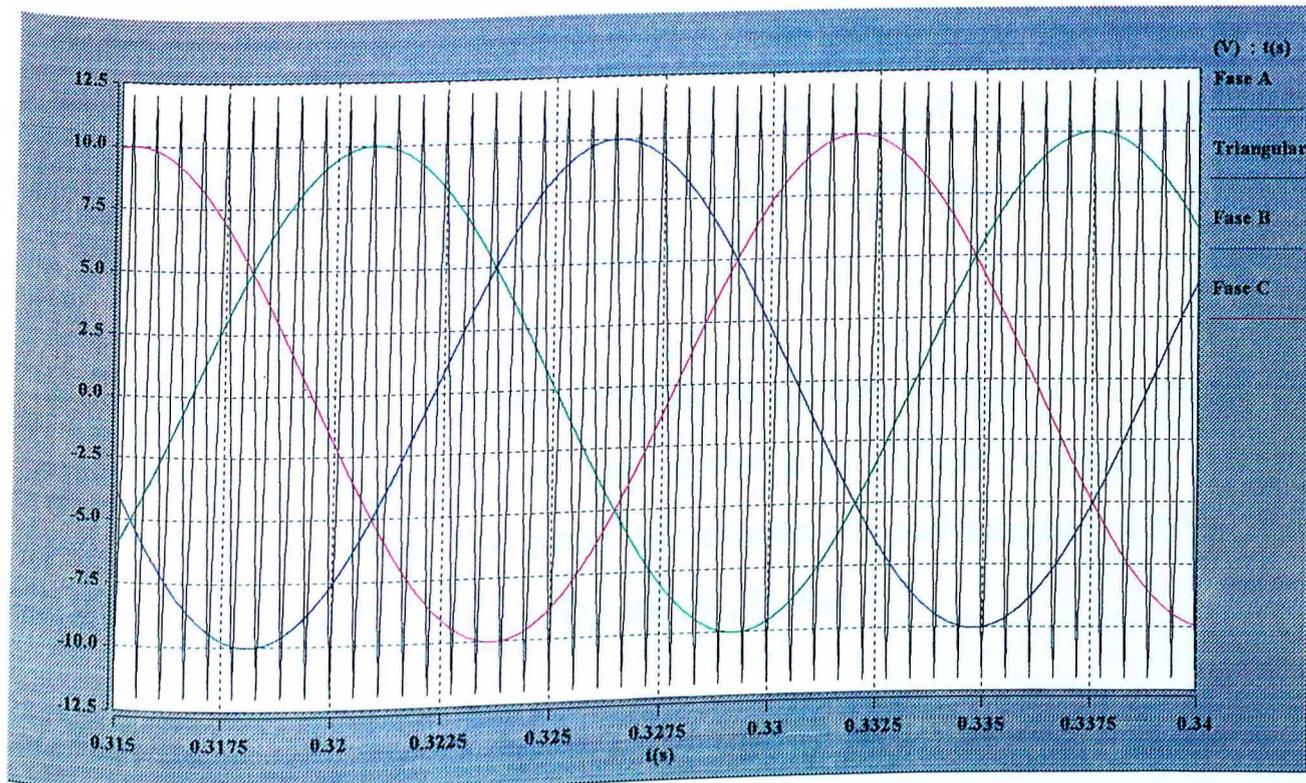


Figura 4.4 - Sinal Comparação para disparo das chaves do Conversor

A título de exemplificação, seja o circuito de potência de um conversor ilustrado na figura (4.5).

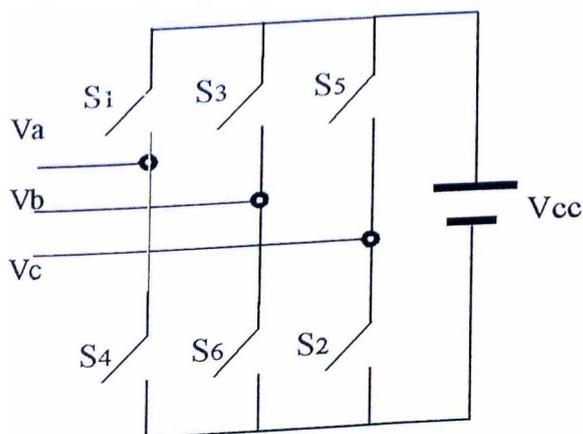


Figura 4.5 - Circuito de potência de um Conversor

O período de condução da chave “S<sub>1</sub>” do conversor se dá sempre que a senóide de controle da fase “a” tem amplitude superior à triangular. Caso contrário, a chave S<sub>4</sub> é que conduzirá. O período de condução da chave “S<sub>3</sub>” do conversor se dá sempre que a senóide de controle da fase “b” tem amplitude superior à triangular. Caso contrário, a chave “S<sub>6</sub>” estará conduzindo. Para as chaves “S<sub>5</sub>” e “S<sub>2</sub>”, a mesma lógica é válida.

A referência para se iniciar a senóide de controle da fase “a”, é a tensão de sequência positiva da fase “a” da barra à qual o UPFC está conectado. Para as fases “b” e “c”, as ondas de controle são criadas respectivamente a 120° e 240° em atraso, com relação à senóide de controle da fase “a”.

O início da senóide de controle da fase “a” merece alguns comentários adicionais. Para tanto, veja a figura (4.6).

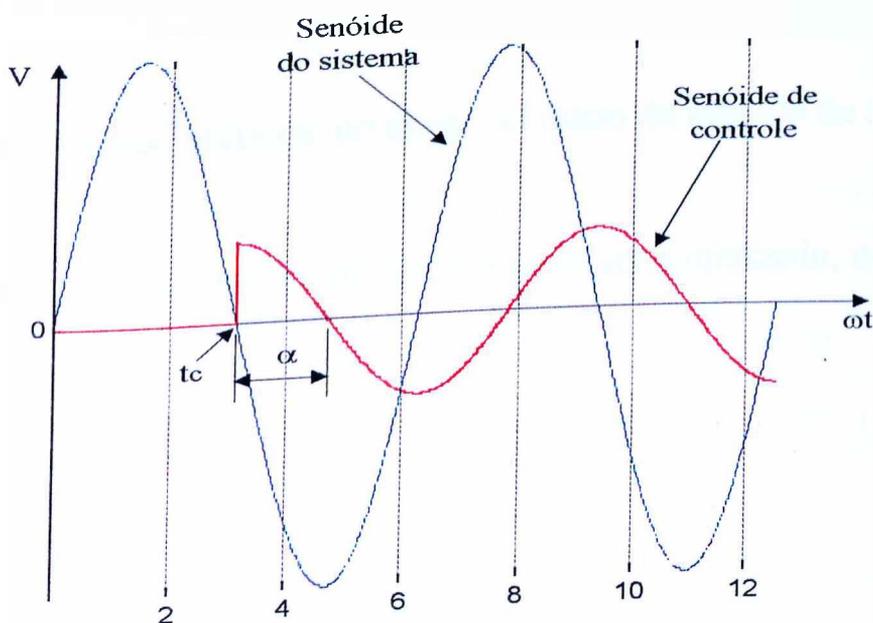


Figura 4.6 - Formação da senóide de controle da fase “a”

Na figura (4.6), tem-se representada em linha azul, a forma de onda da tensão da fase “a” do sistema. O ponto “ $t_c$ ” é o tempo definido para se iniciar a senóide de controle da fase “a” do conversor. Vale a pena frisar que, o ponto “ $t_c$ ” é sempre um instante onde a tensão da fase “a” do sistema passa por zero. O ângulo  $\alpha$  indicado, é responsável pelo defasamento angular da senóide de controle com relação à senóide do sistema, e pode variar de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ . Deste modo, a onda de controle da fase “a” pode ser expressa pela equação (4.1):

$$v_{a_{cont}} = A \cdot \text{sen}[\omega(t - t_c) + \alpha] \quad (4.1)$$

onde:

- $v_{a_{cont}}$  - tensão instantânea de controle da fase “a”
- A - valor de pico da tensão de controle da fase “a”
- $\omega$  - velocidade angular do sistema
- $\alpha$  - ângulo de defasamento da senóide de controle da fase “a”
- t - tempo
- $t_c$  - instante de tempo utilizado no ajuste do início da senóide de controle

Assim, o sistema de pulsos de disparo pode ser sintetizado, como ilustra a figura (4.7).

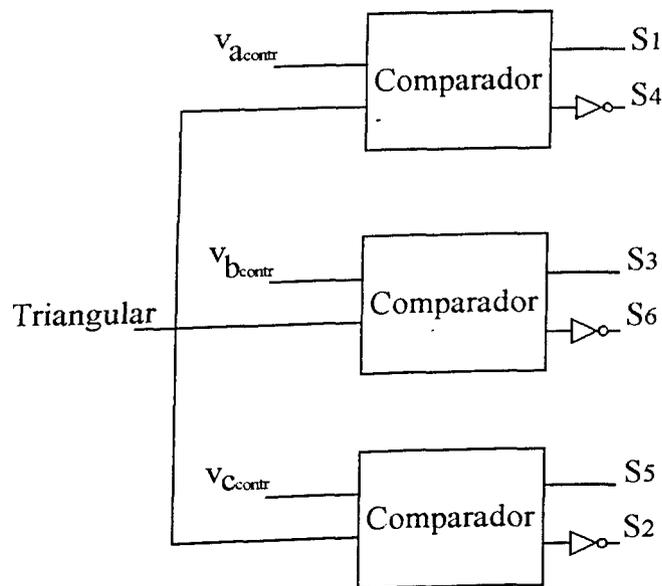


Figura 4.7 - Diagrama de blocos do controle de disparo das chaves do conversor

Na figura (4.7), está representado um sinal triangular comum para as três fases. Este sinal é comparado com a senóide de controle de cada fase, como discutido anteriormente. O resultado disso é refletido em pulsos para as chaves do conversor.

Através do sistema de controle de disparo implementado, é possível definir a magnitude e o ângulo de fase da tensão de saída dos conversores série e “shunt”. A magnitude da tensão de saída é controlada em função da magnitude da senóide de controle, podendo variar de zero até um valor máximo. O ângulo de fase da tensão de saída pode variar de  $0^\circ$  a  $360^\circ$ , de acordo com o ângulo  $\alpha$  de defasagem definido.

A seguir, são apresentados os casos simulados, contendo as análises propostas por esta dissertação de mestrado.

## 4.4 Casos Estudados

Os casos processados no simulador “SABER” objetivaram analisar o desempenho do UPFC, diante de alguns problemas relacionados com a Qualidade da Energia Elétrica. Uma visão geral dos casos simulados é apresentado na tabela (4.1).

Caso	Descrição	Figura	Página
1	Sistema básico <ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem distúrbios</li> <li>• Afundamento temporário de tensão</li> <li>• Elevação temporária de tensão</li> </ul>	4.8	74
2	Sistema com a presença do UPFC	4.12	77
3	Sistema com a presença do UPFC <ul style="list-style-type: none"> <li>• Afundamento temporário de tensão</li> </ul>	4.12	82
4	Sistema com a presença do UPFC <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elevação temporária de tensão</li> </ul>	4.12	88
5	Sistema com a presença do UPFC – Concessionária contendo 5% de distorção harmônica total de tensão <ul style="list-style-type: none"> <li>• Afundamento temporário de tensão</li> </ul>	4.12	94
6	Sistema com a presença do UPFC – Concessionária contendo 5% de desequilíbrio de tensão	4.12	99

Tabela 4.1 - Resumo dos casos simulados

A seguir, são apresentados os resultados obtidos.

### 4.4.1 Caso 1 - Sistema Básico

Neste primeiro caso, buscou-se apresentar o comportamento genérico do sistema, com vistas a oferecer uma sustentação comparativa aos casos estudados subsequentemente. A figura (4.8) ilustra o diagrama unifilar do sistema simulado.

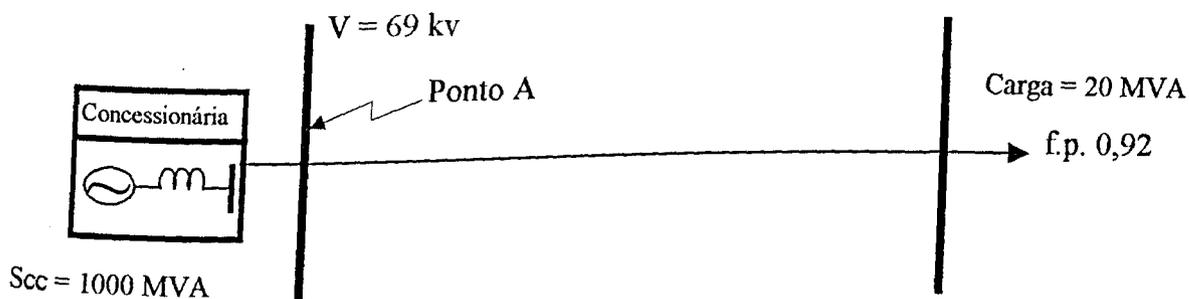


Figura 4.8 - Diagrama unifilar do sistema de potência simulado

Para este sistema, foram realizadas as seguintes simulações:

- a) Sistema sem distúrbios;
- b) Sistema com afundamento temporário de tensão (*sag*);
- c) Sistema com elevação temporária de tensão (*swell*).

Os resultados obtidos, consistem em curvas representativas do comportamento da tensão no ponto "A" do diagrama unifilar, conforme mostrado nas figuras (4.9), (4.10) e (4.11).

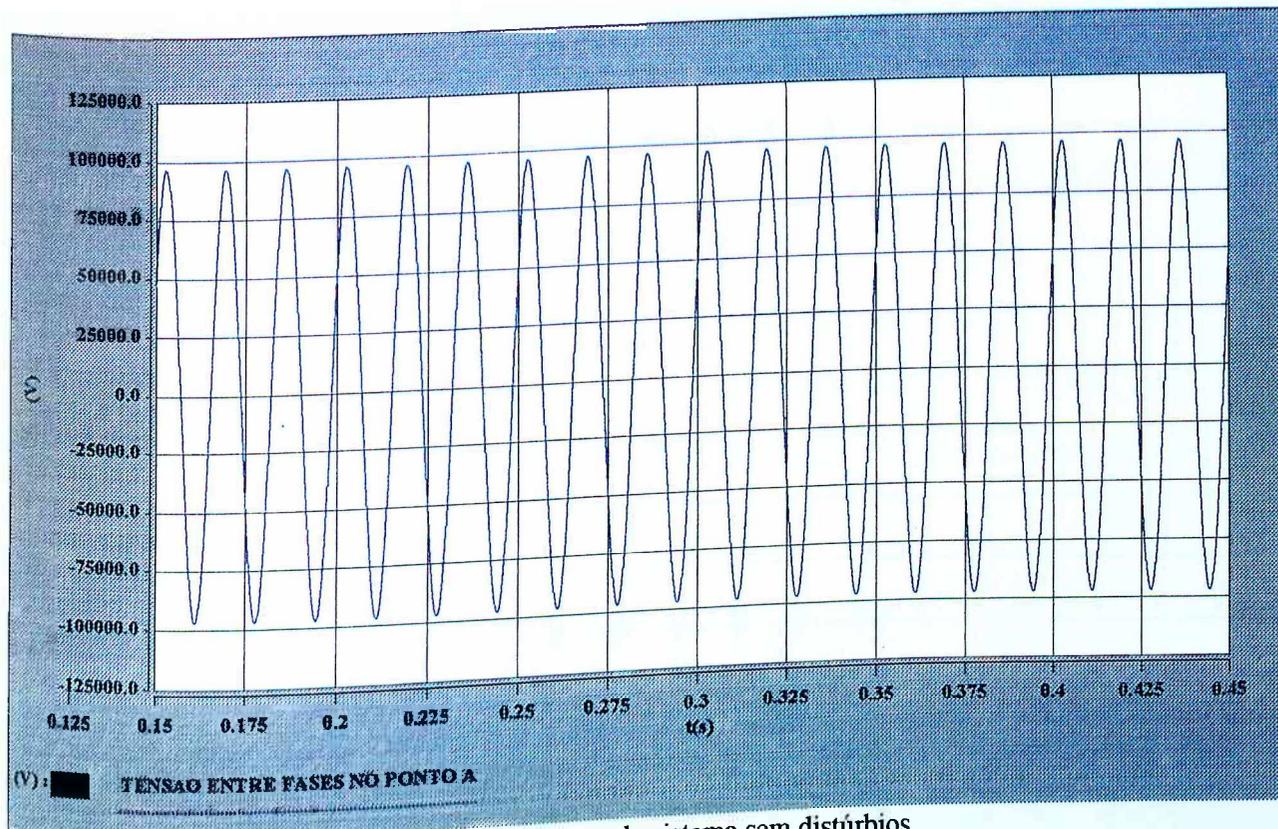


Figura 4.9 - Tensão do sistema sem distúrbios

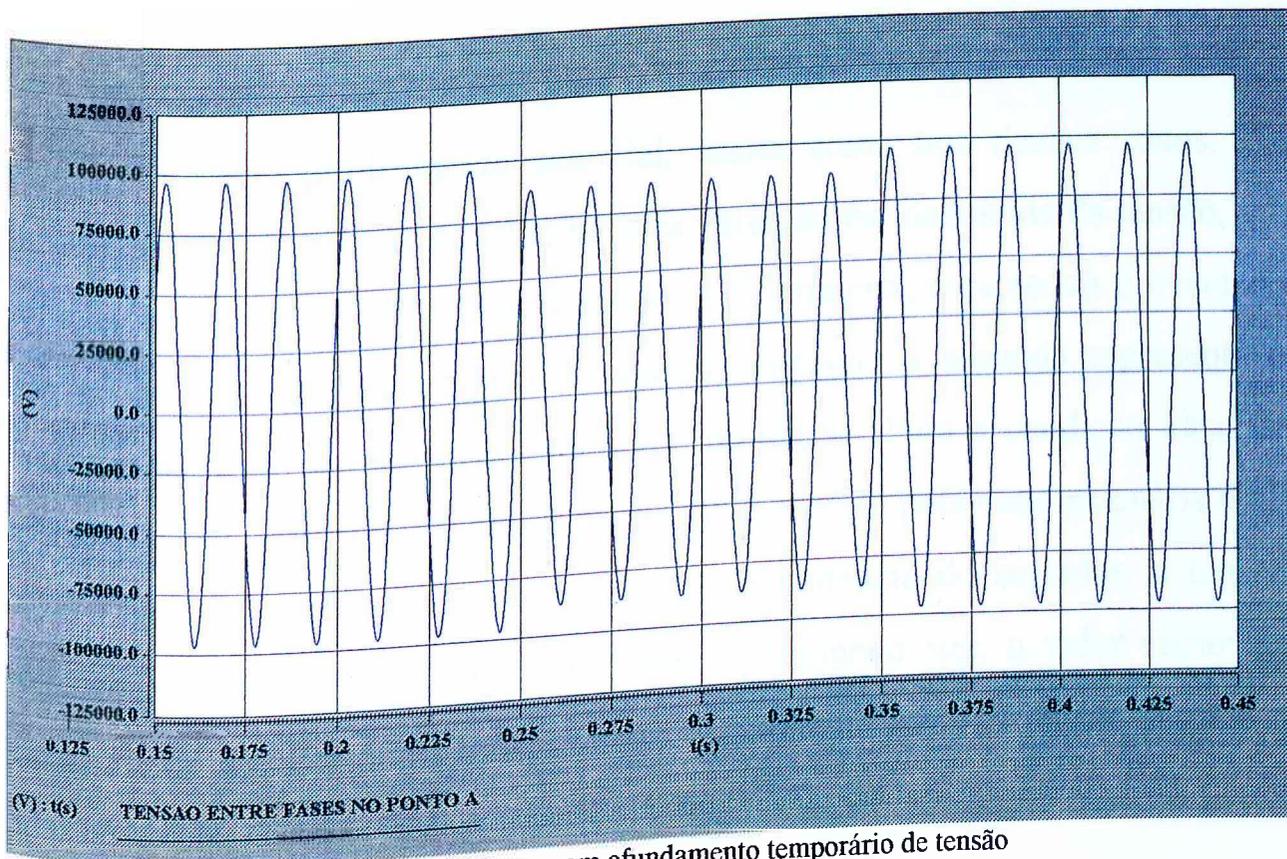


Figura 4.10 - Sistema com afundamento temporário de tensão

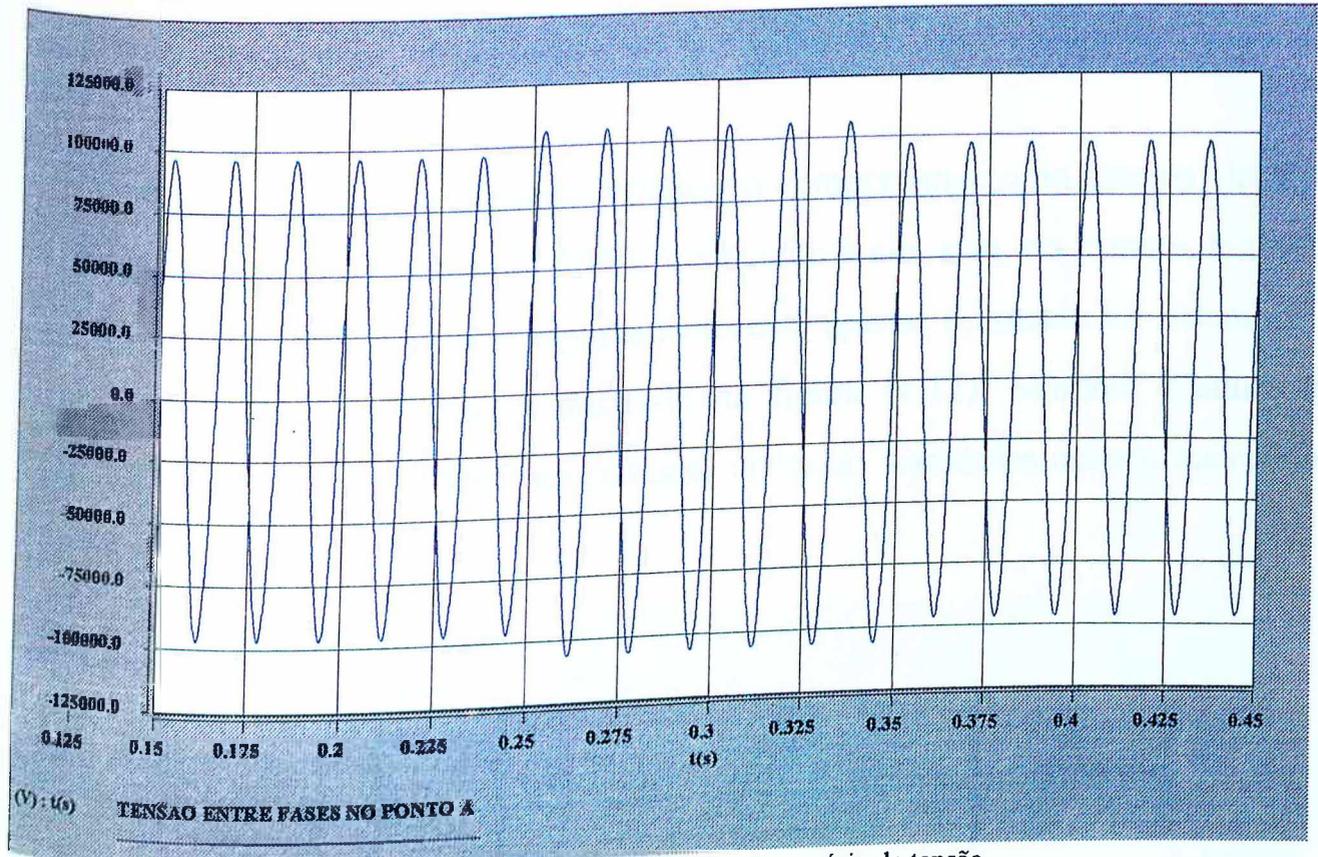


Figura 4.11 - Sistema com elevação temporária de tensão

Analisando a curva obtida para o sistema sem distúrbios, verifica-se que esta se apresenta praticamente senoidal, assim como nos demais casos. No entanto, nas figuras (4.10) e (4.11) há uma variação na magnitude da tensão, em um intervalo de tempo de 100 milisegundos. A primeira, caracteriza o chamado *sag*, ou afundamento temporário de tensão, enquanto a segunda representa o denominado *swell*, ou elevação temporária da tensão. Para a condição ideal de operação do sistema, o valor eficaz da tensão fornecida pela concessionária é 69 kv. No entanto, devido à queda de tensão na reatância do suprimento, a tensão verificada no ponto A é 68,5 kv. Durante o fenômeno *sag*, o valor eficaz da tensão é 61,6 kv. Por outro lado, durante o fenômeno *swell*, a tensão assume o valor eficaz de 75,3 kv. Essa variação na magnitude da tensão, caracteriza perda de qualidade do suprimento elétrico.

#### 4.4.2 Caso 2 - Sistema com a presença do UPFC

Esta simulação tem por meta verificar o comportamento do sistema elétrico proposto, diante da presença do UPFC conectado a ele, sem, no entanto, ocorrer sua atuação efetiva, ou seja, o equipamento está apenas flutuando no sistema. O diagrama unifilar deste caso é ilustrado na figura (4.12). Maiores detalhes a respeito da conexão do UPFC ao sistema, já foram discutidos anteriormente no capítulo III.

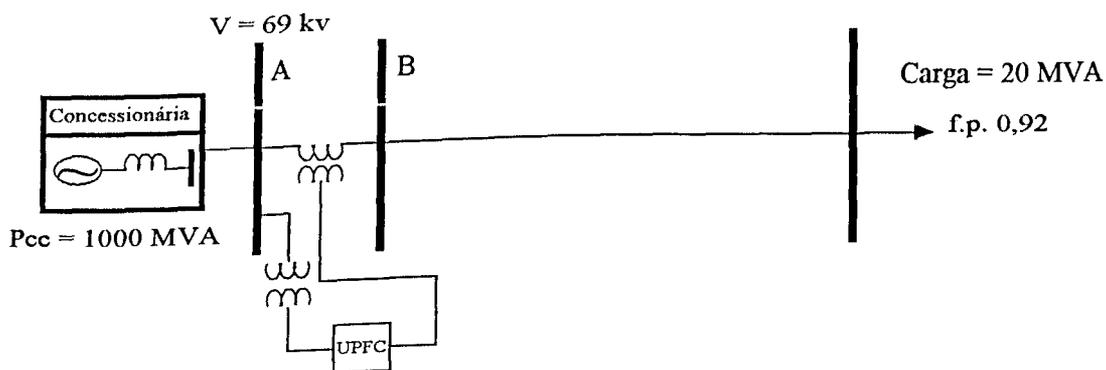


Figura 4.12 - Diagrama unifilar do sistema de potência com UPFC conectado

O estado inoperante do UPFC, é caracterizado pela não circulação de corrente no ramo “shunt” e ausência de injeção de tensão no transformador série. Para que nenhuma tensão seja injetada em série, basta que não se faça os chaveamentos do conversor série do UPFC. Por outro lado, não há circulação de corrente no ramo “shunt” quando a tensão produzida pelo conversor “shunt” é igual em módulo e fase à tensão de suprimento do sistema. Assim, o comportamento da tensão para a situação descrita, verificado nos pontos A e B indicados no diagrama unifilar, está representado nas formas de ondas a seguir.

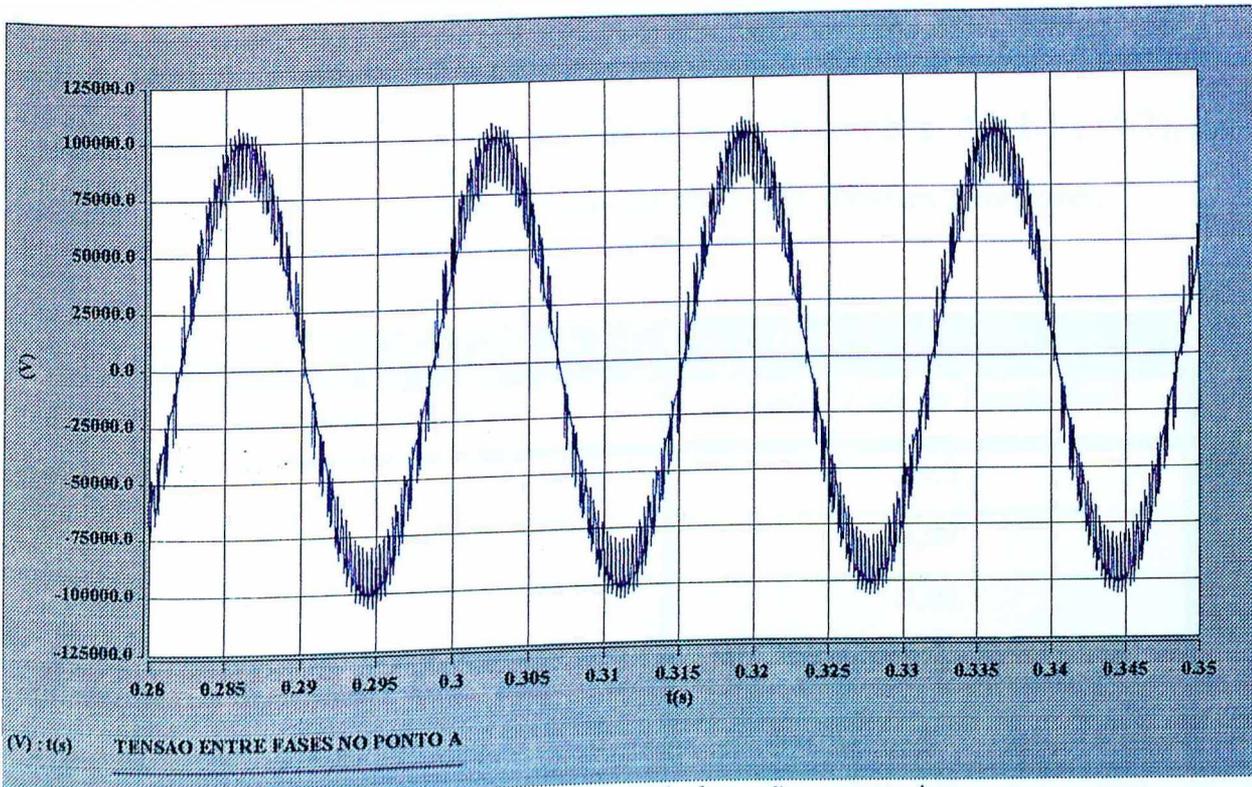


Figura 4.13 - Forma de onda da tensão no ponto A

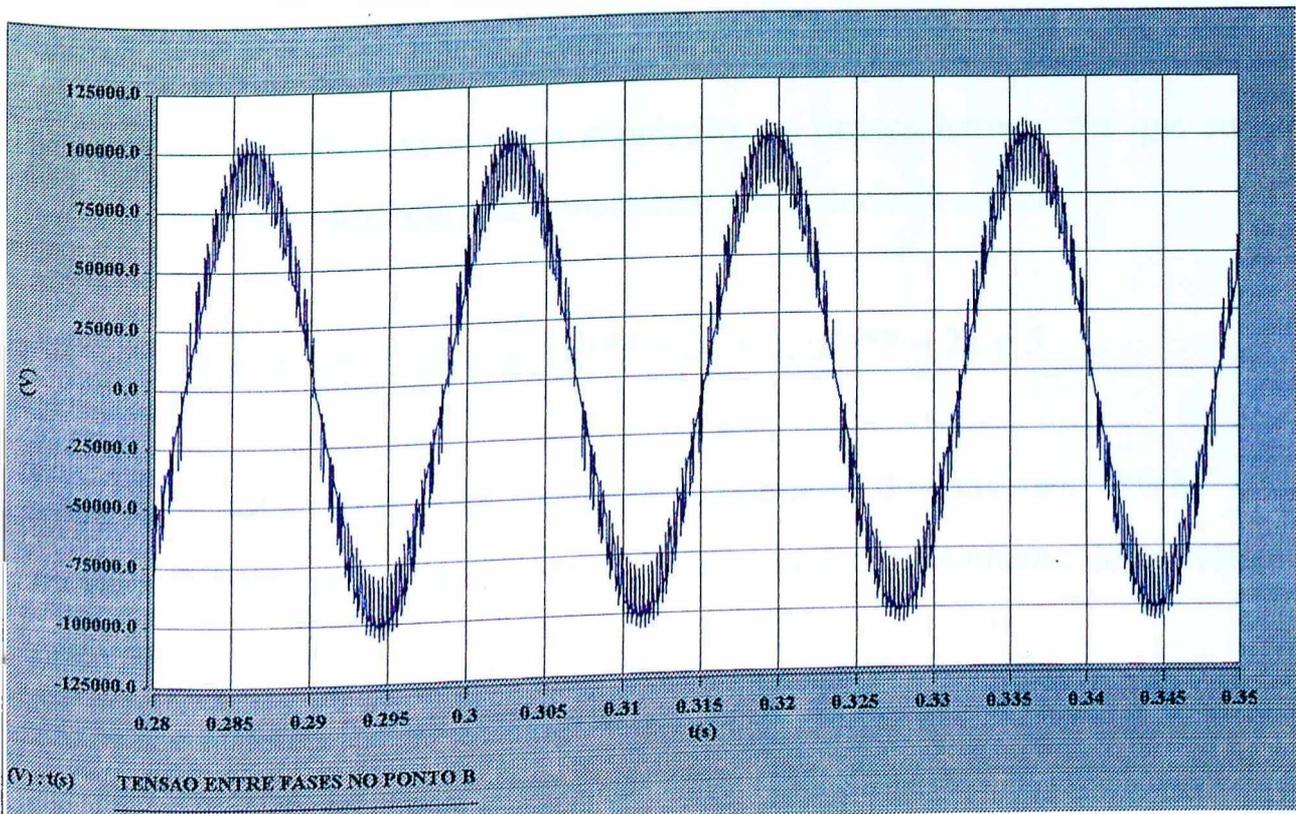


Figura 4.14 - Forma de onda da tensão no ponto B

Observando-se as curvas ilustradas, constata-se que a tensão nos pontos A e B são iguais. Todavia, há a necessidade de se verificar o espectro harmônico de ambas, haja visto que estas apresentam-se com distorções. A tabela (4.2), fornece o conteúdo harmônico para as formas de onda das tensões anteriores.

Decomposição Harmônica da Tensão entre Fases no Ponto A	
Ordem harmônica	Valor Eficaz da Tensão (kv)
1	68,5
28	2,07
32	2,06
59	2,6
61	2,6

Tabela 4.2 – Espectro Harmônico da Tensão entre Fases no Ponto A

De acordo com a referência [29], para as características apresentadas pelos conversores implementados nesta simulação, as ordens harmônicas que surgem em decorrência de sua operação, obedecem aos critérios a seguir:

$$n^* = k \pm 2; n^{**} = 2k \pm 1; n^{***} = 2k \pm 3; n^{****} = 2k \pm 5 \quad (4.1)$$

sendo “n” a ordem harmônica resultante da operação do conversor “PWM” e “k” um valor definido pela relação entre a frequência de chaveamento do conversor e a frequência fundamental:

$$k = \frac{f_c}{f} \quad (4.2)$$

Conforme a referência [29], não é possível uma generalização para a expressões apresentadas.

Com base nas considerações apresentadas e no espectro harmônico obtido, é possível concluir que os resultados obtidos condizem com o esperado. Os harmônicos inerentes aos termos  $n^{***}$  e  $n^{****}$  foram omitidos na tabela (4.2) em função de suas magnitudes serem pouco significativas.

Com o objetivo de se verificar a forma de onda da tensão na saída do conversor “shunt” do UPFC, a figura (4.15) mostra que a mesma é do tipo “PWM”, cuja frequência de chaveamento do conversor é 1,8 khz.

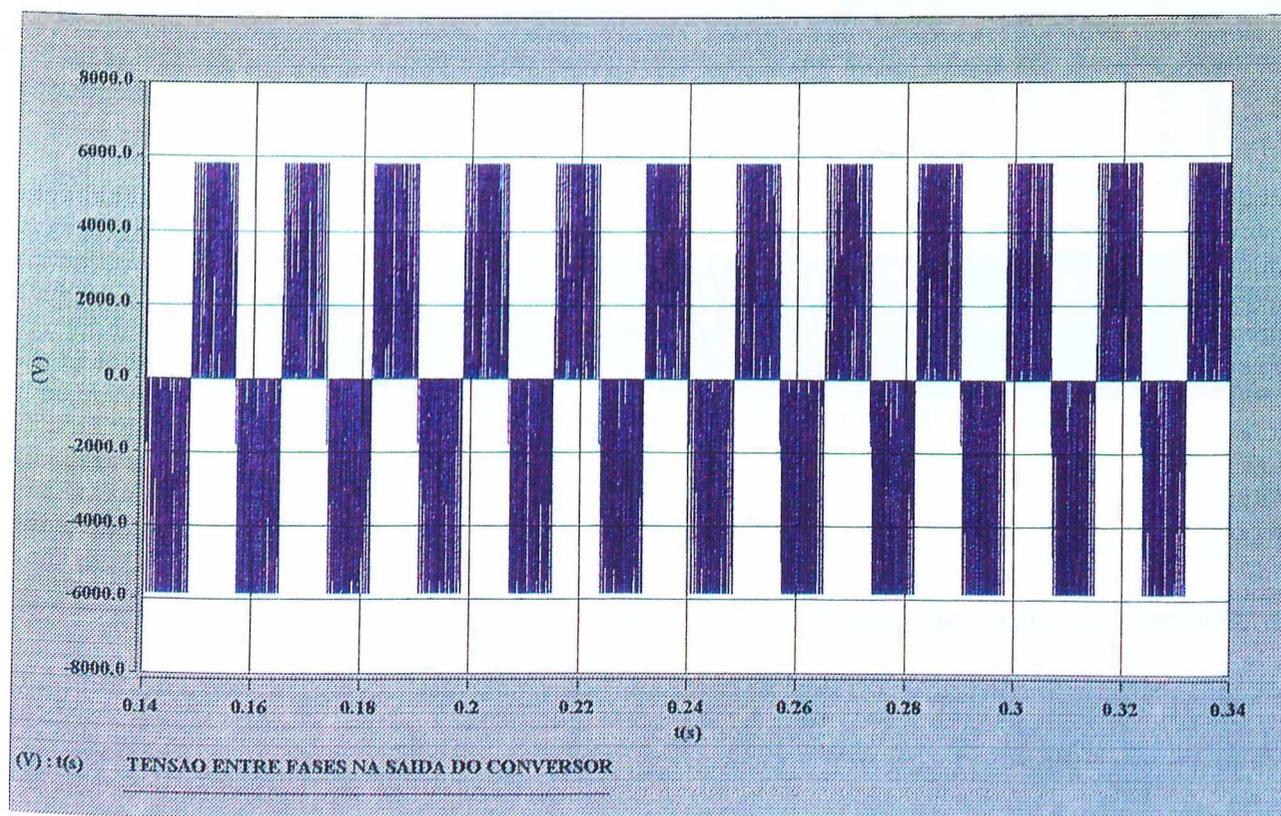


Figura 4.15 – Tensão de saída do conversor “shunt”

Com relação ao conversor série, vale a pena destacar que, neste caso simulado, sua contribuição é nula, ou seja, não há tensão sendo injetada no sistema através de sua saída.

Mesmo com o equipamento não exercendo nenhum tipo de compensação, constata-se a corrente no ramo “shunt” do UPFC, como segue.

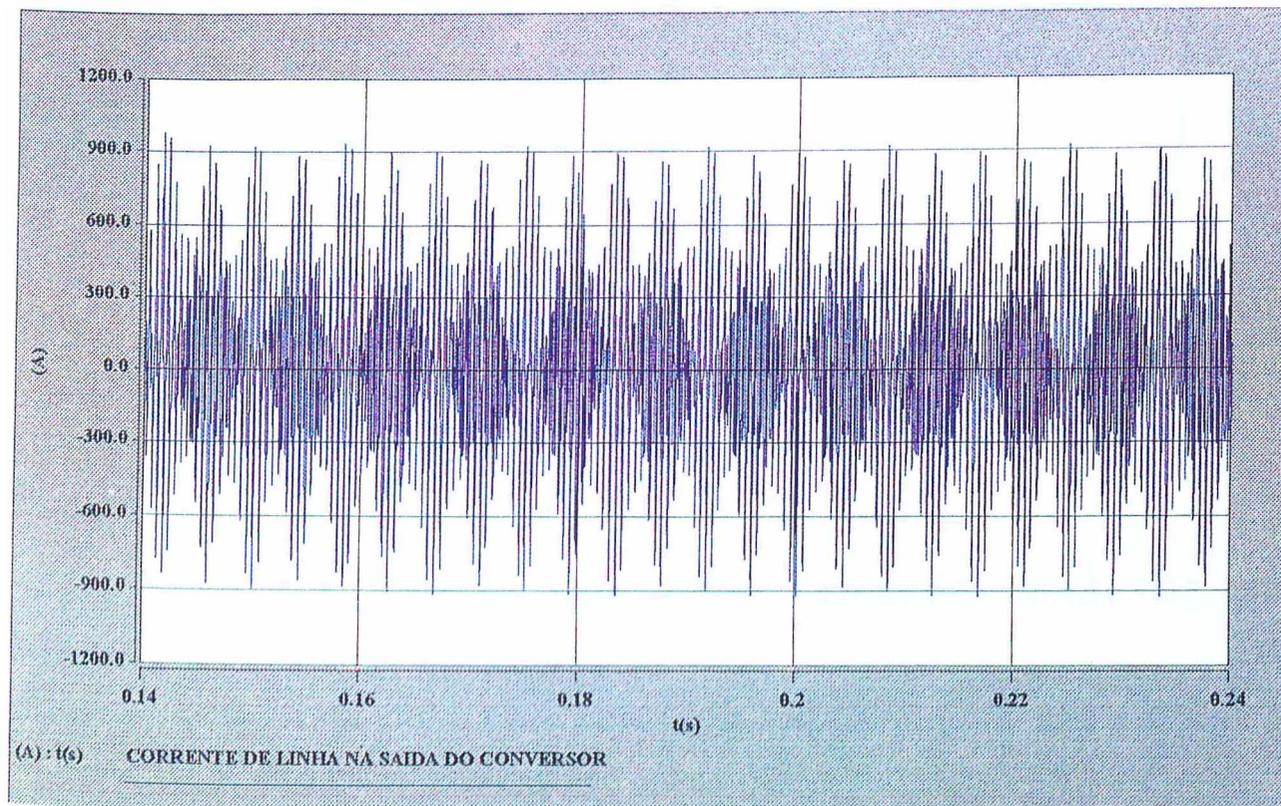


Figura 4.16 – Corrente no ramo “shunt” do UPFC

Quanto à decomposição harmônica para a forma de onda de corrente, a tabela (4.3) mostra os resultados obtidos. Destes, verifica-se um pequeno nível de corrente fundamental, o qual, na verdade, deveria ser nulo. Todavia, esta situação pode ser justificada pela pequena diferença existente entre as tensões no primário (oriunda da rede) e secundário (da ponte “shunt”). Por outro lado, o conteúdo harmônico presente na corrente é atribuído ao desbalanço entre as tensões harmônicas presentes nas tensões supra citadas. Quanto às ordens destas, conforme anteriormente apresentado, estas são típicas para a frequência de chaveamento empregada.

Decomposição Harmônica da Corrente no ramo "shunt" do UPFC	
Ordem harmônica	Valor Eficaz da Corrente (A)
1	0,16
28	9,4
32	8,2
59	5,6
61	5,4

Tabela 4.3 – Espectro harmônico da corrente no ramo "shunt" do UPFC

#### 4.4.3 Caso 3 - Sistema com UPFC atuando diante de um Afundamento de Tensão

O sistema de potência utilizado na realização desta simulação é o mesmo da figura (4.12). Todavia, este estudo é realizado com vistas a verificar o comportamento do sistema e do UPFC no sentido de compensar um afundamento temporário da tensão (*sag*).

A estratégia utilizada foi simular o sistema em regime permanente até 250 ms. No intervalo compreendido entre 250 ms e 350 ms, a tensão da concessionária sofreu uma redução de 10%; e finalmente, entre 350ms a 450 ms, a tensão retoma seu valor nominal. Com esse procedimento, é possível visualizar com clareza os efeitos da compensação do UPFC.

Durante todo o intervalo da simulação, foram colhidas as formas de onda da tensão nos pontos A e B. Os resultados obtidos, estão indicados nas figuras

(4.17) e (4.18). Além disso, também foi monitorada a corrente no ramo “shunt” do compensador.

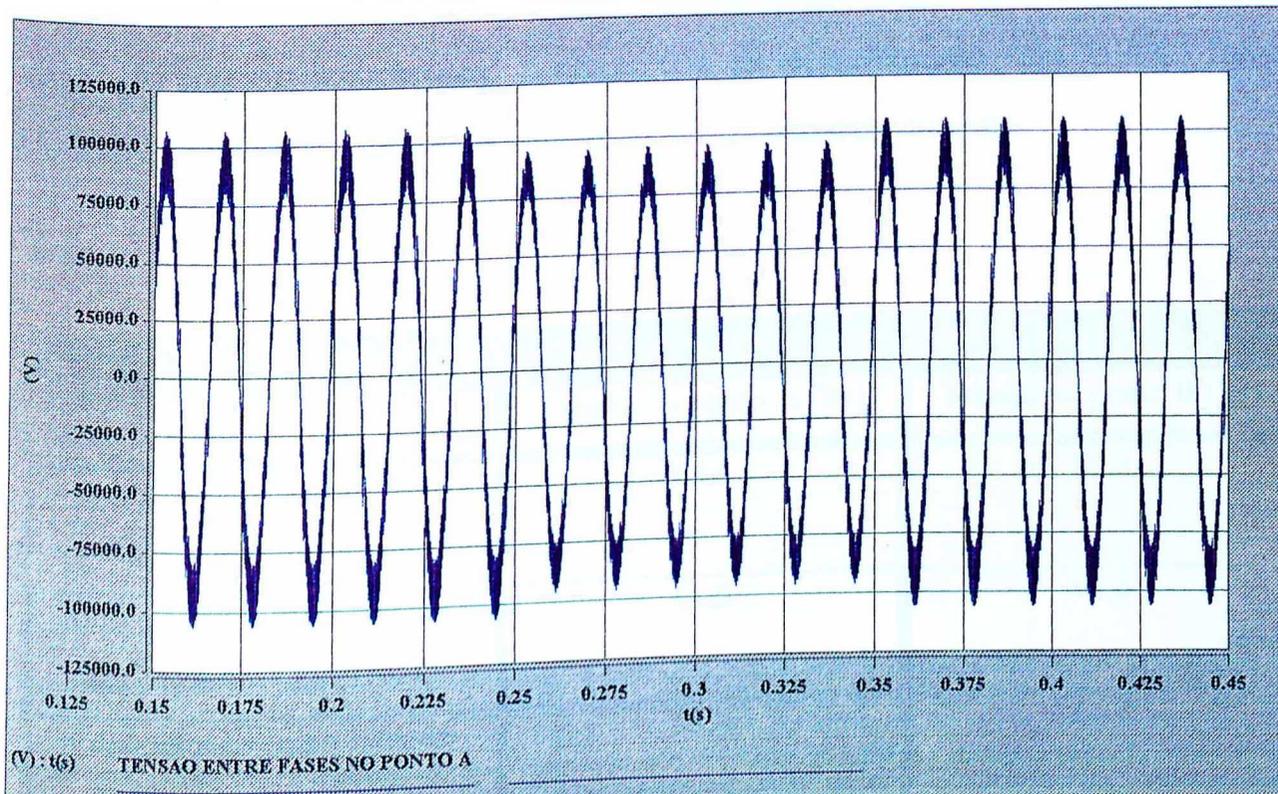


Figura 4.17 - Forma de onda da tensão no ponto A para o caso de sag

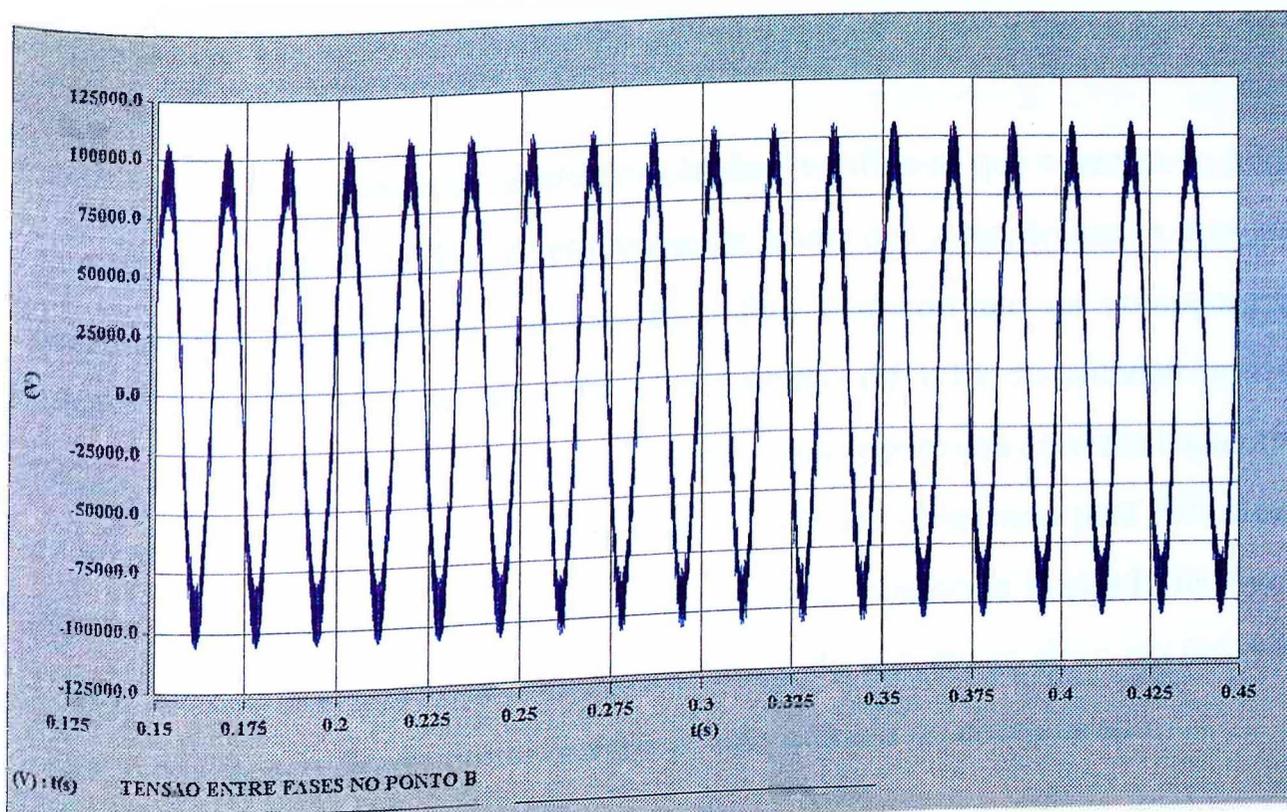


Figura 4.18 - Forma de onda da tensão no ponto B para o caso de sag

Fundamentando-se nas curvas ilustradas, e também nas simulações anteriores, obteve-se a tabela a seguir. Os valores de tensão apresentados para os casos da concessionária ideal e com 10% de afundamento sem UPFC, foram obtidos nos estudos realizados nos casos 1 e 2, respectivamente.

Comparação da Tensão entre Fases do Sistema Simulado		
Caso	Tensão no ponto A (kv)	Tensão no ponto B (kv)
Concessionária ideal	68,5	68,5
Concessionária com 10% de afundamento – sem UPFC	61,6	61,6
Concessionária com 10% de afundamento – com UPFC	62,6	66,8

Tabela 4.4 – Tabela Comparativa das tensões entre Fases nos Pontos A e B durante o *sag*

Comparando os resultados obtidos, verifica-se que a tensão no ponto A, com a presença do UPFC, é relativamente maior que a tensão sem a presença deste, durante a ocorrência do *sag*. Este fato é decorrente da compensação “shunt” realizada pelo equipamento. O acréscimo de 1 kv ao afundamento de tensão, é justificado pelo fato do UPFC estar absorvendo uma corrente capacitiva no ramo “shunt” durante o fenômeno, como pode ser observado pela defasagem angular existente entre esta e a tensão do sistema, conforme ilustrado na figura (4.19), fato este que contribui para que a tensão do sistema se eleve em um dado valor, que depende dentre outras variáveis, da potência do compensador.

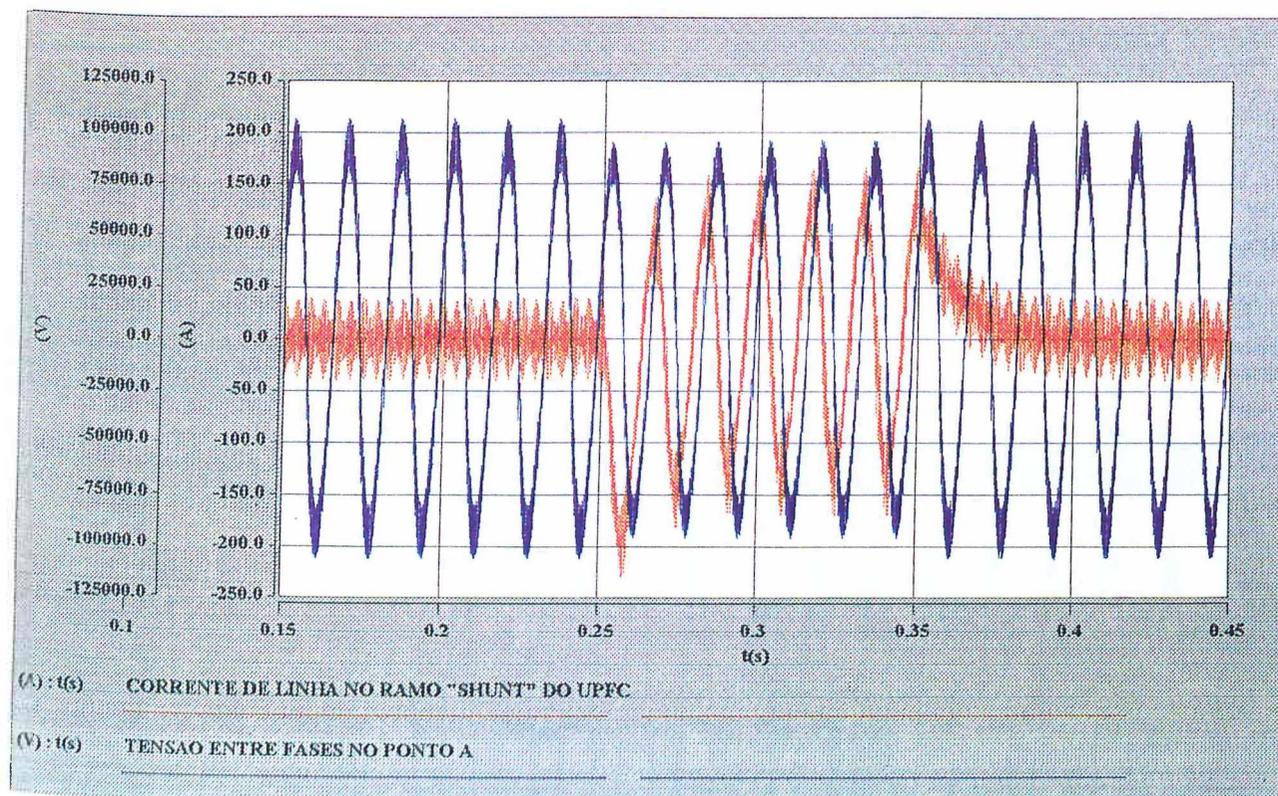


Figura 4.19 - Tensão e corrente no ramo "shunt" do UPFC

Pode-se verificar ainda, através da figura (4.19), que enquanto o sistema está operando em regime permanente, o valor eficaz da corrente de frequência fundamental circulando no ramo "shunt" é praticamente nula, conforme visto nas simulações realizadas no caso 2. Durante o afundamento da tensão, circula neste mesmo ramo, uma corrente  $90^\circ$  adiantada com relação à tensão do sistema, caracterizando a atuação do UPFC como compensador "shunt" capacitivo. No entanto, a contribuição do "compensador generalizado" diante do distúrbio simulado, não se restringe tão somente à injeção de reativos como compensador "shunt". Deve-se verificar ainda, a contribuição do lado Série do UPFC. Neste sentido, observando-se a tabela (4.4), constata-se que a tensão no ponto B, com a presença do UPFC, é maior que no ponto A para a mesma circunstância. Este fato é decorrente da tensão injetada pelo conversor série do UPFC. Neste caso

específico, o controle do equipamento foi programado para produzir uma tensão injetada com o máximo valor possível de saída e com mesmo ângulo de fase da tensão do sistema.

O resultado da compensação total do UPFC, está sintetizado na figura (4.20).

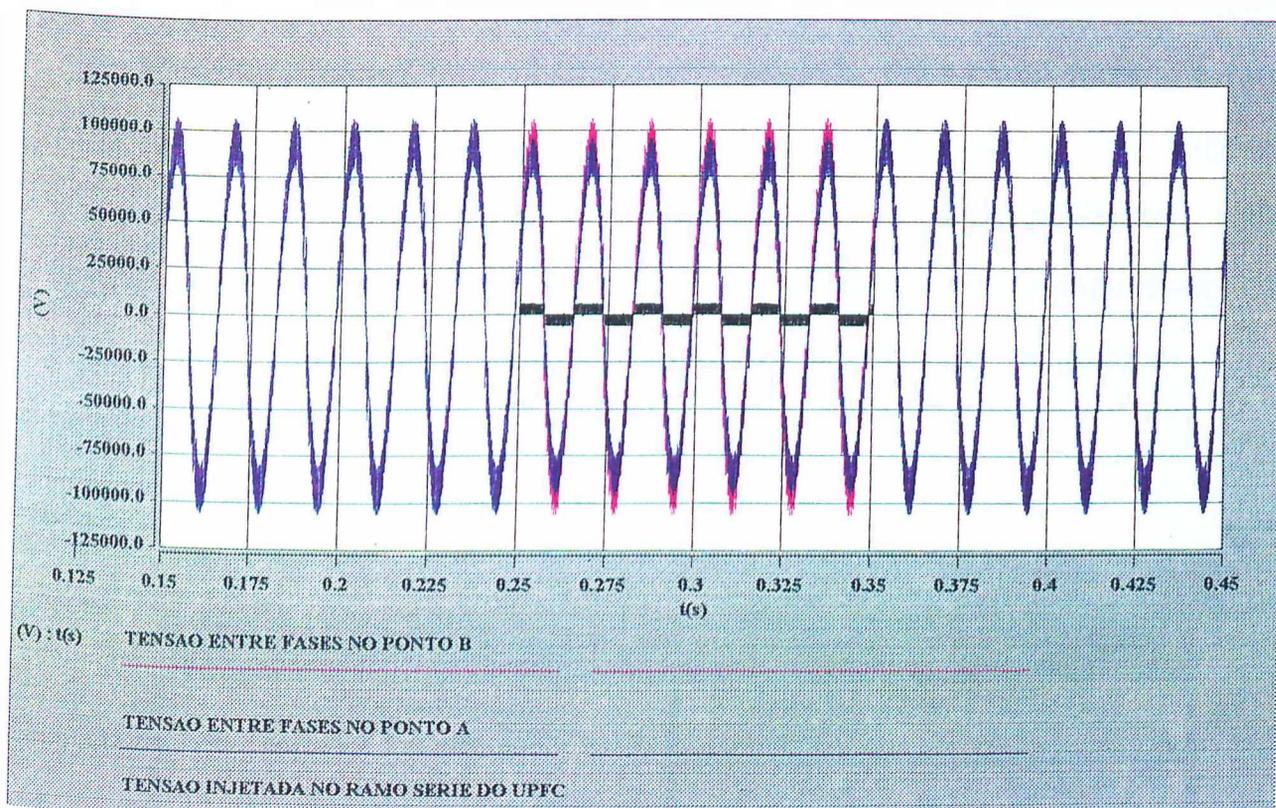


Figura 4.20 - Formas de onda da Tensão série injetada, da Tensão do sistema e da Tensão resultante no ponto B do sistema simulado

A figura (4.20) mostra a tensão no ponto B, ilustrando a compensação total do UPFC. Na mesma figura, está também representada a tensão no ponto A, onde verifica-se que, no intervalo compreendido entre 250 ms e 350 ms, seu valor é menor que o apresentado em regime permanente. Ainda nesta mesma figura, é ilustrada a tensão injetada em série pelo conversor 2 do UPFC, onde constata-se

que seu ângulo de fase é o mesmo da tensão do sistema. A legenda da figura auxilia na identificação destas tensões.

Do exposto, verifica-se que houve uma efetiva atuação do UPFC no sentido de atenuar o efeito do afundamento temporário da tensão, contribuindo assim, para garantir um determinado padrão de qualidade da energia elétrica. Com respeito à contribuição harmônica produzida pelo equipamento, a tabela (4.5) fornece os resultados obtidos pela decomposição através da FFT disponível no programa. Conforme pode ser constatado, as correspondentes ordens permaneceram praticamente inalteradas, e, em função do equipamento estar efetivamente contribuindo com a tensão do sistema, as magnitudes sofrem pequenas alterações

Decomposição Harmônica da Tensão entre Fases		
Ordem harmônica	Valor Eficaz da Tensão (kv)	
	Ponto A	Ponto B
1	62,6	66,8
28	1,7	2,5
32	1,7	1,3
59	2,2	1,7
61	2,2	0,5

Tabela 4.5 – Decomposição harmônica da tensão

#### 4.4.4 Caso 4 - Sistema com UPFC atuando diante de uma Elevação de Tensão

Este estudo é realizado com vistas a verificar o comportamento do sistema e do UPF, diante de uma elevação temporária de tensão (*swell*).

A estratégia utilizada foi simular o sistema em regime permanente até 250 ms; no intervalo compreendido entre 250 ms a 350 ms, aumentar a tensão da concessionária em 10% e, finalmente, entre 350ms a 450 ms, retornar a tensão a seu valor nominal. Com esse procedimento, é possível visualizar com clareza os efeitos da compensação do UPFC.

Para todo o intervalo da simulação foram selecionadas as formas de onda da tensão nos pontos A e B. Os resultados obtidos, estão mostrados nas figuras (4.21) e (4.22). Além disso, também foi monitorada a corrente no ramo “shunt” do compensador, conforme indica a figura (4.23).

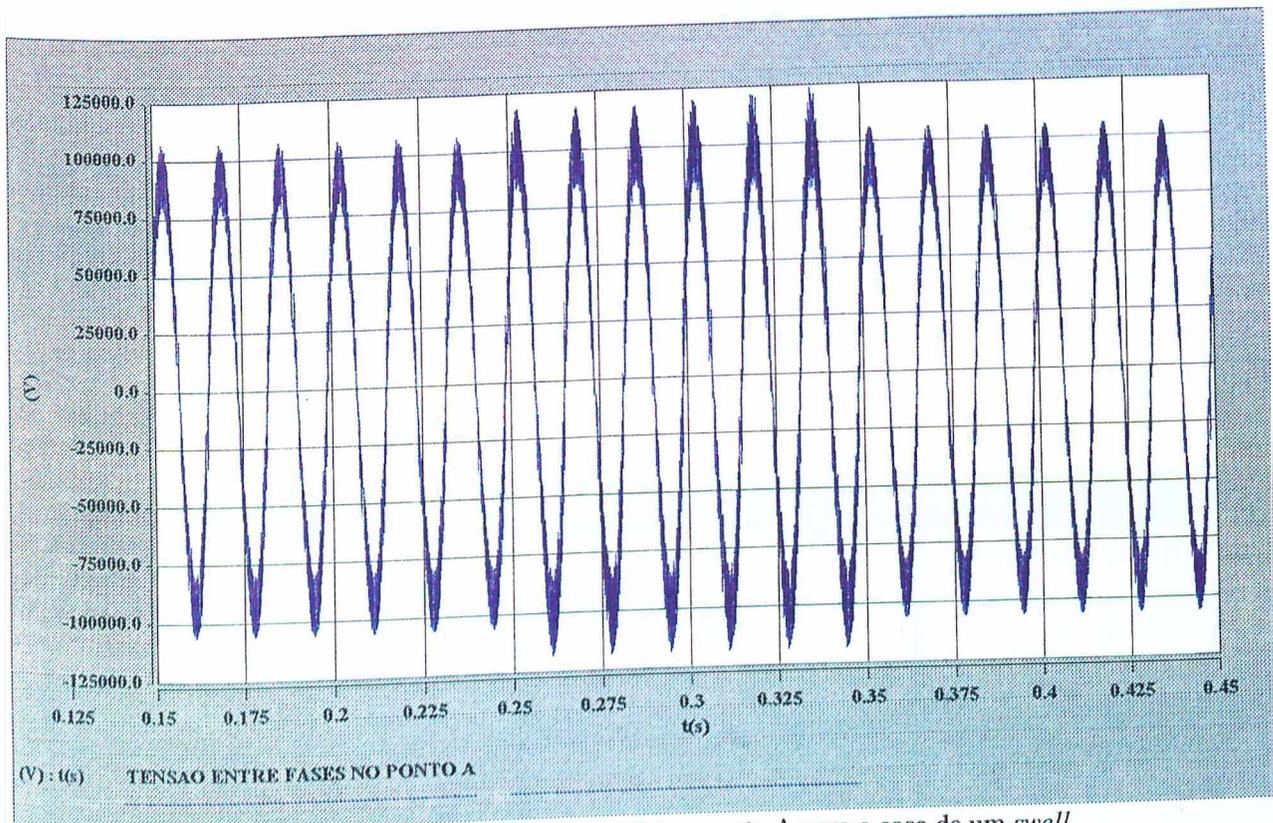


Figura 4.21 - Forma de onda da tensão no ponto A para o caso de um *swell*

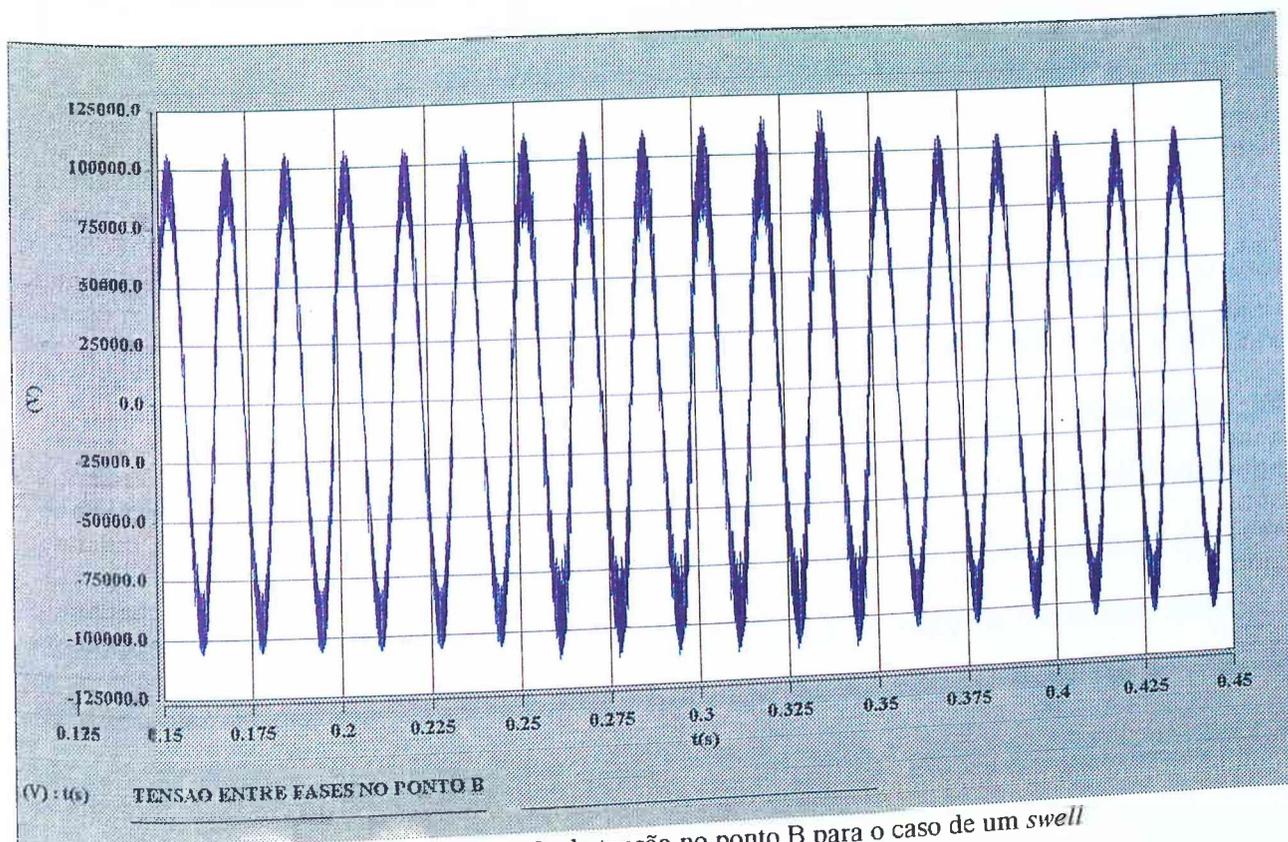


Figura 4.22 - Forma de onda da tensão no ponto B para o caso de um *swell*

Fundamentando-se nas curvas ilustradas, e também nas simulações anteriores, é possível elaborar a tabela comparativa a seguir, através da qual, facilmente se identifica a ação do UPFC. Deve-se notar que os valores de tensão, para o caso da concessionária ideal e com 10% de afundamento sem UPFC, foram obtidos das simulações realizadas nos casos 1 e 2, respectivamente.

Comparação da Tensão entre Fases do Sistema Simulado		
Caso	Tensão no ponto A (kv)	Tensão no ponto B (kv)
Concessionária ideal	68,5	68,5
Concessionária com 10% de elevação de tensão – sem UPFC	75,3	75,3
Concessionária com 10% de elevação de tensão – com UPFC	73,9	69,9

Tabela 4.6 – Tabela Comparativa das tensões entre Fases nos Pontos A e B

Comparando os resultados obtidos, verifica-se que a tensão no ponto A, com a presença do UPFC, é relativamente menor que a tensão sem a presença deste. Este fato é decorrente da compensação “shunt” realizada pelo equipamento. O decréscimo de 1,4 kv à elevação de tensão, é justificado pelo fato do UPFC estar absorvendo uma corrente indutiva no ramo “shunt” durante o fenômeno, como pode ser observado pela defasagem angular existente entre esta e a tensão do sistema, conforme ilustrado na figura (4.23). Este fato contribui para que a tensão do sistema se reduza em um dado valor, que depende dentre outros fatores, da potência do compensador.

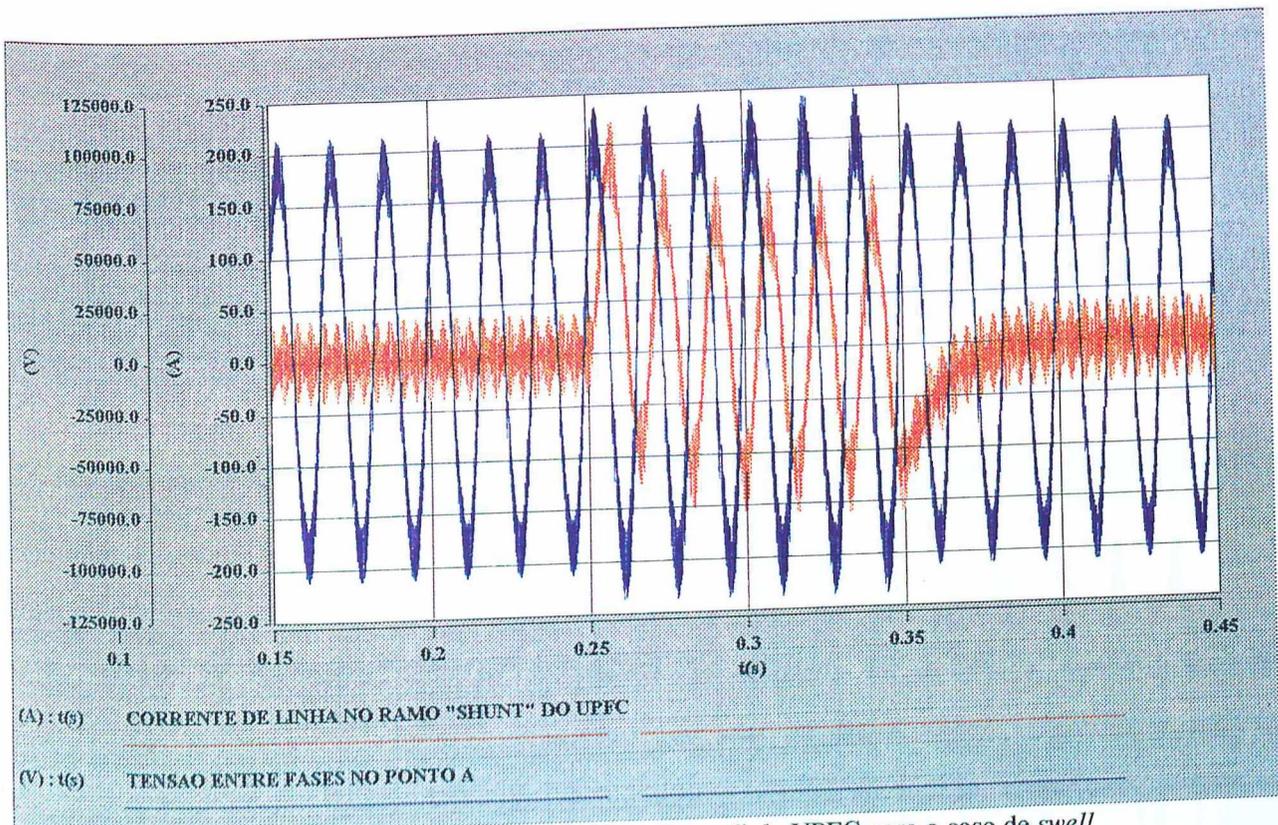


Figura 4.23 - Tensão e corrente no ramo "shunt" do UPFC para o caso de *swell*

Pode-se verificar através da figura (4.23) que, enquanto o sistema está operando em regime permanente, o valor eficaz da corrente de frequência fundamental circulando no ramo "shunt" é praticamente nula, conforme visto nas simulações realizadas no caso 2. Durante a elevação da tensão, se estabelece neste mesmo ramo, uma corrente  $90^\circ$  atrasada com relação à tensão do sistema, caracterizando a atuação do UPFC como compensador "shunt" indutivo. No entanto, a contribuição do "compensador generalizado" diante do distúrbio simulado, não se restringe tão somente à absorção de reativos como compensador "shunt". Deve-se verificar ainda a contribuição do lado Série do UPFC. Neste sentido, observando-se a tabela (4.6), constata-se que a tensão no ponto B, com a presença do UPFC, é menor que no ponto A, para a mesma circunstância. Este

fato é decorrente da tensão injetada pelo conversor série do UPFC. Neste caso específico, o controle do equipamento foi programado para produzir uma tensão injetada com o máximo valor possível de saída e com ângulo de fase em oposição à da tensão do sistema.

O resultado da compensação total do UPFC, está ilustrado na figura (4.24).

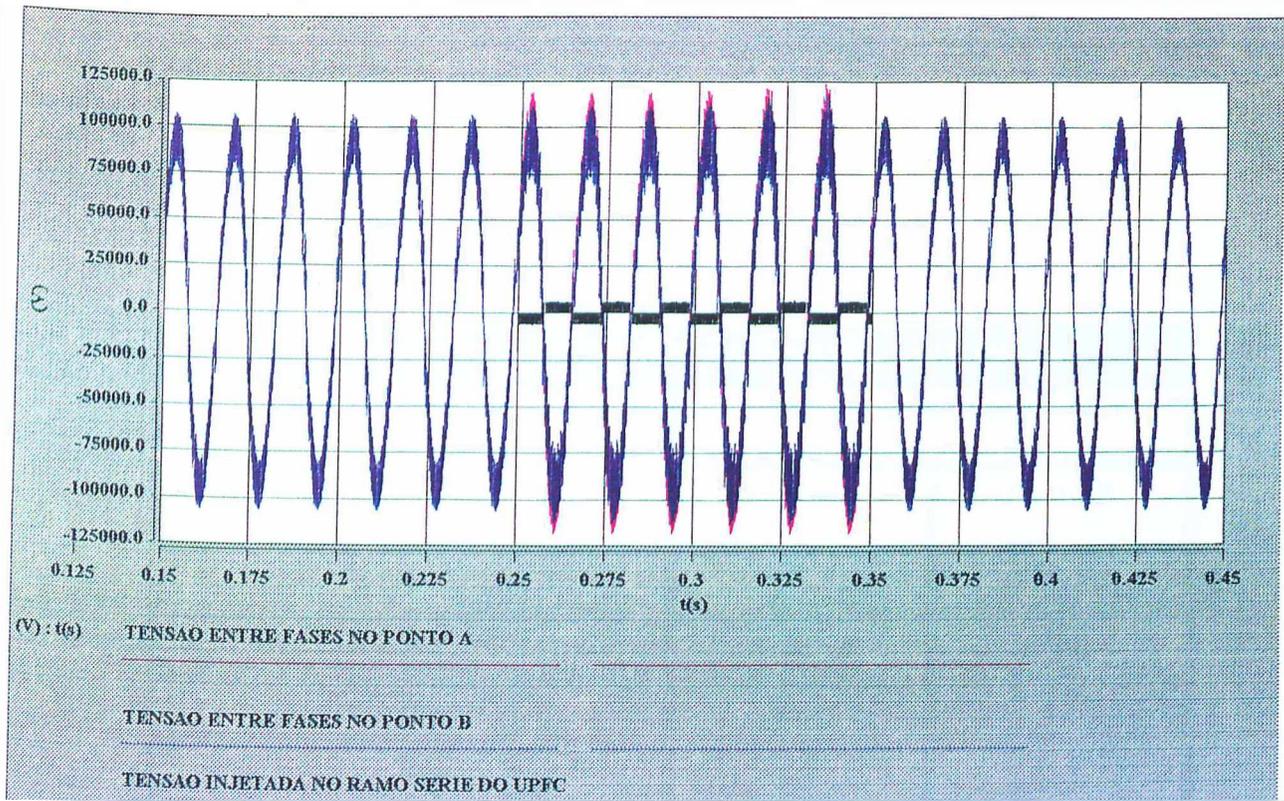


Figura 4.24 - Formas de onda da Tensão série injetada, da Tensão do sistema e da Tensão resultante no ponto B do sistema simulado

Na figura (4.24), tem-se a tensão no ponto A, onde verifica-se que no intervalo de tempo compreendido entre 250 ms e 350 ms, seu valor é maior que o apresentado em regime permanente. Na mesma figura, está representada a tensão no ponto B, onde já está pronunciado o efeito total da compensação do UPFC. Ainda nesta figura, é ilustrada a tensão injetada em série pelo conversor 2 do

UPFC, onde constata-se que seu ângulo de fase está em oposição à tensão do sistema. A legenda da figura auxilia na identificação destas tensões.

Do exposto, verifica-se que houve uma efetiva atuação do UPFC no sentido de atenuar o efeito da elevação temporária da tensão, contribuindo assim, para melhorar o padrão de qualidade da energia elétrica no que tange ao nível de tensão. Com respeito a contribuição harmônica oferecida pelo equipamento, os resultados são fornecidos na tabela (4.7).

Decomposição Harmônica da Tensão entre Fases		
Ordem harmônica	Valor Eficaz da Tensão (kv)	
	Ponto A	Ponto B
1	73,9	69,9
28	2,4	3,1
32	2,4	1,8
59	3,0	4,3
61	3,0	4,8

Tabela (4.7) – Decomposição harmônica da tensão

Da mesma forma como já comentado para o caso anterior, verifica-se que não houve mudança no perfil das ordens e magnitudes dos harmônicos produzidos.

#### **4.4.5 Caso 5 - Simulação da operação do UPFC diante de um Sistema com Suprimento Distorcido e Afundamento Temporário de Tensão (*Sag*)**

Este caso tem por objetivo verificar o comportamento do UPFC e do sistema, quando este último se encontra operando em regime permanente com uma determinada distorção de tensão e, durante um pequeno intervalo de tempo, há a ocorrência de um afundamento da tensão.

Para este estudo, durante os primeiros 250 ms de simulação, a concessionária foi programada para fornecer tensão nominal contendo 5% de distorção harmônica total (2% de 5<sup>a</sup> harmônica, 2% de 7<sup>a</sup> harmônica e 4,12% de 11<sup>a</sup> harmônica). No intervalo de tempo entre 250 ms e 350 ms, a tensão total do sistema foi diminuída em 10%, mantendo-se o mesmo conteúdo harmônico, e durante o último período de simulação, compreendido entre 350 ms e 450 ms, restabeleceu-se a condição de operação do sistema apresentada no primeiro intervalo de tempo simulado.

Do estudo, foi possível obter o comportamento da tensão nos pontos A e B. Além disso, também foi monitorada a corrente no ramo “shunt” do compensador. Os resultados obtidos, estão fornecidos através das figuras (4.25), (4.26) e (4.27).

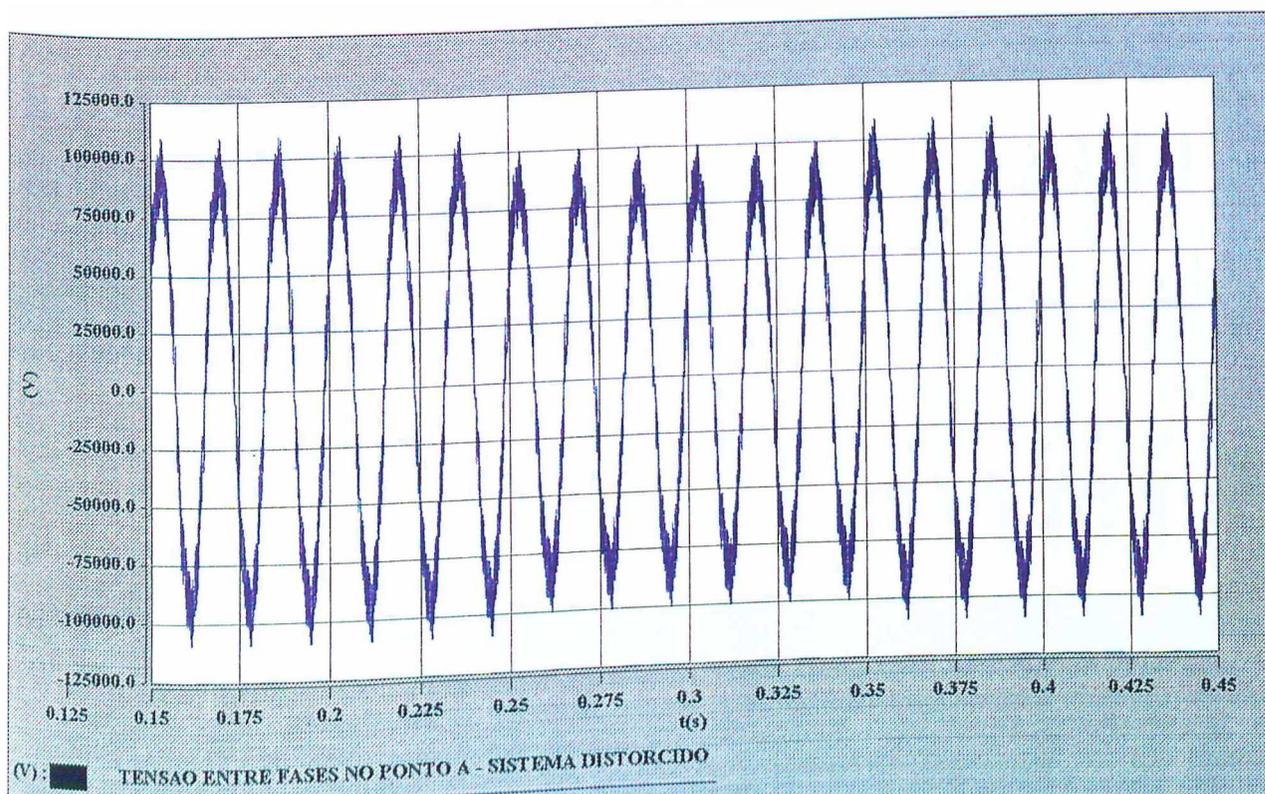


Figura 4.25 - Forma de onda da tensão no ponto A com sistema distorcido no caso de um sag

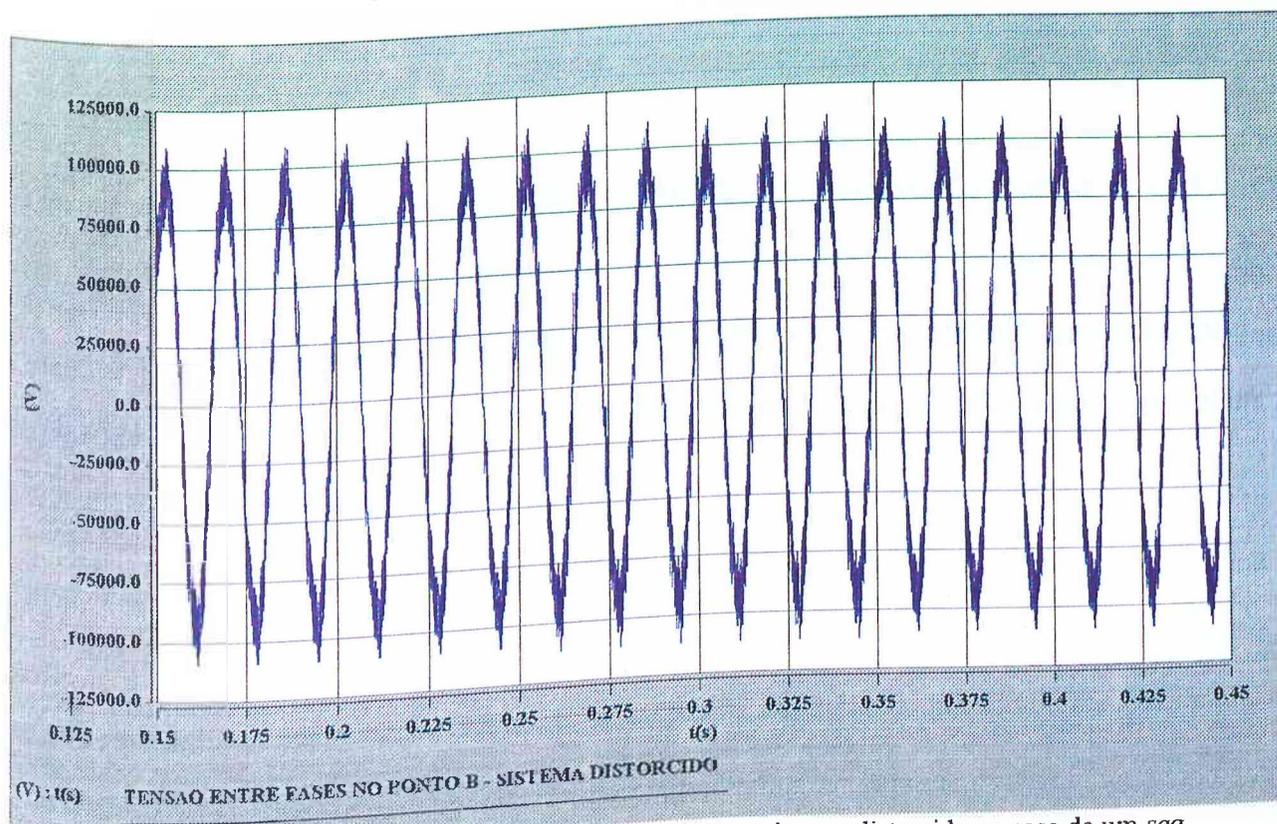


Figura 4.26 - Forma de onda da tensão no ponto B com sistema distorcido no caso de um sag

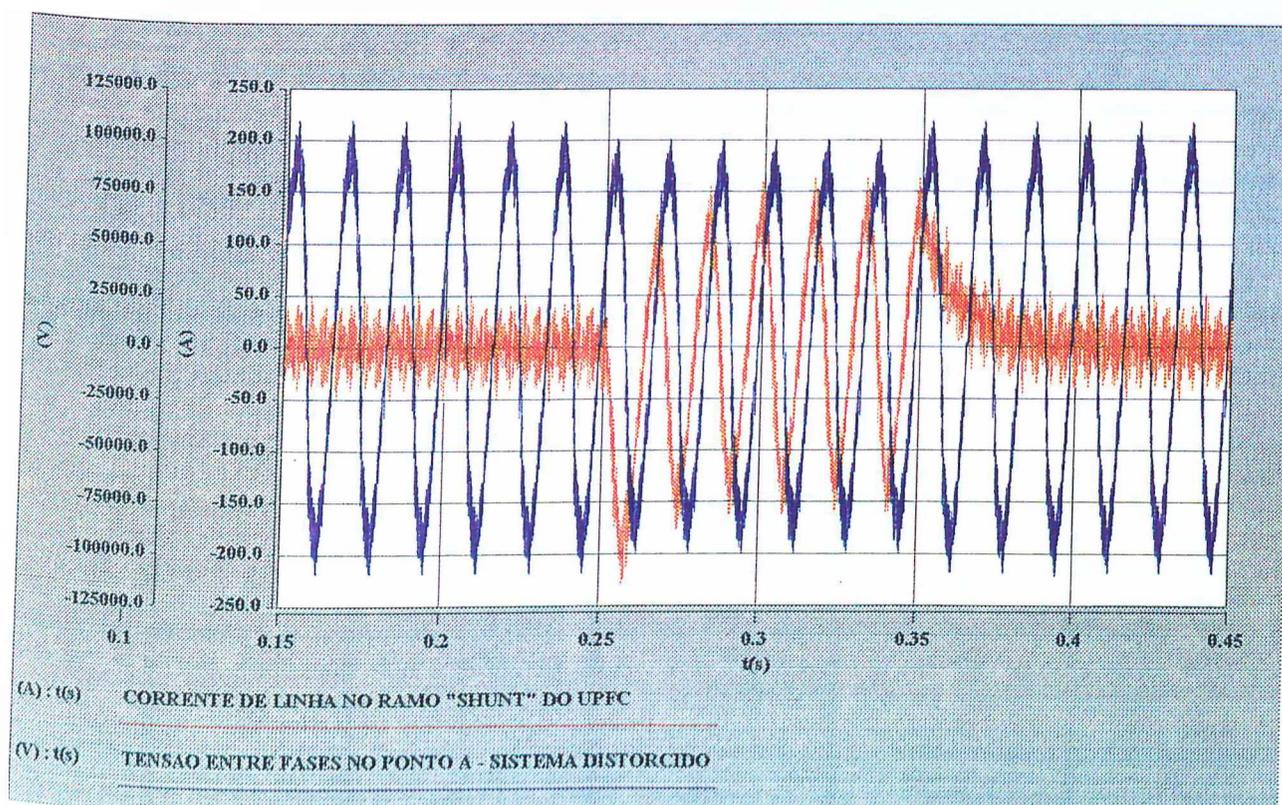


Figura 4.27 - Forma de onda da corrente no ramo "shunt" do UPFC

Com relação à decomposição harmônica da tensão nos pontos A e B, este estudo foi realizado para duas situações. A primeira corresponde aos intervalos de tempo correspondentes ao regime permanente e a segunda, compreende o intervalo de tempo em que se impõe o afundamento de tensão à rede. Os valores obtidos estão ilustrados na tabela (4.8).

Decomposição Harmônica da Tensão entre Fases				
Ordem harmônica	Valor Eficaz da Tensão (kv)			
	PONTO A		PONTO B	
	0ms a 250ms, 350ms a 450 ms	250ms a 350ms	0ms a 250ms, 350ms a 450ms	250ms a 350 ms
1	68,5	62,5	68,5	67,1
5	1,2	1,1	1,2	1,1
7	1,2	1,1	1,2	1,1
11	2,4	2,2	2,4	2,2
28	2,07	2,04	2,07	2,6
32	2,06	2,09	2,06	1,6
59	2,6	2,6	2,6	2,1
61	2,6	2,7	2,6	1,4

Tabela 4.8 – Decomposição harmônica da tensão

Apreciando os resultados numéricos apresentados, verifica-se que não houve diferenças significativas com relação aos casos analisados anteriormente, ou seja, para as condições simuladas, não se registrou maiores influências da distorção da tensão do barramento principal no funcionamento do UPFC. Além disso, pode-se verificar que as magnitudes das harmônicas de ordem 5, 7 e 11 (do sistema distorcido) mostraram-se ligeiramente sensíveis à operação do UPFC. Neste caso específico, houve uma interação entre o UPFC e o sistema no sentido de atenuar as magnitudes harmônicas verificadas no espectro da tensão nos pontos A e B. Assim, pode-se afirmar que este fato merece atenção diferenciada em trabalhos futuros.

No que tange à corrente do ramo “shunt”, o seu espectro harmônico encontra-se fornecido na tabela (4.9).

Decomposição Harmônica da Corrente no ramo "shunt" do UPFC		
Ordem Harmônica	Valor da Corrente (A)	
	0 a 250 – 350 a (ms)	250 a 350 (ms)
1	0,16	90,3
5	3,23	3,23
7	2,3	2,3
11	3,0	3,0
28	9,4	9,4
32	8,2	8,2
59	5,6	5,6
61	5,4	5,4

Tabela 4.9 – Espectro Harmônico da Corrente no ramo "shunt" do UPFC

Levando-se em consideração os dados apresentados, pode-se verificar que, diante das distorções harmônicas simuladas, não houve mudança no comportamento da corrente no ramo "shunt" do UPFC. Disto, conclui-se que não há maiores implicações entre as distorções de tensão e a operação do UPFC, nem sobre a geração harmônica produzida pelo mesmo. As correntes harmônicas de ordem 5, 7 e 11 se fizeram presentes neste espectro em função da distorção de tensão imposta pelo sistema.

#### 4.4.6 Caso 6 – Simulação do UPFC diante de um Sistema com Desequilíbrio de Tensão

Os estudos associados a este caso objetivam analisar o desempenho do UPFC no contexto de um suprimento com tensões desequilibradas.

A estratégia utilizada foi simular o sistema com características equilibradas de suprimento e com o UPFC conectado e flutuando na barra, em um intervalo de tempo de 0 a 250 ms e, logo em seguida, entre 250ms e 400 ms, inserir à forma de onda da tensão, 5% de desequilíbrio de tensão. Para a definição do desequilíbrio, admitiu-se que a tensão fase A-neutro foi elevada em 5%, a tensão fase B-neutro se manteve inalterada, e a tensão C-neutro foi reduzida em 5%.

Uma vez realizado o estudo, obteve-se para todo o intervalo da simulação a forma de onda da tensão no ponto A, haja visto que, quando o UPFC está inoperante, a tensão no ponto B é idêntica à anterior. Merece um comentário adicional o fato de que, nesta simulação, o conversor série não foi acionado para contribuir com o sistema durante o distúrbio. Isso se deve à ausência de **malha de controle**, que não foi implementada no modelo utilizado nas simulações. Nestas condições, somente o lado “shunt” do UPFC atua durante a ocorrência do desequilíbrio. Deste modo, também foi monitorada a corrente no ramo “shunt” do compensador. Os resultados obtidos, estão fornecidos nas figuras (4.28), (4.29), (4,30).

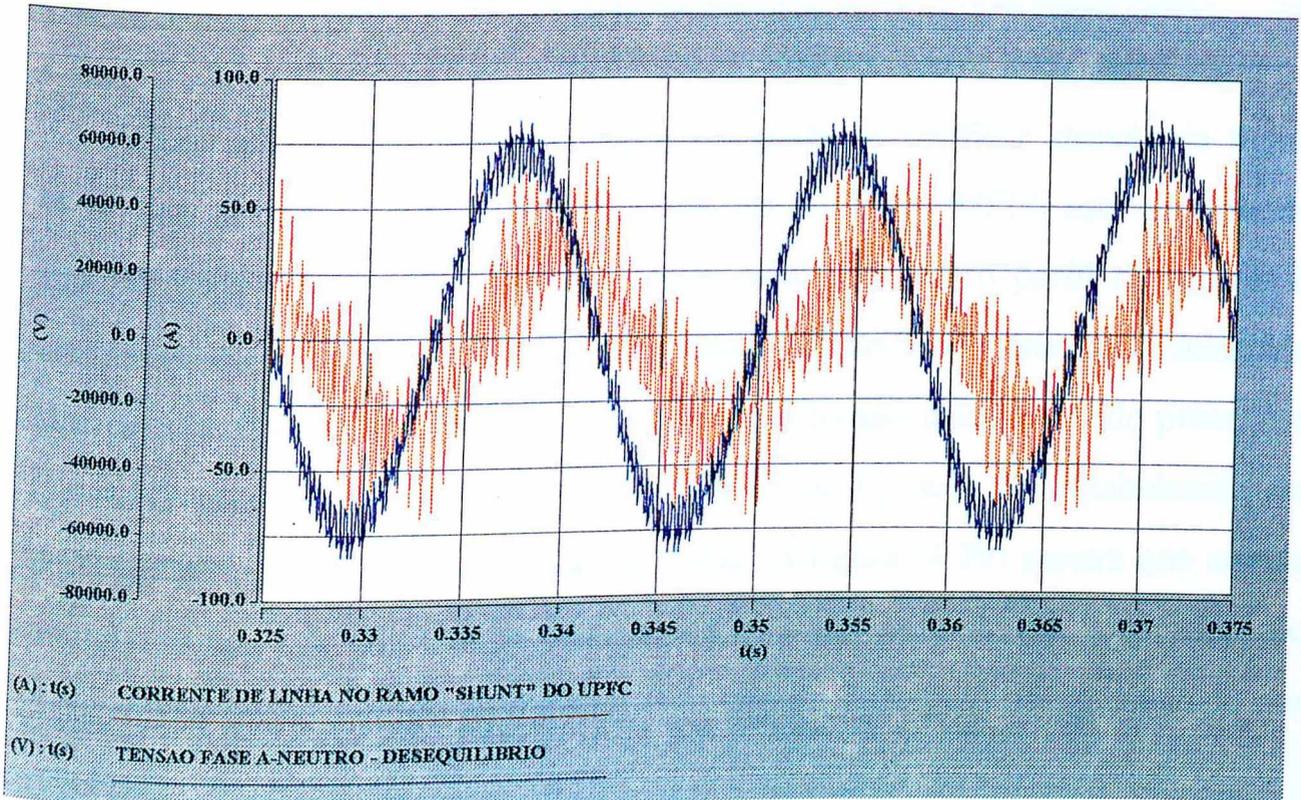


Figura 4.28 - Formas de onda da tensão fase-neutro (fase A) no ponto A e da corrente no ramo "shunt" do UPFC

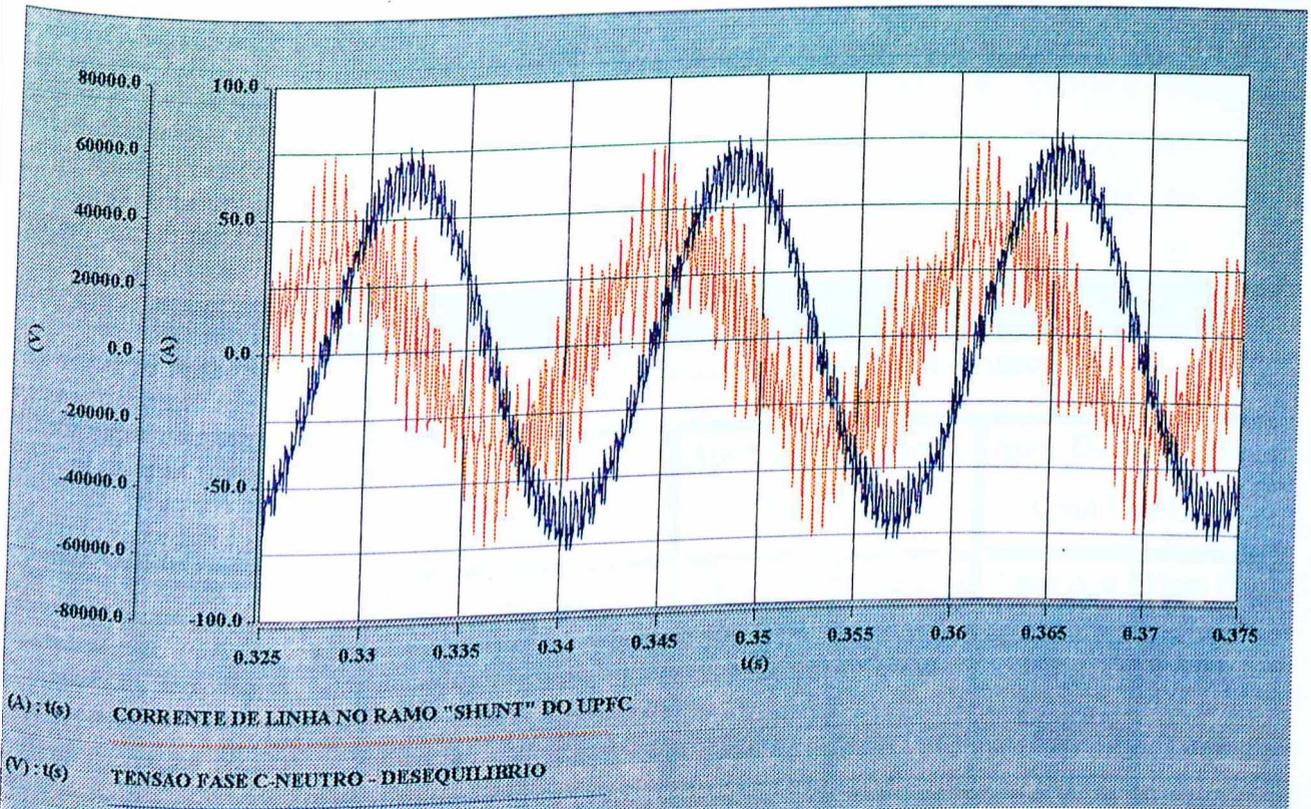


Figura 4.29 - Formas de onda da tensão fase-neutro (fase C) no ponto A e da corrente no ramo "shunt" do UPFC

Com relação às curvas apresentadas, pôde-se verificar através da figura (4.28) que na fase A, onde a tensão foi elevada em 5%, o UPFC está absorvendo uma corrente indutiva, contribuindo assim para melhorar o perfil de equilíbrio desta fase com relação aos valores nominais. Este fato pode ser constatado através do defasamento angular existente entre a tensão fase-neutro do ponto A e a corrente no ramo “shunt” do UPFC. Para a fase C, onde foi estabelecido um decréscimo de 5% ao valor nominal da tensão, a figura (4.29) mostra que circula no ramo “shunt” do UPFC uma corrente capacitiva, o que denota a contribuição do equipamento no sentido auxiliar na correção do desequilíbrio apresentado por esta fase.

A decomposição harmônica da tensão para as condições discutidas, está ilustrada na tabela (4.10).

Decomposição Harmônica das Tensões Fase-Neutro						
Ordem harmônica	Valor Eficaz da Tensão Fase-neutro (kv)					
	Antes do Desequilíbrio		Após Desequilíbrio - Sem UPFC		Após Desequilíbrio - Com UPFC	
	Fase A-n	Fase C-n	Fase A-n	Fase C-n	Fase A-n	Fase C-n
1	39,6	39,6	41,6	37,6	39,6	38,2
28	1,2	1,2	1,26	1,14	1,2	1,2
32	1,2	1,2	1,26	1,14	1,2	1,2
59	1,5	1,5	1,6	1,4	1,5	1,5
61	1,5	1,5	1,6	1,4	1,5	1,5

Tabela 4.10 – Espectro harmônica da tensão

Analisando os resultados apresentados, verifica-se que, na fase onde a tensão foi propositadamente elevada, o equipamento atuou no sentido de reduzir seu valor. Por outro lado, na fase em que o nível da tensão foi diminuído, o UPFC contribuiu para sua elevação. Vale a pena salientar que, as ordens e magnitudes harmônicas produzidas pelo equipamento, mantiveram-se dentro dos mesmos padrões anteriores.

No que tange à corrente do ramo “shunt”, tabela a seguir ilustra o seu espectro harmônico.

Decomposição Harmônica das Correntes do UPFC						
Ordem harmônica	Valor Eficaz da Corrente (A)					
	0 a 250ms Com UPFC			250ms a 400ms Com UPFC		
	Ia	Ib	Ic	Ia	Ib	Ic
1	0,16	0,16	0,16	25,9	25,9	26,1
28	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4	9,4
32	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2	8,2
59	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
61	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4

Tabela 4.11 – Espectro Harmônico das Correntes no ramo “shunt” do UPFC

Pode-se verificar que, no período anterior ao desequilíbrio de tensão, as correntes no ramo “shunt” do UPFC eram nulas, conforme já constatado nas simulações conduzidas no caso 2. Todavia, diante do desequilíbrio simulado, apareceram correntes significativas de frequência fundamental neste mesmo no

ramo “shunt” do UPFC, caracterizando a atuação do UPFC. A justificativa para tanto foi feita anteriormente, assim com também para as demais correntes presentes no espectro harmônico da tabela (4.11).

Embora o tratamento dado a este último caso simulado tenha sido trifásico, como nos anteriores, os resultados foram apresentados sob o ponto de vista monofásico, devido ao fato de que nestas condições, a caracterização da compensação do UPFC diante do desequilíbrio se torna mais acentuada. Além disso, o comportamento da tensão na fase “C” não foi alvo de atenção em função desta ter sido mantida com seu valor nominal de tensão.

## 4.5 Considerações Finais

O enfoque deste capítulo foi analisar computacionalmente o comportamento de um sistema elétrico ao qual encontra-se conectado um compensador do tipo UPFC. De um modo geral, os estudos foram conduzidos de forma a constatar a eficácia do dispositivo quanto ao controle do perfil de tensão, bem como das implicações de seu funcionamento sobre a geração de harmônicos. Desta forma, pode-se entender que os estudos foram voltados para as questões da interação entre as unidades UPFC e a Qualidade da Energia Elétrica.

Através da utilização do simulador “SABER”, foram estudadas algumas situações às quais um sistema de potência pode estar sujeito. Inicialmente, verificou-se seu comportamento sob condições ideais e, posteriormente, foram criados propositadamente alguns distúrbios, quais sejam:

- Afundamento temporário de tensão (*sag*);
- Elevação temporária de tensão (*swell*);
- Distorção harmônica
- Desequilíbrio de tensão.

Os resultados destes estudos permitiram concluir que os fenômenos *sag* e *swell* podem ser minimizados diante da atuação de unidades UPFC nos sistemas elétricos. Além disso, a distorção harmônica produzida por este equipamento é modesta, previsível, e por conseguinte, facilmente eliminada.

Com respeito às simulações onde o sistema continha distorções harmônicas, verificou-se que o equipamento não sofre grandes influências. Em se tratando de suprimentos desequilibrados, observou-se que o UPFC age no sentido de amenizar tais efeitos

## CAPÍTULO V

### CONCLUSÕES GERAIS

Embora ao longo desta dissertação terem sido tecidas conclusões específicas ao final de cada capítulo, é fundamental uma abordagem aglutinada do trabalho desenvolvido, a fim de proporcionar ao leitor uma visão rápida e sucinta do assunto investigado. Deste modo, este capítulo desenvolve-se no sentido de apresentar uma visão global dos capítulos anteriores.

O capítulo II teve por finalidade apresentar uma síntese a respeito da teoria dos FACTS. Para tanto, inicialmente, foram explanados os princípios básicos de funcionamento dos sistemas de transmissão CA flexíveis. Posteriormente, foram relacionados e brevemente discutidos alguns equipamentos aplicados aos FACTS, como o Reator Controlado a Tiristores, o Capacitor Série Controlado a Tiristores e o Controlador de Ângulo de Fase, entre outros. Dentro deste contexto, poderia ser focado também, o denominado UPFC. No entanto, isso é realizado posteriormente, de uma maneira mais abrangente.

O capítulo III dedicou-se a fazer uma análise detalhada a respeito das unidades UPFC. Neste sentido, foi verificado a priori, o princípio básico de funcionamento do equipamento e, subsequentemente, as diversas características de operação oferecidas pelo dispositivo. Do exposto, concluiu-se ser o UPFC um dos mais promissores dispositivos a serem aplicados aos sistemas de potência, com vistas à implantação da filosofia FACTS.

O capítulo IV realizou uma investigação computacional sobre o comportamento de um sistema elementar com e sem a presença de um UPFC, com o propósito de averiguar seus impactos na **Qualidade da Energia Elétrica**, diante de algumas circunstâncias específicas. As simulações foram realizadas com a utilização do *software* denominado por “SABER”, cujas algumas características também foram apresentadas.

No prosseguimento do capítulo, foram expostos os resultados obtidos, de onde foi possível constatar a eficiência do UPFC na compensação das variações no valor RMS de tensão, também denominados por *voltage-sag* e *voltage-swell*. Adicionalmente, pôde-se concluir também, que a poluição harmônica produzida por esse equipamento é previsível, e por conseguinte, facilmente eliminada.

Foram também conduzidas simulações, visando investigar o comportamento do UPFC, operando em um sistema com distorção harmônica, onde observou-se que o equipamento, para as condições simuladas, não sofre grandes interferências, haja visto que, os resultados deste estudo, não se diferenciaram dos obtidos em um sistema sem distorção.

Finalmente, realizou-se a verificação da atuação do UPFC em sistema contendo desequilíbrio de tensão, onde foi notado que o UPFC age no sentido de minimizar seus efeitos.

Reconhecendo-se o fato de que muitos aspectos associados às unidades UPFC ainda são pouco conhecidos (em virtude de se tratar de um equipamento concebido recentemente), pode-se destacar que, uma das contribuições fundamentais desta dissertação de mestrado, foi no sentido de apresentar uma

---

abordagem didática a respeito do dispositivo em foco. Um outro ponto relevante desta pesquisa, foi a análise computacional desenvolvida, que apresentou resultados concernentes ao comportamento estático do equipamento, sob o ponto de vista do seu desempenho quando da presença de anomalias na rede, assim como também das formas de onda e harmônicos produzidos pelo equipamento.

Tendo em vista o contexto apresentado, pode-se notar a existência de muitas lacunas a serem preenchidas, com relação ao UPFC. Assim, como sugestões para trabalhos futuros, destacam-se:

- Estudo da aplicação do UPFC em sistemas de potência para a compensação de “FLICKER”.
  - Análise transitória do comportamento de sistemas compensados por UPFC, diante de distúrbios como Perda de Carga, Curto Circuito, Descargas atmosféricas, etc.
  - Implementação de um protótipo, com vistas a comparar resultados experimentais e aqueles oriundos de simulação.
  - Desenvolvimento computacional de estratégias de controle dinâmico do UPFC, etc.
  - Estudos relacionados com dimensionamento de unidades UPFC.
-

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- [1] SUMI, Y., HARUMOTO, Y., HASEGAWA, T., YANO, M., IKEDA, K., MATSUURA, T., "New Static VAR Control Using Force-Commutated Inverters", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 9, Setembro 1981, pp. 4216-4223.
- [2] HINGORANI, N. G., "Flexible AC Transmission", IEEE Spectrum, Abril 1993, pp. 40-45.
- [3] WATANABE, E. H., BARBOSA, P. G., "Principle of Operation of FACTS Devices", Workshop on FACTS - CIGRÉ/IEEE, Rio de Janeiro, Novembro, 1995.
- [4] MPANDA-MABWE, B., DELFINO, B., CRAPE, M., DENEGRI, G. B., TRECAT, J., INVERNIZZI, M., RENGLET, M., "Simulation and Control Technique of FACTS", EPE 95, Sevilla, Setembro 1995, pp. 2167-2172.
- [5] GYUGYI, L., "A Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems", IEE Proceedings-C, Julho 1992, vol. 139, N° 4.
- [6] GYUGYI, L., SCHAUDER, C. D., WILLIAMS, S. L., RIETMAN, T. R., TORGERSON, D. R., EDRIS, A., "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control", Apresentado no IEEE/PES Summer Power Meeting, São Francisco, Julho 1994, Paper 94 SM 474-7 PWRD.
-

- [7] BIAN, J., RAMEY, D. G., NELSON, R. J., EDRIS, A., "A study of Equipment Sizes and Constraints for a Unified Power Flow Controller", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, Julho 1997, pp. 1385-1391.
- [8] NABAVI-NIAKI, A., IRAVANI, M. R., "Steady-state and Dynamic Models of Unified Power Flow Controller (UPFC) for Power System Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 11, No. 4, Novembro 1996, pp. 1937-1943.
- [9] SMITH, K. S., RAN, L., PENMAN, J., "Dynamic Modelling of a Unified Power Flow Controller", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No. 1, Janeiro 1997, pp. 7-11.
- [10] YACAMINI, R., PASCHOARELLI, D., "Inverter Constraints and harmonic distortion in a Unified Power Flow Controller", Electrimacs, Saint Nazare, França, 1996.
- [11] HINGORANI, N. G., "Power Electronics in Utilities: Role of Power Electronics in Future Power Systems", - Proceedings of IEEE, Vol. 76, No. 4, Abril, 1988.
- [12] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, "The Future of Transmission: Switching to Silicon," EPRI Journal, June, 1989.
- [13] MATSUDA, H. et al., "High Power GTO's: Present Status and Future Trends", CIGRÉ Symposium, Tokyo 1995, Maio 1995, 600-05.
- [14] GAMA, C. A., "Utilização de Equipamentos com Tecnologia FACTS (Flexible AC Transmission Systems) em Sistemas de Potência -
-

- Compensação Série Controlada”, Dissertação de mestrado, UFSC – 1995.
- [15] MILLER, T. J. E., “Reactive Power Control in Electric Systems”, A Wiley-Interscience Publication, 1982.
- [16] ALVES, A. C. B., “Análise de Problemas e Procedimentos na Determinação de Filtros Harmônicos”, Dissertação de Mestrado, UFU, 1991.
- [17] ERINMEZ, I. A., “Static Var Compensators”, Working Group 38-01, Task Force No. 2 on SVC, CIGRÉ, 1986.
- [18] KOSOW, I. L., “Máquinas Elétricas e Transformadores”, 4ª Edição, Vol. I, Editora Globo, 1982.
- [19] FITZGERALD, A. E., “Máquinas Elétricas”, Editora McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- [20] FILHO, E. H. E., “Modelagem de Compensadores Estáticos para Estudos Dinâmicos à Frequência Industrial”, Dissertação de Mestrado, EFEI – 1985.
- [21] TECHNICAL REPORT FROM CIGRÉ WORKING GROUP 14.18, “Thyristor Controlled Series Compensation (TCSC) and Reactors (TCRS)” – jan./1994.
-

- [22] OOI, B. T., DAI, S. Z., GALIANA, F. D., “A Solid-State PWM Phase Shifter” , IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8 No. 2, Abril, 1993.
- [23] MATHUR, R. M., BASATI, R. S., “A Thyristor Controlled Static Phase-Shifter for AC Power Transmission,” IEEE transactions, Vol. PAS-100, No. 5, Maio 1981, pp.2650-2655.
- [24] WOOD, P. et al., “Study of improved load tap-changing for transformers and phase-angle regulators”. EPRI Report EL-6079, Project 2763-1,1988.
- [25] YACAMINI, R., PASCHOARELI, D., “A Unified Power Flow Controller Using Space Vector Modulation Control,” 6<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications, Setembro 1995, pp. 2540-2545.
- [26] LEI, X., POVH, D., LERCH, E., “Global Parameter Settings of FACTS-Controllers for Improving Power System Stability”, International Conference on Power Systems Transients, Lisboa, 3-7 Setembro 1995.
- [27] Manual dos *Templates* do Projeto de Desenvolvimento - Convênio UFU-Petrobrás, 1997.
- [28] BOOST, M., ZIOGAS, P. D., “State-of-the-art PWM Techniques: A Critical Evaluation,” IEEE Power Electronics Specialists Conference 1986, pp. 425-433.

- [29] PITEL, I. J., et al., "Characterisation of Programmed-Waveform Pulsewidth Modulation," IEEE Transactions on industry Applications, Vol. IA-16, No. 5, Setembro /Outubro 1980.
- [30] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 3, Maio/Junho 1984.
- [31] MAKOMBE, T., "An investigation of a Unified Power Flow Controller", Tese de Doutorado, UMIST – 1997.

FU-00010043-2