

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO TCSC FRENTE A DOIS ALGORITMOS DE  
SINCRONISMO: O PLL E O SOGI-FLL

Bruno de Mello Laurindo

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE  
ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO  
ELETRICISTA.

Aprovado por:

Orientador:

\_\_\_\_\_  
Prof. Mauricio Aredes, Dr.-Ing.

Examinador:

\_\_\_\_\_  
Prof. Luis Guilherme Rolim, Dr.-Ing.

Examinador:

\_\_\_\_\_  
Vinícius Maciel Pinto, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

FEVEREIRO DE 2010

# Agradecimentos

Em primeiro lugar não poderia deixar de agradecer a Deus por permitir e abençoar mais uma etapa, importantíssima da minha vida, sempre me mostrando o caminho, me iluminando e me cobrindo com seu manto sagrado.

Sem menos privilégios, agradeço também a meu pai Aluizio e minha mãe Marly por batalharem a vida inteira dedicados somente ao meu sucesso. Agradeço pelo apoio que sempre me deram, as palavras de orientação e as “duras” que tomei de meu pai, pois sem elas poderia ter sido um tanto quanto diferente. Pelo aconchego do colo de minha mãe, todo carinho e luz que sempre me dera.

Não podendo nunca, de maneira alguma, esquecer do amigo, professor e orientador Mauricio Aredes por abrir as portas de seu laboratório, me convidando para trabalhar com ele, me dando suporte, orientação e incentivo para continuar a trabalhar. Não esquecendo nunca dos momentos de brincadeiras, alegrias e confraternização.

Aos grandes amigos Lucio Neto e Isidoro Raposo, aos quais, o Lucio que me acompanha desde antes da faculdade, onde um apoio mútuo sempre aconteceu, o que foi imprescindível para a conclusão do curso de engenharia. Muito obrigado amigo. Ao Isidoro, muito obrigado pela amizade, por todas as orientações técnicas, particulares e pelos “happy hours” as sextas-feiras. Obrigado camarada.

A família LEMT em geral, sem exceção, também agradeço. Foram todos sempre presentes nos diversos momentos. Nos esclarecimentos essenciais com que sempre contribuíram: Leonardo Silva, Bruno França, Vinicius Pinto, Ulisses Miranda, Luis Martinez, Thiago Americano, Luiz Eduardo Mouta, Vitor Maia e outros que não citei; agradeço a valiosa boa vontade que sempre tiveram em me ajudar.

E também a uma pessoa, a qual não poderia deixar de falar, que me acompanhou por mais da metade da faculdade, a Fabiana Casanova. Por toda sua paciência, carinho, amizade e amor que tivera comigo ao longo desse tempo, muito obrigado. Eu te amo!

*“Eduquem as crianças e não será necessário  
castigar os homens”  
Pitágoras*

Resumo do Projeto Final apresentado ao DEE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO TCSC FRENTE A DOIS ALGORITMOS DE SINCRONISMO: O PLL E O SOGI-FLL

Bruno de Mello Laurindo

Fevereiro/2010

Orientador: Maurício Aredes

Este trabalho apresenta um estudo de teste, comparativo, entre dois algoritmos de sincronismo para rastreamento de fase e frequência fundamental da rede, o PLL (*Phased Locked-Loop*) e o SOGI-FLL (*Second Order Generalized Integrator – Frequency Locked-Loop*), aplicados a uma linha de transmissão com compensação série. Em especial, com o objetivo de controlar o fluxo de potência ativa transmitida, é analisado o TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) como compensador série frente aos dois algoritmos de sincronismo citados.

É abordada uma pequena introdução às linhas de transmissão, estabilidade de sistemas de potência, destacando-se a compensação série. Os modelos de controles e o princípio de operação do compensador citados são apresentados e detalhados.

A análise do funcionamento de ambos é feita através da simulação digital no programa PSCAD/EMTDC V.4.0.1 mostrando seus desempenhos, e com seus resultados mostrando a real viabilidade de implementação do algoritmo de sincronismo testado.

Com isso, cabe afirmar que o SOGI-FLL é uma excelente alternativa na substituição do PLL utilizado na maioria dos equipamentos dos sistemas de alta potência.

Abstract of Final Project presented to DEE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrical Engineer.

## STUDY OF THE BEHAVIOR OF TCSC AGAINST TWO SYNCHRONIZATION ALGORITHMS: THE PLL AND SOGI-FLL

Bruno de Mello Laurindo

February/2010

Advisor: Maurício Aredes

This work presents a comparative study between two synchronization algorithms for phase and fundamental frequency tracking of the network, the PLL (*Phased Locked-Loop*) and SOGI-FLL (*Second Order Generalized Integrator - Frequency-Locked Loop*), applied to transmission line with series compensation. In special, with the objective to control the power flow, it is analysed the TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) as series compensator against the synchronization algorithms already mentioned.

It is carried out short introduction to transmission lines, stability of power systems, especially the series compensation. The model of controls and operating basement of compensator above mentioned are presented and detailed.

The analysis of function the two synchronization algorithms is illustrated through digital simulation on the PSCAD/EMTDC V.4.0.1 program, showing their performances and the viability to apply the synchronization algorithm tested, SOGI-FLL.

Thus, by results may be said the SOGI-FLL is an excellent alternative to replace the PLL used in the most of equipment of high power systems.

# Sumário

<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIACÕES.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Considerações Gerais .....	2
1.2 Motivação .....	4
1.3 Objetivo .....	4
1.4 Estrutura do Texto .....	5
<b>CAPÍTULO 2 – PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS SISTEMAS DE POTÊNCIA E OS DISPOSITIVOS FACTS.....</b>	<b>6</b>
2.1 Introdução.....	7
2.2 Conceitos em Linhas de Transmissão .....	8
2.2.1 Alguns Componentes de um Sistema de Transmissão .....	9
2.2.2 Aspectos Construtivos .....	10
2.3 Conceitos de Estabilidade de Sistemas de Potência .....	12
2.3.1 Tipos de Estabilidade .....	14
2.3.1.1 Estabilidade de Ângulo.....	15
2.3.1.2 Estabilidade de Tensão .....	15
2.3.1.3 Estabilidade de Frequência.....	15
2.4 O Sistema Interligado Nacional.....	15
2.5 Dispositivos FACTS.....	20
2.5.1 O TCSC.....	21
<b>CAPÍTULO 3 – O TCSC E SEUS CONTROLES DE DISPARO E SINCRONISMO .....</b>	<b>23</b>
3.1 Introdução.....	24
3.2 Controle do TCSC .....	27
3.2.1 Circuito de Disparo .....	27

3.2.1.1	Circuito de Sincronismo .....	28
	Phase Locked Loop – PLL .....	28
	Second Order Generalized Integrator–Frequency Locked Loop – SOGI-FLL... ..	35
3.2.2	Circuito para geração de Sinal de Disparo.....	44
<b>CAPÍTULO 4 – ANÁLISE COMPARATIVA: SIMULAÇÕES E RESULTADOS</b> .....		<b>46</b>
4.1	Introdução.....	47
4.2	Descrição e Considerações do Sistema .....	48
4.3	Procedimentos e Aspectos Gerais da Simulação .....	51
4.4	Gráficos da Simulação.....	52
<b>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>		<b>65</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>		<b>68</b>
<b>A.TRANSFORMADA DE CLARKE .....</b>		<b>70</b>
<b>B.TRANSFORMADA DE PARK .....</b>		<b>71</b>

# Lista de Siglas e Abreviações

ac	Sistema de corrente ou tensão alternada
dc	Sistema de corrente ou tensão contínua
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
FACTS	Flexible AC Transmission Systems
GCT	Gate Commutated Thyristor
GI	Generalized Integrator
GTO	Gate Turn-off Thyristor
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
LT	Linha de Transmissão
LT1	Linha de Transmissão compensada
LT2	Linha de Transmissão não compensada
PI	Proporcional–Integrador
PLL	Phased Locked Loop
PLL <sub>1<math>\phi</math></sub>	Phased Locked Loop monofásico
PLL <sub>3<math>\phi</math></sub>	Phased Locked Loop trifásico
PSS	Power Systems Stabilizers
p.u.	Por unidade
RCT	Reator Controlado a Tiristor
SE's	Subestações
SOGI-FLL	Second Order Generalized Integrator-Frequency Locked Loop
SSSC	Static Synchronous Series Compensator
TCSC	Thyristor-Controlled Series Capacitor
TSSC	Thyristor-Switched Series Capacitor
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
XC	Reatância capacitiva
XL	Reatância indutiva

# Lista de Figuras

Figura 1.1: Topologia do TCSC e seu Controle .....	3
Figura 2.1: Esquemático de uma Linha de Transmissão .....	10
Figura 2.2: Análise da Estabilidade – Critério das Áreas Iguais .....	14
Figura 2.3: Interligação Norte/Sul .....	18
Figura 2.4: Configuração da Interligação Norte/Sul .....	19
Figura 2.5: Esquema Básico do TCSC .....	22
Figura 3.1: Topologia do Sistema com TCSC.....	25
Figura 3.2: Curva de Reatância versus Ângulo e Disparo.....	26
Figura 3.3: Diagrama de Blocos da Estrutura Básica do PLL.....	28
Figura 3.4: Diagrama de Blocos Simplificado do PLL .....	31
Figura 3.5: Diagrama de Blocos do PLL.....	33
Figura 3.6: (a) Correntes nas fases a, b e c; (b) Rampas Sincronizadas com as correntes .....	34
Figura 3.7: Diagrama do PLL Trifásico .....	35
Figura 3.8: Filtro Adaptativo Baseado no GI .....	36
Figura 3.9: Filtro Adaptativo Baseado no SOGI-QSG.....	37
Figura 3.10: O SOGI-FLL, em sistema de sincronização monofásico.....	38
Figura 3.11: Diagrama de Bode do FLL.....	40
Figura 3.12: Sistema de adaptação a frequência simplificado do FLL .....	42
Figura 3.13: SOGI-FLL com normalização do ganho do FLL.....	42
Figura 3.14: DSOGI-FLL.....	43
Figura 3.15: Dual SOGI-FLL Otimizado .....	44
Figura 3.16: Lógica de Disparo dos Tiristores da fase <i>a</i> do TCSC .....	46
Figura 4.1: Sistema Considerado nas Simulações .....	47
Figura 4.2: Diagrama do Sistema A: (a) Sistema; (b) Carga.....	49

Figura 4.3: Diagrama do Sistema B: (a) Sistema; (b) Carga.....	50
Figura 4.4: Rampas pelo PLL: (a) as três fases; (b) seno da rampa $a$ do PLL sincronizada com a corrente $i_a$ de entrada .....	53
Figura 4.5: Potência ativa trifásica transmitida pelas linhas .....	54
Figura 4.6: Tensão e Corrente no capacitor do TCSC da fase $a$ com $\alpha = 1^\circ$ .....	55
Figura 4.7: Ângulos de disparos para níveis de compensação de 1p.u. e 0,7p.u.....	55
Figura 4.8: Corrente drenada na fase $c$ durante a falta .....	56
Figura 4.9: Perfil de tensão na fase $c$ durante o curto no Sistema A.....	57
Figura 4.10: Potências Médias Ativas Instantâneas Monofásicas Transmitidas pela LT1 .....	57
Figura 4.11: Rastreamento da frequência da rede pelo SOGI-FLL.....	58
Figura 4.12: Rampas pelo SOGI-FLL: (a) as três fases e (b) seno da rampa $a$ do SOGI-FLL sincronizada com a corrente $i_a$ de entrada .....	59
Figura 4.13: Potência ativa trifásica transmitida pelas linhas .....	60
Figura 4.14: Tensão e Corrente no capacitor do TCSC da fase $a$ com $\alpha = 1^\circ$ .....	61
Figura 4.15: Ângulos de disparos para níveis de compensação de 1p.u. e 0,7p.u.....	62
Figura 4.16: Corrente drenada na fase $c$ durante a falta .....	63
Figura 4.17: Perfil de tensão na fase $c$ durante o curto no Sistema A.....	63
Figura 4.18: Potências ativas médias instantâneas monofásicas, transmitidas pela LT1	64
Figura A.1: Diagrama dos eixos coordenados.....	73

# Capítulo 1

## Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as características básicas de um sistema de transmissão elétrica interligado, dando ênfase ao caso brasileiro. Serão feitas também algumas considerações sobre controladores FACTS utilizados para garantir a máxima transmissão de energia ativa pelas linhas transmissão, bem como seus controles visando a todo o momento o estudo para um melhor desempenho desses equipamentos. Por fim, serão apresentadas a motivação para o desenvolvimento deste trabalho e o objetivo a que se propõe.

## 1.1 Considerações gerais

Em países geograficamente grandes, a diferença de fusos-horário e a ocorrência dos picos de carga em diferentes períodos do ano nas diversas partes do sistema de potência são fatores que reduzem a capacidade total de geração instalada necessária para o suprimento efetivo de uma demanda específica e de sua transmissão.

E o Brasil sendo um dos maiores exemplos deste perfil, dispõe de um privilegiado potencial energético (baseado nas usinas hidrelétricas) proveniente das bacias hidrográficas espalhadas por todo seu território, tendo como principal centro consumidor a região sudeste.

A região amazônica concentra a maior parte deste potencial citado, sendo este ainda inexplorado. Segundo estudos publicados em [1], este potencial chega perto de 105 GW, aproximadamente 170% da geração atual de todo país.

Impulsionadas por restrições econômicas, pela minimização dos impactos ambientais, e por avanços tecnológicos diversos estudos têm sido feitos no sentido de tornar os sistemas de transmissão de energia mais eficientes e mais estáveis. Novas filosofias de planejamento, de controle e de operação irão permitir que a rede de transmissão e as unidades geradoras alcancem os seus limites operativos, atendendo à crescente demanda de potência, em condições de estabilidade e condições de qualidade requeridas. E é neste sentido que este trabalho se desenrola, visando avaliar o desempenho de um algoritmo de sincronismo chamado de SOGI-FLL (*Second Order Generalized Integrator – Frequency Locked Loop*) frente aos algoritmos convencionais os PLL's (*Phased Locked Loop*) aplicados ao controle dos TCSC's (*Thyristor - Controlled Serie Capacitor*).

O desejável aumento da flexibilidade e da robustez dos sistemas elétricos, torna-se viável com a utilização de dispositivos de eletrônica de potência, que permitem ações de controle e o chaveamento de grandezas elétricas. A compensação dinâmica de reativos, shunt – através da modulação de tensão nodal na rede, ou série – através da modulação de reatâncias série da linha, melhora a performance dos sistemas elétricos de potência frente a problemas de instabilidade eletromecânica e fluxos de potência, respectivamente. A Figura 1.1 mostra um esquema geral de um sistema de potência com a compensação estudada. Sendo exatamente na compensação série que este trabalho irá se ater, mas precisamente no equipamento TCSC explorando seu desempenho frente alguns tipos de controle.

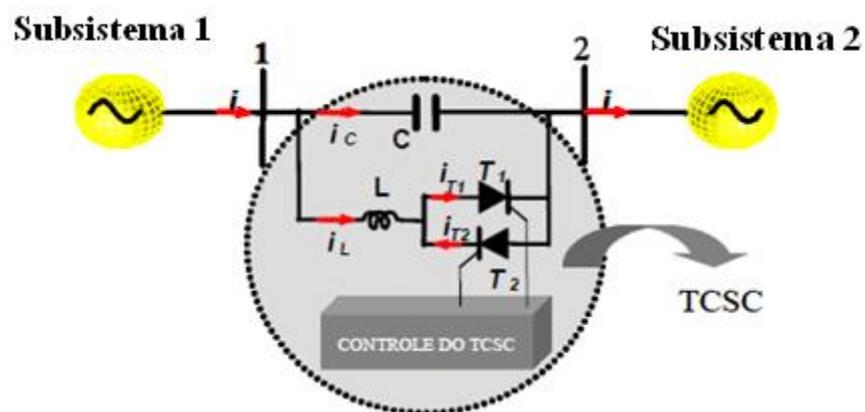


Figura 1.1 : Topologia do TCSC e seu controle.

## 1.2 Motivação

Devido ao progresso tecnológico, tem-se hoje chaves eletrônicas com capacidade de disparo aplicadas as tensões e correntes elevadas. Dessa forma torna-se viável o desenvolvimento de compensadores mais robustos e eficientes. Porém, há a necessidade de equipamentos simples, funcionais e de baixo custo. Partindo deste princípio este trabalho é motivado, a fim de buscar uma base teórica para estudos da melhoria dos sistemas de transmissão, através da manipulação e aprimoramento dos seus controles.

## 1.3 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um novo método de sincronização de frequência adaptativa, o SOGI-FLL, capaz de estimar não somente componentes de seqüência positiva e negativa de sinais de potência na frequência fundamental, mas também outras componentes de seqüência de frequências mais altas, em comparação aos outros algoritmos convencionais para sincronização com a rede, o PLL, aplicados ao controle dos TCSC's. Como objetivos específicos têm-se:

- i. Familiarização com dispositivos FACTS em geral, dando ênfase ao TCSC.
- ii. Apresentar e descrever os algoritmos de sincronismo em questão;
- iii. Verificar e comparar os sistemas em questão.

## 1.4 Estrutura do texto

O texto desta Dissertação está organizado em 5 capítulos, incluindo a introdução, onde estão contidas as considerações gerais sobre as condições energéticas atuais do Brasil no sentido geográfico, econômico e tecnológico, mostrando de forma sucinta a abordagem deste trabalho, equipamentos e controles estudados.

No capítulo 2 são mostrados conceitos relacionados a sistemas de potências, linhas de transmissão (como exemplo, foi tomada interligação Norte/Sul), exemplos de equipamentos FACTS, suas funcionalidades, seus controles e operação e finalmente é iniciada a teoria sobre o TCSC.

É descrito no capítulo 3, com detalhes, o TCSC e seus controles, abordando neste momento o foco do trabalho, no qual são apresentadas as características básicas e princípios de operação dos algoritmos de sincronismo: o tradicional – PLL e o questionado – SOGI-FLL.

Os resultados obtidos e a comparação entre os algoritmos de sincronismo PLL e o SOGI-FLL são apresentados no capítulo 4.

No capítulo 5 estão as principais conclusões obtidas com relação ao tema desenvolvido a partir da análise teórica e computacional dos modelos estudados, e são também apresentados alguns estudos a serem abordados no futuro.

## **Capítulo 2**

# **Princípios Básicos dos Sistemas de Potência e os Dispositivos**

**FACTS.**

## 2.1 Introdução

Todo sistema de potência é fortemente dependente das máquinas síncronas para a geração de potência elétrica. Uma condição necessária para sua operação satisfatória é que todas as máquinas permaneçam em sincronismo (operem com uma mesma velocidade). Este é um aspecto da estabilidade, que é regido, predominantemente, pela dinâmica dos ângulos dos rotores dos geradores síncronos e tem sido referido na literatura como estabilidade de ângulo.

No entanto, a instabilidade pode ocorrer sem que haja perda de sincronismo, caracterizando-se por um decaimento acentuado das magnitudes das tensões em determinadas barras do sistema. Este fenômeno, denominado de instabilidade ou colapso de tensão, é regido pelo comportamento dinâmico das cargas do sistema.

Dentre as alternativas apresentadas para melhorar a estabilidade de sistemas, destaca-se o uso do TCSC, que é um controlador integrante da tecnologia FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) que vem sendo utilizado para amortecimento de oscilações. No Brasil, foram instalados quatro TCSC's na linha de interligação Norte-Sul do SIN (Sistema Interligado Nacional) com o objetivo de amortecer as oscilações eletromecânicas de modo interárea. Estes controladores podem contribuir para estes tipos de amortecimento quando analisados de forma conjunta, e tratando-se de sistemas de potência, tornam-se importantes alguns conceitos básicos sobre estabilidade [2] [3].

Neste capítulo é feita uma descrição sumária sobre a estabilidade dos sistemas de potência e das características funcionais de seus controladores, lembrando que o foco deste trabalho está na capacidade de transmissão de energia das linhas de transmissão.

## 2.2 Conceitos em Linhas de Transmissão

Transmissão de energia elétrica é o processo de transportar energia entre dois pontos. O transporte é realizado por linhas de transmissão de alta potência, geralmente usando corrente alternada, salvo em alguns casos de corrente contínua, que de uma forma mais simples conecta uma usina ao consumidor.

A transmissão de energia é dividida em duas faixas: a transmissão propriamente dita, para potências mais elevadas e ligando grandes centros, e a distribuição, usada dentro de centros urbanos, por exemplo. Cada linha de transmissão possui um nível de tensão nominal, onde encontramos linhas de até 750 kV, com diversos estudos e protótipos em 1 a 1,2 MV [4]. As linhas de distribuição são usualmente na faixa de 13,8 kV. Para a conversão entre níveis de tensão, são usados transformadores.

Em sistemas de grande porte, é usual a interligação redundante entre sistemas, formando uma rede. O número de interligações aumenta a confiabilidade do sistema, porém aumentando a complexidade. A interligação pode tanto contribuir para o suprimento de energia quanto para a propagação de falhas do sistema: um problema que ocorra em um ponto da rede pode afundar a tensão nos pontos a sua volta e acelerar os geradores, sendo necessário o desligamento de vários pontos, incluindo centros consumidores, havendo o aparecimento de apagões ou blecautes conforme aconteceu no Brasil nos anos de 2001 e 2009.

## 2.2.1 Alguns Componentes de um Sistema de Transmissão

- Cabos - Conduzem a energia elétrica propriamente dita. Podem ser constituídos de alumínio, cobre, aço ou ligas. Para linhas de extra-alta tensão, os cabos CAA (alumínio com alma de aço), e variantes, são economicamente viáveis. Em linhas aéreas, são utilizados cabos nus (sem isolamento), de forma a maximizar a ampacidade (determinada pelo equilíbrio térmico) [4].
- Torres - Para linhas aéreas, é necessário erguer os cabos a uma distância segura do solo, de forma a evitar contato elétrico com pessoas, vegetação e veículos que eventualmente atravessem a região. As torres devem suportar os cabos em condições extremas, determinadas basicamente pelo tipo de cabo, regime de ventos da região, terremotos, entre outros eventos.
- Isoladores - Os cabos devem ser suportados pelas torres através de isoladores, evitando a dissipação da energia através da estrutura. Estes suportes devem garantir a rigidez dielétrica e suportar o peso dos cabos. Em geral são constituídos de cerâmica, vidro ou polímeros [4].
- Subestações - As linhas de transmissão são conectadas às subestações, que dispõe de mecanismos de manobra e controle, de forma a reduzir os transitórios que podem ocorrer durante a operação das linhas.

## 2.2.2 Aspectos Construtivos

A construção de uma LT envolve, além de diversos parâmetros, alguns fatores relevantes como: o comprimento físico da LT, o consumo de reativos, a potência de transmissão, a tensão no meio da linha, etc. Estas características variam em função do comprimento elétrico ( $\theta$ ) e da defasagem entre as tensões terminais ( $\delta$ ). Comprimento elétrico de uma linha de transmissão é o seu comprimento expresso como um múltiplo ou submúltiplo do comprimento de onda do sinal eletromagnético periódico ou elétrico de propagação dentro da linha. Assim, o controle dessas variáveis, ( $\theta$ ) e ( $\delta$ ), permite alterar a operação de uma LT, aprimorando a implementação da mesma. O comprimento elétrico pode ser alterado modificando-se a impedância longitudinal e/ou transversal da LT de acordo com o ponto de operação desejado. Esse é um processo que envolve equipamentos caros e de grande volume (banco de capacitores e reatores, por exemplo). Já a defasagem entre as tensões terminais ( $\delta$ ) viabiliza o controle da potência gerada, dependente do ângulo que o eixo do gerador (rotor) faz em relação ao estator (enrolamento das fases), como explicado em [5].

Na Figura 2.1 pode ser observado um esquemático de uma linha de transmissão, na qual podem ser observados alguns parâmetros elétricos intrínsecos de uma linha.

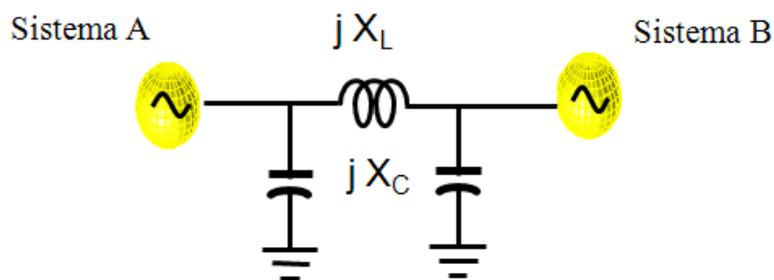


Figura 2.1 - Esquemático de uma Linha de Transmissão.

A transferência de potência ativa em uma LT está ligada à impedância equivalente total do sistema e as tensões terminais das subestações em questão, como mostrado na equação 2.1 abaixo:

$$P = \frac{V_1 \cdot V_2}{X} \cdot \text{sen } \delta \quad (2.1)$$

Onde, da equação e Figura 2.1 pode ser definido:

- P: potência transferida entre as barras 1 e 2;
- $V_1$  e  $V_2$ : módulos das tensões nas barras 1 e 2, respectivamente;
- $\delta$ : defasagem entre as tensões das barras 1 e 2;
- X: reatância série total da linha de transmissão ( $X_{LT} + X_C$ ).
- $X_{LT}$ : reatância série da linha de transmissão;
- $X_C$ : reatância capacitiva de compensação.

Dessa forma, a compensação série de uma linha se faz um fator importante, pois esta pode modificar os parâmetros elétricos da mesma, e sendo o comprimento elétrico ( $\theta$ ) um dos seus principais parâmetros. Alguns problemas que dificultam a operação normal da linha estão relacionados a ele, como estabilidade eletromecânica e os perfis de tensão, diretamente ligados à transferência de potência ativa e à presença de energia reativa. Altera-se então, por exemplo, o comprimento elétrico com o objetivo de operá-la (comprimento físico fixo) em uma região mais favorável.

Seguindo esta base, verifica-se que a redução da reatância série total da linha de transmissão, através da inclusão de uma compensação reativa capacitiva série, pode apresentar os seguintes benefícios:

- ✓ Aumento da capacidade de transferência de potência, em função do aumento dos limites de estabilidade, uma vez que a potência  $P_{\text{máx}}$  aumenta com a redução da reatância série equivalente total  $X$ ;
- ✓ Aumento da margem de estabilidade de regime permanente e de regime transitório. Com a diminuição da reatância  $X$ , observa-se um ângulo de fase  $\delta$  menor para uma mesma transferência de potência  $P$ ;
- ✓ Melhor regulação de tensão;
- ✓ Redução de Perdas. O domínio sobre a reatância série da linha, através de uma compensação reativa capacitiva controlada, possibilita o controle de divisão de fluxo de potência e a conseqüente redução das perdas globais [6].

## 2.3 Conceitos de Estabilidade de Sistemas de Potência

Os estudos de estabilidade eletromecânica abordam o comportamento do sistema após a ocorrência de um distúrbio. Tal ocorrência implica em uma alteração das grandezas elétricas (ângulo, tensão, etc.) do sistema de modo a se estabelecer um novo ponto de operação. O período de tempo necessário para que ocorra esse reajuste é caracterizado por oscilações eletromecânicas inerentes ao sistema de potência. Uma dada oscilação do rotor é acompanhada de um torque elétrico de mesma frequência e proporcional à amplitude da oscilação. Esse torque elétrico pode ser decomposto em

duas componentes ortogonais, denominadas de torque sincronizante e torque de amortecimento. O torque sincronizante está relacionado à região de estabilidade e, portanto, à capacidade de uma máquina de se manter em sincronismo diante de um distúrbio, enquanto que um maior torque de amortecimento acelera o estabelecimento do novo ponto de operação.

Contudo tem-se aumentado os estudos sobre a utilização da compensação série, que expande a região de estabilidade de um sistema, pois gera parte da potência reativa consumida pela reatância série da linha de transmissão. Isso aumenta a reserva de potência reativa no sistema que pode ser utilizada em caso de um distúrbio. Além disso, a potência gerada por um capacitor série aumenta proporcionalmente com o quadrado da corrente, gerando, então, potência reativa quando ela é mais necessária. Ou seja, quando há um aumento na corrente elétrica, fazendo com que a reatância série da linha consuma ainda mais potência reativa do sistema, o capacitor série atua simultaneamente sobre o fluxo de potência do sistema, aumentando seu limite de estabilidade [6].

Uma visualização gráfica da melhoria da estabilidade com a utilização da compensação série é apresentada na Figura 2.2. Essa figura mostra a relação potência versus ângulo, considerando ou não a compensação série. No instante em que o ângulo é  $\delta_0$  ocorre uma perturbação, a máquina acelera, e o ângulo se desloca para  $\delta_1$ , onde o defeito é eliminado.

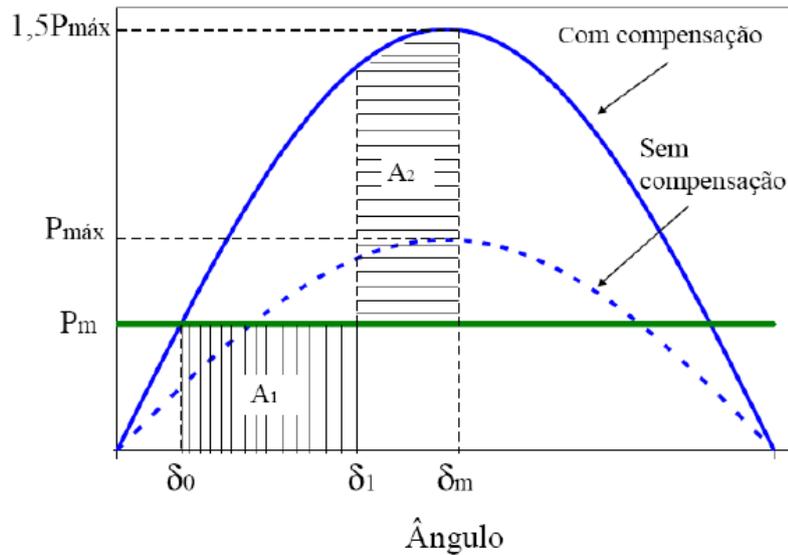


Figura 2.2: Análise da Estabilidade - Critério das Áreas Iguais.

A máquina começa a desacelerar até que a área  $A_2$  (relativa à potência desacelerante) se iguale à área  $A_1$  (relativa à potência acelerante), conforme o critério das áreas iguais, o que ocorre quando o ângulo é  $\delta_m$ , que deve ser menor que o ângulo crítico para que o sistema não perca estabilidade. No sistema com compensação série, a área  $A_2$  de desaceleração é aumentada, o que é um ponto positivo para que o sistema tenha maiores condições de retornar a um ponto de operação estável após uma perturbação.

### 2.3.1 Tipos de Estabilidade

Neste trabalho, serão abordados aspectos básicos da estabilidade angular, no estudo de pequenas e grandes perturbações, no entanto serão apresentados os três tipos de estabilidade mais estudados.

### 2.3.1.1 Estabilidade de Ângulo

A estabilidade de ângulo depende da dinâmica dos rotores dos geradores síncronos e de seus sistemas de controles.

### 2.3.1.2 Estabilidade de Tensão

A estabilidade de tensão é essencialmente dependente do comportamento dinâmico das cargas do sistema, que pode resultar numa variação significativa das tensões em algumas barras.

### 2.3.1.3 Estabilidade de Frequência

A estabilidade de frequência refere-se à manutenção do equilíbrio entre geração e carga, conservando fixa a frequência após a ocorrência de grandes distúrbios. Ela é o principal indicador de que o balanço de potência ativa está sendo cumprido (potência ativa gerada igual à potência ativa solicitada).

## 2.4 O Sistema Interligado Nacional

O sistema de produção e transmissão de energia elétrica brasileiro é composto pelo Sistema Interligado Nacional e pelos sistemas isolados. Possui tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, sendo de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas e de múltiplos proprietários. O SIN é formado pelas empresas das regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte

da região Norte. Apenas 3% da capacidade de produção de eletricidade do país encontra-se fora do SIN, nos pequenos sistemas isolados localizados principalmente na região amazônica [5].

Estudos de planejamento anteriores a 1995 indicaram a possibilidade de se obter ganhos energéticos através da interligação dos sistemas elétricos Norte/Nordeste (Sistema Norte) e Sul/Sudeste/Centro-Oeste (Sistema Sul). Estes ganhos seriam obtidos através da transferência de fluxos inter-regionais sazonais, permitindo uma operação otimizada dos reservatórios das usinas existentes nos dois subsistemas. Tais benefícios foram caracterizados por intercâmbios de 1000 a 2000 MW. Diante dos resultados desses estudos, ficou prevista para o ano de 2001, a construção da interligação Norte/Sul conforme citado em [8],[7].

Pesquisas realizadas no âmbito da Eletrobrás, demonstraram a necessidade de implementação da interligação Norte/Sul, estabelecendo uma ligação entre as subestações de Imperatriz (Eletronorte) e Serra da Mesa (Furnas). Foram estudadas alternativas de transmissão em corrente alternada e contínua para estabelecer a fase inicial da interligação: um elo de transmissão com aproximadamente 1000 km de extensão e capacidade máxima de 1300 MW nos dois sentidos [10].

Ainda na fase de planejamento da interligação, verificou-se que a alternativa em corrente alternada daria origem a um modo de oscilação eletromecânica entre os sistemas Norte e Sul, com baixos valores de frequência e pouco amortecimento. Contudo, esta alternativa apresentava custos inferiores à alternativa em corrente contínua, além da vantagem de inserção regional, ao facilitar a integração de novas cargas e geração ao longo da rota da linha.

O primeiro circuito entrou em operação em agosto de 1999, formando um único sistema, o qual foi denominado Sistema Interligado Nacional, conforme citado em [11].

A distância elétrica entre os centros de geração do Nordeste e do Sudeste, afetada pela não realização dos reforços previstos para o sistema receptor, ficou caracterizada pelo baixo coeficiente de potência sincronizante entre os subsistemas interligados e, conseqüentemente, pelo surgimento de um modo de oscilação de baixa frequência (0,15 a 0,2 Hz). Para frequências desta ordem fica difícil obter amortecimento adequado das oscilações eletromecânicas com a utilização de estabilizadores (PSS) implantados nas unidades geradoras das usinas [10].

A solução adotada para viabilizar a operação interligada foi a utilização de TCSCs nas extremidades da Interligação Norte/Sul, estratégia que conferiu amortecimento suplementar às oscilações entre os geradores [8][10].

A Interligação Norte/Sul, mostrada na Figura 2.3, compreende as linhas de transmissão em 500 kV entre as subestações Imperatriz, Colinas, Miracema, Gurupi e Serra da Mesa, conecta os sistemas Norte e Nordeste aos sistemas Sul, Sudeste e Centro-Oeste, e está em destaque em amarelo no mapa a seguir.

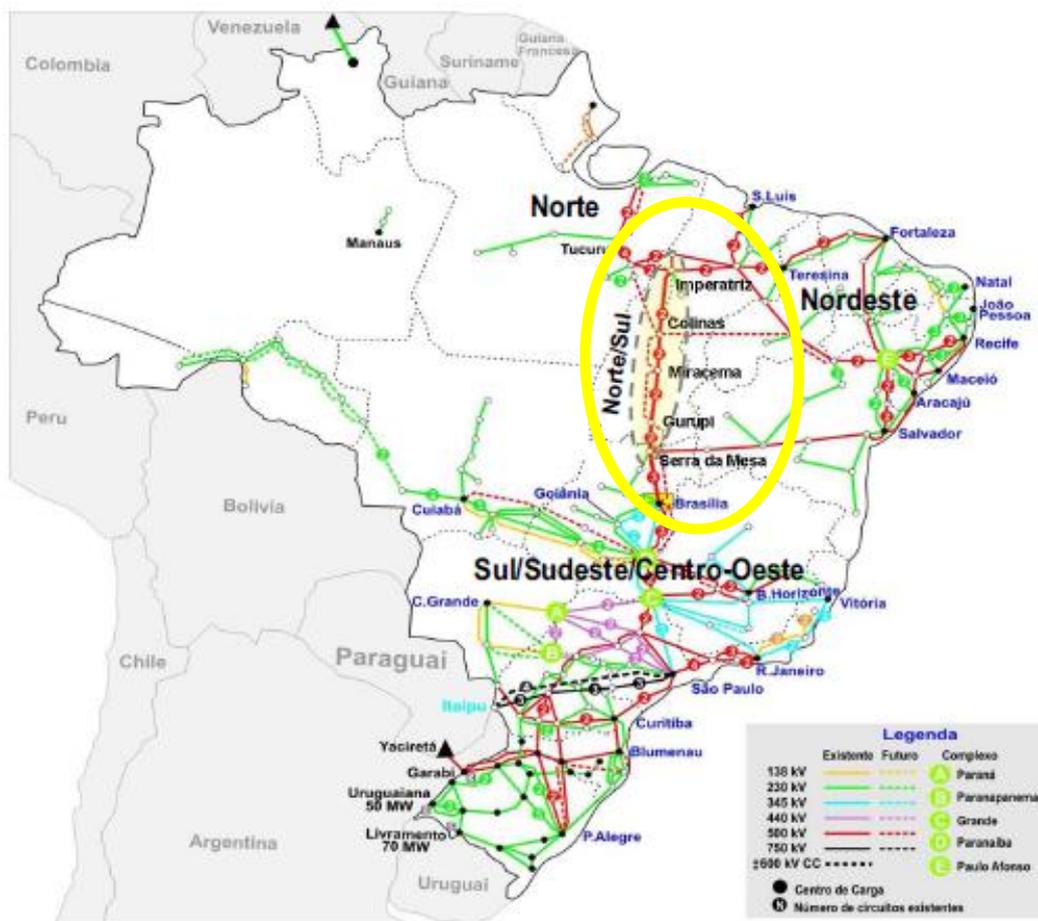


Figura 2.3 - Interligação Norte/Sul.

A duplicação da Norte/Sul, em destaque na Figura 2.4 a seguir, tornou-se necessária devido à segunda etapa de construção da UHE (Usina Hidrelétrica de Energia) de Tucuruí e da UHE de Lajeado, reforço que possibilitou ampliar a capacidade de transmissão para intercâmbios da ordem de 2500 MW [6].

E é exatamente nesta ampliação da capacidade de transmissão, através de um TCSC com um controle diferente, que foca este trabalho, por meio de uma simulação digital de uma linha de transmissão.

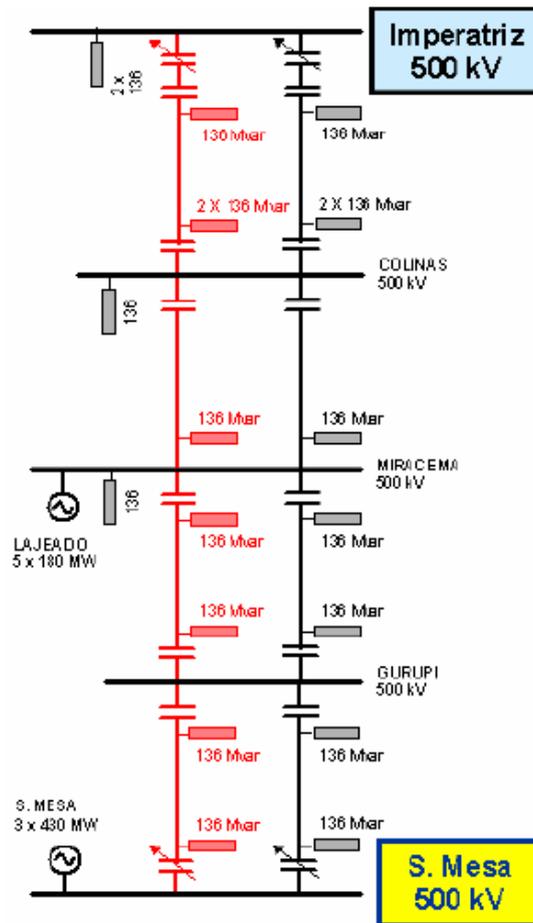


Figura 2.4 - Configuração da Interligação Norte/Sul.

Há 04 TCSC's instalados na Interligação Norte/Sudeste, 01 em cada extremidade dos 02 circuitos da interligação. As transmissoras proprietárias e os fabricantes dos TCSC's são apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Transmissoras e Fabricantes dos TCSC's da Interligação Norte/Sul

Subestação	Circuito	Transmissora	Fabricante
Imperatriz	1	Eletronorte	ABB
	2	Novatrans	GE
Serra da Mesa	1	Furnas	Siemens
	2	Novatrans	GE

## 2.5 Dispositivos FACTS

Com o aumento crescente da demanda de energia elétrica, os sistemas de potência tornaram-se mais complexos, em dimensão e utilização de aparelhos, fato que aliado às pressões de mercado exigiu que tais sistemas operassem próximos de seus limites térmicos e de estabilidade. A construção de novos sistemas de transmissão pode não ser a solução que represente menor tempo e custos de implementação, por razões ambientais e econômicas [12].

Com isso, a necessidade de melhoria das condições de utilização dos sistemas existentes tornou-se um aspecto importante no atual contexto. A idéia de produzir equipamentos que forneçam um determinado grau de controle e suporte de potência ativa encontra-se em vigor desde os primeiros projetos de pesquisa quando visavam ao aumento da capacidade de transmissão [13]. Para tentar sanar as dificuldades (ou mesmo impossibilidades) de transmissão de energia elétrica surgem aplicações de dispositivos que aumentam a eficácia do sistema de transmissão, os chamados controladores FACTS.

Contudo, este estudo veio se aperfeiçoando até que fosse proposto o uso de FACTS nos sistemas elétricos de potência baseando-se na flexibilidade proporcionada pela eletrônica de potência. Neste sentido, as primeiras propostas baseavam-se no uso de dispositivos chaveados a tiristores de potência, bem como de dispositivos semicondutores autocomutados (controle do ângulo de disparo e de extinção), como IGCTs (Integrated Gate Commuted Thyristor) e IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) dentre outros [13].

Alguns equipamentos controladores FACTS que pertenceram à primeira geração desta tecnologia, nos quais eram usados tiristores, podem ser citados aqueles conectados

em paralelo como o TCR (Thyristor-Controlled Reactor), o TSC (Thyristor-Switched Capacitor) e o SVC (Static Var Compensator). Os principais equipamentos conectados em série são o GCSC (GTO- Controlled Series Capacitor), TSSC (Thyristor-Switched Series Capacitor) e o TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor). Existem ainda dispositivos como o TCPAR (Thyristor-Controlled Phase Angle Regulator) e o TCPST (Thyristor-Controlled Phase-Shifting Transformer), que combinam características de ligação série-paralelo [14][15].

Apesar dos tiristores não possuírem capacidade de controle do instante de bloqueio, apresentam vantagens em relação às chaves autocomutadas que justificam sua utilização em uma ampla faixa de aplicações. Justificando ainda o uso dos tiristores, pode-se dizer que apresentam benefícios como alto nível de tensão, simplicidade do circuito de controle, e menores perdas e custos, quando comparados às chaves autocomutáveis.

Este trabalho terá como principal interesse o controlador TCSC, visando exatamente seu controle de sincronismo, mais precisamente a comparação entre o comportamento de dois tipos de controle: o PLL tradicional e o SOGI, que serão discutidos detalhadamente nos capítulos 3 e 4.

### 2.5.1 O TCSC

O TCSC é um dispositivo dotado de uma capacitância fixa e um reator controlado a tiristores. A reatância efetiva do TCSC é modificada através do controle do disparo dos tiristores e assim inserida na linha de transmissão, de maneira a manipular a

reatância total da linha e, conseqüentemente, controlar seu fluxo de potência. Um esquema básico para o TCSC é mostrado na Figura 2.5 [12].

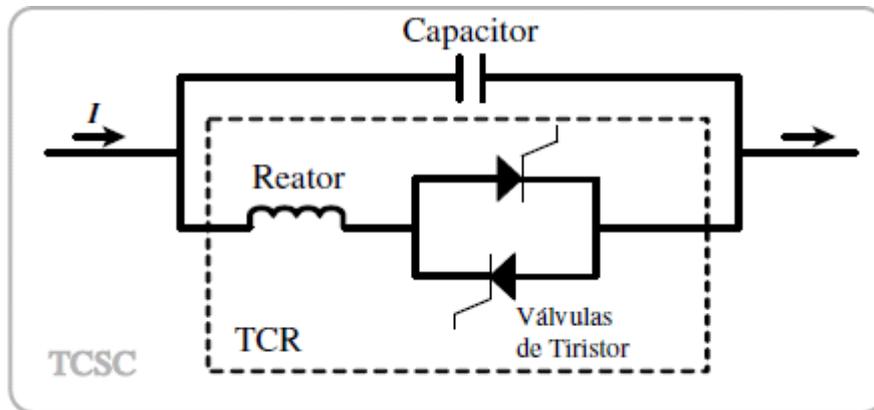


Figura 2.5 - Esquema Básico do TCSC.

O TCSC permite que o nível de compensação série de uma linha de transmissão seja controlado de forma rápida e contínua.

O capacitor série controlado a tiristores foi proposto inicialmente em 1986 por Vithaythil como um método de ajuste rápido da impedância equivalente de uma linha de transmissão, conforme citado em [14]. Estas características fazem com que o TCSC seja capaz de desempenhar funções como: rápida regulação do fluxo de potência, aumento da margem de estabilidade, atenuação de ressonância subsíncrona (RSS), além do amortecimento de oscilações.

O TCSC, através do controle de seus tiristores, atua amortecendo oscilações dos sistemas de energia de forma a variar a impedância série equivalente da linha de transmissão. Cada tiristor é disparado uma vez por ciclo, possuindo um intervalo de condução menor que meio-ciclo da frequência da fundamental.

Como já informado estes e outros fundamentos serão mais bem discutidos no próximo capítulo.

## **Capítulo 3**

# **O TCSC e Seus Controles de Disparo e Sincronismo**

## 3.1 Introdução

A concepção do TCSC é baseada no conceito de sistemas de corrente alternada com fluxos de potência controláveis, ou FACTS. E esses dispositivos FACTS têm como principais objetivos o aumento da capacidade de transmissão de potência e o controle direto do fluxo de potência em rotas específicas de transmissão.

No TCSC, o equivalente entre o capacitor série e a reatância indutiva pode ser controlado continuamente através do disparo adequado dos tiristores. Com efeito, a compensação série de uma linha de transmissão pode ser realizada de forma dinâmica com esse dispositivo. O TCSC tem provado ser um importante dispositivo para controlar o fluxo de potência e amortecer oscilações eletromecânicas. No Brasil, o TCSC é considerado como elemento fundamental para a conexão dos sistemas elétricos Norte-Sul, sendo suas primordiais funções o amortecimento de oscilações de baixa frequência entre os dois sistemas e a melhoria na capacidade de transmissão da mesma.

A compensação é viabilizada pela variação da reatância total do sistema. Tal fato é possível a partir do controle da reatância do circuito LC paralelo,  $X_{TCSC}(\alpha)$ , a ser inserido em série, formado por uma capacitância fixa,  $X_C$ , e uma indutância,  $X_L(\alpha)$ , controlada. O controle é realizado a partir de um ângulo  $\alpha$  de atraso, em relação a corrente de linha  $i$ , no disparo dos tiristores, que varia o período de condução do mesmo, e portanto a corrente no reator. Assim, o equivalente gerado pelo sistema é definido, de forma simplificada, pela equação 3.1.

Vê-se sua topologia na Figura 3.1.

$$X_{TCSC}(\alpha) = -\frac{X_L(\alpha) \cdot X_C}{X_L(\alpha) - X_C}; \quad (3.1)$$

$$\text{Onde: } X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)} \quad (3.2)$$

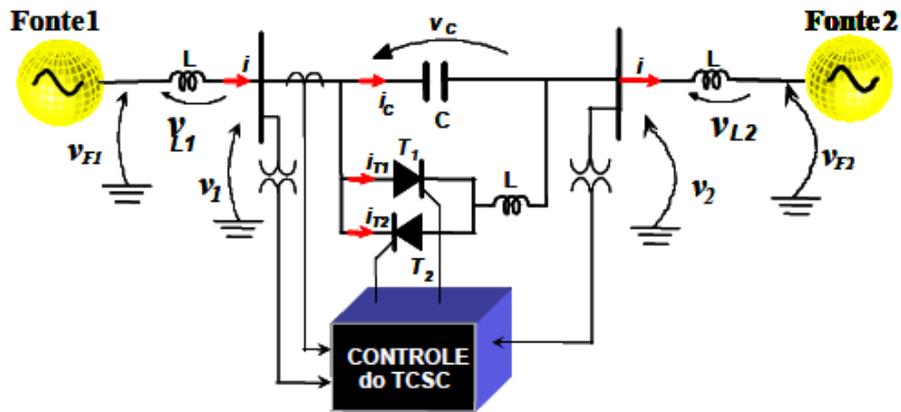


Figura 3.1 - Topologia do sistema com TCSC.

Sendo,  $X_L = \omega L$ , e  $\alpha$  o ângulo de atraso medido em relação ao cruzamento pelo zero da corrente da linha.

Na equação 3.2, se for considerado  $\alpha = \pi/2$ , tem-se a compensação mínima do equipamento, ou seja, o RCT (Reator Controlado a Tiristor) está bloqueado e o capacitor completamente inserido na linha. A partir da Figura 3.2, pode ser observado que o TCSC opera em duas regiões distintas: Indutiva,  $0 \leq \alpha \leq \alpha_{L \text{ lim}}$  ou Capacitiva, operando com  $\alpha_{C \text{ lim}} \leq \alpha \leq \pi/2$ . Geralmente, este equipamento funciona na faixa capacitiva, visando basicamente o controle do fluxo de energia.

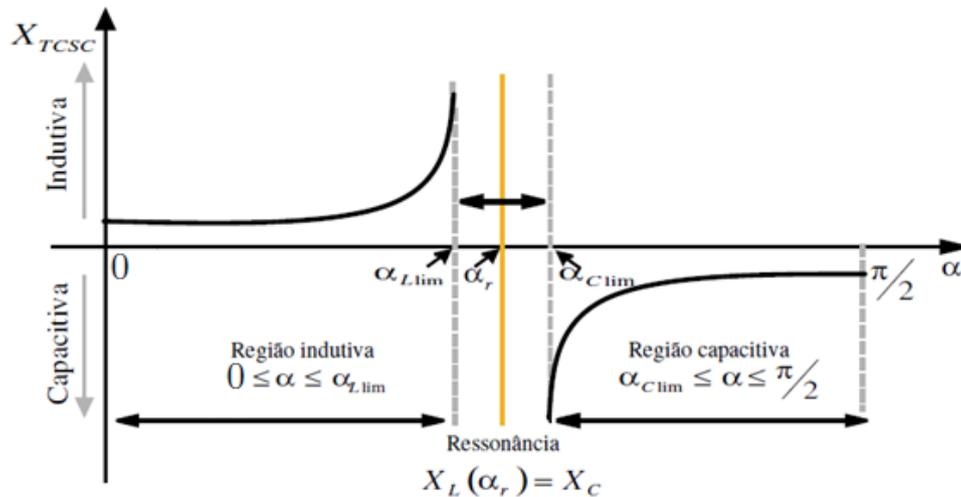


Figura 3.2 - Curva de Reatância versus Ângulo de Disparo.

Na Figura 3.2, são observados os modos de operação do equipamento, onde se percebe que para ângulos de disparo próximos de zero, suas variações implicam em reatâncias indutivas com valores bem próximos, ou seja, sem variações consideráveis no eixo das ordenadas. Analogamente acontece com ângulos de disparo próximos de  $\pi/2$ , oferecendo reatâncias capacitivas que variam muito pouco; com o devido cuidado de forma a nunca trabalhar no ponto de ressonância  $\alpha_r$ , onde  $X_L(\alpha_r) = X_C$ .

Através dessa característica, torna-se possível, com um conjunto de pares ordenados extraídos da referida característica, corresponder a um valor de ordem de reatância desejado com o ângulo de disparo necessário. Cabe destacar os ângulos limites de disparo,  $\alpha_{L,lim}$  e  $\alpha_{C,lim}$ , que definem a área em que a operação do TCSC deve ser inibida, em função do risco de ressonância [16].

## 3.2 Controle do TCSC

Este capítulo apresenta o controle utilizado no comando de abertura das chaves do compensador em questão. Essa estratégia de controle da reatância série é fundamental para o bom desempenho deste equipamento, sendo este, detalhado nas seções a seguir.

### 3.2.1 Circuito de Disparo

Esta seção se atém em fundamentar a parte mais importante deste trabalho, os controles do TCSC, onde a proposta é analisar o funcionamento do equipamento frente a um algoritmo de sincronismo tradicional, um PLL, e outro tipo de algoritmo, o SOGI-FLL, sendo este o foco. Para tanto, um entendimento dos fundamentos do controle de disparo se faz necessário e está descrito abaixo.

O disparo dos tiristores de forma controlada permite a obtenção de uma reatância efetiva variável, o que é conveniente para a operação de sistemas de potência.

Partindo da ordem de reatância calculada pelo controlador para a transmissão de uma determinada potência ativa, podem-se determinar os ângulos de disparo correspondentes com a característica de reatância do TCSC. De posse do ângulo de disparo, faz-se necessário gerar pulsos precisos para o disparo dos tiristores de cada uma de suas fases. Um circuito de disparo típico inclui duas funções fundamentais: o circuito de sincronismo e o circuito para geração do sinal de disparo. A seguir serão descritos cada um desses circuitos.

### 3.2.1.1 Circuito de Sincronismo

Para que o disparo dos tiristores seja feito de maneira precisa, é fundamental que o sinal de disparo esteja sincronizado com as grandezas elétricas da rede. Desvios na frequência da rede, por exemplo, devem ser compensados quando da determinação dos sinais de disparo, sob risco de não se obter a reatância ordenada e comprometer severamente a efetividade do TCSC.

- *Phase-Locked Loop - PLL*

Uma das maneiras utilizadas em equipamentos baseados em eletrônica de potência para o sincronismo, uma das mais comuns é a sincronização por meio de circuitos *Phase-Locked Loop* – PLL. Os circuitos de sincronismo detectam de forma contínua a frequência de grandezas alternadas do sistema. Diversos tipos de PLL são atualmente empregados.

Tenha-se por base para análise o PLL tradicional, em que neste caso, com sinais de entrada trifásicos, pode ser analisado de forma a introduzir pequenas modificações na estrutura do PLL monofásico, mostrado simplificado na Figura 3.3 [17].

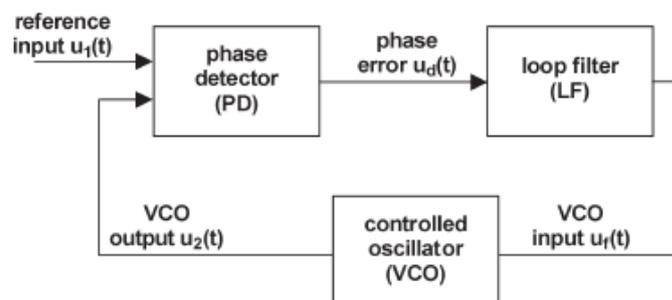


Figura 3.3 - Diagrama de blocos da estrutura básica do PLL.

Diante disso, a entrada de referência está sendo representada por um vetor espacial, bem como a saída do *voltage-controlled oscillator* – VCO, que seguem nas equações 3.3 e 3.4.

$$u_1(t) = U_1 \cdot e^{j(\omega_1 t + \phi_1)} \quad (3.3)$$

$$u_2(t) = U_2 \cdot e^{j(\omega_2 t + \phi_2)} \quad (3.4)$$

Num referencial estacionário –  $\alpha\beta$ , ambos os sinais podem ser escritos por  $u(t) = u_\alpha(t) + ju_\beta(t)$ , onde as componentes  $\alpha$  e  $\beta$  são representadas pelas equações 3.5 e 3.6, respectivamente abaixo:

$$u_\alpha(t) = U \cdot \cos(\omega t + \phi) \quad (3.5)$$

$$u_\beta(t) = U \cdot \sin(\omega t + \phi) \quad (3.6)$$

Sinais trifásicos podem ser facilmente convertidos para esta forma através da transformação de Clarke. Alternativamente, estes sinais podem ser representados em uma referência rotativa, utilizando a transformação de Park, obtendo resultados similares [17][18]. As transformações de Clarke e Park encontram-se nos Apêndices A e B.

A operação do *phase detector* – PD é baseada no produto dos vetores  $u_1(t)$  e  $u_2(t)$ , por esta razão, depois ele é chamado de “*vector – product PD*” (VP-PD), esta saída pode ser obtida por:

$$u_d(t) = u_1(t) \cdot u_2(t)^* = U_1 U_2 e^{j(\omega_1 - \omega_2)t} e^{j(\phi_1 - \phi_2)} \quad (3.7)$$

Onde, na equação 3.7 o asterisco denota o conjugado complexo, Alternativamente, o sinal do erro de fase pode ser expresso na forma retangular como a equação abaixo:

$$u_d(t) = (u_{1\alpha}u_{2\alpha} + u_{1\beta}u_{2\beta}) + j(u_{1\beta}u_{2\alpha} - u_{1\alpha}u_{2\beta}) \quad (3.8)$$

Fica evidente na equação 3.8 que as componentes real e imaginária de  $u_d(t)$  têm, respectivamente a mesma forma que as componentes de potência p e q da teoria da potência instantânea do Akagi. No entanto, duas diferentes aproximações podem ser adotadas: se a parte real de  $u_d(t)$  for utilizada como realimentação do sinal de erro, tem-se o então chamado *p*-PLL, ou por outro lado se for utilizada a parte imaginária de  $u_d(t)$  resulta no que se chama de *q*-PLL. A outra aproximação será usada na próxima análise apresentada, mas o resultado também é aplicável ao *p*-PLL [17].

Agora, considerando que  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ , então o sinal de erro de fase dado pela equação 3.7 pode ser simplificado para:

$$u_d(t) = \text{Im} \{U_1 U_2 e^{j(\phi_1 - \phi_2)}\} \quad (3.9)$$

Que resulta em:

$$u_d(t) = U_1 U_2 \cdot \text{sen}(\phi_1 - \phi_2) \quad (3.10)$$

Para pequenos desvios de fase, esta relação pode ser aproximada linearmente por:

$$u_d(t) \approx K_d \cdot \phi_e(t) \quad (3.11)$$

Onde,  $K_d = U_1 U_2$  e  $\phi_e(t) = (\phi_1 - \phi_2)$ .

Se as amplitudes de  $U_1$  e  $U_2$  são ambas normalizadas para unidade, então a equação 3.11 é ainda simplificada para  $u_d(t) \approx \phi_e(t)$ . E como resultado, o modelo linearizado do PLL pode ser descrito pelo diagrama de blocos mostrado na Figura 3.4.

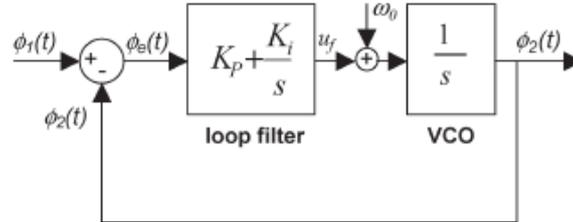


Figura 3.4 - Diagrama de blocos simplificado do PLL.

No diagrama de blocos mostrado na Figura 3.4 acima, a frequência de centro aparece como um termo adicionado à saída do PI (*loop filter*). Isto produz o mesmo efeito que condições iniciais diferentes de zero na saída do integrador. Para um *loop filter* proporcional-integral como o mostrado na Figura 3.4, a função de transferência linearizada entre  $\phi_1(t)$  e  $\phi_2(t)$  é dada por [17][18]:

$$H(s) = \frac{\phi_2(s)}{\phi_1(s)} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (3.12)$$

Onde  $H(s)$  pode ser reescrito na forma:

$$H(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.13)$$

Onde  $\omega_n = \sqrt{K_i}$ ,  $\xi = K_p/2\sqrt{K_i}$ .

Em um PLL bem projetado deve-se encontrar um seguinte critério:  $\xi = 0,7$  para uma resposta transitória otimizada, largura de banda estreita (baixo  $\omega_n$ ) para uma melhor rejeição de ruído, a fim de produzir um sinal de saída puramente senoidal até mesmo para entradas harmônicas.

O intervalo de bloqueio do PLL é definido como o desvio máximo de frequência inicial entre referência de entrada e a saída do integrador (VCO), que ainda vão fazer com que o PLL comece travado em um único passo. De acordo com o melhor que pode ser mostrado para ser aproximadamente igual à frequência natural  $\omega_n$  como:

$$\Delta\omega_L \approx \omega_n \quad (3.14)$$

Dessa forma, um PLL ainda pode falhar no travamento na componente fundamental da frequência de dado sinal de entrada durante o início transitório se, por exemplo, as seguintes condições acontecerem simultaneamente:

- ✓ O sinal de entrada contiver harmônicos de ordens muito altas ou componentes sub-harmônicas;
- ✓ Uma das componentes harmônicas tiver a frequência próxima da saída do PI;
- ✓ A diferença entre a saída do PI e a frequência fundamental ser maior que o intervalo de bloqueio.

No entanto, é muito difícil prever o comportamento real do PLL sob as condições acima, pois sempre dependerá da amplitude das componentes harmônicas. Por exemplo, oscilações sub-harmônicas na entrada de referência fazer o PLL travar na menor frequência sub-harmônica mesmo se a magnitude relativa for muito baixa [19].

O projeto desses circuitos de sincronismo deve garantir uma boa operação mesmo em situações onde as grandezas apresentem conteúdo harmônico significativo ou desequilíbrios. O diagrama de blocos do PLL utilizado neste trabalho, na comparação para a sincronização dos circuitos de disparo do TCSC é mostrado na Figura 3.5.

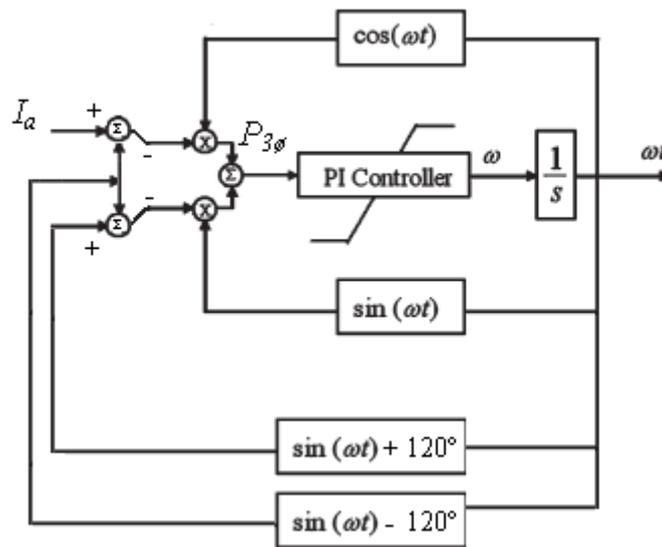


Figura 3.5 - Diagrama de Blocos do PLL.

A partir do valor instantâneo da corrente na fase *a*, por exemplo, determina-se a frequência e a fase de sua componente fundamental. Desta forma, utilizam-se estruturas similares para a obtenção de rampas em fase com as correntes das fases *a*, *b* e *c*. A comparação dessas rampas com os valores de referência dá origem aos sinais de disparo que comandarão o início da condução dos tiristores.

As Figuras 3.6(a) e 3.5(b) [19] mostram as correntes nas fases *a*, *b* e *c* e as respectivas rampas obtidas por meio do PLL implementado neste trabalho.

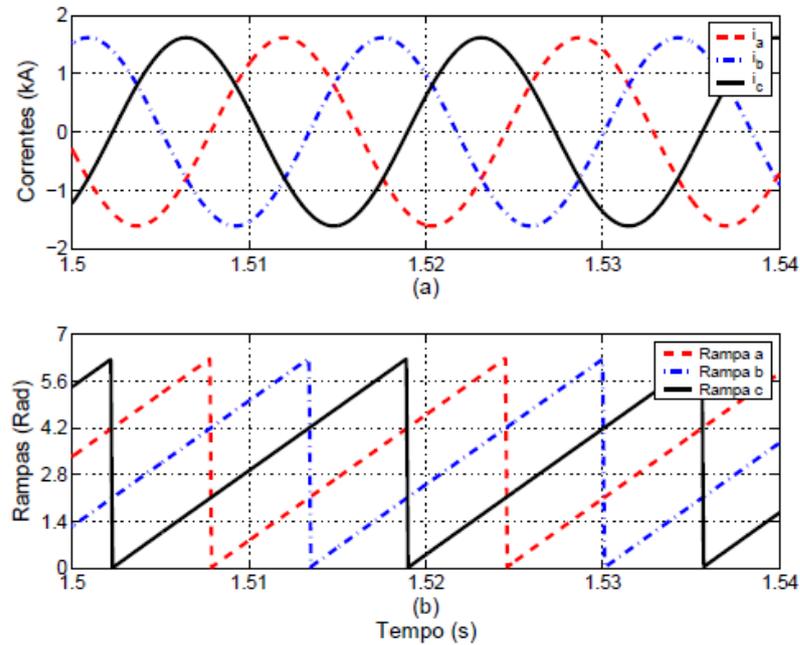


Figura 3.6 - (a) Correntes nas fases a, b e c; (b) Rampas sincronizadas com as correntes.

A escolha da corrente como variável de entrada para o PLL deve-se a seu baixo conteúdo harmônico quando comparado, por exemplo, com o da tensão no banco de capacitores, que durante a condução dos tiristores é distorcida em função das correntes harmônicas. Os harmônicos gerados pelo chaveamento dos tiristores ficam “confinados” no TCSC, uma vez que, as impedâncias harmônicas da linha/sistema são tão elevadas quanto maior a ordem harmônica.

O PLL trifásico é apresentado na Figura 3.7 [20].

Em resumo, o controlador PI busca um ponto de equilíbrio, no qual a sua entrada tenda a zero. Este ponto é encontrado quando a saída  $\omega t$  vale  $\pi/2$ , ou seja, a saída é adiantada de  $\pi/2$  em relação à fase da corrente  $i_a$ . Sabendo-se que a tensão e a corrente em quadratura levam a uma potência trifásica zero à entrada do PI,  $P_{3\phi} = V_a(i_a - i_b) + V_c(i_c - i_b) = 0$ , o PLL mantém a sua saída em  $\omega t$ , e  $\omega t'$  está em fase com a corrente de linha de referência,  $i_a$ .

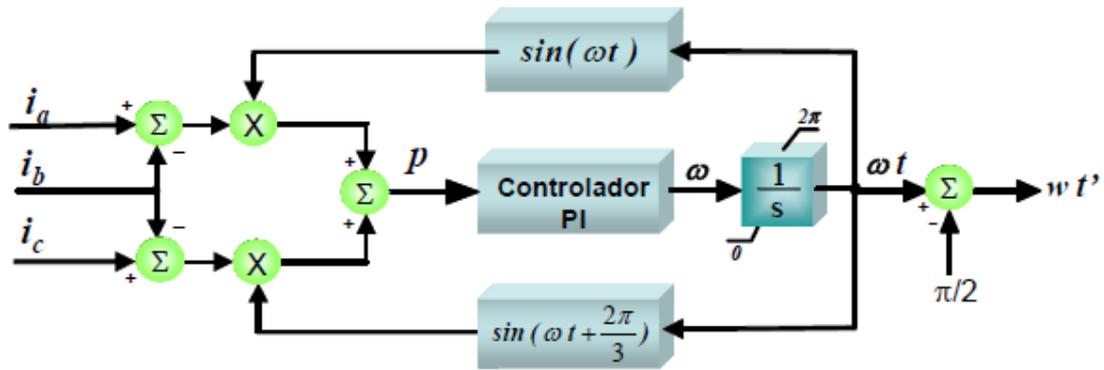


Figura 3.7 - Diagrama do PLL Trifásico.

- *Second Order Generalized Integrator – Frequency Locked*

#### *Loop – SOGI-FLL*

Este algoritmo propõe um novo método de sincronização de frequência adaptativa que estima não somente componentes de seqüência positiva e negativa de sinais de potência na frequência fundamental como também componentes de seqüência de frequências maiores. Este dispositivo é chamado de MSOGI-FLL, uma vez que é baseado em uma rede desacoplada, consistindo de múltiplos SOGI's (MSOGI), que estão na frequência adaptativa pelo uso de um FLL [21].

Para este trabalho, será explorado apenas o rastreamento da frequência fundamental do sinal de entrada, de modo a comparar seu desempenho com o PLL tradicional.

O conceito do *generalized integrator* (GI) para sinais senoidais foi formalmente introduzido por Yuan e colaboradores (2002), onde um bloco simplificado com a função

de transferência  $2s/(s^2 + \omega^2)$  foi apresentada como um GI para sinais senoidais monofásicos [21].

O GI é a base dos controladores proporcional-ressonantes (PR) e sua funcionalidade básica é introduzir um ganho infinito na frequência de ressonância selecionada de modo a eliminar o erro no estado permanente daquela frequência. O GI também é aplicado na filtragem adaptativa e implementação de PLL – sendo este o objetivo principal. A Figura 3.8 mostra um filtro adaptativo baseado no GI, onde uma função cosseno é usada em sua implementação.

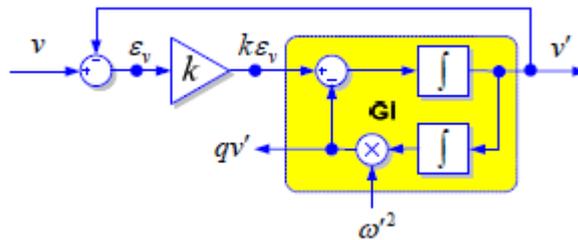


Figura 3.8 - Filtro Adaptativo baseado no GI.

$$GI(s) = \frac{v'}{k\varepsilon_v}(s) = \frac{s}{s^2 + \omega'^2} \quad (3.15)$$

Em 3.15, a frequência de ressonância foi chamada de  $\omega'$  para diferenciá-la da frequência de entrada  $\omega$ .

Os dois sinais de saída do filtro, que estão em quadratura e mostrados na Figura 3.8, são definidos pelas seguintes funções de transferência:

$$D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{ks}{s^2 + ks + \omega'^2} \quad (3.16)$$

$$Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{k\omega'}{s^2 + ks + \omega'^2} \quad (3.17)$$

Entretanto, as funções de transferências acima não são as escolhas mais adequadas para a implementação de um filtro adaptativo de frequência variável, uma vez que a largura de banda na equação 3.16 e o ganho estático na equação 3.17 não estão somente em função do ganho  $k$ , mas também eles dependem da frequência de centro ( $\omega'$ ) do filtro, que de fato iguala a frequência de ressonância do GI. Para superar este problema, uma estrutura alternativa do GI foi apresentada formalmente por Rodriguez e colaboradores (2006), sendo nomeada de *second order generalized integrator* – SOGI. Este modelo de filtro adaptativo é mostrado na Figura 3.9 [22].

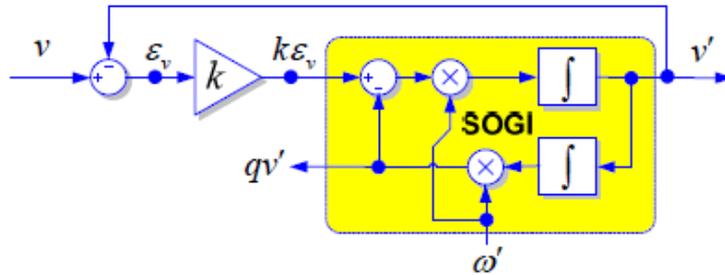


Figura 3.9 - Filtro Adaptativo baseado no SOGI-QSG.

A função de transferência do SOGI é dada por:

$$SOGI(s) = \frac{v'}{k\varepsilon_v}(s) = \frac{\omega's}{s^2 + \omega'^2} \quad (3.18)$$

E as funções de transferência das duas saídas em quadratura do filtro adaptativo da Figura 3.9 são:

$$D(s) = \frac{v'}{v}(s) = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (3.19)$$

$$Q(s) = \frac{qv'}{v}(s) = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (3.20)$$

Neste caso, a largura de banda do filtro representado pela equação 3.19 independe da frequência de centro  $\omega'$ , sendo exclusivamente ajustado pelo ganho  $k$ . Além disso, as funções de transferência 3.19 e 3.20 podem mostrar que a saída  $qv'$  está sempre atrasada de  $90^\circ$  da saída  $v'$ , independentemente da frequência do sinal de entrada  $v$  e da frequência de ressonância do SOGI. E por esse motivo o filtro adaptativo da Figura 3.9 foi nomeado como SOGI *quadrature signal generator* (SOGI-QSG).

Para melhor entender como a frequência de ressonância do SOGI é igualada a frequência do sinal de entrada, ou seja, como a frequência do sinal de entrada é rastreada, será explicada a estratégia do FLL.

Os dois sinais de saída do SOGI-QSG têm mesma amplitude somente no caso quando a frequência do sinal de entrada e a frequência de ressonância do SOGI são iguais. Dessa forma, a frequência de centro do SOGI-QSG deve ser adaptada à frequência do sinal de entrada a fim de alcançar um ajuste balanceado dos sinais em quadratura com amplitudes iguais nas suas saídas.

O FLL, também apresentado por Rodriguez (2006) como um eficiente mecanismo para adaptação da frequência de centro do SOGI-QSG está mostrado na Figura 3.10 a seguir, já incluindo o filtro adaptativo explicado [21][22].

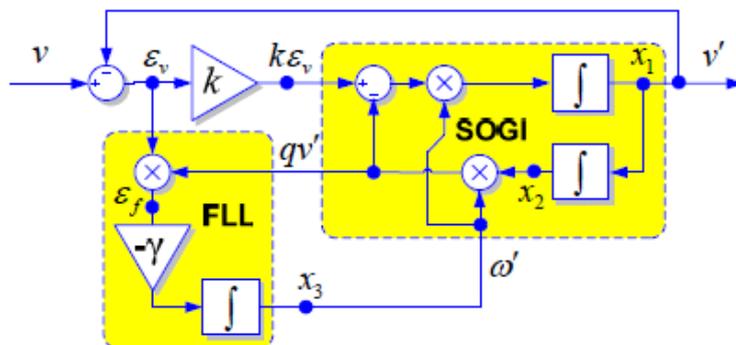


Figura 3.10 - O SOGI-FLL, em sistema de sincronização monofásico.

A relação entre o sinal de saída em quadratura  $qv'$  e o sinal de erro  $\varepsilon_v$  deve ser analisado para explicar o comportamento do FLL. Abaixo é mostrada a função de transferência do sinal de entrada  $v$  e o sinal de erro  $\varepsilon_v$  na equação 3.21.

$$E(s) = \frac{\varepsilon_v}{v}(s) = \frac{s^2 + \omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (3.21)$$

Ambos  $Q(s)$  e  $E(s)$  são mostrados juntos no diagrama de Bode da Figura 3.11 a seguir, onde pode ser observado que os sinais  $qv'$  e  $\varepsilon_v$  estão em fase quando a frequência de entrada é mais baixa que a frequência de ressonância do SOGI ( $\omega < \omega'$ ) e quando ( $\omega > \omega'$ ) eles ficam em contra-fase. Assim, o erro variável da frequência  $\varepsilon_f$  pode ser definido como produto  $qv'$  por  $\varepsilon_v$ . Conforme indicado no diagrama de Bode o valor médio de  $\varepsilon_f$  será positivo quando ( $\omega < \omega'$ ), zero quando ( $\omega = \omega'$ ) e negativo quando ( $\omega > \omega'$ ). Conseqüentemente, como mostrado na Figura 3.10, o controlador integral com ganho negativo  $-\gamma$ , pode ser utilizado para zerar na componente dc do  $\varepsilon_f$  pelo deslocamento da frequência de ressonância  $\omega'$ , do SOGI até igualar com a frequência de entrada  $\omega$ . No diagrama de blocos do sistema de frequência adaptativa da Figura 3.10 estão o SOGI e o FLL, os quais juntos foram nomeados SOGI-FLL, um sistema de sincronismo monofásico em que a frequência de entrada é diretamente detectada pelo FLL [21][22][23].

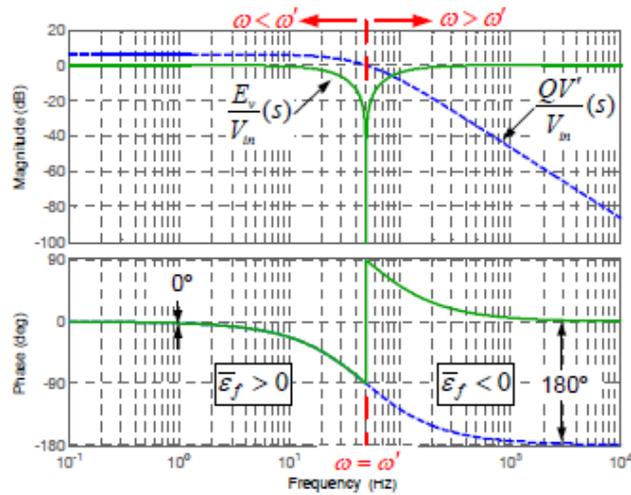


Figura 3.11 - Diagrama de Bode do FLL.

➤ Sintonizando o SOGI

Das funções de transferência nas equações 3.19 e 3.20, o tempo de resposta do SOGI-QSG para um dado sinal de entrada senoidal  $v = V \text{sen}(\omega t + \phi)$  é descrito como [21][23]:

$$v' = -\frac{V}{\gamma} \text{sen}(\gamma \omega t) \cdot e^{-\frac{k\omega'}{2}t} + V \text{sen}(\omega t) \quad (3.22)$$

$$qv' = V \left[ \cos(\gamma \omega t) + \frac{k}{2\gamma} \cdot \text{sen}(\gamma \omega t) \right] \cdot e^{-\frac{k\omega'}{2}t} - V \cos(\omega t) \quad (3.23)$$

Onde,  $\gamma = \sqrt{4 - k^2}/2$  e  $k < 2$ .

De acordo com as equações 3.22 e 3.23 o tempo de assentamento pode ser aproximado para [21]:

$$t_{s(SOGI)} = \frac{10}{K\omega'} \quad (3.24)$$

Neste trabalho, o ganho utilizado no SOGI foi de  $k = \sqrt{2}$ , que resultou em um intercâmbio ótimo entre o tempo de assentamento, o *overshoot* e a rejeição de harmônicos.

➤ Sintonizando o FLL

Tomando por um sinal senoidal  $v = V \cdot \text{sen}(\omega t + \phi)$  como sinal de entrada para o SOGI-FLL e considerando um ponto de operação instável do FLL com ( $\omega \neq \omega'$ ), tem-se na vizinhança da operação do estado permanente do FLL um termo não-linear da equação dinâmica do espaço de estados do sistema, o qual apresentará uma componente dc somado a termo ac oscilando em duas vezes a frequência de entrada. Desse modo, a dinâmica média do FLL com ( $\omega \approx \omega'$ ), pode ser definida pela equação 3.25, onde a componente ac não aparece, conforme apresentado em [21].

$$\dot{\omega}' = -\frac{\gamma V^2}{k\omega'} (\bar{\omega}' - \omega) \quad (3.25)$$

A equação acima é importante porque mostra a relação entre a resposta dinâmica do FLL e a rede variável e o ganho do SOGI-QSG. Desta equação, o valor de  $\gamma$  pode ser normalizado em acordo com a equação seguinte, a 3.26, de modo a obter o sistema linearizado da Figura 3.12, que não depende de nenhuma rede variável nem do ganho do SOGI-QSG [21].

$$\gamma = \frac{k\omega'}{V^2} \Gamma \quad (3.26)$$

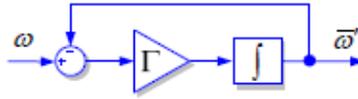


Figura 3.12 - Sistema de adaptação a frequência simplificado do FLL.

A função de transferência de primeira ordem do diagrama de blocos da figura acima é dada por:

$$\frac{\bar{\omega}'}{\omega} = \frac{\Gamma}{s+\Gamma} \quad (3.27)$$

Portanto, o tempo de assentamento é exclusivamente dependente do parâmetro  $\Gamma$  e pode ser aproximado por:

$$t_{s(FLL)} \approx \frac{5}{\Gamma} \quad (3.28)$$

O FLL realimentado e linearizado é mostrado na Figura 3.13. Neste sistema, o ganho do FLL é ajustado por uma realimentação estimada nas condições de operação da malha, que garanta um tempo de assentamento constante na estimativa da frequência da rede independentemente das características do sinal de entrada [21].

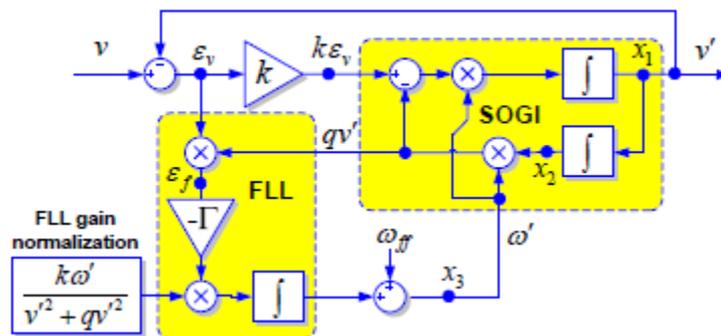


Figura 3.13 - SOGI-FLL com normalização do ganho do FLL.

Neste trabalho, o  $\Gamma$  foi estimado e utilizado no valor de  $\Gamma = 50$ .

Um MSOGI-FLL pode ser facilmente implementado pela aplicação de estruturas monofásicas dele próprio, para dois sinais ortogonais na referência estacionária  $\alpha\beta$ . A saída desses Dual SOGI (DSOGI), que trabalham no domínio  $\alpha\beta$ , providenciarão sinais de entrada para o calculador de componentes de seqüência positiva e negativa, que está encarregado do cálculo instantâneo das componentes simétricas de seqüência positiva e negativa da sintonização da freqüência correspondente. Onde finalmente se vê nas figuras 3.14 e 3.15, o DSOGI-FLL e Dual SOGI-FLL Otimizado, respectivamente.

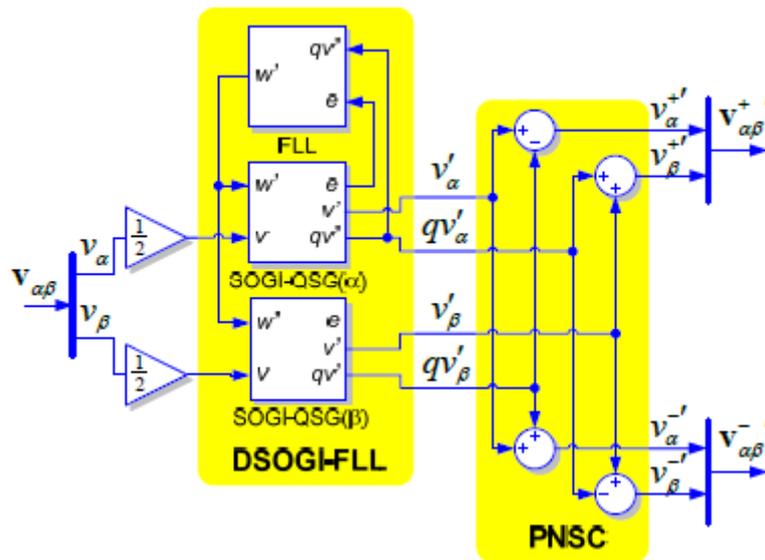


Figura 3.14 - DSOGI-FLL

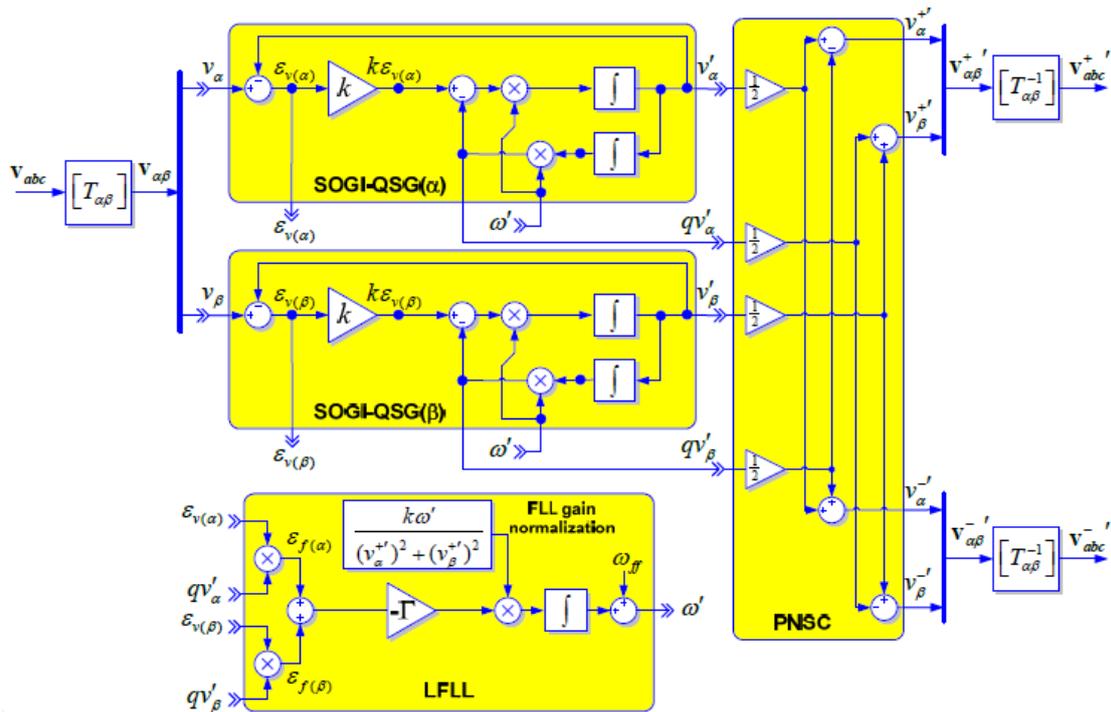


Figura 3.15 - Dual SOGI-FLL Otimizado.

### 3.2.2 Circuito para Geração do Sinal de Disparo

Para a obtenção dos sinais de disparo dos tiristores, compararam-se as rampas geradas pelos circuitos de sincronismo com a ordem do ângulo de disparo correspondente à ordem de reatância gerada pelo TCSC.

A metodologia para determinação dos valores de ângulo de disparo  $\alpha$  empregada neste trabalho é baseada na teoria de linearização da curva de reatância do TCSC conforme apresentada em [17]. Em face da relação extremamente não linear entre a reatância e o ângulo de disparo do tiristor (ver Figura 3.2) deve-se determinar uma curva que torne possível a obtenção de  $\alpha$  a partir da ordem de reatância imposta pela estratégia de controle.

A estratégia de obtenção dos sinais de disparo para as chaves é mostrada na Figura 3.16 [19]. Observa-se que a comparação feita entre a rampa sincronizada e o sinal associado ao ângulo de disparo desejado produz pulsos adequados ao chaveamento dos tiristores.

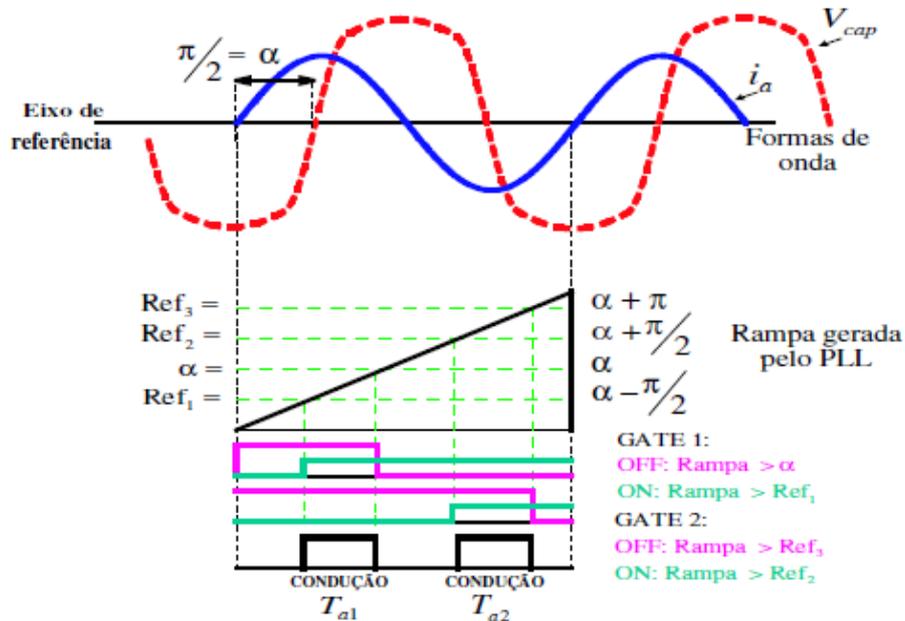


Figura 3.16 - Lógica de disparo dos tiristores da fase  $a$  do TCSC.

O circuito de disparo é baseado em duas saídas: uma proveniente do sincronismo (PLL ou SOGI-FLL) -  $sen(\omega t')$ , onde  $\omega t'$  é a saída do próprio sincronismo sem o adianto natural de  $90^\circ$ , e a outra é a primeira saída, porém atrasada de  $\alpha$ ,  $sen(\omega t' + \alpha)$ . Quando ambas as saídas passam a ter o mesmo sinal, a chave diretamente polarizada é disparada. Suponha que a corrente  $i_a$  seja positiva e a tensão  $V_{cap}$  negativa, o tiristor  $T_{a1}$  está polarizado corretamente sendo disparado com um atraso de  $\alpha$  após  $i_a$  cruzar o zero. O tiristor  $T_{a2}$  é habilitado quando  $i_a$  é negativo e a segunda saída troca de sinal (passa a ser negativa). Como temos a corrente  $i_a$  adiantada de  $\pi/2$  em relação à tensão do capacitor, pode-se garantir que no cruzamento da corrente pelo zero teremos os devidos tiristores diretamente polarizados.

# **Capítulo 4**

## **Análise Comparativa:**

## **Simulações e Resultados**

## 4.1 Introdução

Neste capítulo, com base nos estudos dos capítulos anteriores, onde foram abordados conceitos básicos da operação do TCSC e seus controles de disparo e sincronismo, dando maior ênfase ao sincronismo, o PLL e o SOGI-FLL, será implementado e simulado o funcionamento do equipamento FACTS – TCSC, onde será comparado seu desempenho no controle na transmissão de potência ativa quando controlado pelo PLL e depois com o SOGI-FLL.

O sistema mostrado na Figura 4.1 foi simulado no programa PSCAD/EMTDC V.4.0.1.

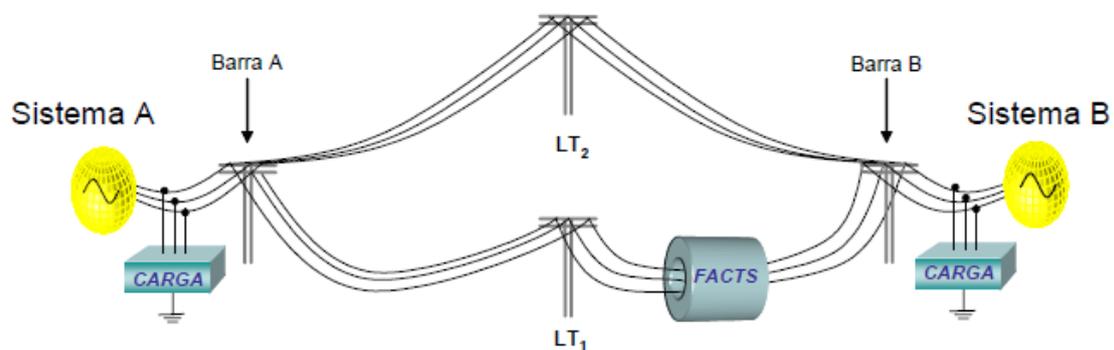


Figura 4.1 - Sistema considerado nas simulações.

Tal avaliação se dará em duas situações. Na primeira, ver-se-á o funcionamento do TCSC com o sincronismo tradicional, o PLL, dispositivo que tomou como variável de entrada as correntes de linha e através delas pode rastrear a fase e a frequência da rede para assim sincronizar o equipamento, e na segunda, o mesmo procedimento, porém, neste momento será usado o algoritmo SOGI-FLL, o qual também utilizou as correntes de linha como variáveis de entrada para o mesmo objetivo: rastrear a entrada e

sincronizar o equipamento com a rede. Só então, comparar a *performance* do TCSC frente aos dois métodos de sincronização.

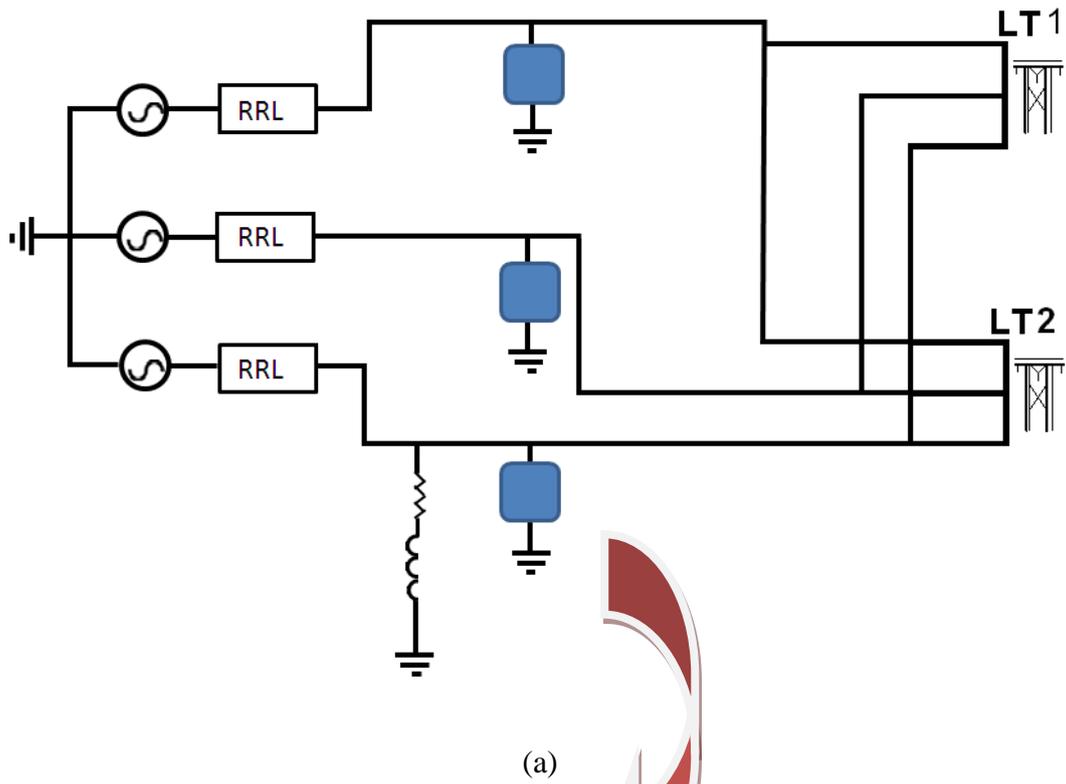
O item a seguir descreve detalhadamente as características da linha utilizada e os equipamentos que compõem o sistema.

## 4.2 Descrição e Considerações do Sistema

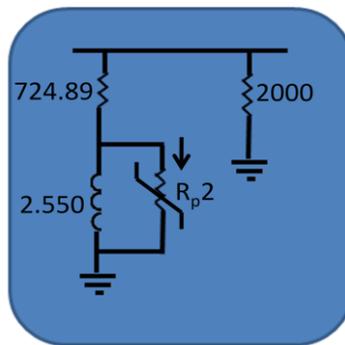
Este consiste de dois sistemas, A e B, interligados entre si por duas linhas de transmissão trifásicas, paralelas, idênticas, idealmente transpostas, de 2722 km. Uma das linhas é controlada pelo equipamento FACTS, a LT1, e a outra linha não, a LT2, como mostrado nas Figuras 4.2 e 4.3. O equipamento é utilizado para compensação série da linha e controle do fluxo de potência de até 40%.

Estas linhas estão bastante distantes entre si, de modo a não haver acoplamentos mútuos entre elas. Elas foram simuladas utilizando o modelo dependente da frequência no domínio de fases do simulador. Vale ressaltar que as linhas de transmissão aqui apresentadas não são otimizadas, porém isto não interfere na validação dos conceitos aqui apresentados.

O sistema A está representado na Figura 4.2 e seus principais parâmetros estão a seguir: tensão de linha eficaz - 750 kV; ângulo -  $0^\circ$ ; frequência - 60 Hz; impedância -  $18 \Omega$ ;  $87^\circ$ ; carga (Z constante) - R //  $R_2L$  em estrela trifásica, onde: R = 2000  $\Omega$ ,  $R_2 = 724,9$  e L = 2,550 H



(a)



(b)

Figura 4.2 - Diagrama do Sistema A: (a) Sistema; (b) Carga

Da mesma forma, é descrito o sistema B na Figura 4.3 e seus principais parâmetros vão a seguir: tensão de linha eficaz - 825 kV; ângulo -191,5°; frequência -60 Hz; Impedância -  $28 \Omega$ ,  $87^\circ$ ; carga (Z constante) – R//R<sub>2</sub>L em estrela trifásica, onde: R = 250  $\Omega$ , R<sub>2</sub> = 173,6  $\Omega$  e L = 0,3054 H.

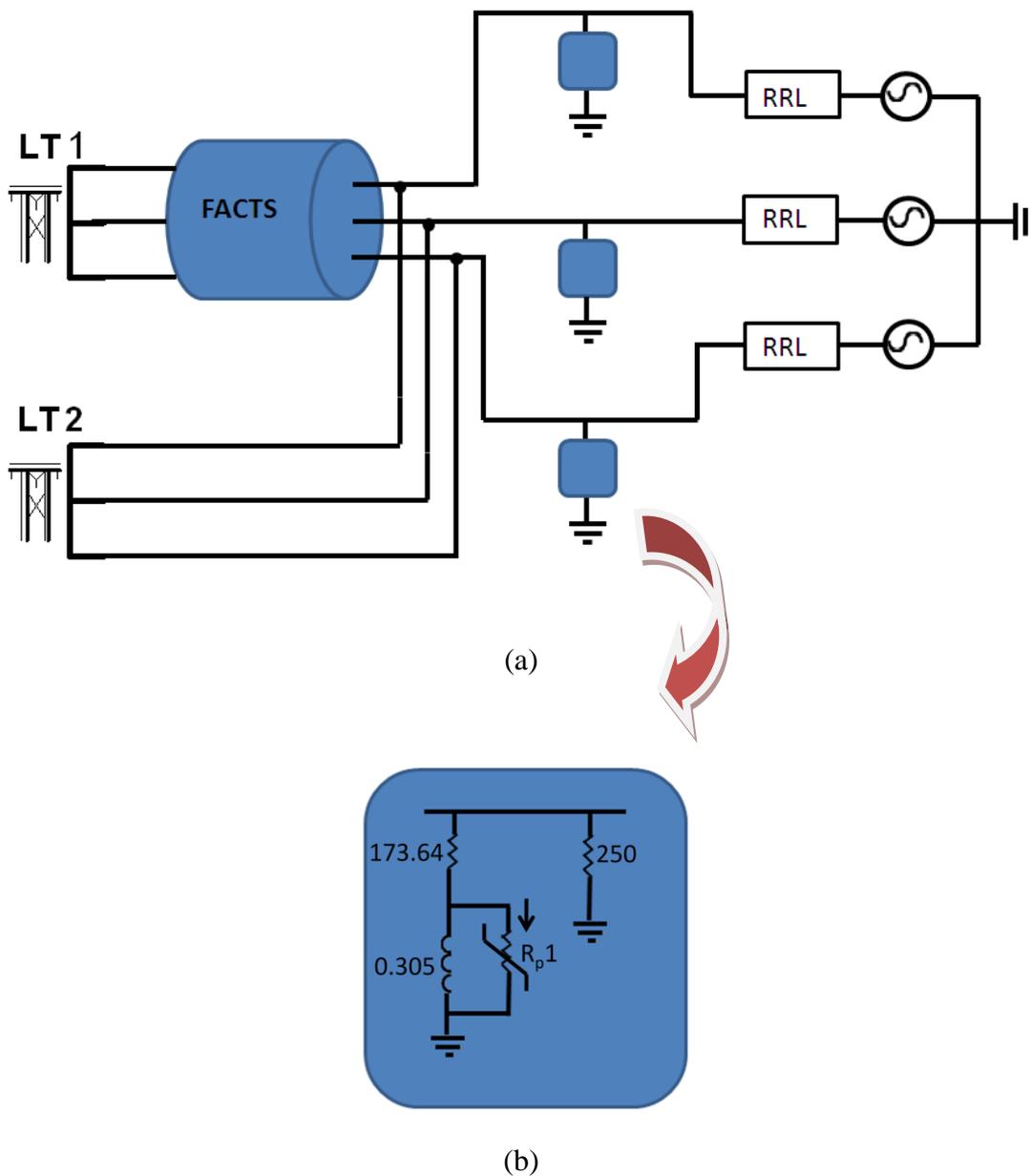


Figura 4.3 - Diagrama do Sistema B: (a) Sistema; (b) Carga

Os principais dados do TCSC utilizado são:  $C = 180 \mu\text{F}$  ( $X_{c(\min)} = 14,75 \Omega$ , em 60Hz);  $L = 52,2 \text{ mH}$  ( $X_{c(\max)} = 59 \Omega$ , em 60Hz);

### 4.3 Procedimentos e Aspectos Gerais da Simulação

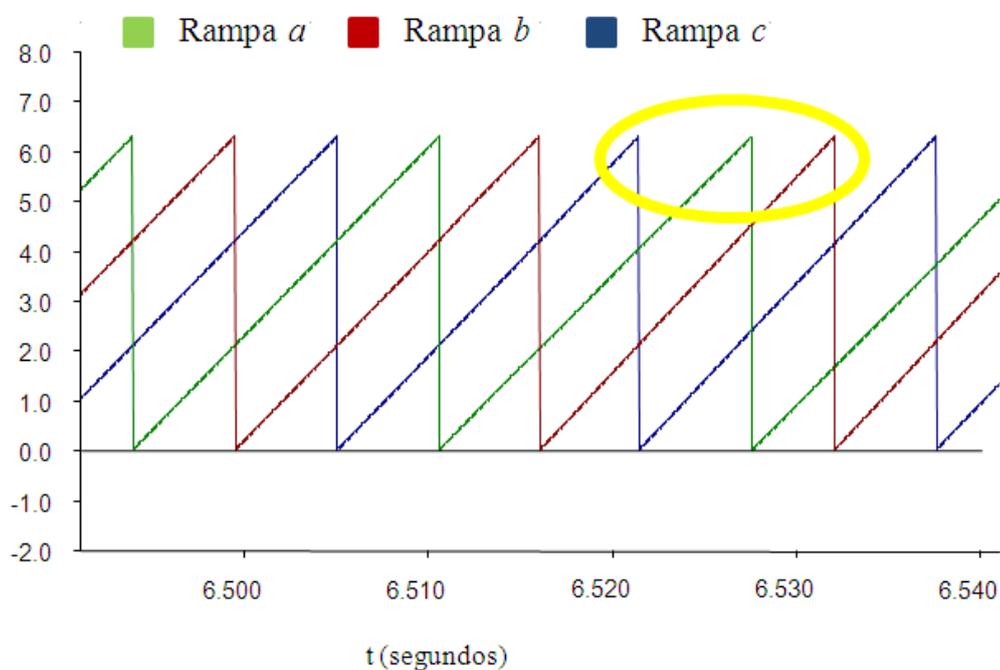
Neste item, todo o procedimento da simulação é detalhado.

Foram consideradas em ambos os extremos das linhas, associações série de impedâncias e fontes de tensão, de valores fictícios, de forma a representarem os subsistemas equivalentes vistos dos pontos A e B mostrados na Figura 4.1. Com relação à potência trifásica transmitida nas duas linhas, tomou-se por base como a soma, nas três fases, do produto entre tensão e corrente de cada fase no final das linhas. Para as potências ativas trifásicas, valores em p.u. foram utilizados, tomando-se como base a potência de 1890 MW (potência característica menos as perdas na linha). Tudo isso com um tempo total de simulação de 12 segundos, com um *time step* de  $10\mu\text{s}$  e o *plot step* de  $50\mu\text{s}$ .

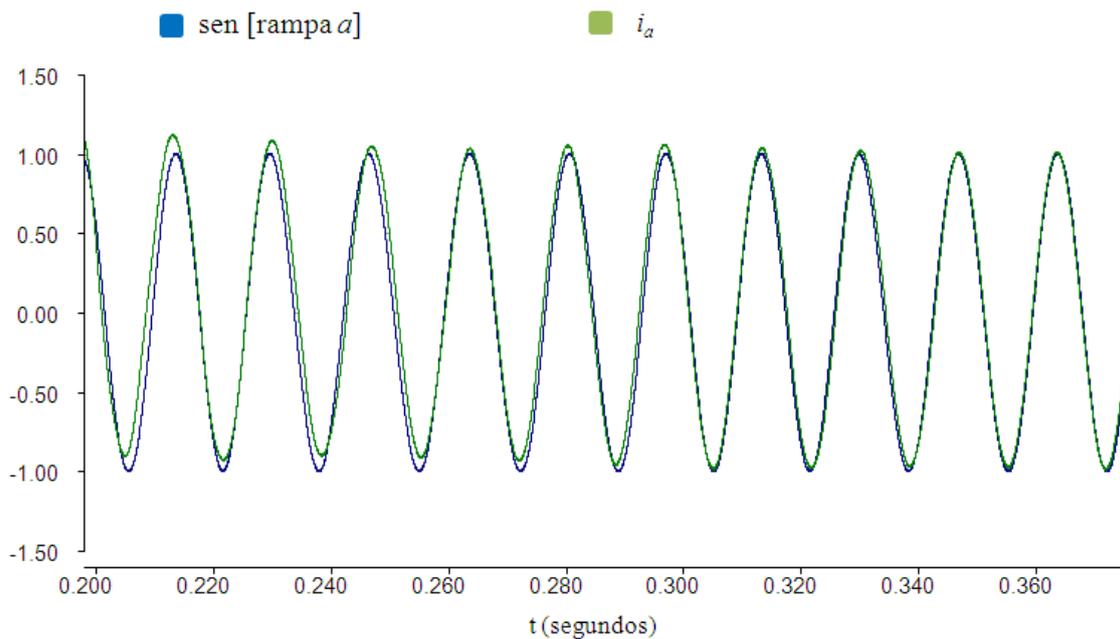
Assim, o desempenho do equipamento TCSC frente aos dois algoritmos de sincronismo foi avaliado quando o simulado foi o seguinte: inicialmente o equipamento estava desligado, até 1s. Então o este é acionado, colocando-se a referência de potência para 1 p.u. Em seguida altera-se a referência para 0,7 p.u. Por fim, ocorre um curto, aos 6,5s da simulação, na fase *c* da fonte 1 (sistema A) de duração de 0,5s. Ou seja, de 1s até 4s a referência é mantida em 1p.u. e de 4s em diante em 0,7p.u.

## 4.4 Gráficos da Simulação

A Figura 4.4 mostra a atuação do PLL, entregando, através das rampas relativas a cada fase  $a$ ,  $b$  e  $c$ , - Figura 4.4 (a) - a frequência e a fase da rede para que o controle dos pulsos seja sincronizado com a mesma, fazendo, dessa forma, com que os tiristores do TCSC sejam disparados em sincronia com a rede. Neste gráfico nota-se que nos instantes do curto, o PLL, apesar de “sentir” o distúrbio (destacado em amarelo) conseguiu manter o sincronismo. Esta característica é indispensável para o bom funcionamento do TCSC. E complementarmente, na Figura 4.4 (b) o exato sincronismo da rampa da fase  $a$  do PLL com a corrente de entrada  $i_a$ , onde se vê o seno da rampa  $a$  em azul seguindo a corrente, em verde, procurando o sincronismo, tão logo encontrando e travando em torno dos 0,32s.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Rampas pelo PLL: (a) as três fases; (b) seno da rampa  $\alpha$  do PLL sincronizada com a corrente  $i_a$  de entrada.

Em seguida, vê-se a Figura 4.5, onde é possível analisar o controle do fluxo de potência na linha LT1 pelo compensador, uma vez que os disparos dos tiristores estão sincronizados (vide o bom funcionamento do PLL na figura anterior). Observando a operação do TCSC, nota-se que, quando a potência de referência a ser transmitida é alterada duas vezes: na primeira, em 1s, quando é alterada para 1 p.u., o equipamento segue a referência e aos 3,3s alcança-a, levando aproximadamente 2,3s; já na segunda vez em 4s, quando a potência de referência é baixada para 0,7 p.u., o TCSC alcança-a aos 5,4s aproximados, levando por volta de 1,4s.

Vale ressaltar também que, após a falta monofásica na fase  $c$ , aos 6,5s com duração de  $0,5\mu s$  o TCSC conseguiu buscar referência de 0,7 p.u., onde se pode observar uma resposta sensivelmente amortecida, e ressaltando a oscilação inicial de subida, a qual existe por causa do banco LC formado com o fechamento das chaves.

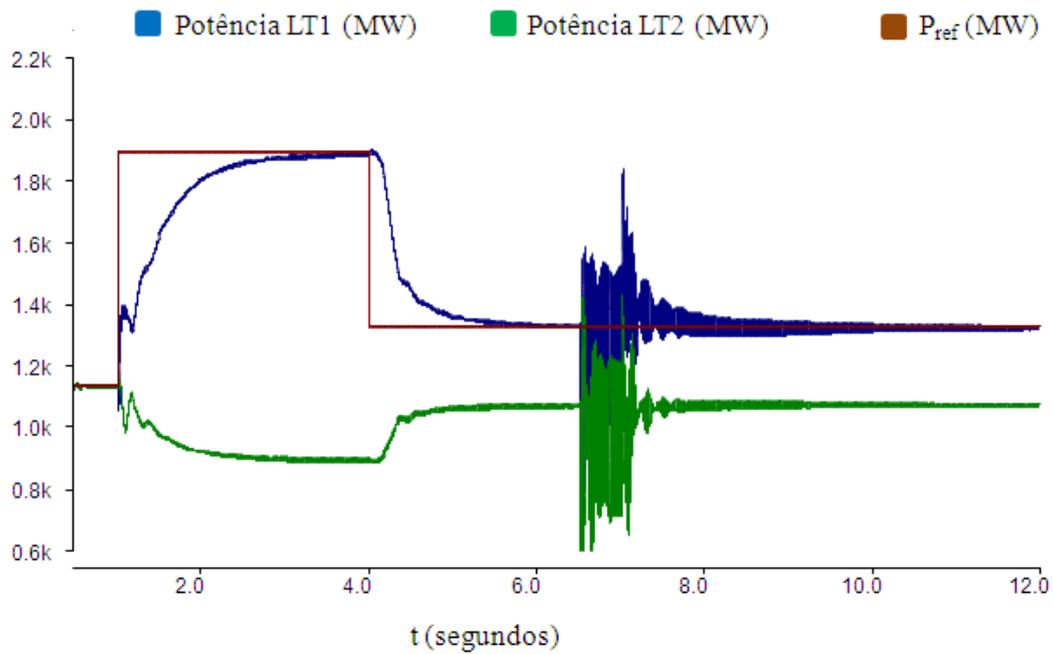


Figura 4.5 - Potência ativa trifásica transmitida pelas linhas.

De modo a propiciar o entendimento do gráfico da Figura 4.6, foi aplicado um fator de escala de 10% na tensão (ficando 10kV) do capacitor em relação a sua corrente (kA), uma vez que seus valores são de ordem de grandeza diferente.

Desta forma, na figura a seguir observa-se o comportamento da tensão e da corrente no capacitor do TCSC da fase *a*, quando este é submetido a um nível de compensação máxima, ou seja, ângulo de disparo dos tiristores de  $1^\circ$ , basicamente com inserção total do RCT.

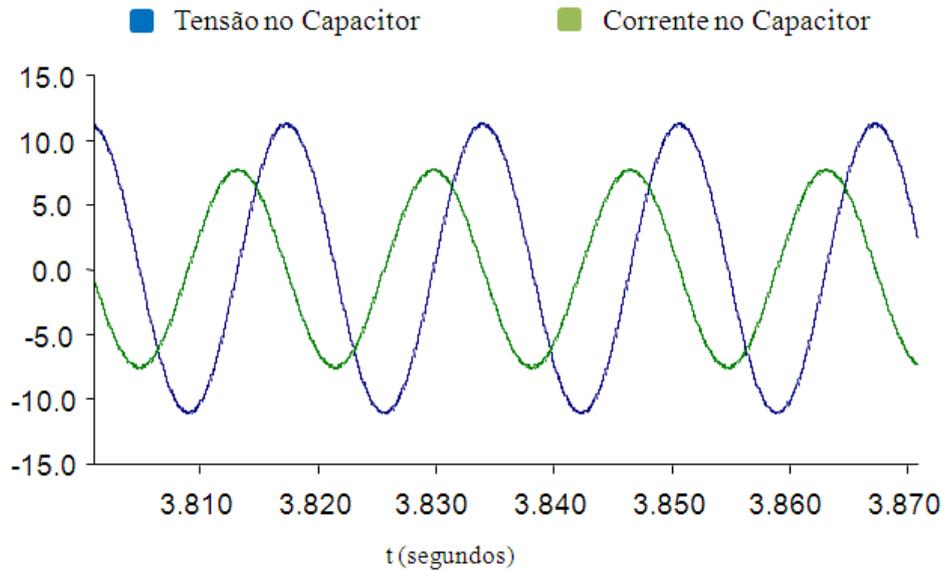


Figura 4.6 - Tensão e Corrente no capacitor do TCSC da fase  $a$  com  $\alpha = 1^\circ$ .

A Figura 4.7 a seguir, apresenta a variação dos ângulos de disparo dos tiristores em função do nível de compensação desejado. Nela, pode-se observar que os ângulos são todos idênticos, uma vez que os capacitores são inseridos em cada fase de maneira uniforme, salvo no momento do curto (monofásico na fase  $c$ ) em diante, pois a potência ativa em cada fase é alterada e, portanto sendo necessária a correção de potência ativa individual por fase: atuação do PLL<sub>1 $\phi$</sub> .

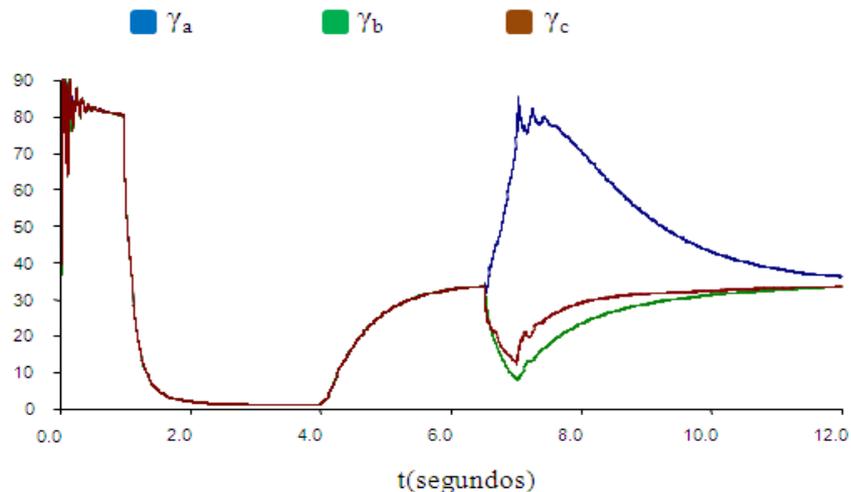


Figura 4.7 - Ângulos de disparos para níveis de compensação de 1p.u. e 0,7p.u.

Em seguida, vê-se na Figura 4.8, com enfoque na falta monofásica (Barra A - fase *c*), o perfil da corrente de curto antes e durante a falta e depois do restabelecimento do sistema. Onde se pode avaliar uma corrente de valor em torno de 7,5 kA.

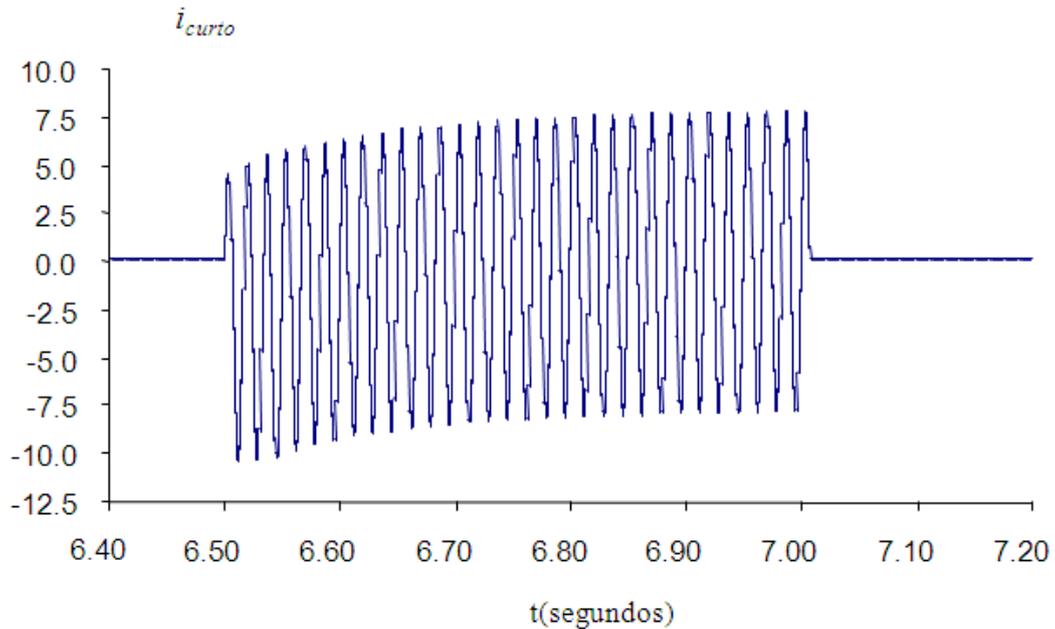


Figura 4.8 - Corrente drenada na fase *c* durante a falta.

Continuando ainda na Barra A, pela Figura 4.9 pode ser visto o perfil de tensão na fase *c* antes, durante e depois da falta monofásica. A tensão encontra-se em p.u. com  $V_{base} = 612$  kV. Neste gráfico nota-se um pequeno afundamento de tensão de 20%, retornando a 1 p.u. após o restabelecimento do curto.

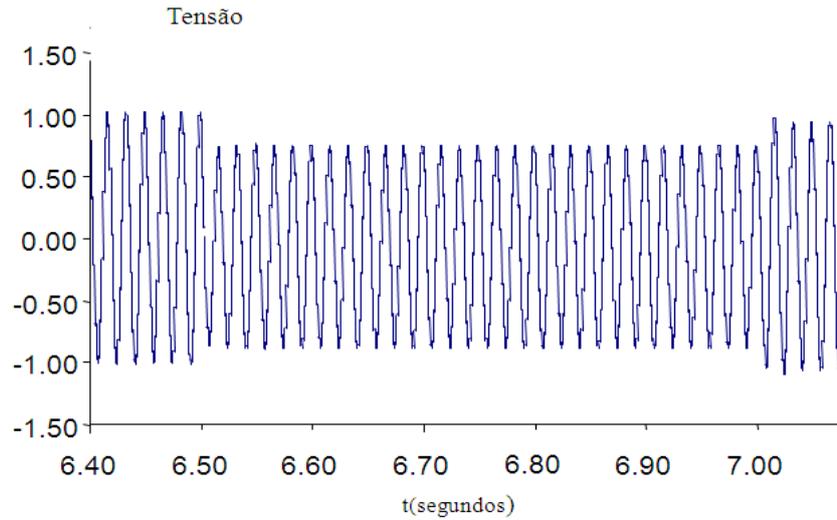


Figura 4.9 - Perfil de tensão na fase *c* durante o curto no Sistema A.

As potências ativas instantâneas monofásicas, referentes ao sistema A transmitida pela LT1 são mostradas na Figura 4.10 a seguir. Nota-se que como a falta deu-se na fase *c*, esta foi a mais afetada, diferente da fase *a*, que sofreu menos impacto, mesmo se tratando do sistema A.

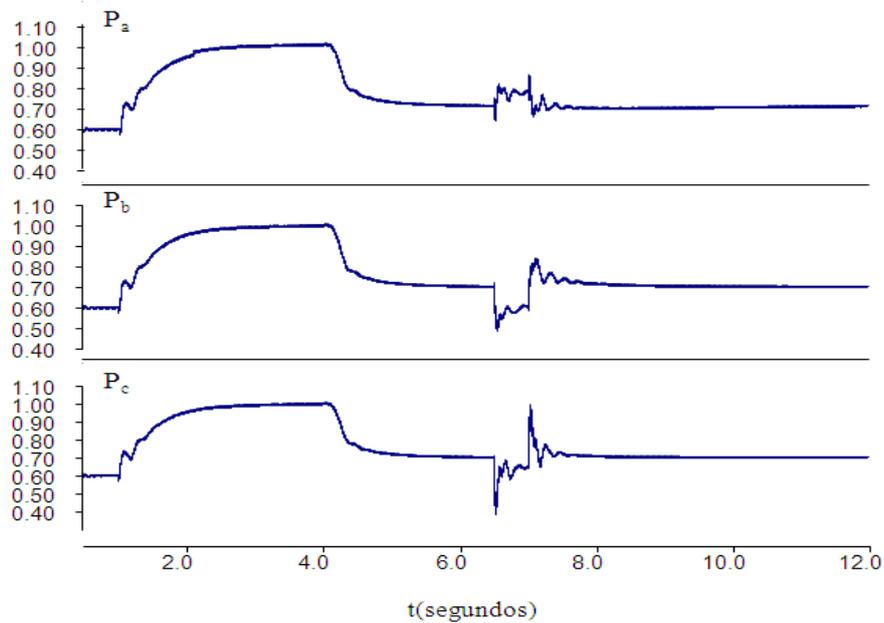


Figura 4.10 - Potências Médias Ativas Instantâneas Monofásicas Transmitidas pela

LT1.

A partir deste momento, a análise dar-se-á em torno do SOGI-FLL. Da mesma forma que se desenvolveu a análise com o PLL, visa-se avaliar o comportamento do sistema transmissor de potência com a atuação, agora, do SOGI-FLL.

Desta forma, através da Figura 4.11 pode-se observar o rastreamento da frequência da rede, 60Hz, a qual está ilustrada pelo  $\omega$  com valor aproximado de 377 rad/s. Onde se nota duas pequenas frentes de oscilação: a primeira quando o TCSC é introduzido no sistema, em 1s, e quando se dá a falta monofásica, aos 6,5s.

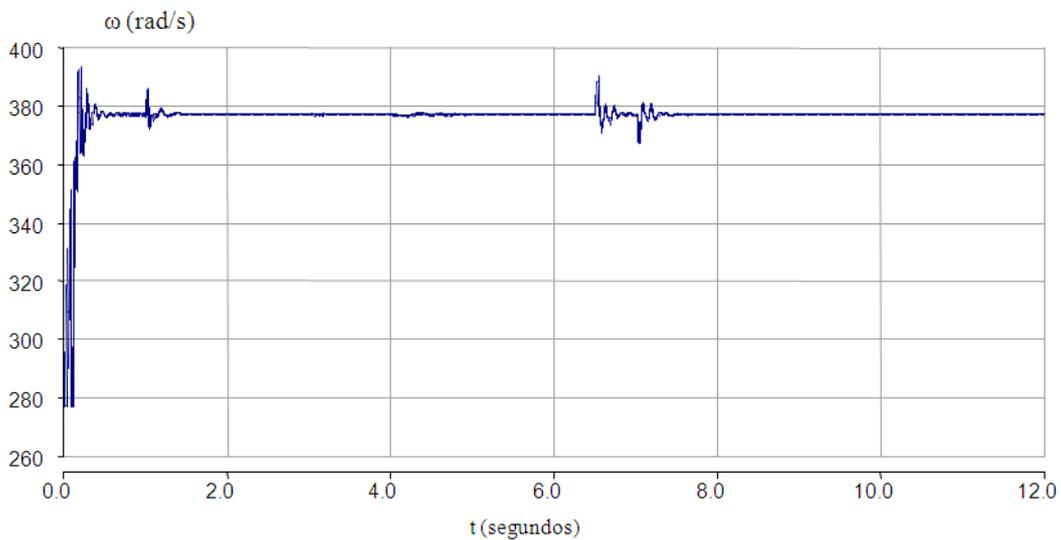
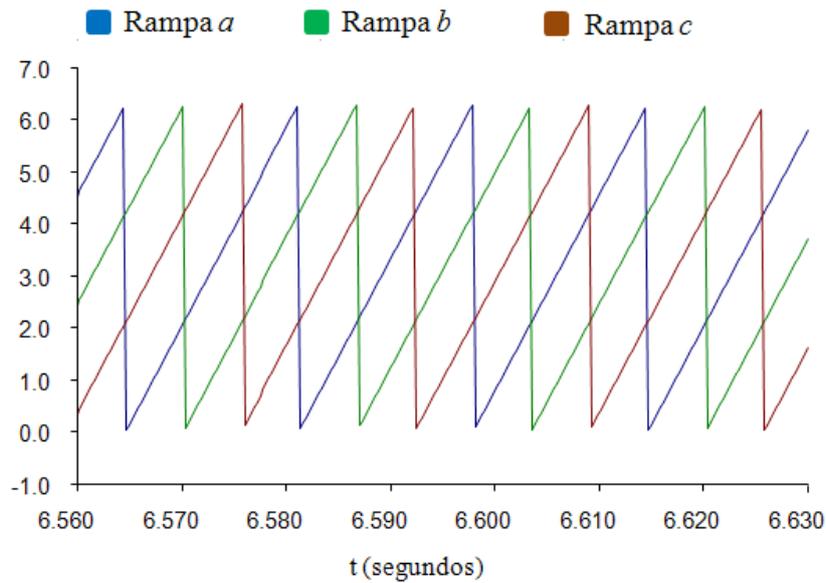


Figura 4.11 - Rastreamento da frequência da rede pelo SOGI-FLL.

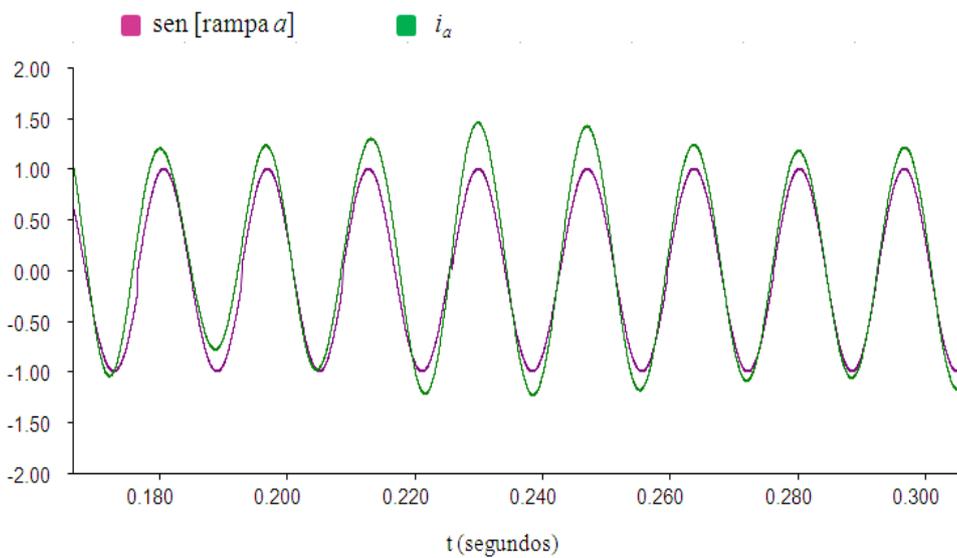
Tanto o *overshooting* quanto as outras duas oscilações tiveram suas amplitudes melhoradas através da otimização dos ganhos de controle do SOGI-FLL, de forma que essa configuração foi a melhor encontrada para o sistema em questão.

Continuando a análise do SOGI-FLL da mesma forma que no PLL, a Figura 4.12 (a) e (b) ilustra: (a) as rampas relativas às fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ , sincronizando os pulsos de disparos dos tiristores com a rede. E da mesma forma que o PLL, avaliou-se o

travamento com a corrente de entrada, onde na figura (b) mostra o seno da rampa da fase  $a$  seguindo e travando exatamente com  $i_a$  em pouco antes dos 0,3s. Fato que, embora tenha sido consideravelmente pequeno em comparação ao tempo de travamento do PLL, pode ter implicado no comportamento geral do sistema, que será comentado ainda nas análises à frente.



(a)



(b)

Figura 4.12 – Rampas pelo SOGI-FLL: (a) as três fases e (b) seno da rampa  $a$  do SOGI-FLL sincronizada com a corrente  $i_a$  de entrada.

Em seguida, pela Figura 4.13, é possível analisar o controle do fluxo de potência na linha LT1 pelo compensador uma vez que os disparos dos tiristores estão sincronizados. Nesta observação da operação do TCSC, nota-se que, quando a potência de referência foi alterada em 1s, para 1 p.u., o equipamento segue a referência alcançando-a em aproximadamente 2,5s; já aos 4s, quando a potência de referência foi diminuída para 0,7 p.u., o TCSC alcança-a em aproximados 1,5s.

Analogamente a análise com o PLL, é ressaltado também que, após a falta monofásica na fase *c*, aos 6,5s com duração de 0,5s, o TCSC conseguiu buscar referência de 0,7 p.u., onde se pode observar uma resposta quanto ao amortecimento de forma semelhante a anterior.

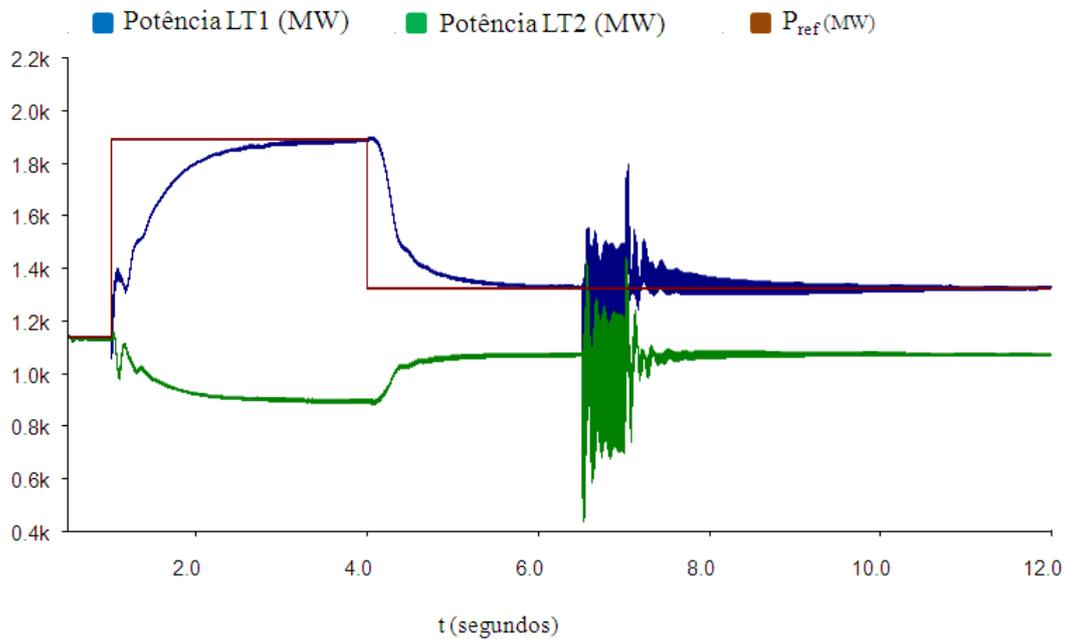


Figura 4.13 - Potência ativa trifásica transmitida pelas linhas.

De mesma forma que na análise com PLL, também foi aplicado um fator de escala de 10% na tensão (ficando 10kV) do capacitor em relação a sua corrente (kA).

Assim, na Figura 4.14 a seguir, observa-se o comportamento da tensão e da corrente no capacitor do TCSC da fase *a*, quando este é submetido a um nível de compensação máxima, ou seja, ângulo de disparo dos tiristores de  $1^\circ$ , basicamente com inserção total do RCT, comportando-se conforme esperado e praticamente idêntico ao funcionamento com PLL.

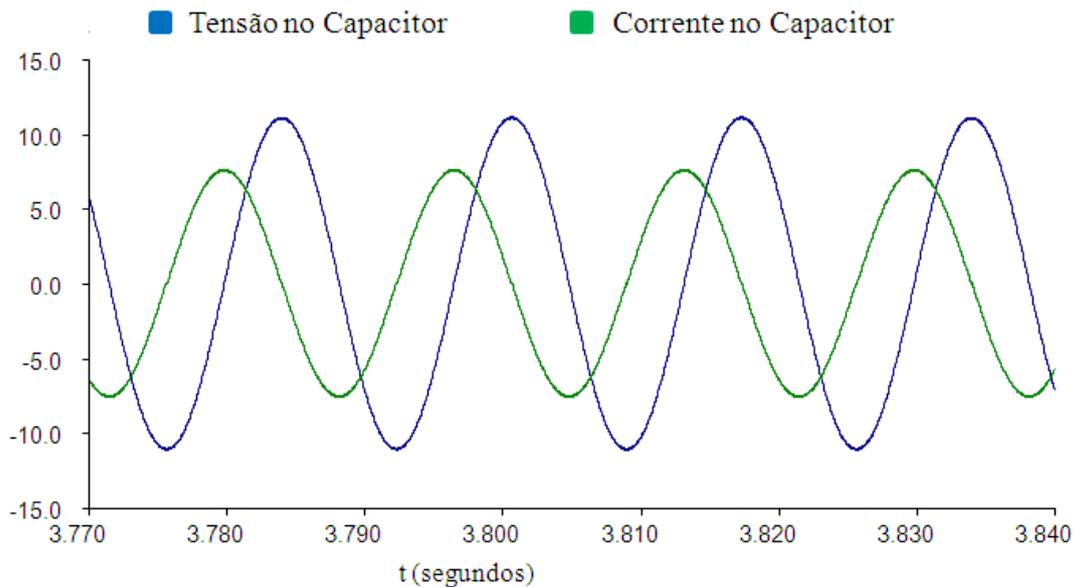


Figura 4.14 - Tensão e Corrente no capacitor do TCSC da fase *a* com  $\alpha = 1^\circ$ .

A Figura 4.15 a seguir, apresenta a variação dos ângulos de disparo dos tiristores em função do nível de compensação desejado. Nela, é observado, como no equivalente anterior, que os ângulos são todos idênticos, uma vez que os capacitores são inseridos

em cada fase de maneira uniforme, salvo no momento do curto (monofásico na fase *c*) em diante, onde atua a correção individual, o PLL<sub>1 $\theta$</sub> .

Onde, mais uma vez, pode-se salientar as oscilações que se evidenciam após o curto, neste caso fazendo com que os ângulos de disparo sejam diferentes por um certo tempo, uma vez que a potência ativa nas três fases é diferente até que se estabilize e o funcionamento volte ao normal, retornando assim, de forma igual, todos ângulos de acordo com o nível de compensação.

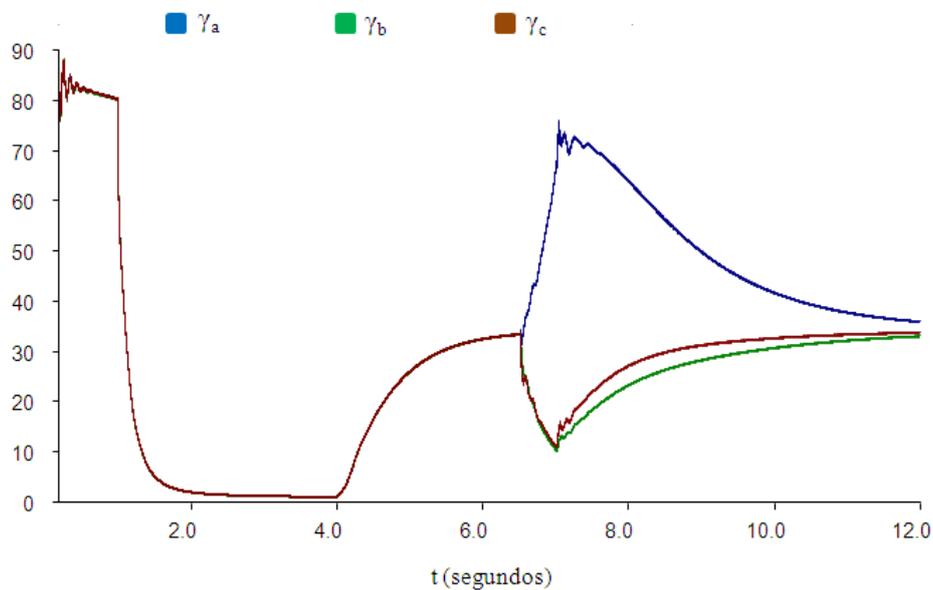


Figura 4.15 - Ângulos de disparos para níveis de compensação de 1p.u. e 0,7p.u.

Em seguida, vê-se na Figura 4.16, novamente com enfoque maior na falta monofásica (Barra A - fase *c*), o perfil da corrente de curto antes, durante e depois da falta. Onde se pode chegar, igualmente a configuração com PLL, a uma corrente com valor próximo de 7,5 kA.

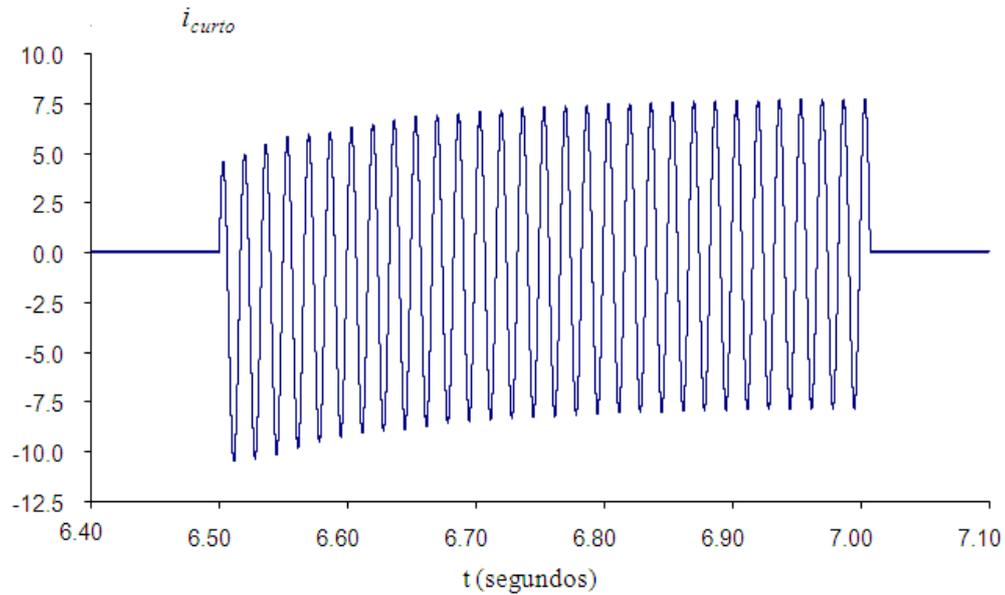


Figura 4.16 - Corrente drenada na fase c durante a falta.

Ainda na Barra A, na Figura 4.17 a seguir, pode ser visto o perfil de tensão na fase *c* antes, durante e depois da falta monofásica. Neste gráfico, como no análogo da configuração anterior, nota-se um pequeno afundamento de tensão de 20%, retornando a 1 p.u. após o restabelecimento do curto.

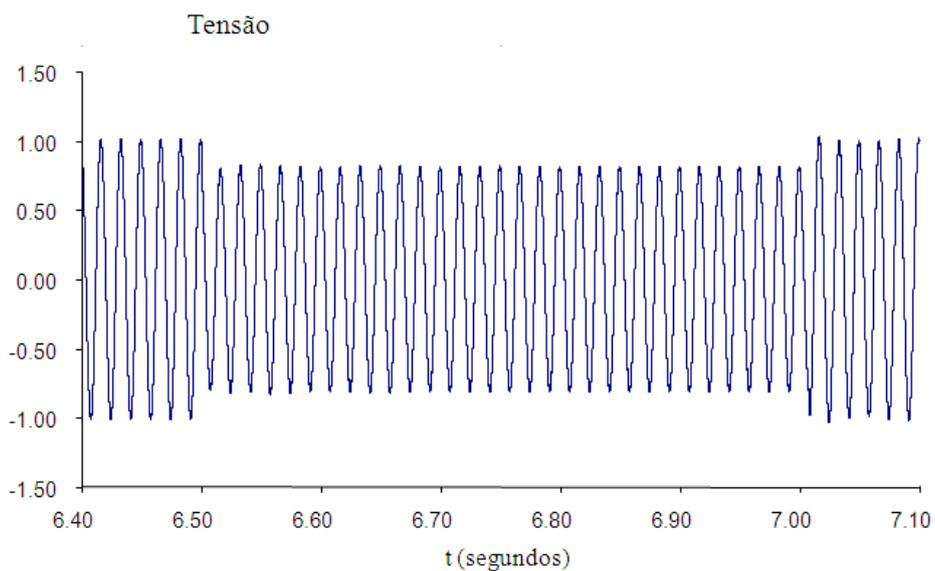


Figura 4.17 - Perfil de tensão na fase c durante o curto no Sistema A.

E por fim, pela Figura 4.18 são mostradas as potências ativas médias instantâneas monofásicas, transmitidas pela LT1. As potências estão em p.u. e têm por base  $P_{base} = 1890\text{MW}$ .

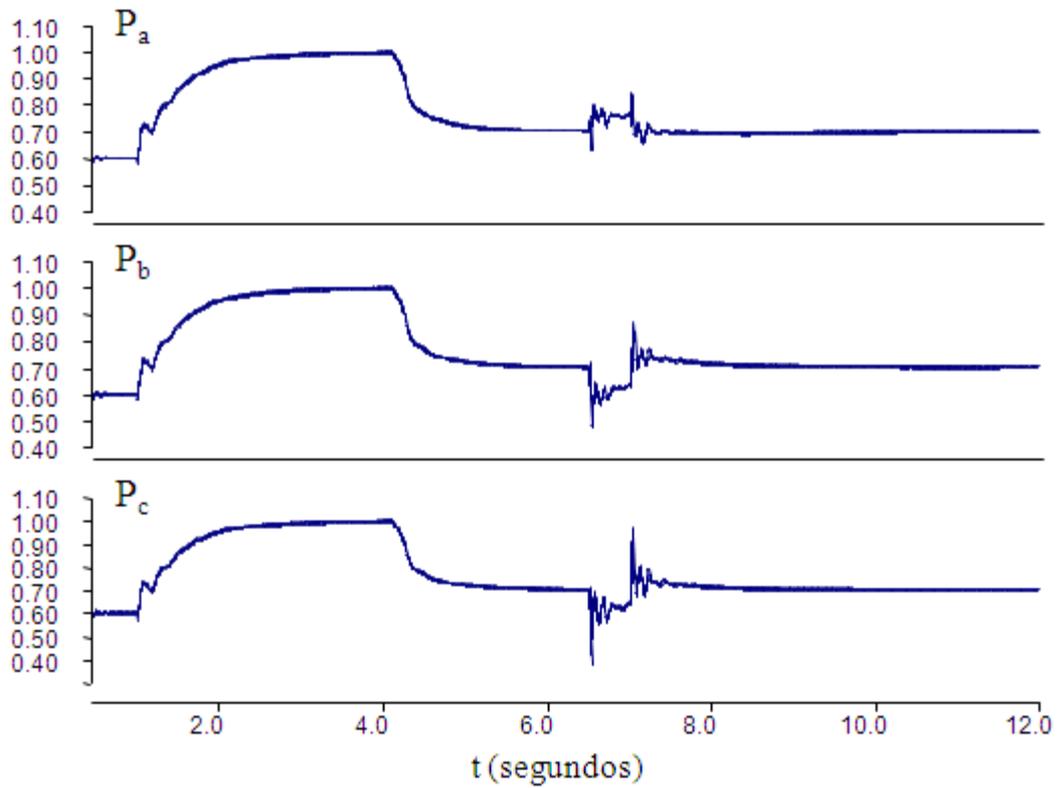


Figura 4.18 - Potências ativas médias instantâneas monofásicas, transmitidas pela LT1.

## **Capítulo 5**

### **Conclusões e Trabalhos Futuros**

Com base nas referências teóricas e nos resultados obtidos nas simulações, conclui-se que este trabalho atingiu seu objetivo, permitindo comparar o desempenho de um sistema de transmissão de energia hipotético, no qual existe uma compensação série, assim como na interligação norte/sul, sendo esta compensação simulada, ora controlada por PLL, ora pelo SOGI-FLL.

A partir dos conceitos de sistemas de potência, dispositivos FACTS e dos diferentes algoritmos de sincronismo discutidos neste trabalho, pode-se perceber que é possível transmitir grandes blocos de energia a longa distância sem subdividir a linha. E nesse sentido, também foi possível testar um novo algoritmo de sincronismo, o SOGI-FLL atuando para sincronizar o disparo das chaves semicondutoras do TCSC, onde se pode dizer que este processo é viável sim, não havendo nenhum comprometimento do sistema por tal utilização.

O equipamento estudado neste trabalho, o TCSC, que realiza compensação série dos parâmetros longitudinais de uma linha de transmissão, a fim de controlar o fluxo de potência na mesma, foi testado tanto com o PLL (configuração tradicional existente atualmente) e com o SOGI-FLL (configuração ainda não utilizada no Brasil).

Os sistemas propostos operaram de forma satisfatória. Foi possível avaliar o desempenho individual de cada configuração, confirmando a viabilidade do funcionamento do TCSC com o SOGI-FLL.

A partir das simulações do capítulo 4, observou-se que nos gráficos do fluxo de energia transmitida pela linha equipada com TCSC, quando submetido ao SOGI-FLL, dispositivo composto basicamente por circuitos ressonantes baseados em integradores generalizados, sintonizados na frequência desejada, que para este caso foi a frequência fundamental da rede, 60Hz, não ocorreu absolutamente nada fora do esperado. Os

tempos de resposta tanto do PLL quanto do SOGI-FLL foram praticamente os mesmos, ambos travando na fase e na frequência desejada e assim possibilitando o que os tiristores fossem disparados corretamente de modo a aumentar a capacidade de transmissão da linha compensada conforme requerido.

Como trabalhos futuros, se fazem necessários ampliar e aprofundar os conhecimentos em FACTS e seus controles, viabilizando um dimensionamento mais robusto e rápido e permitindo ajustes finos de modo a obter uma transmissão melhorada. Além disso, tem-se a interligação norte/sul com quatro TCSC's em funcionamento com PLL's, podendo também ser sincronizado com quatro SOGI's, necessitando um melhor entendimento de seus circuitos ressonantes.

# Referências Bibliográficas

- [1] Eletrobrás, “SIPOT, Sistema de Informação do Potencial Hidroelétrico”, Brasil, 1999.
- [2] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, et al, *Definition and Classification of Power System Stability*, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19, N° 2, pp. 1387-1401, 2004 .
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 2ª Edição, 1994.
- [4] CEPEL, LPNE-Linhas de potência natural elevada, <http://www.o-t-s.com/sil.htm>
- [5] S. J. CHAPMAN, “*Electric Machinery Fundamentals*”, second edition.
- [6] D. N. Gonçalves, *Desempenho do Relé de Distância em Linhas de Transmissão Compensadas com TCSC*, Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, 2007.
- [7] ONS, Histórico da Geração, Geração de Energia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007, [http://ons.org.br/historico/Geracao/historico/geracao\\_energia.aspx](http://ons.org.br/historico/Geracao/historico/geracao_energia.aspx), 21/08/2009.
- [8] Grupo de Trabalho de Expansão da Transmissão no Horizonte Quinquenal - GCPS/CTST/GTQT, *Dimensionamento da Transmissão da Interligação Norte/Sul, Contemplando Inovações Metodológicas Relacionadas a Aspectos Energéticos*, XIV SNPTEE, Belém - PA, Brasil, 1997.
- [9] M. G. Santos, P. Gomes, M. Th Schilling, et al *Interligação Norte-Sul: Desafios Problemas, Soluções e Perspectivas para a Operação Elétrica Integrada Nacional*, XV SNPTEE, Foz do Iguaçu - PR, Brasil, 1999.
- [10] C. Gama, *Brazilian North-South Interconnection control-application and operating experience with a TCSC*, IEEE Summer Power Meeting, Vol. 2, pp. 1103-1108, 1999.
- [11] P. Gomes, M.G. dos Santos, A. F. C. Aquino, A. B. Barbosa, V. R. de Oliveira, *Experiência Brasileira com a Utilização de TCSC em circuitos paralelos*, ERIAC 2005, Paraguai, 2005.
- [12] M.A. Furini, P.B. Araujo, *Melhora da Estabilidade Dinâmica de Sistemas Elétricos de Potência Multimáquinas Usando Dispositivos FACTS “Thyristor -*

*Controlled Series Capacitor – TCSC*”, Revista Controle & Automação/Vol.19 Nº.2/Abril, Maio e Junho 2008, pp. 214 – 225.

[13] E. H. Watanabe, P. G. Barbosa, K. C. Almeida, et al, *Tecnologia FACTS - Tutorial*, Revista SBA Controle e Automação, vol. 9, Nº 1, pp. 39-55. Jan – Abril de 1998.

[14] N. G. Hingorani and L. Gyugyi, *Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press - John Wiley and Sons, 2000.

[15] N. G. Hingorani , *Power electronics in electric utilities: Role of power electronic in future power systems*, Proceedings of IEEE, Special Issue on Power Electronics, April 1988.

[16] Hingorani, N.G, Gyugyi, L., *Understanding FACTS*, New York, IEEE Press, 2000;

[17] D. R. da Costa Júnior, L. G. B. Rolim, M. Aredes *Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing Circuit - PLL Circuit*, IEEE International Symposium on Industrial Electronics - ISIE, pp. 616-622, 2003.

[18] V. Kaura, V. Blasko, *Operation of a Phase Locked Loop Systems Under Distorted Utility Conditions*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, Nº 1, january/february, pp. 58-63, 1997.

[19] S.L.S. Lima, *Avaliação da Operação Conjunta dos TCSC's da Interligação Norte/Sul do Sistema Elétrico Brasileiro*, Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, 2007.

[20] I.C.R Almeida Filho, *Estudo Comparativo de Dispositivos FACTS: O GCSC e o TCSC*, Projeto de Final de curso, (DEL/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, 2004.

[21] P. Rodríguez, A. Luna, I. Candela, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, “Grid Synchronization of Power Converters Using Multiple Second Order Generalized Integrators,” in Proc. IEEE Int. Conf. on Ind. Electron. (IECON’08), Florida, 10-13 Nov. 2008, pp.755-760.

[22] P. Rodríguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, “Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorced Operating Conditions,” in Proc. IEEE Int. Conf. on Ind. Electron. (IECON’06), Nov. 2006, pp.5173-5178.

[23] A.J.O. Riquelme, *Contribuições ao Controle do Statcom*, Dissertação de Mestrado (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, 2007.

## A. Transformada de Clarke

Esta é uma transformada algébrica que muda a referência de grandezas elétricas, do eixo trifásico  $abc$ , para um bifásico  $\alpha\beta$  e vice versa. A seguir são apresentadas as principais matrizes de transformação utilizadas e uma modificação dela para sistemas de 3 fios.

### A.1 $abc \leftrightarrow \alpha\beta 0$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \underbrace{\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}}_{[C]} \begin{bmatrix} \dot{X}_\alpha \\ \dot{X}_\beta \\ \dot{X}_0 \end{bmatrix}, \quad (\text{A.1})$$

Com  $[C]^{-1} = [C]^T$

### A.2 $ab, bc \rightarrow \alpha\beta$

Pelo fato de ser um sistema a 3 fios, vamos considerar que o sistema não tem componente de seqüência zero, ou seja:

$$\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c = 0 \quad (\text{A.2})$$

e

$$\dot{V}_{ab} + \dot{V}_{bc} + \dot{V}_{ca} = 0 \quad (\text{A.3})$$

Com objetivo de escrever as tensões fase-fase em função das tensões fase-neutro, vai-se arbitrar duas tensões fase-fase:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ab} &= -\dot{V}_{bc} - \dot{V}_{ca} \\ &= -\dot{V}_b + \dot{V}_c - \dot{V}_c + \dot{V}_a \\ &= -\dot{V}_b + \dot{V}_a \\ &= -2\dot{V}_b + \dot{V}_c \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{aligned}
\dot{V}_{bc} &= -\dot{V}_{ab} - \dot{V}_{ca} \\
&= -\dot{V}_a + \dot{V}_b - \dot{V}_c + \dot{V}_a \\
&= \dot{V}_b + \dot{V}_c \\
&= -\dot{V}_a - 2\dot{V}_c
\end{aligned} \tag{A.5}$$

Escrevendo um sistema de equações com (A.2) e as equações apresentadas em (A.4) e (A.5), com  $\dot{V}_{abc}$  variáveis desconhecidas e  $\dot{V}_{ab,bc}$  conhecidas, obtém-se o seguinte:

$$\begin{bmatrix} 0 & -2 & -1 \\ -1 & 0 & -2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \\ 0 \end{bmatrix} \implies \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ -1 & 1 \\ -1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \end{bmatrix} \tag{A.6}$$

Utilizando a transformação de  $abc \rightarrow \alpha\beta$  e a relação (A.6) é possível obter as tensões em componentes simétricas a partir de 2 tensões fase-fase, como é ilustrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_\alpha \\ \dot{X}_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ab} \\ \dot{V}_{bc} \end{bmatrix} \tag{A.7}$$

## B. Transformada de Park

### B.1 $\alpha\beta 0 \leftrightarrow dq0$

A transformação dos eixos de referência síncronos  $dq0$  para os eixos estacionários  $\alpha\beta 0$ , consiste em converter as componentes em eixos estacionários que giram à frequência angular  $\omega t$ , em grandezas invariantes no tempo mediante a multiplicação do vetor  $\alpha\beta 0$  pela velocidade de giro.

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega t & -\sin \omega t \\ 0 & \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix}}_{[A]} \begin{bmatrix} x_0 \\ x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

Com  $[A]^{-1} = [A]^T$ .

A transformada de Park ([P]),  $0dq$  para  $abc$ , é o produto da transformada de Clarke ([C]), uma transformação dos modos  $0\alpha\beta$  para as fases  $abc$ , por uma transformação de ângulo ([A]),  $0dq$  para  $0\alpha\beta$ .

$$[P] = [C] [A] \quad (\text{B.2})$$

$$[P]^{-1} = [P]^T.$$

Assim, a transformada de Park é dada por:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [C] [A] \begin{bmatrix} x_0 \\ x_d \\ x_q \end{bmatrix} \iff \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} x_0 \\ x_d \\ x_q \end{bmatrix} \quad (\text{B.3})$$

Logo,

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_{0dq} \end{bmatrix} \quad (\text{B.4})$$

Dessa forma é apresentado na Figura A.1 a seguir um diagrama explicativo que relacionam os eixos mencionados anteriormente:

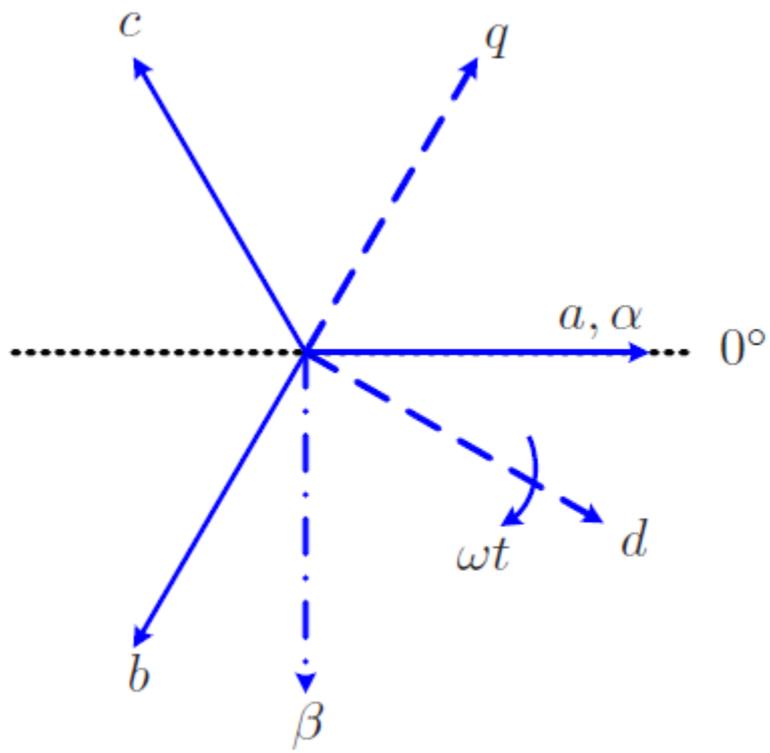


Figura A.1: Diagrama dos eixos coordenados.