



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Luís Gustavo Camelo Trovão

**ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA  
SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE UM  
COMPENSADOR ESTÁTICO (STATCOM)  
VIA RTDS**

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2016

Luís Gustavo Camelo Trovão

**ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA SIMULAÇÃO  
EM TEMPO REAL DE UM COMPENSADOR  
ESTÁTICO (STATCOM) VIA RTDS**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos de Potência

Orientador: Prof. Karcius Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.

Campina Grande, Paraíba

Outubro de 2016

Luís Gustavo Camelo Trovão

# **ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA SIMULAÇÃO EM TEMPO REAL DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO (STATCOM) VIA RTDS**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Coordenação do Curso de Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal  
de Campina Grande como parte dos requisi-  
tos necessários para a obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Elétrica.*

Aprovado em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

---

**Professor Avaliador**

Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

---

**Prof. Karcius Marcelus Colaço  
Dantas, D.Sc.**

Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador

Campina Grande, Paraíba  
Outubro de 2016

*Dedico este trabalho à minha Família*

# Agradecimentos

Aos meus pais, Alberes e Ana Lúcia, que sempre me incentivaram a seguir meus sonhos, apoiando minhas escolhas e permitindo que eu pudesse realizar meus objetivos. Vocês são a principal parte do meu sucesso.

A todos da minha família que sempre estiveram ao meu lado. Especialmente aos meus irmãos, Carolina e César, que tiveram que aguentar muitas vezes meus estresses em momentos de dificuldade, sempre me ajudando em tudo.

À Nadinne, minha namorada, que esteve sempre ao meu lado, suportando minhas lamentações, muitas vezes tendo que abdicar de momentos nas minhas ausências e sendo meu porto seguro nas horas mais importantes.

Aos grandes amigos que passaram por minha vida, vocês fizeram meu percurso muito mais fácil.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, pelo conhecimento transmitido, permitindo minha evolução como aluno e ser humano.

Ao Professor Karcus Marcellus Dantas, pela orientação desde trabalhos de iniciação científica, por toda paciência e todos os ensinamentos que me passou durante toda a graduação.

*O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos.*  
*(Eleanor Roosevelt)*

# Resumo

Este Trabalho de Conclusão de Curso contempla o estudo e desenvolvimento de simulações em tempo real de um STATCOM. O objetivo principal é estudar a modelagem e aplicação de compensadores síncronos estáticos ou STATCOM (*STATic synchronous COMpensator*) em sistemas elétricos de potência, para regulação de tensão, por meio de simulações digitais em tempo real. Para tanto, será utilizado o RTDS (*Real Time Digital Simulator*), cujas funcionalidades e princípios de funcionamento serão abordados, a exemplo de modelos empregados para representar os elementos do sistema, com ênfase nos modelos de tiristores e GTO (*Gate Turn Off*), além de sistemas de controle aplicados ao STATCOM. Ainda, será realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, enfatizando as principais aplicações e métodos de controle encontrados na literatura.

**Palavras-chave:** STATCOM. Regulação de Tensão. Filtros shunt ativos. RTDS.

# Abstract

This work contemplates the study and development of STATCOM real-time digital simulations. The main purpose is the study of modeling and application of synchronous static compensators (STATCOM) for voltage regulation in power systems through Real-Time Digital Simulations. For that, it is utilized the RTDS, whose operation principles are reviewed, as used models to represent the system elements, with emphasis in thyristors and GTO (*Gate Turn Off*), besides controls systems applied to STATCOM. Besides, it is performed a literature review on the matter.

**Keywords:** STATCOM. Voltage Regulation. Active Shunt Filters. RTDS.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Rack do RTDS . . . . .	15
Figura 2 – Módulo gráfico <i>DRAFT</i> do RTDS . . . . .	16
Figura 3 – Módulo <i>RUNTIME</i> do RTDS . . . . .	17
Figura 4 – Modelagem de indutor e capacitor com os métodos de integração . . . . .	18
Figura 5 – Modelagem de chave aberta e fechada . . . . .	19
Figura 6 – Modelo Básico e Curvas Características SVC . . . . .	22
Figura 7 – Característica $VxI$ para o STATCOM . . . . .	23
Figura 8 – Esquema Simplificado de conexão do STATCOM à rede . . . . .	24
Figura 9 – Fonte de tensão ideal $V_c$ atuando na compensação de reativos . . . . .	25
Figura 10 – Conceito de compensação shunt de corrente . . . . .	28
Figura 11 – Bloco de controle de compensação shunt de corrente baseado na teoria p-q . . . . .	28
Figura 12 – Fluxo das potências instantâneas definidas nas coordenadas de Clarke . . . . .	29
Figura 13 – STATCOM no módulo <i>DRAFT</i> do RSCAD . . . . .	34
Figura 14 – Controle de Potência ativa do modelo analisado . . . . .	35
Figura 15 – Controle de Tensão no barramento do modelo analisado . . . . .	36
Figura 16 – PWM e Tensão na barra para adição da carga . . . . .	36
Figura 17 – PWM e Tensão na barra para retirada da carga . . . . .	36
Figura 18 – Modelo de geração de correntes de Referência . . . . .	37
Figura 19 – Potência Reativa Injetada e Tensão no barramento . . . . .	38
Figura 20 – Referência de Corrente e Corrente na Saída do Inversor . . . . .	38

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Equações método trapezoidal para o indutor e para o capacitor . . . .	19
--	----

# Lista de abreviaturas e siglas

AC	<i>Alternating Current</i>
ATP	<i>Alternative Transients Program</i>
EMTP	<i>Electromagnetic Transients Program</i>
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
SVC	<i>Static Var Compensator</i>
TCR	<i>Thyristor-Controlled Reactor</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
TSC	<i>Thyristor-Switched Capacitor</i>
TSSC	<i>Thyristor-Switched Series Capacitor</i>
UPFC	<i>United Power Flow Controller</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>13</b>
<b>1.2</b>	<b>Organização do Texto</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>SIMULAÇÕES DIGITAIS EM TEMPO REAL</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b><i>Real Time Digital Simulator - RTDS</i></b>	<b>15</b>
2.1.1	<i>Software</i>	15
2.1.2	<i>Hardware</i>	17
<b>2.2</b>	<b>Modelagem de chaves no RTDS</b>	<b>17</b>
2.2.1	Algoritmo de soluções dos sistemas do RTDS	17
2.2.2	Método de integração Trapezoidal	18
2.2.3	<i>Small Time-Step</i>	19
<b>3</b>	<b>FACTS</b>	<b>21</b>
<b>3.1</b>	<b>Primeira Geração - SVC</b>	<b>21</b>
<b>3.2</b>	<b>Segunda Geração - STATCOM</b>	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Teoria de Potência Instantânea e Controle do STATCOM</b>	<b>26</b>
3.3.1	Considerações Gerais	26
3.3.2	Significado Físico das Potências Instantâneas	29
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>FACTS</b>	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>STATCOM</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>PROCEDIMENTOS E RESULTADOS</b>	<b>34</b>
<b>5.1</b>	<b>Metodologia Utilizada</b>	<b>34</b>
<b>5.2</b>	<b>Resultados</b>	<b>34</b>
5.2.1	Modelo do STATCOM no RTDS	34
5.2.2	Modelo baseado na teoria de potência instantânea	37
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>39</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>40</b>

# 1 Introdução

Em sistemas de transmissão de corrente alternada, aliados a cargas reativas existe o problema de demanda de potência reativa, uma vez que motores elétricos, por exemplo, requerem esse tipo de potência para alimentar seu campo magnético.

O caráter reativo das linhas de transmissão também contribui para que esta potência seja demandada, com isso, mais corrente é requerida nas linhas de transmissão, causando quedas de tensão no terminal receptor e podendo, desta forma, causar danos ao consumidor e a equipamentos, bem como aumentando as perdas ôhmicas ao longo da linha e podendo comprometer a estabilidade do sistema (GYUGYI, 1988).

A utilização de bancos de capacitores e reatores mecanicamente chaveados, de modo a compensar os reativos da linha, são métodos bastante comuns, contudo, estes realizam ajustes discretos nos reativos requeridos, além de possuírem atuação mais lenta por serem mecanicamente chaveados (HINGORANI, 1988).

Outro método consolidado é a utilização de compensadores síncronos, constituídos de máquinas síncronas, operando em vazio, produzindo ou absorvendo reativos da rede a partir do controle da corrente de excitação. Este é um método que permite um ajuste fino dos reativos requeridos, contudo, o compensador rotativo possui uma série de desvantagens. Ele possui tempo de resposta lento, instabilidade rotacional devido à presença de componentes girantes, baixa impedância de curto circuito e requer manutenções constantes (WATANABE; AREDES, 2002).

Além da potência reativa, uma questão bastante recorrente e atual é a preocupação com a qualidade da energia transmitida. O acréscimo cada vez maior de cargas não-lineares à rede, bem como o aumento da utilização de geração distribuída, vem injetando harmônicos na rede, causando distorção nas formas de onda de correntes e tensão, causando problemas de ressonâncias, sobreaquecimento de motores elétricos, aumento da corrente de neutro, dentre outros problemas (SALGADO, 2005).

Com o advento da eletrônica de potência, métodos mais eficientes de compensação desta potência reativa a partir da utilização de tiristores e semicondutores auto-comutados vêm sendo estudados. A esses equipamentos, foi dado o nome de FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) (HINGORANI, 1988). Este trabalho dará ênfase ao STATCOM (*STATic Synchronous COMpensator*), equipamento da segunda geração dos FACTS (CAVALIERE, 2001). A nomenclatura compensador estático síncrono deriva do fato de que este possui princípio de atuação semelhante ao do compensador síncrono, porém, sem a presença de componentes girantes, elucidando o termo estático.

O STATCOM consiste num equipamento FACTS conectado em paralelo ao sistema elétrico, que se utiliza de inversores de tensão, atuando como uma fonte de tensão controlada em fase e amplitude, fazendo, desta forma, a compensação dos reativos de forma dinâmica, o que pode aumentar a estabilidade e a eficiência das linhas de transmissão, auferindo inúmeros benefícios econômicos.

A modelagem e teste de um STATCOM para realização das análises é possível através da utilização do RTDS. Este é uma mistura de software e hardware, representando um TNA digital (DANTAS, 2009). A partir dele, é possível a simulação de sistemas elétricos em tempo real.

Para possibilitar as simulações em tempo real, o RTDS se utiliza de algoritmos do tipo EMTP (*EletroMagnetic Transients Program*) para que as equações diferenciais dos elementos do sistema possam ser convertidas em equações algébricas, tornando possível os cálculos das soluções do sistema em passos de tempo que configuram a simulação em tempo real, como descrito por Dommel (1996).

Porém, a simulação de chaves em alta frequência na abordagem tradicional, de impedância infinita quando aberta e impedância zero quando em estado fechado, representa um obstáculo na realização dos cálculos em passos de tempo pequenos, uma vez que a matriz admitância do sistema sofre mudanças constantes que requerem esforço computacional para inversão de múltiplas matrizes (RSCAD, 2006). Logo, os princípios de simulação em tempo real são abordados neste trabalho.

## 1.1 Objetivos

Diante do contexto atual de necessidade de soluções que otimizem a utilização dos sistemas de transmissão, bem como que garantam a qualidade da energia elétrica mediante a "poluição" de harmônicos gerados por cargas não lineares e gerações distribuídas, o objetivo geral deste projeto é a abordagem dos conceitos básicos que envolvem a simulação de dispositivos FACTS em tempo real, com ênfase no STATCOM e seu respectivo sistema de controle. Como objetivos específicos, pode-se elencar os seguintes tópicos:

- Estudo das técnicas básicas para simulação digital de sistemas elétricos.
- Estudo da modelagem de chaves, tiristores, GTO, etc, para simulação em tempo real no RTDS.
- Estudo do módulo STS (*Small Time Step*) do RTDS para simulação de dispositivos do tipo FACTS.
- Estudo do princípio de funcionamento do STATCOM.

- Revisão bibliográfica sobre aplicações de dispositivos FACTS, com ênfase para o STATCOM.
- Modelagem de um sistema elétrico simplificado e do STATCOM no RTDS, incluindo o respectivo sistema de controle.
- Simulação e análise do funcionamento do STATCOM em tempo real no RTDS.

## 1.2 Organização do Texto

Este trabalho encontra-se dividido em 6 capítulos. No Capítulo 2 é realizada uma discussão geral acerca de simulações em tempo real, sendo apresentado o RTDS, bem como os princípios de modelagem de chaves para simulação em tempo real. No Capítulo 3 são revisados os equipamentos FACTS, sendo dada ênfase ao STATCOM, suas características e controle. No Capítulo 4 é realizada uma breve revisão bibliográfica acerca de alguns artigos sugeridos relativos aos FACTS e ao STATCOM. Na sequência, no Capítulo 5 são descritas as simulações realizadas e analisados os resultados. Por fim, no Capítulo 6 são feitas as considerações finais do trabalho.

## 2 Simulações Digitais em Tempo Real

### 2.1 *Real Time Digital Simulator - RTDS*

Antes do surgimento de dispositivos eficientes para a implementação de algoritmos para solução digital de transitórios eletromagnéticos em tempo real, se fazia necessário a implementação analógica de modelos de sistemas elétricos em miniatura, denominados Analisadores de Rede ou *Transient Network Analysers* (TNA)(DANTAS, 2009). O que demandava muito mais trabalho e possuía custos mais altos para implementação, dificultando testes com equipamentos elétricos.

Com a evolução tecnológica de dispositivos para o processamento digital, foram desenvolvidos equipamentos para a simulação digital de sistemas elétricos de potência em tempo real, estes, combinações de hardware e software, se comportam como um TNA digital e permitem flexibilidade muito maior às simulações.

O RTDS é um exemplo de um equipamento que combina *hardware* e *software*, permitindo a simulação de sistemas de potência em tempo real. Para isto, é utilizado o *software RSCAD*, as simulações são consideradas em tempo real porque as soluções do sistema são obtidas em um intervalo de tempo muito menor que as constantes de tempo do sistema (DANTAS, 2009). O *rack* do RTDS é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Rack do RTDS



#### 2.1.1 *Software*

O RSCAD consiste num software que possui interface gráfica, permitindo a montagem de sistemas elétricos de potência a partir de elementos gráficos (linhas de transmissão, geradores, motores, etc) que são baseados em algoritmos do tipo EMTP.

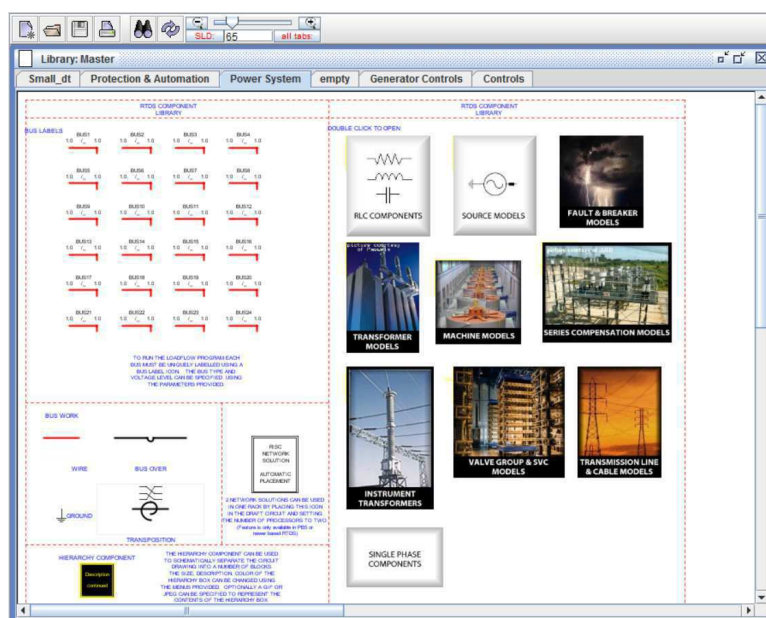


Os módulos do RSCAD utilizados para as simulações de interesse foram o módulo *DRAFT*, o módulo *RUNTIME* e o módulo *CBUILDER*.

O módulo *DRAFT* é um módulo pré-processado utilizado para ligar o circuito do sistema de potência e definir seus parâmetros associados (KUFFEL et al., 1995). Essa associação do circuito do sistema de potência é realizada de maneira gráfica, ao invés de linhas de código serem escritas.

As várias bibliotecas do *DRAFT*, mostradas na Figura 2, contém os componentes a serem utilizados no sistema, estes são arrastados para nosso sistema modelado e, após o término da construção, esse sistema é compilado pelo *software*.

Figura 2 – Módulo gráfico *DRAFT* do RTDS

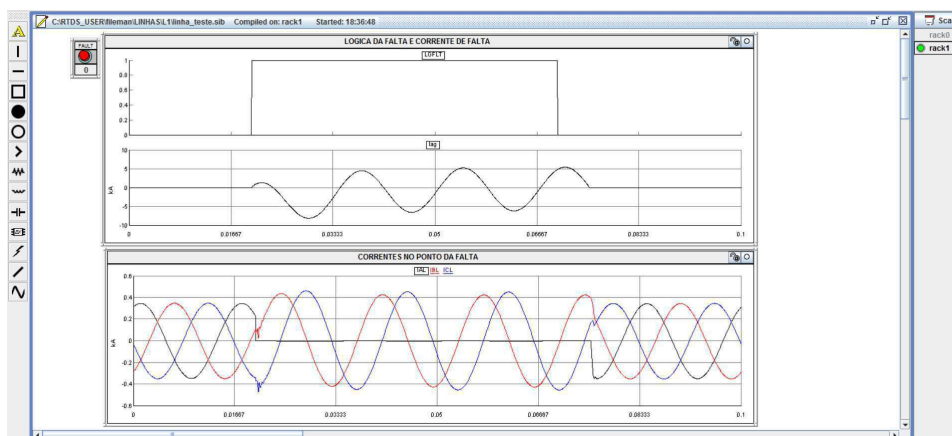


Destaca-se que, para nosso trabalho, será utilizada preponderantemente a biblioteca *Small.dt*, que contém elementos necessários para a simulação de componentes como chaves em tempo real.

O módulo *RUNTIME* nos permite acompanhar as variáveis de interesse de diversas formas como gráfica, numérica, leds digitais, etc. Além disso é possível alterar alguns valores definidos no *DRAFT* como variáveis, através da utilização de *sliders*, *buttons*, chaveadores binários, dentre outros, permitindo, por exemplo, a simulação de uma falta no sistema.

Os valores são acompanhados em tempo real e são mostrados a cada clique no botão para atualizar as variáveis, este acompanhamento em tempo real permite a visualização dos transitórios para qualquer variação na topologia do sistema. A Figura 3 contém uma visualização do módulo *RUNTIME* para uma simulação qualquer.

O módulo *Component Builder (Cbuilder)* permite a criação de componentes elétricos

Figura 3 – Módulo *RUNTIME* do RTDS

e de controle implementados por meio da linguagem de programação C, flexibilizando desta forma as simulações. Estes blocos programados podem ser inseridos nas simulações e interagir com os elementos já fornecidos pelo RTDS.

### 2.1.2 Hardware

O teste de equipamentos externos é possibilitado pelo uso de interfaces para entrada e saída de dados através de uma família de cartões denominada GT-I/O. Estes permitem a comunicação através do envio/recepção de sinais analógicos e digitais.

O *hardware* do RTDS permite a ligação deste com elementos externos, podendo ser usado para testes de equipamentos elétricos como relés de proteção ou controladores externos. Este é baseado na utilização de Processadores de Sinais Digitais, com uma arquitetura de processamento em paralelo, sendo desenvolvido especificamente para solução de transitórios eletromagnéticos baseados em algoritmos implementados em programas do tipo EMTP.

A estrutura do RTDS é baseada em unidades denominadas *racks*. Cada rack possui seus cartões de processamento e de comunicação e pode simular sistemas elétricos com um número limitado de barras e equipamentos. Cada *rack* tem a capacidade de simular em geral 54 nós por *rack*. Para sistemas com mais nós é possível a utilização de mais de um *rack*, estes trabalham em conjunto, subdividindo o sistema em várias partes, cada uma dessas simulada por um *rack* diferente (DANTAS, 2009).

## 2.2 Modelagem de chaves no RTDS

### 2.2.1 Algoritmo de soluções dos sistemas do RTDS

Para o cálculo das soluções do sistema elétrico simulado no *software* do RTDS, este se utiliza de algoritmos encontrados em programas do tipo EMTP (DOMMEL, 1996).

A simulação é considerada em tempo real devido às soluções do sistema elétrico serem obtidas em um intervalo de tempo muito menor que as constantes de tempo do sistema (DANTAS, 2009).

Os sistemas de equações são obtidos através da transformação de elementos do sistema, como indutores, capacitores, transformadores, linhas de transmissão, que são modelados como condutâncias em paralelo com fontes de correntes dependentes de valores de iterações passadas (RSCAD, 2009).

Após essa modelagem do sistema, a matriz condutância  $G$  é determinada por inspeção. A solução para as tensões é dada, portanto, da seguinte forma:

$$[V] = [G]^{-1} \cdot [I] \quad (2.1)$$

Logo, o maior esforço computacional para a solução deste sistema está na inversão da matriz condutância.

Para a maioria das aplicações envolvendo transitórios eletromagnéticos este algoritmo se mostra eficaz para aplicações em tempo real. Porém, para o caso da modelagem de uma chave, que possui alta condutância quando fechada, e alta impedância quando aberta, percebe-se que a mudança no estado da chave altera a matriz condutância.

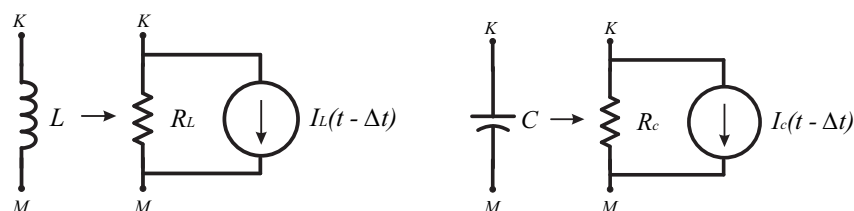
Pelo algoritmo proposto por Dommel (DOMMEL, 1996), sempre que há uma mudança na matriz condutância, esta deve ser decomposta ou invertida antes que novas soluções para o sistema possam ser determinadas (RSCAD, 2006), o que, dependendo do número de nós do sistema, cria barreiras para que a simulação ocorra em tempo real.

### 2.2.2 Método de integração Trapezoidal

Como dito anteriormente, os elementos do sistema, para o algoritmo utilizado pelo RTDS, são transformados em fontes de corrente em paralelo com condutâncias. Sabe-se que as equações que relacionam tensão e corrente em diversos elementos do sistema são diferenciais, e, portanto, necessitam ser convertidas em relações algébricas envolvendo termos de iterações passadas pré-determinados. Para isso, são usados os métodos de integração (DANTAS, 2003).

Os modelos equivalentes para o indutor e o capacitor são mostrados na Figura 4.

Figura 4 – Modelagem de indutor e capacitor com os métodos de integração



As equações para o método de integração Trapezoidal, utilizado neste trabalho são mostradas na Tabela 1, onde  $\Delta t$  representa o passo de cálculo da simulação.

Tabela 1 – Equações método trapezoidal para o indutor e para o capacitor

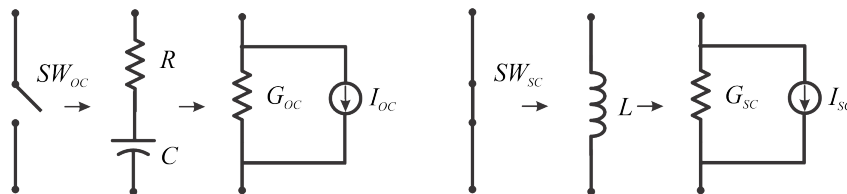
RESISTÊNCIA	CORRENTE
Capacitor	$R_c = \frac{\Delta t}{2 \cdot C}$ $I_c(t - \Delta t) = -\frac{e_{km}(t - \Delta t)}{R_c} - i_{km}(t - \Delta t)$
Indutor	$R_L = \frac{2 \cdot L}{\Delta t}$ $I_l(t - \Delta t) = \frac{e_{km}(t - \Delta t)}{R_l} + i_{km}(t - \Delta t)$

### 2.2.3 Small Time-Step

Para que o problema abordado na seção anterior seja resolvido, o RTDS possui uma biblioteca *Small.dt*, que permite que sejam modelados sistemas com chaves, como retificadores e conversores de potência.

Um algoritmo alternativo para a modelagem das chaves é portanto utilizado. Como mostrado na Figura 5, em estado fechado "ON" a chave é modelada como um indutor, enquanto que em estado aberto "OFF" a chave é modelada como um capacitor em série com uma resistência (MAGUIRE; GIESBRECHT, 2005).

Figura 5 – Modelagem de chave aberta e fechada



Quando o tiristor é aberto,  $G_{sc}$  se torna  $G_{oc}$ , enquanto que  $I_{sc}$  se torna  $I_{oc}$ . Os valores de R, L e C são escolhidos de forma que as condutâncias  $G_{sc}$  e  $G_{oc}$  sejam iguais. Deste modo não é necessário que seja recalculada a inversa da matriz condutância, e, portanto, esta se torna constante apesar das mudanças na topologia da chave, havendo mudanças apenas nos valores das fontes de corrente utilizadas nos cálculos.

A diminuição do esforço computacional decorrente deste procedimento permite que o passo de simulação seja reduzido para a faixa de 1.5 a 2.5  $\mu s$  (RSCAD, 2009).

Além disso, R e C devem ser escolhidos de forma que possuam alta impedância na faixa de operação do sistema, bem como L deve ser escolhido de forma que possua baixa impedância neste faixa. Segundo Maguire e Giesbrecht (2005), as perdas na escolha dos valores dos elementos serão minimizadas se  $CV^2 = \frac{1}{2}Li^2$ . As equações para o dimensionamento dos elementos são dadas abaixo (MAGUIRE; GIESBRECHT, 2005):

$$F = \frac{1}{2 \cdot (\sqrt{\delta^2 + 1} - \delta)} \tag{2.2}$$

$$L = \sqrt{2} \cdot (\Delta t \cdot F) \cdot \frac{V}{i} \quad (2.3)$$

$$C = \frac{(\Delta t \cdot F)^2}{L} \quad (2.4)$$

$$R = \frac{2L}{\Delta t} - \frac{\Delta t}{2C} \quad (2.5)$$

Onde  $V$  e  $i$  são os valores nominais de tensão e corrente chaveadas, respectivamente, e  $\delta$  o fator de amortecimento, cujos valores típicos estão na faixa  $0,85 < \delta < 1,333$ .

## 3 FACTS

Os FACTS incorporam dispositivos semicondutores de potência aos sistemas de transmissão, tornando a resposta do sistema a perturbações mais rápida e precisa, em oposição a dispositivos chaveados mecanicamente, tidos como "lentos" (HINGORANI, 1988).

O controle dos reativos em sistemas de transmissão é determinante para controle da tensão no terminal receptor, bem como o controle de oscilações e de estabilidade do sistema. Tradicionalmente esse controle é feito através de reatores ou bancos de capacitores, espalhados ao longo da linha, que são acionados mecanicamente caso haja necessidade.

De acordo com Pina (2010) os dispositivos FACTS são divididos em duas gerações, de acordo com o tipo de chaves de gatilhamento utilizadas. Os da primeira geração utilizavam chaves tiristoras, como o SVC (*Static Var Compensator*). Já para a segunda geração, como o STATCOM, são aplicados semicondutores auto-comutados, como GTOs (*Gate Turn-Off*) e IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

Ainda, de acordo com Cavaliere (2001), existem a terceira e a quarta geração dos FACTS, consistindo na combinação de elementos da segunda geração e integração de elementos em linhas diferentes, respectivamente.

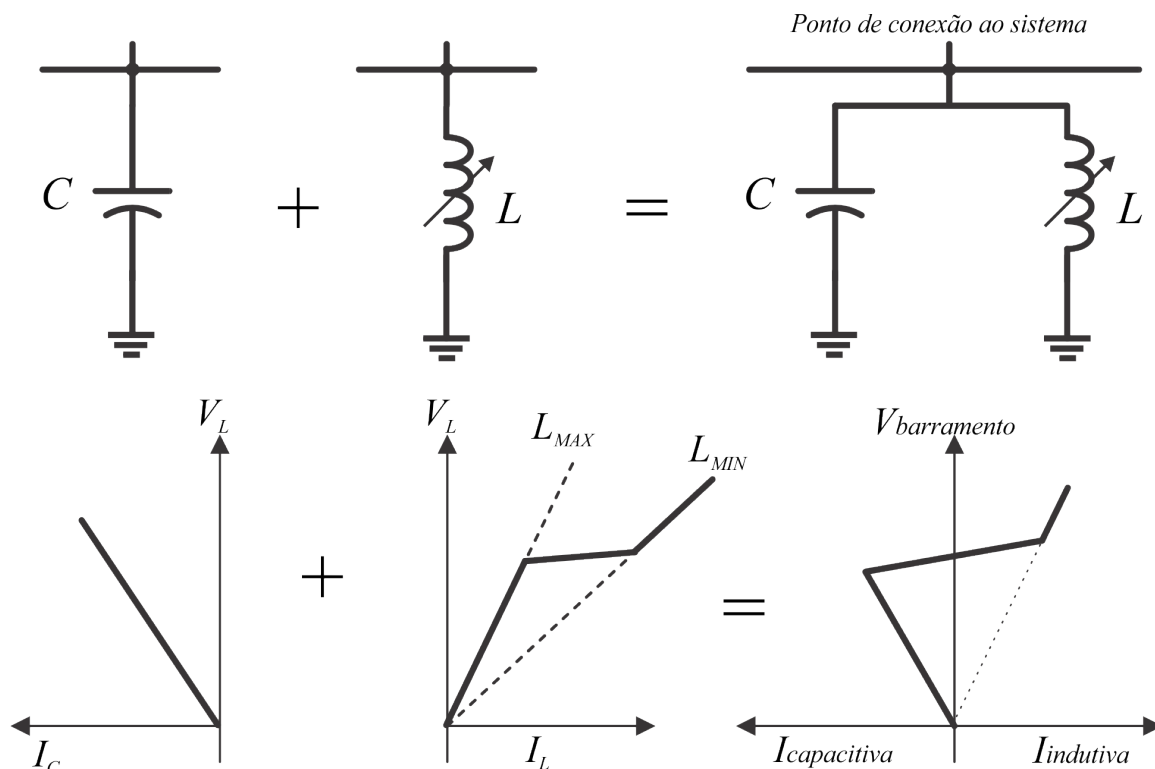
Uma comparação entre os compensadores estáticos SVC e STATCOM é feita por Lijie, Yang e Yiqun (2010). O SVC consiste basicamente de bancos de reatores *shunt* cuja saída é ajustada com o auxílio dos tiristores para trocar corrente capacitiva ou indutiva com a linha, compensando os reativos. Enquanto que o STATCOM funciona como uma fonte de tensão controlada por conversores, convertendo a tensão do barramento DC em AC de modo à compensar os requerimentos de potência ativa e reativa da linha.

### 3.1 Primeira Geração - SVC

Inicialmente, um dos dispositivos FACTS utilizado para controle de tensão no barramento de forma dinâmica foi o SVC, o termo *Static* (Estático) advém do fato que este não possui peças girantes, tais quais os compensadores síncronos, que também são usados para regulação da tensão no barramento.

O modelo básico, com os elementos de composição deste, para abstração do funcionamento de um SVC é mostrado na Figura 6. Este consiste num reator controlável em derivação em paralelo com um capacitor (KUNDUR, 1994). A característica tensão vs corrente ( $V \times I$ ) dos dois elementos é combinada, gerando a curva também mostrada na Figura 6.

Figura 6 – Modelo Básico e Curvas Características SVC



Analisando a curva inferior direita, consideramos que o ponto de operação normal do sistema é o ponto em que a esta cruza o eixo das ordenadas. Para o caso de a tensão da barra exceder o valor de referência, os tiristores são chaveados, deixando o SVC com caráter mais indutivo, como é possível ver no valor da corrente indutiva absorvida da rede no gráfico. Caso haja uma queda de tensão, uma corrente capacitiva é lançada na rede, injetando reativos e aumentando a tensão na barra. Desta forma, portanto, é realizada a compensação dinâmica de potência na barra.

Nota-se por fim que a limitação do SVC advém do fato que a capacidade de injeção de corrente capacitiva é proporcional à tensão do barramento, logo, para quedas de tensão bruscas, não será possível realizar a regulação de tensão, uma vez que o SVC não terá reativos o suficiente para compensar a requisição da rede. Normalmente, capacitores chaveados são acoplados ao equipamento para tentar aumentar o seu desempenho.

### 3.2 Segunda Geração - STATCOM

O STATCOM é um filtro ativo *shunt*, sendo utilizado em paralelo com o barramento em que é requerida a regulação de tensão, este se comporta como uma fonte de tensão regulada em amplitude e fase, controlando assim o fluxo de potência. Este fluxo é, desta forma, controlado sem a necessidade de elementos passivos com a finalidade de fornecer ou absorver reativos, tal qual o SVC. No STATCOM, o capacitor tem função única de

manter a tensão no lado DC do inversor.

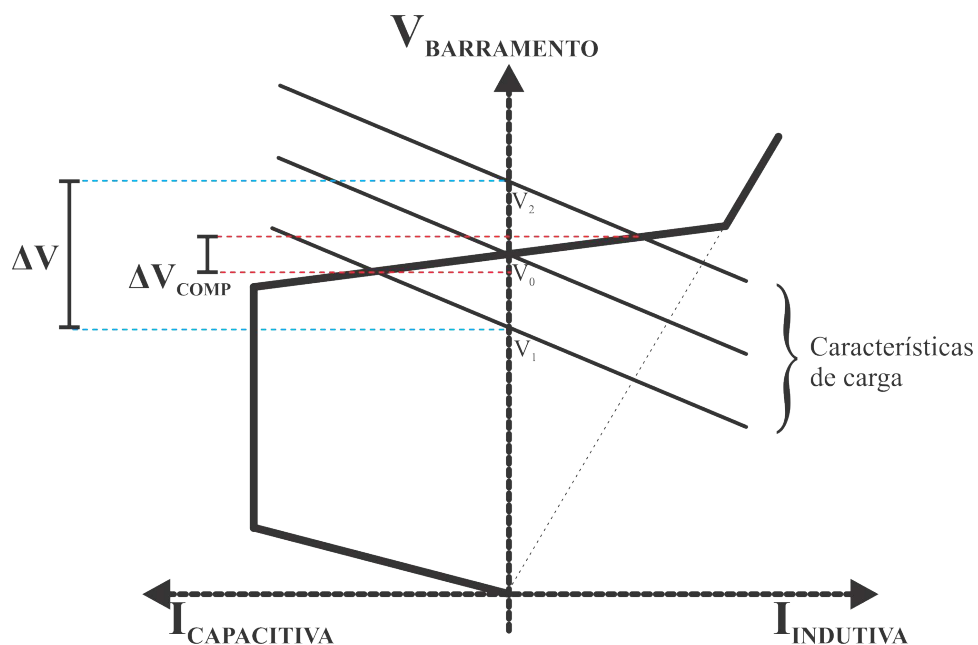
Este equipamento é composto por inversores de tensão do tipo VSI (*Voltage Source Inverter*, que determinam a forma de onda da saída do STATCOM, diversas topologias podem ser usadas de acordo com a funcionalidade e complexidade que deve ser atribuída ao modelo.

Além disso, é necessária a utilização de um capacitor no barramento DC do inversor, servindo como uma fonte DC e acumulando energia para eventuais trocas com o sistema. Destaca-se que a tensão nos terminais deste deve ter uma amplitude mínima que garanta que o STATCOM atue de forma eficiente, não limitando sua atuação.

Também, são partes integrantes deste um transformador de acoplamento ao ponto de conexão no sistema e o sistema de controle. O sistema de controle é o responsável por, através de diversas técnicas, garantir o chaveamento dos semi-condutores auto-comutados utilizados.

A curva característica  $V \times I$  para o STATCOM pode ser vista na Figura 7, é possível perceber que, diferentemente do SVC, o STATCOM consegue manter a corrente capacitiva mesmo para grandes variações de tensão, sendo desta forma, muito mais eficaz em afundamentos de tensão que este outro equipamento do tipo FACTS. Como pode ser visto, um afundamento de tensão levaria o STATCOM a uma injeção de corrente, capacitiva ou indutiva que desta forma regularia a tensão no barramento.

Figura 7 – Característica  $V \times I$  para o STATCOM



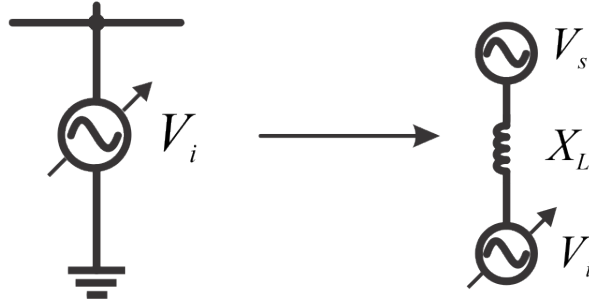
Para um compensador paralelo ideal conectado ao sistema como mostrado na Figura 8, considerando que o compensador possui um ângulo  $\alpha$  em relação ao sistema podemos determinar as equações para o fluxo de potência em função da amplitude e



defasagem do compensador da seguinte forma:

Figura 8 – Esquema Simplificado de conexão do STATCOM à rede

Ponto de conexão ao sistema → Equivalente Simplificado



$$V_i \angle \alpha = V_i \cdot \cos \alpha + j \cdot V_i \cdot \sin \alpha$$

$$S_s = V_s \cdot i^*$$

$$i = \frac{V_s - V_i \angle \alpha}{j \cdot X_L} = j \cdot \frac{(V_i \cos \alpha - V_s)}{X_L} - \frac{V_i \cdot \sin \alpha}{X_L}$$

$$S_s = \frac{-V_i \cdot V_s}{X_L} \cdot \sin \alpha + j \cdot \left( \frac{V_s^2}{X_L} - \frac{V_i \cdot V_s}{X_L} \cdot \cos \alpha \right)$$

Nota-se que a parte real representa a potência ativa, enquanto que a parte imaginária representa a potência reativa. Desta forma podemos fazer nossa análise.

- Se a tensão do compensador  $V_i$  estiver adiantada da tensão do sistema  $V_s$ ,  $0 < \alpha < 90^\circ$ , a potência ativa será negativa e portanto o fluxo de potência ativa é do compensador pro sistema.
- Se a tensão do compensador  $V_i$  estiver atrasada da tensão do sistema  $V_s$ ,  $0 > \alpha > -90^\circ$ , a potência ativa será positiva e portanto o fluxo de potência ativa é do sistema pro compensador.
- Se não houver defasamento,  $\alpha = 0$  e não há fluxo de potência ativa.
- Se não houver defasamento e  $|V_s| > |V_i|$ ,  $Q > 0$  e, portanto, há fluxo de potência reativa indutiva.
- Se não houver defasamento e  $|V_s| < |V_i|$ ,  $Q < 0$  e, portanto, há fluxo de potência reativa capacitiva.

Portanto, através do controle da fase e amplitude do compensador, podemos controlar o fluxo de potência ativa e reativa no sistema.

Para atuação como compensador de reativos, é de interesse o controle da amplitude da saída do STATCOM, além do sincronismo que garante que não haja fluxo de potência ativa entre o equipamento e o sistema. Para este controle de sincronismo, é utilizado um PLL (*Phase Locked Loop*).

Para o controle da amplitude, sabe-se, da análise acima, que o fluxo de potência ativa pode ser controlada através do controle da defasagem, esse fluxo pode carregar o capacitor do lado de tensão CC quando é do sistema para o STATCOM e pode atuar descarregando o capacitor no caso contrário. Logo, com a introdução de pequenas defasagens pelo sistema de controle, é possível controlar a amplitude da tensão CA do STATCOM, controlando desta forma os reativos (CAVALIERE, 2001).

O princípio de funcionamento de compensadores ideais em derivação, implementados por FACTS, é mostrado por Watanabe (1998). No que se refere à capacidade de transmissão da linha, para um modelo simples de um gerador conectado à um barramento infinito, a potência ativa transmitida pode ser dada por:

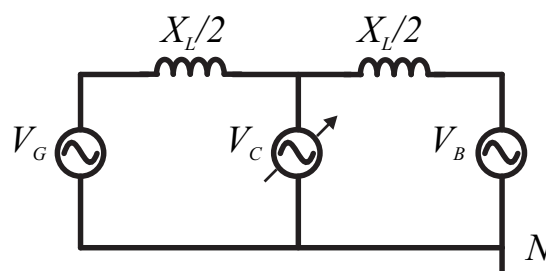
$$P = \frac{V^2}{X} \cdot \sin \Theta \quad (3.1)$$

Sendo  $\Theta$  o defasamento entre a tensão da geração e do barramento. Para o caso de uma fonte ideal de tensão atuando como compensador em derivação no meio da linha, entre os geradores e o barramento como mostrado na Figura 9, a potência ativa transmitida será dada por:

$$P = \frac{V^2}{\frac{X}{2}} \cdot \sin \frac{\Theta}{2} \quad (3.2)$$

E, portanto, a capacidade de transmissão é aumentada, a partir da compensação de reativos, resultando num maior aproveitamento das linhas de transmissão já instaladas.

Figura 9 – Fonte de tensão ideal  $V_c$  atuando na compensação de reativos



### 3.3 Teoria de Potência Instantânea e Controle do STATCOM

Para que o STATCOM atue de forma eficiente, a etapa de controle é primordial, uma vez que este deve responder à perturbações do sistema de forma dinâmica, evitando assim problemas com estabilidade, portanto, a escolha da estratégia de controle é um dos fatores mais importantes no projeto deste compensador.

#### 3.3.1 Considerações Gerais

Mediante condições de sistemas desbalanceados e na presença de harmônicos, a teoria de potência ativa e reativa convencional possui algumas limitações para sua validação, apesar de funcionar na maioria das aplicações de engenharia. Uma análise detalhada mostra que esta teoria tem validade apenas confirmada para sistemas monofásicos operando em sistemas operando em regime permanente e sem distorção, para sistemas trifásicos, o sistema além disso deve ser balanceado (WATANABE; AREDES, 2002).

Para contornar este problema, a teoria de potência instantânea foi proposta por Akagi, Kanazawa e Nabae (1983). Esta descreve uma teoria mais geral acerca de potências, permitindo o controle correto dos filtros ativos, princípio do funcionamento do compensador estático.

A teoria de potência instantânea, também denominada teoria p-q, realiza uma transformação da coordenadas de tensão e corrente do plano de fases abc para as coordenadas  $\alpha\beta 0$ , definindo as potências instantâneas nesse referencial.

Para a transformação de coordenadas, é utilizada a Transformada de Clarke. Esta é uma transformada algébrica que converte um sistema trifásico em sistema estacionário de referência onde se trabalha com apenas duas variáveis. As componentes  $\alpha$  e  $\beta$  são obtidas a partir da projeção dos vetores trifásicos em eixos perpendiculares, sendo  $\alpha$  o eixo horizontal e  $\beta$  o eixo vertical. A transformada para o plano  $\alpha - \beta$  é dada por:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Enquanto que a respectiva transformada inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Uma vantagem da aplicação da transformação de Clarke é a separação das componentes de sequência zero das componentes de fase abc. Os eixos  $\alpha$  e  $\beta$  não contribuem para componentes de sequência zero (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). Para um sistema trifásica a três fios, essa componentes podem ser eliminadas devido à ausência de corrente de neutro. Assim, a transformada se torna:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Para as tensões, as mesmas relações são válidas. Diante dos valores transformados  $V_\alpha, V_\beta, I_\alpha e I_\beta$ , determinamos as potência aparentes no domínio das transformadas como:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

O desenvolvimento dos cálculos pode ser visto em Akagi, Watanabe e Aredes (2007), porém, a expressão foi adotada com a referência de sinal proposta por Watanabe e Aredes (2002). A partir de 3.6, determinamos as correntes que servirão como referência para o STATCOM como mostrado em 3.7.

Para isso, são selecionadas as potências instantâneas de acordo com a função do filtro shunt. Para o STATCOM atuando como regulador de tensão, estamos interessados apenas na regulação da potência reativa, e da potência ativa para compensação das perdas no equipamento, de modo a manter a tensão no capacitor DC constante (BARBOSA; LIMA; WATANABE, ).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha^*} \\ i_{\beta^*} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Os esquemas mostrados nas Figuras 10 e 11 contidas em Somsai e Kulworawanichpong (2010), ajudam na compreensão da utilização desta teoria de potência em filtros *shunt* ativos, tal qual o STATCOM. Segundo Somsai e Kulworawanichpong (2010), as potências calculadas em 3.6, possuem componentes médias e oscilantes, resultado da composição de harmônicos, como é visto em 3.8 e 3.9. Os valores médios coincidem com os valores encontrados na teoria convencional de potência ativa e reativa em sistemas AC, enquanto os termos oscilantes não contribuem para transferências de energia entre a fonte e a carga, sendo uma aplicação importante desta teoria a compensação seletiva destes valores.

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \tag{3.8}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \tag{3.9}$$

Figura 10 – Conceito de compensação shunt de corrente

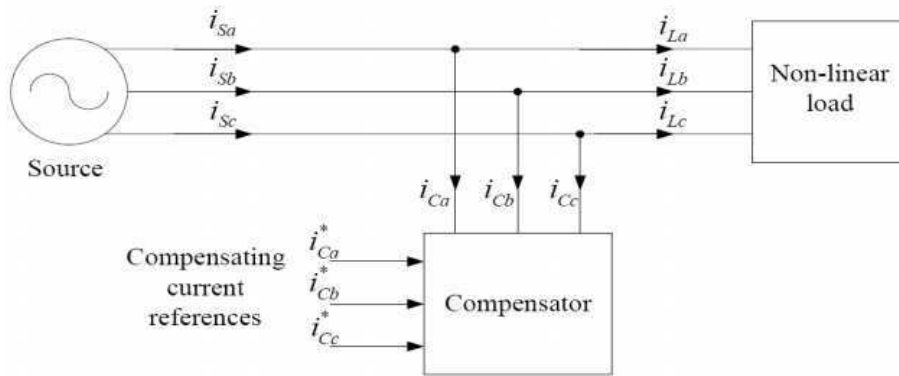
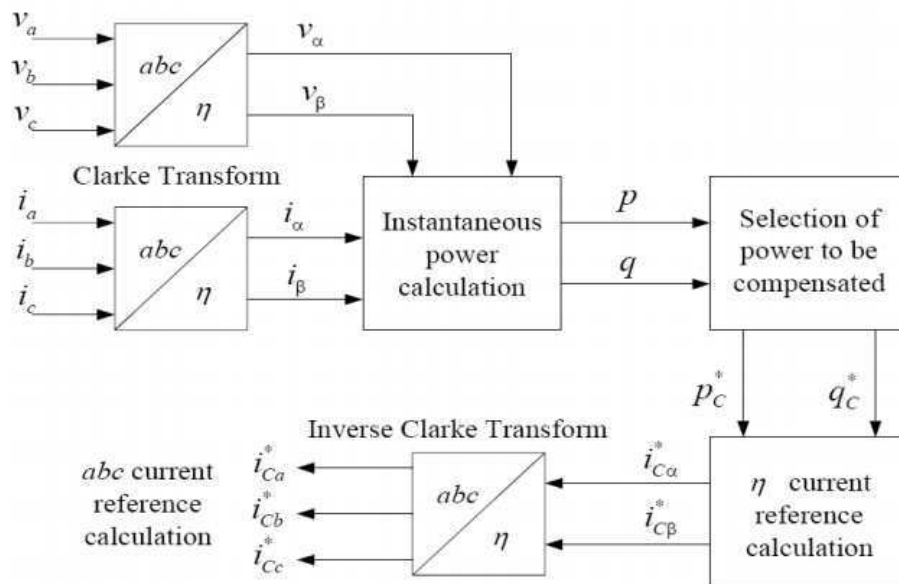


Figura 11 – Bloco de controle de compensação shunt de corrente baseado na teoria p-q



### 3.3.2 Significado Físico das Potências Instantâneas

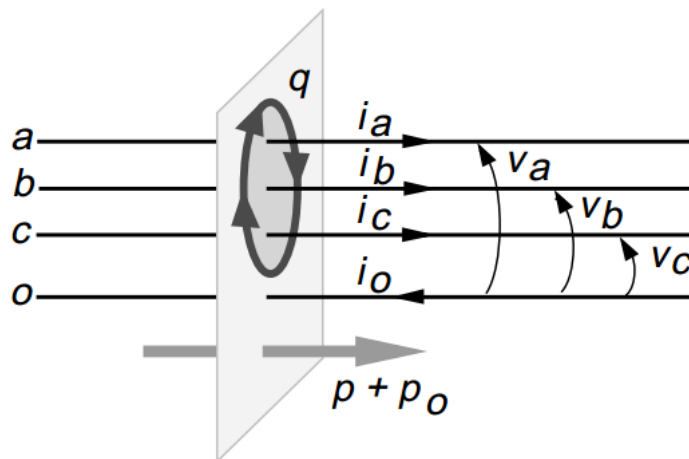
O significado físico das variáveis acima determinadas num sistema físico pode ser visto em (WATANABE; AREDES, 2002; AKAGI; KANAZAWA; NABAE, 1984; SALGADO, 2005).

Watanabe e Aredes (2002), através da Figura 12, resumem os principais pontos dos conceitos citados. Enfatizando as seguintes considerações:

- As componentes de seqüência zero de tensão ou corrente não contribuem para as potências instantâneas  $p$  e  $q$ .
- A potência ativa instantânea, que corresponde ao fluxo instantâneo de energia por unidade de tempo é sempre igual à soma da potência real  $p$  e a potência de seqüência zero ( $p_{3\phi} = p + p_0$ ).
- A potência imaginária  $q$  representa a energia que pode ser constante ou não e é trocada entre as fases do sistema. Isto significa que  $q$  não contribui para a transferência de energia entre a fonte e a carga em nenhum instante. Além disto, esta potência só existe em sistemas com mais de uma fase.

Os autores também citam que esta teoria é mais geral, sendo a teoria de potência convencional uma caso particular da teoria descrita aqui.

Figura 12 – Fluxo das potências instantâneas definidas nas coordenadas de Clarke



## 4 Revisão Bibliográfica

Foi realizada uma breve revisão bibliográfica de algumas referências propostas na literatura. O levantamento bibliográfico inicia-se com o estudo da origem dos sistemas flexíveis de transmissão alternada, a partir de publicações mais citadas referentes ao tema. Após isso, foi dada ênfase a publicações que envolvem o STATCOM.

### 4.1 FACTS

O termo FACTS, referente a Sistemas Flexíveis de Transmissão AC (*Flexible AC Transmission Systems*) foi inicialmente proposto em [Hingorani \(1988\)](#), na década de 80, publicação que faz previsões quanto ao papel da eletrônica de potência no cenário futuro dos sistemas de potência. Segundo [Hingorani](#), como os dispositivos mecanicamente controlados em sistemas de potência, tais quais *taps* de transformadores, reatores e bancos de capacitores, carecem de um controle rápido, além de que o desgaste deste dispositivos mecânicos é bem maior se comparado ao dos dispositivos semicondutores de potência. A utilização de dispositivos semicondutores de potência, da ordem de Megawatts, se apresenta como tendência de aperfeiçoamento dos sistemas elétricos. Dentre as consequências da falta de controle preciso são citadas problemas com estabilidade, fluxo de potência através de partes indesejadas do sistema, maiores perdas e alta ou baixa da tensão desejada. Portanto, a possibilidade de controle rápido de ângulo de fase, tensão e, portanto, fluxo de potência, trará um aumento significativo na performance dos sistemas de potência.

No mesmo ano, [Gyugyi \(1988\)](#) discute acerca da utilização de dispositivos SVC (*Static Var Compensator*) em aplicações em sistemas de potência. Inicialmente são mostrados os conceitos de estabilidade de sistemas de potência, bem como de que forma a utilização destes dispositivos pode vir a aumentar a estabilidade à transitórios, relacionada à resposta das máquinas geradoras à perturbações sem que haja perda de sincronismo. Além disso, são abordados os conceitos de amortecimento de oscilações e regulação da tensão no ponto de entrega da energia. Após isso, [Gyugyi](#) aborda o funcionamento dos elementos básicos para a composição de SVCs. São destacados o TCR (*Thyristor-Controlled Reactor*) e o TSC (*Thyristor-Switched Capacitor*), que, combinados ou em conjunto com elementos passivos, consistem basicamente de capacitores e reatores chaveados através de tiristores, provendo a potência reativa requerida pelo sistema através do controle do ângulo de disparo das chaves. Por fim, o autor ainda introduz a utilização de GTOs (*Gate Turn-Off Thyristors*), em compensadores denominados por ele de geradores de reativos do tipo fonte de tensão, que são propostos neste trabalho, com o nome de STATCOM.

[Cavaliere \(2001\)](#) realiza uma breve análise do histórico de equipamentos FACTS.

Flexibilidade é definida pelo autor como a capacidade de rápida e contínua alteração dos parâmetros que controlam a dinâmica de funcionamento de um sistema elétrico. Os equipamentos FACTS podem ser divididos em dois grupos, os compensadores ligadores em paralelo e os ligados em série à rede. Estes são classificados quanto à sua geração, sendo divididos em quatro gerações. A primeira geração é composta por FACTS que utilizam tiristores, a exemplo do TCR, TSC e SVC. A segunda geração é definida pelo uso de chaves autocomutadas, a exemplo dos GTOs e IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), que permitem a interrupção da corrente, o STATCOM, bem como o compensador série (SSSC), constituem esta geração. A terceira geração é classificada como a integração de equipamentos série e paralelo, a exemplo do UPFC (*United Power Flow Controller*), e por fim a quarta geração é dita como sendo a integração de equipamentos série e paralelo em linhas diferentes. O STATCOM, da presente proposta, está contido, portanto, na segunda geração dos FACTS.

Uma síntese de todos os equipamentos FACTS é realizada em (WATANABE, 1998). Inicialmente os princípios de operação, em uma análise fasorial e equacionamento, são mostrados para os compensadores ideais em derivação, em série e para o compensador de ângulo de fase ideal. A análise posterior é focada na análise de dispositivos FACTS quanto à sua configuração (série, paralela) e ao tipo de chave utilizada (tiristor, chaves autocomutadas). Para a configuração paralela é mostrada a característica de operação  $VxI$  para os dois tipos de chave, sendo especificadas as regiões de operação. Também, é mostrada a operação em regime permanente destes dispositivos, dentro os aspectos citados como mais importantes estão o carregamento máximo permitido com a sua introdução e as perdas incrementais que advêm deste aumento na carga. Por fim, são citados estudos relatando um aumento de até 80% na capacidade de transmissão da linha sendo compensada.

## 4.2 STATCOM

O princípio da compensação de reativos através de uma fonte de tensão ideal é descrito em Gyugyi (1994), o termo STATCON (*Static Synchronous Condenser*) é utilizado, nomenclatura que também pode ser utilizada para o STATCOM, e que, segundo o autor advém da premissa de funcionamento similar à de um compensador síncrono. Apesar da similaridade, as desvantagens do compensador síncrono são apresentadas, dentre as quais podemos destacar a resposta lenta à perturbações, risco de perda de sincronismo, baixa impedância de curto circuito e alto custo de manutenção. Ainda é descrito o procedimento para implementação do inversor de tensão, a topologia descrita é a do inversor do tipo fonte de tensão de seis pulsos, ainda assim o autor indica que outras topologias multi-pulsos podem vir a produzir menos harmônicos. Podemos ressaltar, por fim, um comparativo entre as características de tensão *versus* corrente ( $VxI$ ), do STATCON com o SVC é mostrado, além do comparativo de como a utilização do STATCON aumenta a estabilidade



do sistema em relação ao SVC, através do ganho de margem para o método das áreas para ambos os equipamentos.

Cavaliere (2001) introduz uma análise sucinta acerca do princípio de funcionamento do STATCOM como um controlador de reativos do tipo fonte de tensão. O autor descreve as componentes básicas do equipamento, dividindo-o em quatro partes: inversores, transformadores, capacitor do lado de tensão contínua e sistema de controle. No que concerne os inversores, é dada ênfase nos tipos de topologia utilizados, analisando vantagens e desvantagens para cada topologia citada, sendo feita uma análise baseada na THD (*Total Harmonic Distortion*) das tensões de saída destes. Topologias para os capacitores CC e transformadores também são apresentadas. Cavaliere desenvolve e simula um modelo digital de um STATCOM, com objetivo de controle de potência reativa, com a utilização do *software* de transitórios eletromagnéticos ATP-EMTP. Por fim, é realizada uma análise para o funcionamento do STATCOM em sistemas desbalanceados, com componentes de sequência negativa, que prejudicam o seu funcionamento.

Em Lijie, Yang e Yiqun (2010), é feita uma análise comparativa entre o desempenho do SVC e do STATCOM quanto a suporte de tensão na ocorrência de uma falta, melhora na estabilidade transitória e limite de transmissão, amortecimento de oscilações de baixa frequência e velocidade de resposta dinâmica a uma perturbação. Para isso, é feito um estudo de caso na rede elétrica de *Si-Chuan*, parte do sistema elétrico da China, sendo verificado o funcionamento dos equipamentos numa subestação de uma linha de 500 kV. Após a análise, comprova-se a maior eficiência do STATCOM quanto aos fatores citados. Apesar de citar o fato que o STATCOM é mais caro, nenhuma análise econômica é realizada, não deixando claro se, apesar dos melhores indicativos de desempenho, é vantajosa, economicamente falando, a utilização deste equipamento.

Um exemplo de projeto instalado de um STATCOM de  $\pm 100$  Mvar é mostrado em Schauder et al. (1997), onde é relatado uma série de testes num equipamento STATCOM presente na Subestação *Sullivan*, no nordeste do estado americano do *Tennessee*. Esta subestação é suprida por uma linha de 500 kV e por 4 linhas de 161 kV, sendo o STATCOM conectado a um barramento de 161 kV. Além disso, ao mesmo barramento é conectado um banco de capacitores de 84Mvar. Inicialmente, os componentes do STATCOM são descritos. Foi utilizado, neste projeto, um inversor de 48 pulsos, com 16 GTOs por fase. Segundo Schauder et al., esta disposição de chaves, juntamente com o transformador faz com que não haja a necessidade de filtros passivos, como também é mostrado nos resultados da saída do STATCOM. Os testes realizados para medir o desempenho do compensador foram:

- **Resposta à um degrau aplicado no controle de corrente reativa injetada -**  
Foi testada a resposta numa mudança instantânea no controle do tipo de corrente a ser

fornecida, de 0,5 p.u. capacitivo para indutivo e vice-versa. Estes testes mostraram que o STATCOM foi capaz de realizar uma transição de 100  $Mvar$  em poucos milissegundos com nenhum transitório de tensão considerável.

- **Resposta à um degrau aplicado no controle da tensão de referência** - Foi aplicado um teste onde a tensão de referência para o controlador foi reduzida de 1,032 p.u. para 1,022 p.u., em modo de controle normal de operação, causando uma variação de 70  $Mvar$ , nota-se que a corrente reativa passou a ser mais indutiva, absorvendo reativos e regulando a tensão no barramento. Além disso a corrente na fase passa por um transitório de aproximadamente 25  $ms$ , enquanto que a tensão não mostra nenhuma distorção considerável durante o transitório.
- **Resposta ao chaveamento do banco de capacitores adjacente** - O banco de capacitores presente no barramento foi chaveado durante a operação normal do STATCOM. Notou-se que o transitório de tensão gerado foi pequeno e percebeu-se que a mudança na corrente reativa para um perfil indutivo em alguns milissegundos. Também, foi constatada uma queda na tensão do barramento CC no capacitor do STATCOM, o que segundo o autor, representa claramente a atuação do compensador na atenuação dos distúrbios de tensão no barramento.
- **Resposta à abertura da interligação entre o barramento de 500 kV e o de 161 kV** - Este teste simulava uma situação de operação em contigência, quando o banco de transformadores que liga o barramento de 500  $kV$  ao de 161  $kV$  é aberto. Sem a linha de 500  $kV$ , a impedância do barramento vista pelo STATCOM é aumentada, e o controle precisa responder a isso alterando seus ganhos. Os resultados indicaram que após a abertura a resposta do STATCOM foi estável, mantendo a tensão do barramento.

## 5 Procedimentos e Resultados

### 5.1 Metodologia Utilizada

Para realização das simulações referentes ao STATCOM, foi utilizado o RTDS do Laboratório de Sistemas de Potência da Universidade Federal de Campina Grande. Inicialmente foi analisada e discutida a simulação de um exemplo de implementação do STATCOM contida no próprio *software* do equipamento, para que fosse obtido um sistema base, possibilitando alteração dos controles e servindo de comparação.

Os módulos do RSCAD utilizados para as simulações foram o DRAFT, o RUNTIME e o CUILDER. Possibilitando, desta forma, a implementação do sistema elétrico e seus controles, bem como flexibilizando os métodos a serem implementados, já que foi possível modelar nossos próprios blocos de controle, implementados em linguagem C.

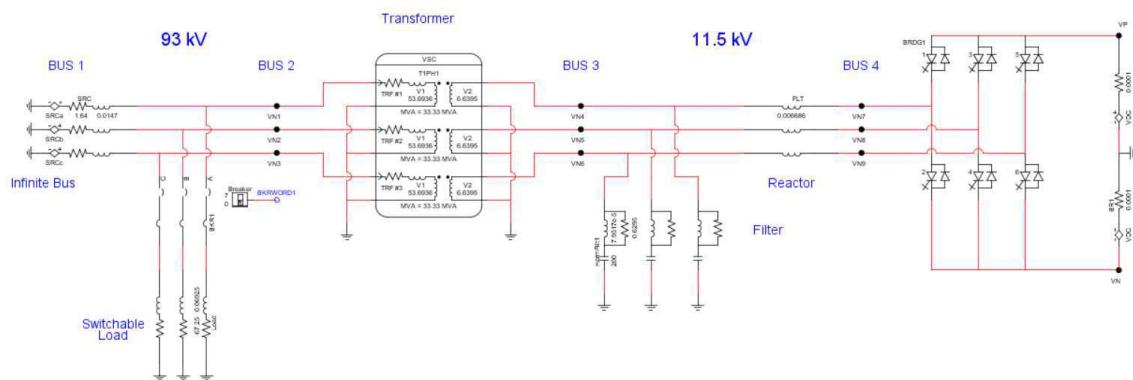
### 5.2 Resultados

#### 5.2.1 Modelo do STATCOM no RTDS

Com o intuito de familiarização com a ferramenta RSCAD e a simulação de um STATCOM no RTDS, bem como a adoção de um modelo base para análises, foi realizada uma análise minuciosa do modelo fornecido, descrito em [RSCAD \(2009\)](#).

O sistema modelado pode ser visto, no módulo *DRAFT* do *RSCAD*, na Figura . Este sistema, por conter chaves, deve ser colocado dentro de um bloco STS, já descrito anteriormente, contido nas bibliotecas do *software*.

Figura 13 – STATCOM no módulo DRAFT do RSCAD



Como pode ser visto, o STATCOM é representado pelas chaves e um lado DC, enquanto que, à esquerda do transformador, temos o sistema elétrico. O barramento 2

(BUS 2) é o nosso barramento de interesse, no qual a tensão deve ser controlada pelo STATCOM após a variação brusca da carga. Esse sistema possui 93 kV no lado de alta tensão e 11,5 kV no lado direito do transformador, possuindo também potência base de 100 MVA.

O sistema de controle utilizado para a regulação de tensão neste exemplo é baseado nas equações 5.1 e 5.2.

$$P = \frac{V_3 V_2}{x} \cdot \text{sen} \delta \quad (5.1)$$

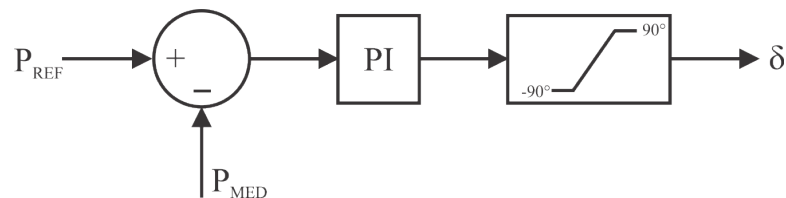
$$Q = \frac{V_3 V_2 \cos \delta - V_2^2}{x} \quad (5.2)$$

Como descrito em seções anteriores, o controle do fluxo de potência ativa e reativa no STATCOM está relacionado ao controle da amplitude e fase da tensão de saída deste equipamento, sendo a potência reativa fortemente ligada à amplitude, enquanto que a potência ativa é determinada pela fase.

O sistema de controle de potência ativa é esquematizado na Figura 14. Como a potência injetada pelo STATCOM é fortemente acoplada ao ângulo de fase  $\delta$ , o sinal de erro gerado pela diferença entre a potência ativa de referência e a potência ativa medida passa por um controlador PI, gerando um sinal de ângulo  $\delta$ , utilizado na geração do sinal modulante do PWM senoidal.

O ângulo de fase  $\delta$  é então limitado, uma vez que, em casos em que a referência é maior que o limite de operação do STATCOM, o controlador incrementaria o ângulo de forma contínua, levando a oscilações na potência ativa injetada. Para a presente simulação, o valor de referência foi definido como zero, uma vez que o sistema não necessita de compensar queda de tensão nos terminais do capacitor, que é considerado uma fonte ideal de tensão.

Figura 14 – Controle de Potência ativa do modelo analisado

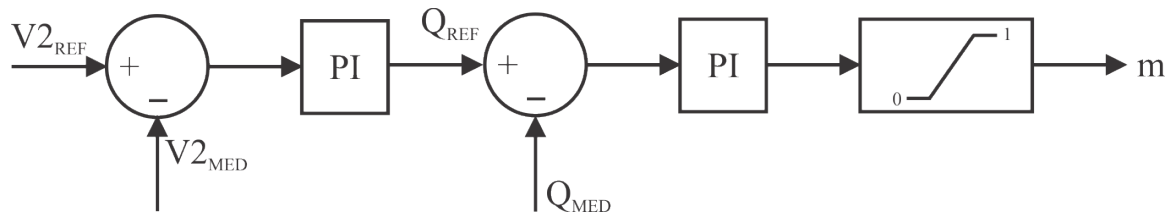


Já para o controle de tensão do barramento, o procedimento mostrado na Figura 15 é utilizado. A tensão no barramento é medida e comparada com a tensão de referência.

A subtração destes dois valores passa por um controlador PI, que gera um valor de potência reativa de referência. Este, por sua vez, é comparado à potência reativa medida. Como discutido, a potência reativa é dependente da amplitude da saída do STATCOM. Num

inversor, a saída é diretamente ligada ao índice de modulação, que determina se as chaves passarão mais tempo conduzindo ou abertas. O erro gerado pela comparação das potências reativas, portanto, passa por outro PI, gerando um valor de índice de modulação do PWM alterando o valor da amplitude da saída do STATCOM, que regula a potência reativa injetada. Esse índice também é limitado de modo a evitar problemas de oscilação de controle.

Figura 15 – Controle de Tensão no barramento do modelo analisado



Os resultados obtidos na simulação podem ser vistos nas Figuras 16 e 17, para um acréscimo e uma retirada de carga após a acomodação desta no sistema, respectivamente. Os eixos horizontais representam o tempo em segundos.

Figura 16 – PWM e Tensão na barra para adição da carga

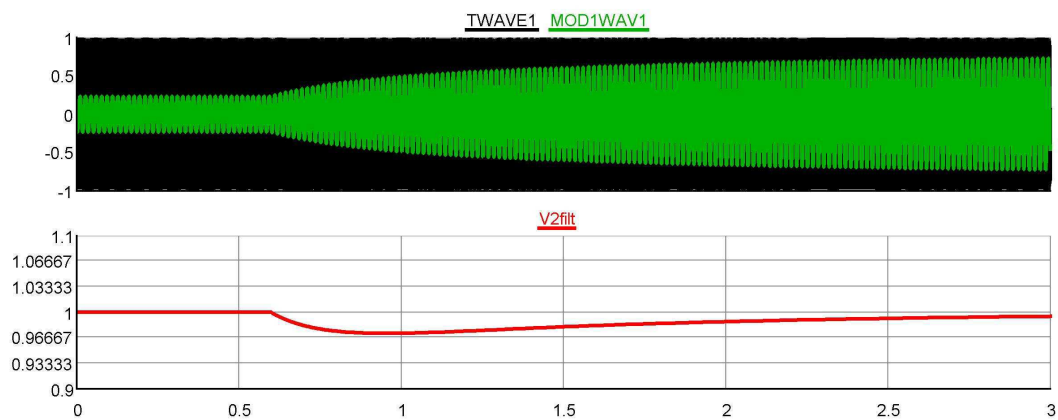
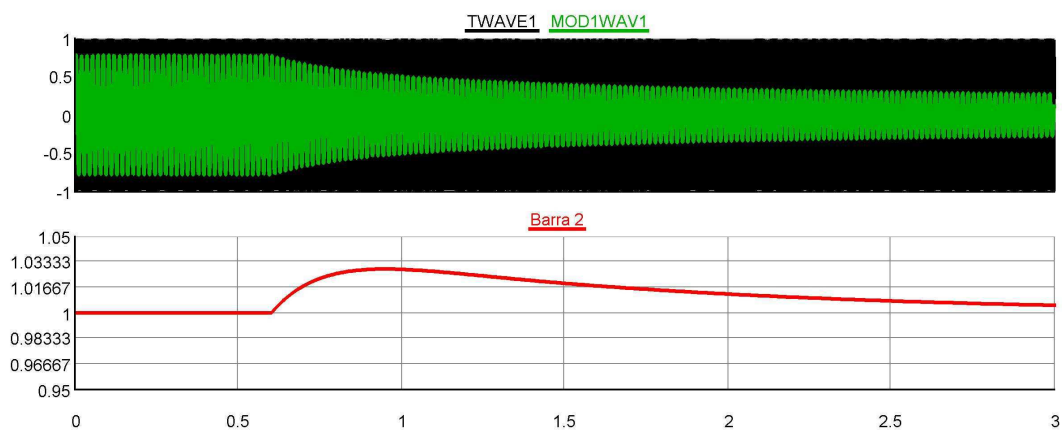


Figura 17 – PWM e Tensão na barra para retirada da carga

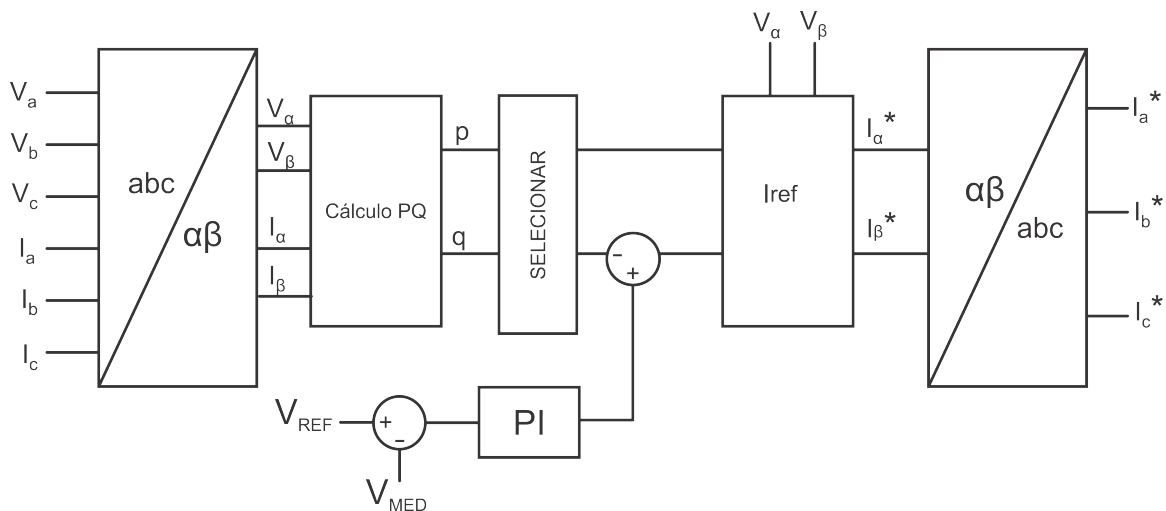


Nota-se que o STATCOM atua corrigindo a tensão no barramento através da variação do índice de modulação, desta forma injetando ou retirando reativos do sistema. O gráfico em verde representa a onda modulante, enquanto que em preto é mostrado a onda triangular que é usada como comparação, para a janela longa mostrada, pelo fato deste sinal ter alta frequência, sua representação se assemelha a um sinal contínuo.

### 5.2.2 Modelo baseado na teoria de potência instantânea

A partir da teoria de potência instantânea estudada, o modelo simulado no RSCAD, analisado anteriormente, foi modificado para que atue compensando a queda de tensão da carga chaveada. O esquema de controle simulado pode ser visto na Figura 18. O modelo considera uma carga equilibrada e um sistema a três fios.

Figura 18 – Modelo de geração de correntes de Referência



As tensões e correntes da carga são submetidas à transformada de Clarke, após isso, é realizado a escolha das potências que devem ser compensadas. Para o caso simulado, uma fonte DC ideal foi utilizada no lado CC do inversor, não sendo necessária a compensação das perdas do capacitor, portanto, foi selecionada apenas a potência reativa a ser compensada.

Esta referência de potência ativa foi determinada a partir da comparação entre o referencial de tensão desejado no barramento,  $1,0 p.u.$ , e a tensão medida neste, o erro foi passado por um controlador PI, com ganhos determinados heurísticamente, gerando assim nossa referência de potência reativa injetada pelo STATCOM.

Após a seleção das potências compensadas, a transformação inversa dada pela Equação 3.7 é utilizada, sendo determinadas, desta forma, as correntes de referência que devem ser compensadas pelo filtro *shunt*.

Por fim, é realizado um controle de corrente PWM por histerese, para que a saída de corrente do inversor corresponda à referência determinada. Os blocos de controle foram implementados a partir do módulo *Component Builder (CBUILDER)* do RSCAD.

Como mostrado na Figura 19, após o chaveamento da carga no sistema, a referência de potência reativa, inicialmente negativa, denotando absorção de reativos da rede, passa a ser positiva, indicando afundamento de tensão e consequente injeção de reativos na barra, estabilizando a tensão do barramento.

Da mesma forma, como é mostrado na Figura 20, após a conexão da nova carga, uma nova referência é gerada, e abaixo do gráfico das referências, é possível ver o comportamento da corrente na saída do inversor, responsável pela regulação da tensão na carga. Nesta, o eixo horizontal representa o tempo, em segundos.

Figura 19 – Potência Reativa Injetada e Tensão no barramento

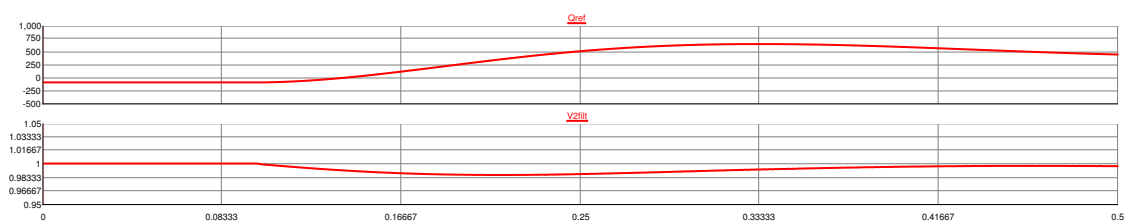
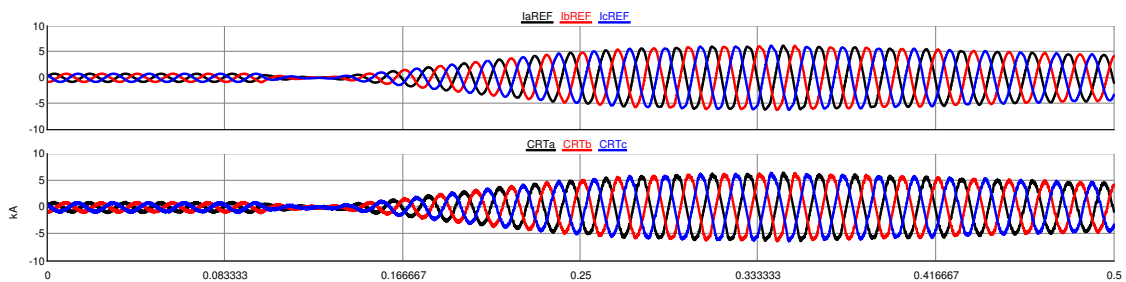


Figura 20 – Referência de Corrente e Corrente na Saída do Inversor



Portanto, é observada desta forma a eficiência do controle baseado na teoria p-q proposta. Se comparado ao sistema anterior simulado, destaca-se a velocidade e amplitude da resposta deste controle.

## 6 Conclusões

Os compensadores estáticos de potência conferem um maior aproveitamento do sistema de transmissão utilizado, através da compensação de reativos e harmônicos presentes nas cargas. Existe uma ampla diversidade de aplicação desses equipamentos, sendo estes imprescindíveis na flexibilização dos sistemas elétricos.

As estratégias de controle do STATCOM advém, em sua maioria, da teoria p-q consolidada de potências instantâneas, presente na maioria dos filtros ativos. Portanto, é fundamental seu estudo para aplicações mais complexas deste tipo de compensação.

Por fim, os resultados das simulações mostraram que as estratégias abordadas neste trabalho atuam de forma eficiente nos objetivos propostos de regulação de tensão na barra. Porém, mais estudos podem ser empregados em condições diferentes às realizadas, como por exemplo, com o emprego de um capacitor ao invés de uma fonte ideal de tensão DC, além de considerações mais reais de carga.

Como proposta de trabalhos futuros, existem inúmeras análises que podem ser realizadas. A substituição de fontes DC por capacitores, gerando a necessidade da utilização também de potência ativa na geração das correntes de referência do filtro. Além disso, análise de cargas desbalanceadas, bem como situações de faltas, que afetam consideravelmente as tensões nas barras, poderiam ser adaptadas ao modelo.



## Referências

- AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. In: TOKYO. *IPEC*. [S.l.], 1983. v. 83, p. 1375–1386. Citado na página 26.
- AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-20, n. 3, p. 625–630, May 1984. ISSN 0093-9994. Citado na página 29.
- AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. The instantaneous power theory. In: \_\_\_\_\_. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-IEEE Press, 2007. p. 41–107. ISBN 9780470118931. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5236678>>. Citado na página 27.
- BARBOSA, P. G.; LIMA, A. C. de; WATANABE, E. H. Modeling of thyristor and gto based shunt compensators for facts applications. Citado na página 27.
- CAVALIERE, C. A. C. *Análise de STATCOM operando em sistemas desbalanceados*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Julho 2001. Citado 5 vezes nas páginas 12, 21, 25, 30 e 32.
- DANTAS, K. M. C. *Faltas em Linhas de Transmissão*. 2003. Relatório de PIBIC. Citado na página 18.
- DANTAS, K. M. C. Introdução ao real-time digital simulator rtds. 2009. Citado 4 vezes nas páginas 13, 15, 17 e 18.
- DOMMEL, H. W. *Electromagnetic transients program reference manual: EMTP theory book*. First edition. [S.l.]: Portland, BPA, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 13, 17 e 18.
- GYUGYI, L. Power electronics in electric utilities: Static var compensators. *Proceedings of IEEE*, v. 76, n. 4, April 1988. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 30.
- GYUGYI, L. Dynamic compensation of ac transmission lines by solid-state synchronous voltage sources. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 9, n. 2, p. 904–911, Apr 1994. ISSN 0885-8977. Citado na página 31.
- HINGORANI, N. G. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. *Proceedings of the IEEE*, v. 76, n. 4, p. 481–482, Apr 1988. ISSN 0018-9219. Citado 3 vezes nas páginas 12, 21 e 30.
- KUFFEL, R. et al. Rtds - a fully digital power system simulator operating in real time. In: *Digital Power System Simulators, 1995, ICDS '95., First International Conference on*. [S.l.: s.n.], 1995. p. 19–. Citado na página 16.
- KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. [S.l.]: McGraw-Hill, 1994. Citado na página 21.

- LIJIE, D.; YANG, L.; YIQUN, M. Comparison of high capacity svc and statcom in real power grid. In: *Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA), 2010 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 1, p. 993–997. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 32.
- MAGUIRE, T.; GIESBRECHT, J. Small time-step vsc model for the real time digital simulator. *International Conference on Power System Transients (IPST '05), Montreal, Canada*, June 2005. Citado na página 19.
- PASCHOARELI JR., D. *Introdução aos Sistemas Flexíveis e Controladores Facts*. [S.l.], 2007. Nenhuma citação no texto.
- PINA, A. P. *Comparação entre modelos do dispositivo FACTS STATCOM para o estudo da estabilidade a pequenas perturbações*. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Estadual Paulista, Maio 2010. Citado na página 21.
- RSCAD. *VSC Small Time-Step Modeling - RTDS*. [S.l.], 2006. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 18.
- RSCAD. *Small Time-Step Simulation: An Introductory Tutorial - RTDS*. [S.l.], 2009. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 34.
- SALGADO, E. V. *Estudo Comparativo de Teorias de Potência Instantânea e aplicações em filtros ativos*. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Abril 2005. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 29.
- SCHAUDER, C. et al. Operation of  $\pm 100$  mvar tva statcon. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 12, n. 4, p. 1805–1811, Oct 1997. ISSN 0885-8977. Citado na página 32.
- SOMSAI, K.; KULWORAWANICHONG, T. Instantaneous power control of d-statcom with consideration of power factor correction. In: *Electrical Engineering/Electronics Computer Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2010 International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1186–1190. Citado na página 28.
- WATANABE, E. H. Tecnologia facts - tutorial. *SBA Controle e Automação*, v. 9, n. 1, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 31.
- WATANABE, E. H.; AREDES, M. Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações. 2002. Citado 4 vezes nas páginas 12, 26, 27 e 29.