

Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA  
Engenharia Eletrônica

**Projeto e Construção de um Compensador  
Estático de Reativos para Aplicações  
Laboratoriais (SVC)**

Autor: Matheus Jericó Palhares

Orientador: Prof. Alex Reis

Brasília, DF

2018





Matheus Jericó Palhares

## **Projeto e Construção de um Compensador Estático de Reativos para Aplicações Laboratoriais (SVC)**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Alex Reis

Brasília, DF

2018

---

Matheus Jericó Palhares

Projeto e Construção de um Compensador Estático de Reativos para Aplicações Laboratoriais (SVC)/ Matheus Jericó Palhares. – Brasília, DF, 2018-68 p. : il.

Orientador: Prof. Alex Reis

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB  
Faculdade UnB Gama - FGA , 2018.

1. SVC. 2. Compensador Estático de Reativos. I. Prof. Alex Reis. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Projeto e Construção de um Compensador Estático de Reativos para Aplicações Laboratoriais (SVC)

CDU 02:141:005.6

---

Matheus Jericó Palhares

## **Projeto e Construção de um Compensador Estático de Reativos para Aplicações Laboratoriais (SVC)**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Eletrônica da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Eletrônica.

Trabalho apresentado. Brasília, DF, 11 de Outubro de 2018:

---

**Prof. Alex Reis**  
Orientador

---

**Titulação e Nome do Professor**  
Convidado 1

---

**Titulação e Nome do Professor**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2018



Dedico este trabalho a minha mãe Elaine, que sempre me apoiou independente das circunstâncias.





# Resumo

A tecnologia FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) tem sido bastante utilizada como uma solução para a melhora na estabilidade de tensão e na capacidade de transmissão de potência no Sistema Elétrico de Potência. Descrevem-se as principais características dos controladores FACTS, com o intuito de estudar a topologia *SVC*.

O presente trabalho apresenta o projeto de desenvolvimento e resultados de implementação de um Compensador Estático de Reativos (*SVC*) usando o software PSIM, com o objetivo de analisar o desempenho da rede elétrica sem o *SVC* e com o mesmo, a partir da adição de cargas indutivas e capacitivas à rede. A implementação é construída por meio da plataforma de simulação do PSIM.

Os resultados ilustram os parâmetros de tensão, corrente e potência reativa de um sistema de baixa tensão, modelado para aplicações laboratoriais, de  $220 V_{rms}$ . A partir da variação das cargas conectadas ao mesmo, tem-se o propósito de estudar o comportamento do Compensador Estático de Reativos.

**Palavras-chaves:** CER. SVC. PSIM. FACTS.



# Abstract

FACTS (Flexible AC Transmission Systems) technology has been very used as a solution to improve voltage stability and power transmission capacity in the Electric Power System. The main characteristics of the FACTS controllers are described, with the aim of studying the topology SVC.

This project presents the development and results of implementation of a Static Var Compesator (SVC) using the software PSIM, with the objective of analyzing the performance of the electrical network with and without the SVC, from the addition of inductive and capacitive loads to the network. The implementation is built using the PSIM simulation platform.

The results illustrate the parameters of voltage, current and reactive power of a low voltage system, laboratory applications patterned, 220  $V_{rms}$ . From the variation of the loads connected to itself. It has the purpose of studying the behavior of the Static Var Compesator.

**Key-words:** CER. SVC. PSIM. FACTS



# Lista de ilustrações

Figura 1 – (A) Diferença de fase entre tensão e corrente sobre um capacitor; (B) Diferença de fase entre tensão e corrente sobre um indutor. . . . .	20
Figura 2 – Triângulo de Potência. . . . .	20
Figura 3 – Reator <i>shunt</i> de 765 kV na subestação de Foz do Iguaçu. . . . .	22
Figura 4 – Máquina Síncrona. . . . .	22
Figura 5 – VSC - <i>Voltage-Sourced Converter</i> . . . . .	24
Figura 6 – Diagrama de blocos do <i>SVC</i> . . . . .	27
Figura 7 – Configuração do Compensador Estático de Reativo. . . . .	28
Figura 8 – Característica Tensão <i>Versus</i> Corrente do <i>SVC</i> . . . . .	29
Figura 9 – Circuito equivalente. . . . .	29
Figura 10 – Linha de carga do sistema. . . . .	30
Figura 11 – Funcionamento do <i>SVC</i> no Sistema Elétrico. . . . .	31
Figura 12 – (a) Tiristor, (b ) Tiristores em anti-paralelo (triac). . . . .	32
Figura 13 – Estrutura do <i>TCR</i> . . . . .	33
Figura 14 – <b>a)</b> Disparo dos tiristores com $\alpha$ igual a $90^\circ$ com duração do disparo de $10^\circ$ ; <b>b)</b> Tensão de entrada 220 <i>Volts<sub>rms</sub></i> ; <b>c)</b> Corrente <sub><i>TCR</i></sub> . . . . .	34
Figura 15 – <b>a)</b> Disparo dos tiristores com $\alpha$ igual a $130^\circ$ com duração do disparo de $10^\circ$ ; <b>b)</b> Tensão de entrada 220 <i>Volts<sub>rms</sub></i> ; <b>c)</b> Corrente <sub><i>TCR</i></sub> . . . . .	34
Figura 16 – Espectro de harmônicas geradas em função do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) do <i>TCR</i> . . . . .	35
Figura 17 – Estrutura do <i>TSC</i> . . . . .	36
Figura 18 – Diagrama para modelagem do <i>SVC</i> . . . . .	37
Figura 19 – Diagrama da unidade de controle dos tiristores do <i>SVC</i> . . . . .	37
Figura 20 – Diagrama genérico do sistema simulado. . . . .	40
Figura 21 – Circuito simulado no <i>PSIM</i> sem o <i>SVC</i> . . . . .	42
Figura 22 – <b>a)</b> Tensão do SEP; <b>b)</b> Corrente do SEP; <b>c)</b> Potência reativa. . . . .	42
Figura 23 – Circuito simulado no <i>PSIM</i> com o <i>TSC</i> . . . . .	43
Figura 24 – Circuito simulado no <i>PSIM</i> com o controlador dos tiristores do <i>TSC</i> . . . . .	43
Figura 25 – <b>a)</b> Tensão da Barra; <b>b)</b> Tensão da Fonte. . . . .	44
Figura 26 – <b>a)</b> Corrente da Barra; <b>b)</b> Corrente do <i>SVC</i> ; <b>c)</b> Corrente da Carga. . . . .	44
Figura 27 – <b>a)</b> Potência Ativa; <b>b)</b> Potência Reativa. . . . .	45
Figura 28 – Disparo dos tiristores do <i>TSC</i> . . . . .	45
Figura 29 – Circuito Simulado no <i>PSIM</i> com o <i>TSC</i> e o <i>TCR</i> . . . . .	46
Figura 30 – Circuito simulado no <i>PSIM</i> com o controlador dos tiristores do <i>TCR</i> . . . . .	46
Figura 31 – <b>a)</b> Tensão da Barra; <b>b)</b> Tensão da Fonte. . . . .	47
Figura 32 – <b>a)</b> Corrente da Barra; <b>b)</b> Corrente do <i>SVC</i> ; <b>c)</b> Corrente da Carga. . . . .	48

Figura 33 – a) Potência Ativa; b) Potência Reativa. . . . .	48
Figura 34 – a) Tensão da Barra; b) Tensão da Fonte. . . . .	49
Figura 35 – a) Corrente da Barra; b) Corrente do <i>SVC</i> ; c) Corrente da Carga. . . . .	50
Figura 36 – a) Potência Ativa; b) Potência Reativa. . . . .	50
Figura 37 – a) Tensão da Barra; b) Tensão da Fonte. . . . .	51
Figura 38 – a) Corrente da Barra; b) Corrente do <i>SVC</i> ; c) Corrente da Carga. . . . .	52
Figura 39 – a) Potência Ativa; b) Potência Reativa. . . . .	52
Figura 40 – Arduino Mega 2560 . . . . .	55
Figura 41 – Simulação do circuito de Detecção de Passagem por Zero. . . . .	56
Figura 42 – Pulso de saída do circuito de Detecção de Passagem por Zero. . . . .	57
Figura 43 – Layout da placa de Detecção de Passagem por Zero. . . . .	57
Figura 44 – Tensão de saída do Arduino Mega com ângulo de disparo de 90°. . . . .	58
Figura 45 – Tensão de saída do Arduino Mega com ângulo de disparo de 120°. . . . .	58
Figura 46 – Tensão de saída do Arduino Mega com ângulo de disparo de 150°. . . . .	59
Figura 47 – Sistema de aquisição de dados e acionamento do Triac com o Arduino Mega 2560. . . . .	59
Figura 48 – Tensão no resistor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de 90°. . . . .	60
Figura 49 – Tensão no resistor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de 120°. . . . .	60
Figura 50 – Tensão no resistor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de 150°. . . . .	60
Figura 51 – Nanoshield Triac da EletroShields. . . . .	61
Figura 52 – Tensão no indutor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de 90°. . . . .	62
Figura 53 – Tensão no indutor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de 120°. . . . .	62
Figura 54 – Tensão no indutor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de 150°. . . . .	63

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Impedâncias da Linha de Transmissão . . . . .	40
Tabela 2 – Carga Conectada Inicialmente . . . . .	41
Tabela 3 – Carga Conectada Posteriormente . . . . .	41
Tabela 4 – Capacitância e Indutância do <i>SVC</i> . . . . .	41





# Lista de abreviaturas e siglas

FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems;</i>
TCR	<i>Thyristor Controlled Reactor;</i>
TSC	<i>Thyristor Switched Capacitor;</i>
SVC	<i>Static Var Compesator;</i>
CER	Compensador Estático de Reativos;
SEP	Sistema Elétrico de Potência;
LTs	Linhas de Transmissão;
DC	Contínuo;
$\alpha$	Alpha;
V	Tensão;
I	Corrente;
CI	Circuito Integrado;
X	<i>Versus;</i>
B	Susceptância;
Q	Potência Reativa.



# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
<b>1.1</b>	<b>Sistema Elétrico de Potência</b>	<b>19</b>
1.1.1	Reatores <i>Shunt</i>	21
1.1.2	Compensadores Síncronos	22
1.1.3	Dispositivos FACTS	22
1.1.3.1	Primeira Geração	23
1.1.3.2	Segunda Geração	24
<b>1.2</b>	<b>Objetivos do Trabalho</b>	<b>24</b>
<b>1.3</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>25</b>
<b>2</b>	<b>STATIC VAR COMPENSATOR - SVC</b>	<b>27</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>27</b>
<b>2.2</b>	<b>Transformador de Acoplamento</b>	<b>32</b>
<b>2.3</b>	<b>Reator Controlado por Tiristor (<i>TCR</i>)</b>	<b>32</b>
<b>2.4</b>	<b>Capacitor Chaveado por Tiristor (<i>TSC</i>)</b>	<b>35</b>
<b>2.5</b>	<b>Sistema de Controle</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS E RESULTADOS PARCIAIS</b>	<b>39</b>
<b>3.1</b>	<b>Software de Simulação</b>	<b>39</b>
<b>3.2</b>	<b>Sistema Simulado</b>	<b>39</b>
3.2.1	Caso 1: Linha de Transmissão sem o <i>SVC</i>	42
3.2.2	Caso 2: Linha de Transmissão com o <i>TSC</i>	43
3.2.3	Caso 3: Linha de Transmissão com o <i>TSC</i> e o <i>TCR</i>	45
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>65</b>
<b>5.1</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>67</b>



# 1 Introdução

## 1.1 Sistema Elétrico de Potência

Devido ao avanço tecnológico e ao aumento populacional e industrial, mudanças ocorreram na sociedade e, conseqüentemente, o interesse pela energia elétrica. Dessa forma, o consumo energético tem aumentado cada vez mais, não apenas em magnitude, mas também em complexidade.

Para suprir a demanda energética requisitada pela sociedade, o aumento da capacidade de geração e de transmissão são soluções que atenderiam às exigências. Entretanto, a preocupação com a ecologia e o meio ambiente, bem como às restrições econômicas impostas por políticas recessivas, tem feito com que essa não seja uma solução viável (NATURESE, 2001). Dessa forma, o aumento contínuo da demanda, tem sobrecarregado os sistemas de energia elétrica, causando o aparecimento de problemas na estabilidade de tensão, como distúrbios de magnitude e ocorrência de blecautes.

Outro fator, ocasionado pelo aumento das cargas conectadas a rede elétrica, principalmente por causa das indústrias, é a necessidade de fornecer potência reativa suficiente para atender às cargas e também manter os níveis das tensões das barras próximos do valor nominal. Quando há excesso de potência reativa, o nível de tensão sobe, já quando há falta da mesma, o nível de tensão cai. Além disso, a presença em excesso de potência reativa, circulando no sistema, causa superaquecimento (PASSOS, 2013).

As cargas conectadas a rede elétrica consomem tanto potência ativa quanto potência reativa, dependendo da natureza destas cargas. Porém, correntes indutivas nas linhas de transmissão reduzem o nível de tensão transmitida com o aumento da extensão da linha de transmissão. Dessa forma, torna-se necessário reduzir o efeito dessas correntes minimizando o fluxo de potência reativa no sistema elétrico de potência (ROBELATTO; FURQUIM; OLIVEIRA, 2014).

A potência reativa tem origem na diferença de fase entre a onda de corrente e onda de tensão em uma mesma frequência. Dessa forma, quando um dispositivo necessita gerar campos elétricos (capacitores) e campos magnéticos (indutores), a corrente se defasa em relação a tensão (atrasa ou adianta). O módulo da potência reativa responsável pela geração dos campos eletromagnéticos acima, tem relação direta com a diferença de fase entre tensão e corrente (PASSOS, 2013).

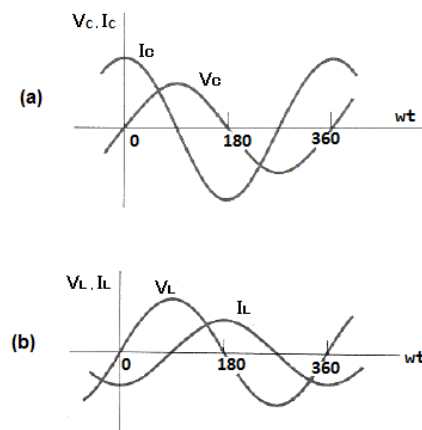


Figura 1 – (A) Diferença de fase entre tensão e corrente sobre um capacitor; (B) Diferença de fase entre tensão e corrente sobre um indutor.

Fonte: NDT RESOURCE CENTER

No Sistema Elétrico de Potência, são instalados bancos de capacitores em paralelo com as cargas, para realizar a compensação do fator de potência, para deixá-lo o mais próximo do valor unitário. A potência ativa é sempre consumida para execução de trabalho, é de fato a potência que os consumidores desejam obter. Já a potência reativa, além de não produzir trabalho, fica circulando entre a fonte de alimentação e as cargas, ocupando uma parcela da potência aparente que poderia ser utilizada para alimentar mais cargas. Portanto, os bancos de capacitores tem como objetivo reduzir as perdas em potências ativa, reduzindo o valor da potência reativa (BAUAB, 2009). É possível ver na Figura 2 o triângulo de potência.

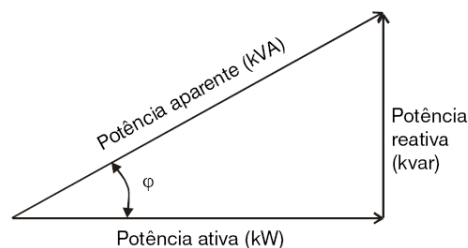


Figura 2 – Triângulo de Potência.

A instabilidade de tensão, discernida por um decaimento lento e progressivo no nível das magnitudes das tensões das barras de carga, cuja a ocorrência desse acontecimento é devido a incapacidade dos sistemas de atender a crescente demanda reativa (NATURESE, 2001), é também conhecido como colapso de tensão. Nessas circunstâncias, as pesquisas relacionadas ao controle de tensão e aos problemas ligados à potência reativa, tem tido grandes avanços.

Em relação à estabilidade e instabilidade de tensão, uma definição bastante utilizada por pesquisadores e engenheiros do setor elétrico é descrita por (KUNDUR, 1994):

"Estabilidade de tensão é a habilidade de um sistema de potência de manter níveis aceitáveis de tensão em regime permanente para todas as barras do sistema, tanto sob condições normais de operação quanto após a ocorrência de uma perturbação. Um sistema entra no estado de instabilidade de tensão quando uma perturbação seja por aumento de carga, seja por mudança nas condições do sistema, causa uma queda progressiva e incontrolável de tensão em uma ou mais barras da rede elétrica".

A falta de controle do sistema elétrico pode ocasionar diversos problemas, entre eles: perda de estabilidade, fluxos circulantes de corrente, violação de limites de tensão e elevados níveis de curto circuitos (TORTELLI, 2010). Estes problemas podem ser solucionados com o aumento da capacidade de geração e de transmissão, mas como foi dito anteriormente, é inviável. Uma das áreas que vem sendo bastante desenvolvida para realizar o controle do sistema elétrico, é a eletrônica de potência, cujo objetivo é utilizar de forma mais eficiente a rede elétrica, minimizando o valor da potência reativa na rede elétrica.

Desse forma, vem sendo desenvolvido dispositivos e técnicas que operem no controle do Sistema Elétrico de Potência. Dentre os dispositivos que controlam os distúrbios ocasionados na rede elétrica, temos:

- Reatores *Shunt*
- Compensadores Síncronos
- Dispositivos FACTS

### 1.1.1 Reatores *Shunt*

Os **Reatores *Shunt*** são utilizados para minimizar o efeito capacitivo das linhas de transmissão longas (maiores que 250 km), pois as mesmas possuem um elevado acoplamento capacitivo entre fases e entre fase e solo, acarretando um significado aumento da tensão na linhas em duas situações distintas: quando ocorre rejeição de carga (chaveamento) e quando a baixa demanda por partes dos consumidores de energia elétrica. Os reatores *Shunt* podem ser utilizados em série ou em paralelo a linha. Quando utilizados em série, contribui para limitar a corrente de curto-circuito da mesma, já que a impedância série equivalente dessa combinação tende a aumentar. Já quando é colocado em paralelo, tem o objetivo de absorver o excesso de reativos (RODRIGUES; SILVA, 2014).



Figura 3 – Reator *shunt* de 765 kV na subestação de Foz do Iguaçu.

### 1.1.2 Compensadores Síncronos

Os **Compensadores Síncronos**, através do controle da excitação, mantém o equilíbrio do Sistema Elétrico de Potência, fornecendo ou absorvendo potência reativa, dessa forma, mantém o nível de tensão da rede dentro dos padrões no qual é desejado (WEG, 2017).

Os Compensadores Síncronos Sub-Excitados, operam com valores baixos de corrente de campo, absorvendo potência reativa, assemelhando-se ao indutor. Já os Compensadores Sobre-Excitados, operam com valores elevados de corrente de excitação, gerando potência reativa capacitiva, regulando assim o excesso de energia indutiva (ROBELATTO; FURQUIM; OLIVEIRA, 2014).



Figura 4 – Máquina Síncrona.

Fonte: WEG (2014)

### 1.1.3 Dispositivos FACTS

Os **FACTS** (*Flexible AC Transmission Systems*), são sistemas de controle de fluxo de potência, controlando a estabilidade das LTs, baseados em eletrônica de potência.



Realizando o controle do sistema de corrente alternada: a corrente, a tensão, o ângulo de fase e a impedância (CORREIA, 2016).

Segundo Correia (2009) os FATCS trazem alguns benefícios ao Sistema Elétrico de Potência, sendo eles:

- Controle do fluxo de potência.
- Aumento da estabilidade.
- Aumento da flexibilidade do sistema no local de produção.
- Diminui o fluxo de potência reativa.
- Diminui as inversões de fluxo de potência.
- Reduz os custos de produção.
- Diminui o impacto ambiental, pois controlando a estabilidade do sistema, não há necessidade de construir novas fontes de geração de energia.

Os FACTS ajudam a reduzir os problemas ambientais relacionados a ampliação das linhas e construções de novas fontes de geração de energia, porque deixam as LTs mais eficientes, pois aumentam a capacidade de transmissão das mesmas (BORDIM, 2011).

Além disso, os FACTS vem sendo bastante utilizados para solucionar essa adversidade, como uma resposta a essa demanda energética permanente pelo fato de gerar uma grande elevação da flexibilidade, segurança, previsibilidade, robustez, controle dos níveis de tensão e de potência reativa, eficiência e capacidade de transferência de energia das redes (PASSOS, 2013).

Os dispositivos FACTS são comumente divididos em duas gerações:

#### 1.1.3.1 Primeira Geração

A primeira geração dos dispositivos FATCS, são baseados na ação de tiristores convencionais, que são componentes que atuam como chaves eletrônicas, cujo comando atua apenas no momento do disparo, não tendo necessidade de controle do bloqueio. Em resultado do seu baixo custo, alta eficiência e capacidade de suportar elevados valores de tensão e corrente, são amplamente utilizados nos projetos de conversores de alta potência até os dias de hoje (TORTELLI, 2010).

Os principais dispositivos FATCS da 1ª geração são os TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) e o SVC (*Static Var Compensator*)

### 1.1.3.2 Segunda Geração

A segunda geração dos dispositivos FACTS, diferem da primeira geração pelo fato de utilizar dispositivos de comutação que tem a capacidade de bloqueio, além do disparo (dispositivos que utilizam GTO (*Gate Turn-Off thyristor*)). Com isso, originou-se o dispositivo conversor tipo VSC - *Voltage-Sourced Converter*, que constituem no elemento base da 2ª geração de Controladores FACTS (FRONTIN, 2013) (TORTELLI, 2010).

Os VSC's utilizam chaves eletrônicas com capacidade de bloqueio, como o GTO, visando gerar uma tensão síncrona com magnitude e ângulo de fase controláveis, sem a necessidade de utilizar banco de capacitores ou reatores, como na 1ª geração dos dispositivos FACTS. A figura abaixo mostra a estrutura básica de um VSC e sua representação equivalente (TORTELLI, 2010).

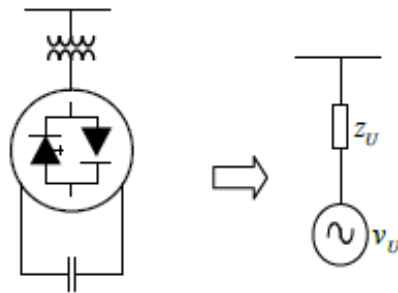


Figura 5 – VSC - *Voltage-Sourced Converter*.

Os principais dispositivos FATCS da 2ª geração são os STATCOM (*Static Synchronous Compensator*), SSSC (*Static Synchronous Series Compensator*), UPFC (*Unified Power Flow Controller*) e o IPFC (*Interline Power Flow Controller*). Estes dispositivos trocam potência ativa e reativa com o SEP, através de fontes internas de tensão síncrona, com magnitude e ângulos controlados pelos semicondutores (tiristores (GTO) ou transistores) (FRONTIN, 2013)

## 1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como foco o estudo e a simulação do dispositivo FATCS da 1ª geração - SVC (*Static Var Compensator*), com o objetivo de averiguar a regulação da tensão e do suporte de potência reativa em um sistema elétrico de baixa tensão.

Com a finalidade de analisar a atuação do SVC no sistema convencional de energia elétrica, foi utilizado como ferramenta de estudo o software PSIM (*Software for Power Electronics Simulation*), com o qual foram realizadas várias simulações do sistema elétrico, considerando diferentes tipos de carga e compensação de energia reativa do sistema.

## 1.3 Estrutura do Trabalho

Os demais capítulos deste trabalho estão organizados da seguinte forma:

No capítulo 2 é apresentado detalhadamente o Controlador SVC, caracterizando e explanando todos os componentes do mesmo. Além de explicar o funcionamento do sistema de controle.

- Introdução;
- RTC - Reator Controlado a Tiristor;
- CCT - Capacitor Controlado a Tiristor;
- Sistema de controle.

No capítulo 3 é apresentado uma breve explicação do software PSIM, simulações do sistema elétrico com o SVC e os resultados obtidos. Analisando a regulação da tensão e o controle da potência reativa.

- Software de Simulação
- Sistema Simulado
- Resultados

No capítulo 4 é apresentado os resultados do protótipo construído, bem como o funcionamento do acionamento do Triac e detecção do sinal da rede elétrica.

No capítulo 5 é apresentada a conclusão e os trabalhos futuros.



## 2 Static Var Compensator - SVC

### 2.1 Introdução

O SVC - *Static Var Compensator* ou Compensador Estático de Reativos, segundo (HINGORANI; GYUGYI, 2000), foi classificado como um Controlador FACTS da primeira geração, que utiliza elementos passivos, tais como reatores e capacitores, sendo caracterizado da seguinte forma:

“*Static Var Compensator (SVC) é um absorvedor ou gerador de Potência Reativa estático, com conexão shunt, cuja saída é ajustada para o intercâmbio de corrente reativa, capacitiva ou indutiva, para manter o controle de um específico parâmetro do SEP, geralmente a tensão de uma barra.*”

O SVC é um dispositivo FACTS que utiliza válvulas de tiristores, e como principal característica dessa topologia, é o controle rápido e constante da tensão no ponto de conexão. O controle é feito por meio da troca de potência reativa entre os elementos passivos (capacitores e reatores), presentes no compensador, e a rede elétrica.

Conforme pode ser visto na Figura 6 (HINGORANI; GYUGYI, 2000), a tensão da barra no SEP, é medida e comparada com a tensão de referência. A diferença entre elas, também chamada como erro, é amplificado pelo controlador integral proporcional, produzindo uma corrente de referência que é utilizada para controlar os tiristores, logo, controlar a conexão dos componentes passivos a rede elétrica. Dessa forma, de acordo com a corrente de referência, o SVC absorve ou injeta potência reativa na barra. Fazendo com que a tensão da barra permaneça constante.

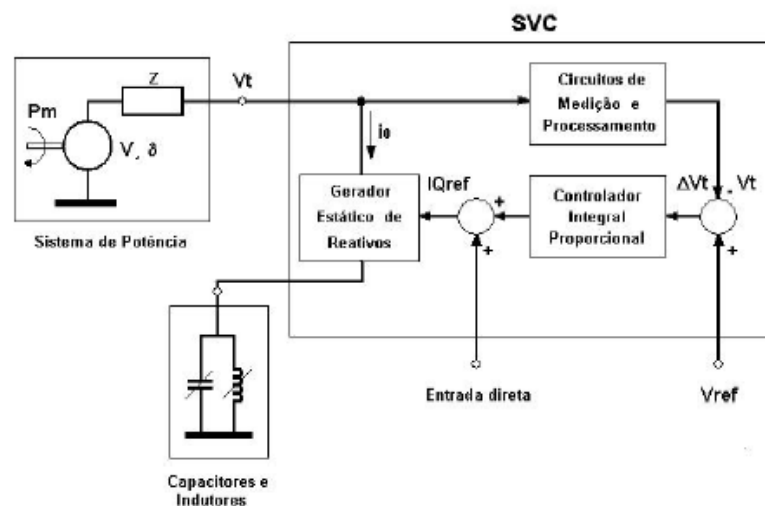


Figura 6 – Diagrama de blocos do SVC.

O termo “Estático ”é utilizado para indicar que o *SVC* não possui componentes com partes móveis (girante ou rotativo) (JúNIOR, 2008). O controle é feito de forma dinâmica pela eletrônica de potência utilizada nessa topologia de FACTS.

Os valores dos componentes passivos, capacitores e indutores, estão diretamente relacionados com a quantidade de potência reativa que o sistema do *SVC* vai adicionar ou absorver da rede elétrica. E esse valor depende da quantidade de flutuação de tensão a ser compensada e da impedância de curto circuito da rede (ALMEIDA et al., 2016). Os elementos do *SVC* são, o reator controlado por tiristor (TCR), capacitor chaveado por tiristor (TSC), o filtro de harmônicas e em alguns casos, o transformador de acoplamento.

Na Figura 7, mostra a estrutura típica de um SVC, através da associação e conexão do *TCR* (*Thyristor Control Reactor*), do *TSC* (*Thyristor Switched Capacitor*) e do filtro de harmônica, conectados ao SEP através do transformador de acoplamento. Dessa forma, o sistema *SVC* realiza troca de potência reativa com a rede elétrica, evitando flutuações de tensão, mantendo a tensão da barra (PAC) constante.

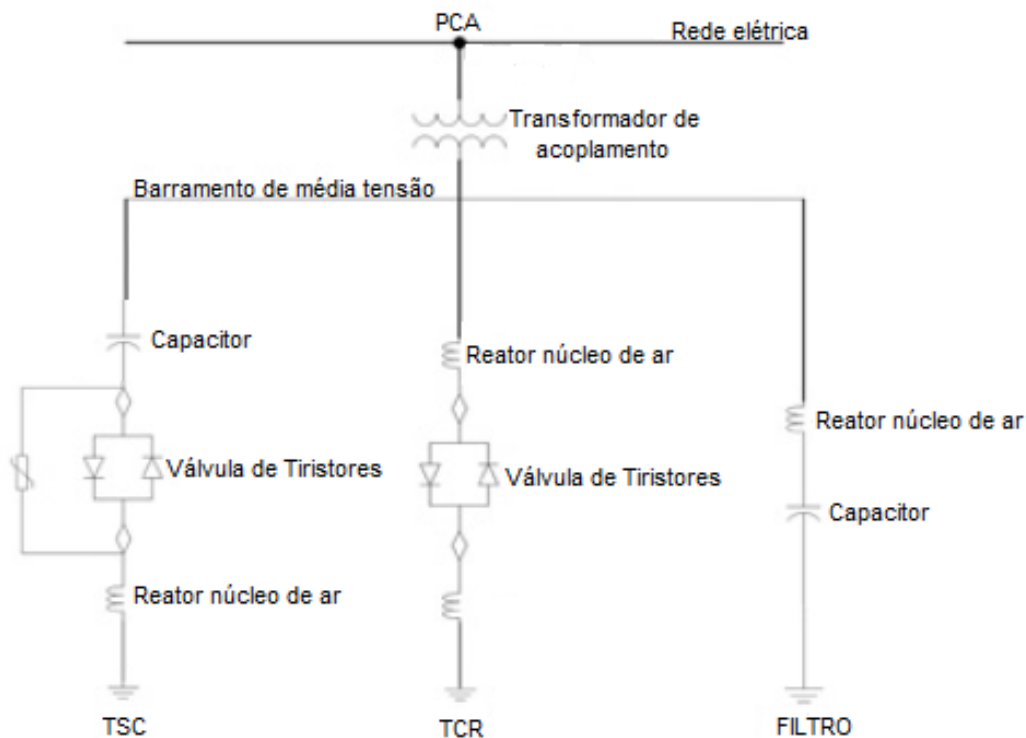


Figura 7 – Configuração do Compensador Estático de Reativo.

O princípio de funcionamento do Compensador Estático de Reativos, pode ser comparado a uma reatância variável e um capacitor, na qual o resultado é a sobreposição das características Tensão *Versus* Corrente dos dois componentes passivos. Com isso, o comportamento da tensão é modelado pela combinação dessas partes integrantes (FRONTIN, 2013). Como é mostrado na Figura 8, é possível observar que existe uma faixa de

valores de corrente na qual é possível regular a tensão.

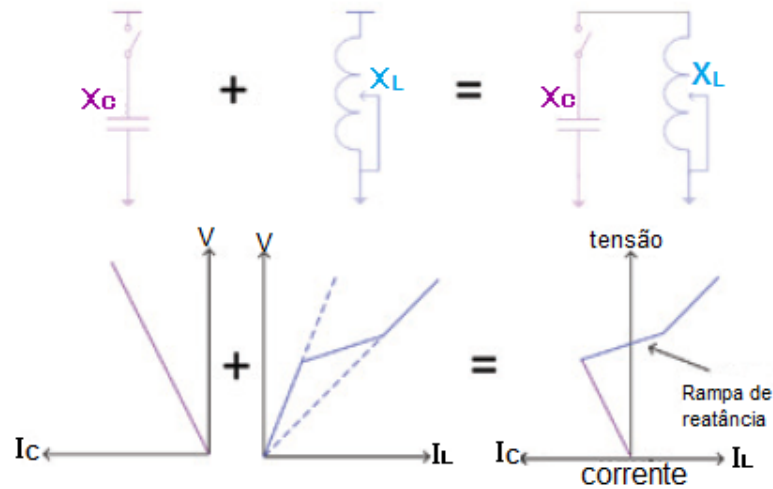


Figura 8 – Característica Tensão *Versus* Corrente do SVC.

Fonte:(FRONTIN, 2013)

Para uma melhor compreensão do funcionamento do CER, é necessário fazer uma análise da Tensão X Corrente<sub>SVC</sub> da rede elétrica. Utilizando o equivalente de *Thevenin*, pode-se caracterizar e analisar o comportamento da rede elétrica com a inserção do CER.

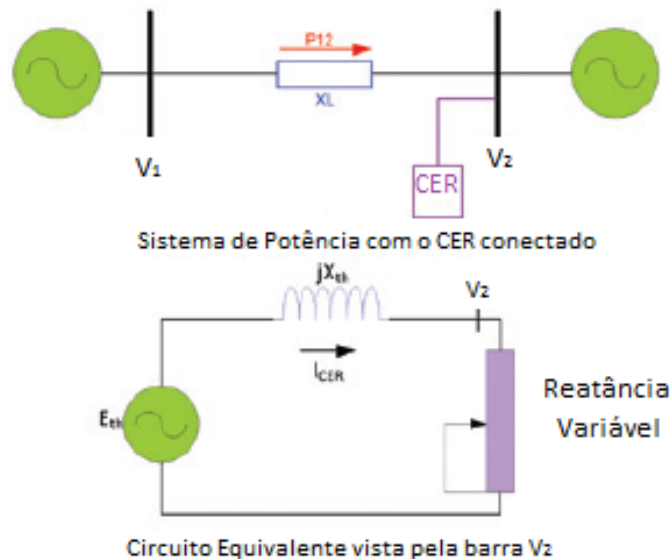


Figura 9 – Circuito equivalente.

Fonte:(FRONTIN, 2013)

Na Figura 9 é mostrado o equivalente de *Thevenin* da rede elétrica. A tensão da barra V2 tende a diminuir quando a corrente de carga é indutiva, e quando a corrente de

carga é capacitiva tende a aumentar (FRONTIN, 2013). A tensão na barra 2 é caracterizada pela equação:

$$V_2 = E_{TH} - X_{TH}I_{CER}. \quad (2.1)$$

Com o equivalente de *Thevenin*, caracteriza-se tensão X corrente e pode-se verificar qual é a alteração da linha de carga da rede elétrica tendo em vista as variações da tensão de *Thevenin* ( $E_{th}$ ) e da reatância equivalente ( $X_{th}$ ). Na Figura 10 é possível observar esse comportamento.

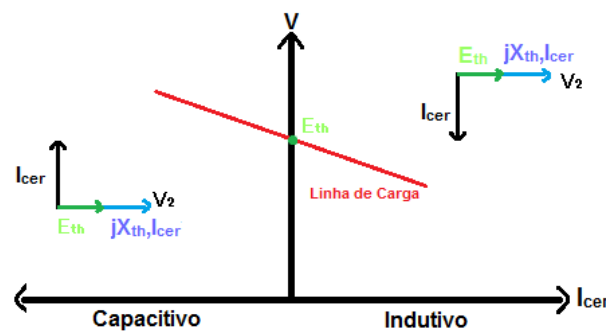


Figura 10 – Linha de carga do sistema.

Fonte:(FRONTIN, 2013)

A característica do SEP com a inserção do *SVC* é expressa pela equação:

$$V = V_{TH} + X_{CER}I_{CER} \quad (2.2)$$

Sendo que:

- $V$  = Tensão final;
- $V_{TH}$  = Tensão inicial;
- $X_{CER}$  = Reatância equivalente do CER;
- $I_{CER}$  = Corrente do CER.

A Figura 11 apresenta a relação entre a variação da linha de carga, em função de alterações no nível de tensão, e a atuação do compensador estático de reativos.



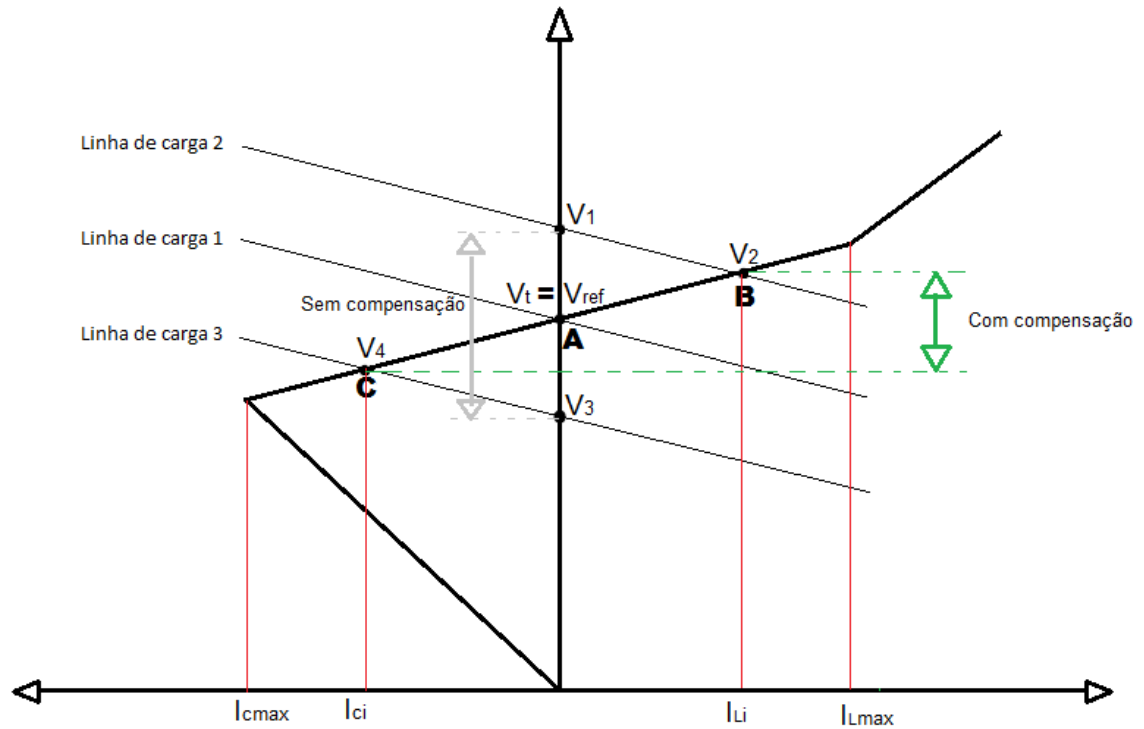


Figura 11 – Funcionamento do *SVC* no Sistema Elétrico.

São retratadas três possíveis linhas de carga, tratando-se de três valores para a tensão equivalente do sistema ( $E_{TH}$ ). A linha de carga 1 representa as condições nominais do sistema e intercepta a curva característica do *SVC* no ponto A, quando  $V_T = V_{ref}$  (tensão de referência) e  $I_{CER} = 0$  (CER inativo).

Quando ocorre um decréscimo de carga, acontece um aumento da tensão do sistema ( $\uparrow E_{TH}$ ), fazendo com que  $V_T = V_1$  (situação da linha de carga 2), sem a presença do *SVC*. Já com o acréscimo do *SVC*, o ponto de operação desloca-se para o ponto B, com  $V_T = V_2$ , absorvendo corrente indutiva  $I_{L2}$ .

Quando ocorre um aumento de carga, a tensão do sistema diminui ( $\downarrow E_{TH}$ ), fazendo com que  $V_T = V_3$  (situação da linha de carga 3), sem a presença do *SVC*. Já com o acréscimo do *SVC*, o ponto de operação desloca-se para o ponto C, com  $V_T = V_4$ , injetando corrente capacitiva  $I_{C2}$ .

A linha tracejada verde mostra a variação da tensão com a presença do *SVC*, já a linha tracejada cinza mostra a variação da tensão sem a presença do compensador. Demonstrando que com a presença do *SVC*, a variação da tensão é muito menor.

Se o *SVC* fosse ideal, a inclinação da linha de carga seria nula, fazendo com que qualquer variação na tensão do sistema, o compensador mantenha a tensão no ponto A.

## 2.2 Transformador de Acoplamento

O Transformador de Acoplamento é um transformador de potência, que recebe esse nome pelo fato de conectar o *SVC* a rede elétrica de alta tensão. Na maioria dos casos, o *SVC* é utilizado em sistema de alta tensão, para que seja feito o controle da tensão. O local da subestação onde o Transformador de Acoplamento é conectado é nomeado de PAC (Ponto de Acoplamento Comum). De acordo com (FRONTIN, 2013), o Transformador de Acoplamento deve ser projetado para atender a dois requisitos básicos:

- Exposição aos harmônicos gerados pelo chaveamento dos tiristores;
- Gerar o mínimo possível de perdas para o SEP;

## 2.3 Reator Controlado por Tiristor (*TCR*)

O *TCR* (*Thyristor Control Reactor*) é formado por uma indutância de valor fixo  $L$  em série com dois tiristores em anti-paralelo, fazendo com que a condução de corrente seja bidirecional. O tiristor permite a condução de corrente do ânodo para o cátodo quando a uma aplicação de um pulso no terminal de porta (*gate*). A condução do tiristor é bloqueada sempre que a corrente alternada passa por zero (JÚNIOR, 2008).

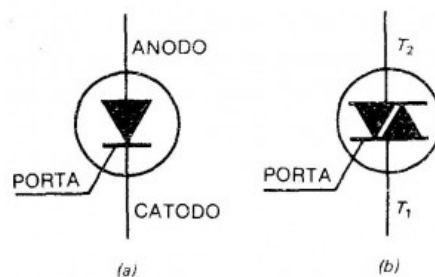


Figura 12 – (a) Tiristor, (b) Tiristores em anti-paralelo (triac).

Fonte: <http://eletronicos.etc.br>

Os tiristores do *TCR* conduzem corrente elétrica alternadamente a cada meio-ciclo da frequência fundamental, e estão diretamente relacionado com o ângulo de disparo ( $\alpha$ ), que é medido a partir do cruzamento com o zero da tensão, para conduzirem. Junto aos tiristores, é frequentemente utilizado um circuito de amortecimento (*Snubber*), que nada mais é que um resistor em série com um capacitor, cuja função é controlar os efeitos produzidos pelas reatâncias intrínsecas do circuito. Além disso, o circuito *Snubber* amortece oscilações, controla a taxa de variação da tensão e/ou corrente, e grampeia sobretensões (FRONTIN, 2013).

É demonstrado na Figura 13 a estrutura básica de *TCR*.

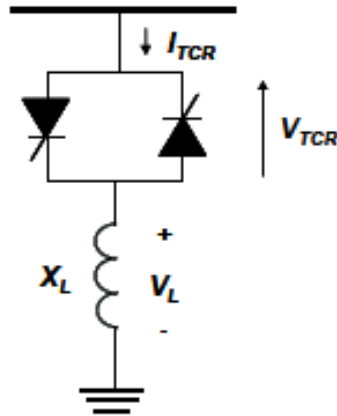


Figura 13 – Estrutura do TCR.

A condução do TCR é feita com o ângulo ( $\alpha$ ) de disparo maior que  $90^\circ$  e menor que  $180^\circ$ , valores de  $\alpha$  menores que  $90^\circ$  não são permitidos, pois produzem correntes assimétricas com uma componente de corrente DC (NATURESE, 2001). Com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) entre  $90^\circ$  e  $180^\circ$ , a condução da corrente é parcial, reduzindo-se com o aumento do  $\alpha$ , já com  $\alpha$  ligeiramente superior a  $90^\circ$ , a condução de corrente do TCR é máxima, logo, máxima potência reativa absorvida (JÚNIOR, 2008). Dessa forma, alterando-se o ângulo de disparo, o TCR se comporta como uma susceptância controlável (HINGORANI; GYUGYI, 2000).

A tensão quando o indutor está conduzindo é expressa pela equação:

$$V_L = V \sin(\omega t) = L \frac{di_{TCR}}{dt}; \quad (2.3)$$

A corrente quando o indutor está conduzindo é expressa pela equação (PASSOS, 2013):

$$I_{TCR}(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} V \sin(\omega t) dt = \frac{V}{\omega L} [\cos \alpha - \cos(\omega t)]; \quad (2.4)$$

A equação que descreve o comportamento da susceptância (B) é dada por (PASSOS, 2013):

$$B_{TCR}(\alpha) = \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi X_L}; \quad (2.5)$$

Quando o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) é igual a  $90^\circ$ , a susceptância (B) é dada pela equação:

$$B_{TCR} = \frac{1}{X_L}; \quad (2.6)$$

O valor mínimo para a susceptância (B) é quando o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) é igual a  $180^\circ$ , dessa forma, a susceptância é igual a zero.

E para determinar a potência reativa:

$$Q_{TCR} = V_{SVC}^2 B_{TCR}. \quad (2.7)$$

A medida que o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) é incrementado de  $90^\circ$  para  $180^\circ$ , a forma de onda da corrente torna-se cada vez menos senoidal. Dessa forma, o TCR passa a gerar harmônicos. Por isso é comumente utilizado o filtro de harmônicas (FRONTIN, 2013). Pode ser visualizado a forma de onda da corrente com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) igual a  $90^\circ$  (Figura 14) e igual a  $130^\circ$  (Figura 15).

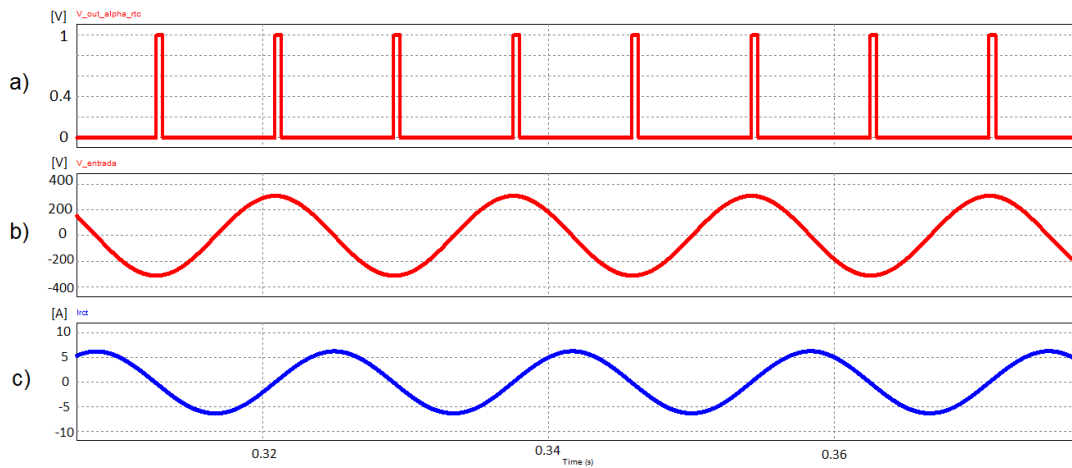


Figura 14 – a) Disparo dos tiristores com  $\alpha$  igual a  $90^\circ$  com duração do disparo de  $10^\circ$ ; b) Tensão de entrada  $220 \text{ Volts}_{rms}$ ; c) Corrente $_{TCR}$ .

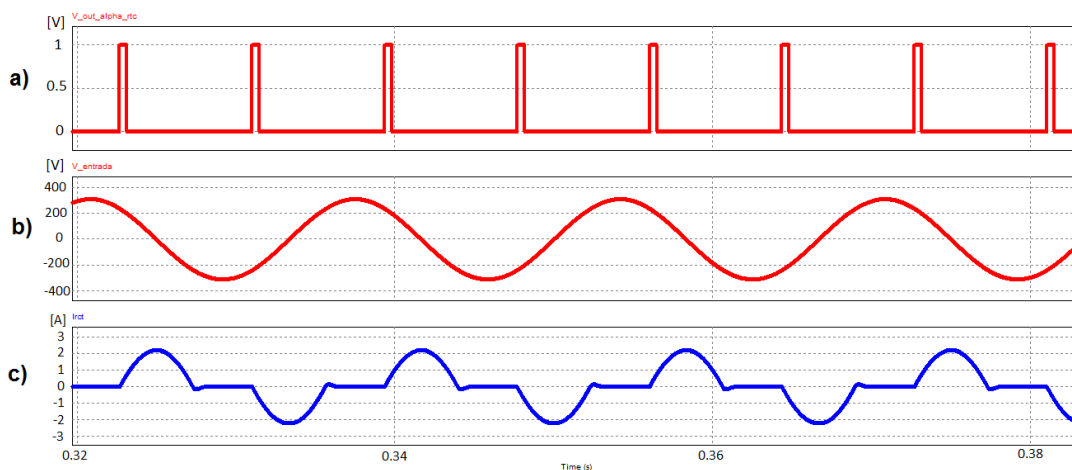


Figura 15 – a) Disparo dos tiristores com  $\alpha$  igual a  $130^\circ$  com duração do disparo de  $10^\circ$ ; b) Tensão de entrada  $220 \text{ Volts}_{rms}$ ; c) Corrente $_{TCR}$ .

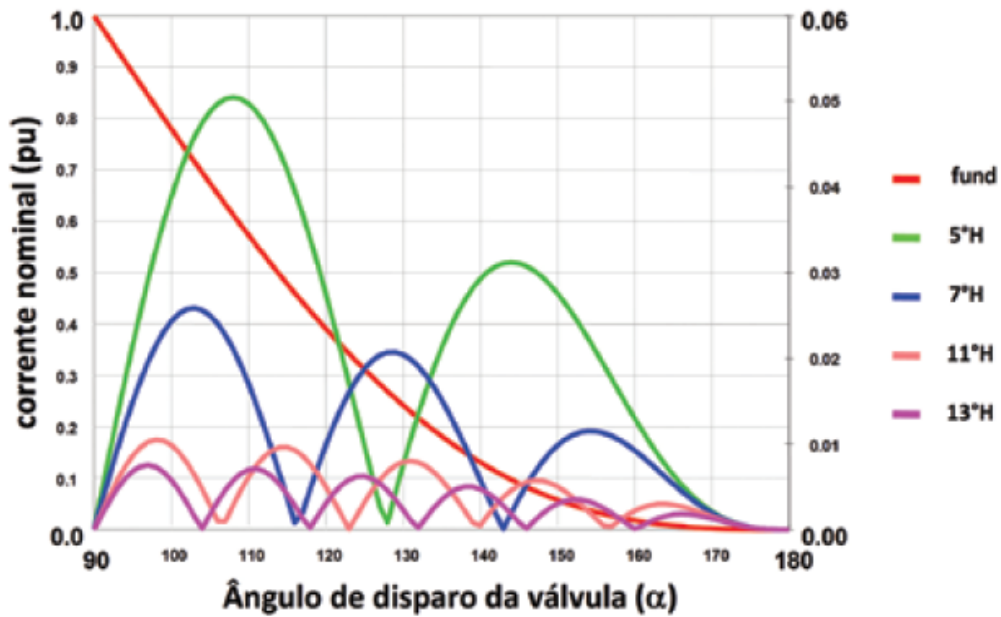


Figura 16 – Espectro de harmônicas geradas em função do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) do *TCR*.

A Figura 16 ilustra as harmônicas geradas de acordo com a variação do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) dos tiristores do *TCR*.

## 2.4 Capacitor Chaveado por Tiristor (*TSC*)

O *TSC* (*Thyristor Switched Capacitor*) é formado por um capacitor de valor fixo  $C$  em série com um pequeno indutor limitador de corrente e tiristores em anti-paralelo, mesma topologia do *TCR*. O reator em série tem como função limitar o transitório do chaveamento do capacitor e proteção contra ressonância com o sistema elétrico (BESSA, 2015).

Quanto maior a variação da tensão sobre o capacitor, maior será a corrente passando por ele. A equação que expressa a corrente do capacitor é dada por:

$$I_C(t) = C \frac{dV_C(t)}{dt}. \quad (2.8)$$

Os tiristores tem como finalidade exercer função de uma “chave eletrônica” com o objetivo de retirar e inserir os capacitores em um curto período de tempo. O chaveamento dos capacitores pode gerar valores elevados de transitórios dependendo da frequência de ressonância desses capacitores com a rede elétrica, portanto, deve-se ter um controle do ângulo de disparo ( $\alpha$ ) adequado, com o objetivo de minimizar os transitórios no chaveamento do *TSC* (PASSOS, 2013). Os tiristores operam apenas em dois estados: bloqueado

ou em condução total. Dessa forma, no *TSC*, ou os capacitores estão conectados no sistema ou estão desconectados, ou seja, não há controle de reatância capacitiva e, sim, apenas o controle da manobra de inserção do banco de capacitores. (JÚNIOR, 2008).

O momento no qual ocorre o disparo do tiristor para que o capacitor seja conectado ao SEP corresponde ao estado que a tensão da barra é igual a zero, ou seja, com a corrente no seu valor de pico (JÚNIOR, 2008). Contudo, o instante em que ocorre o fechamento do tiristor, coincide ao estado no qual a corrente da barra passa por zero, com a finalidade de evitar sobrecorrentes de chaveamento nos tiristores (PASSOS, 2013) (FRONTIN, 2013).

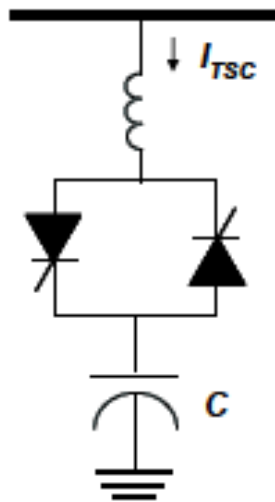


Figura 17 – Estrutura do *TSC*.

## 2.5 Sistema de Controle

O sistema de Controle é responsável por realizar o acionamento do *TCR* e do *TSC* no momento adequado, para exercer o controle da tensão da barra (rede elétrica) e, conseqüentemente, da potência reativa do sistema. Por consequência, quanto mais preciso for realizado o controle, e acionamento dos módulos, melhor será a resposta do *SVC* no controle das variáveis almeçadas.

O bloco de controle do *SVC* é um sistema de controle convencional, composto por um sistema de medição, um somador, um regulador, um controlador PI e um atuador. Na Figura 6, tem-se o diagrama com os elementos básicos do *SVC*.

Além dos elementos básicos que compõe o sistema de controle do *SVC*, é de extrema importância o filtro de harmônicas, em razão do chaveamento do *TCR* produzir várias harmônicas, como foi mostrado na Figura 16. Também, devido ao chaveamento do *TSC*, o circuito *Snubber* é de grande relevância, pois tem a finalidade de reduzir a variação brusca de tensão sobre os terminais do tiristor quando o mesmo deixa de conduzir (podendo

provocar novo disparo).

A Figura ilustrativa 18, apresenta um diagrama esquemático do SVC.

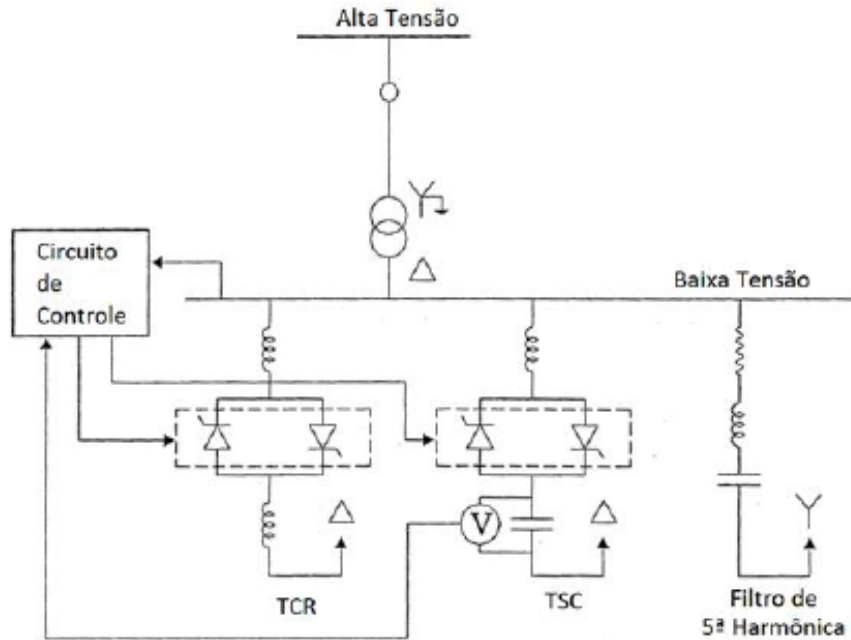


Figura 18 – Diagrama para modelagem do SVC.

Como pode-se visualizar na Figura 18, o Circuito de Controle é responsável por gerar pulsos de disparo dos tiristores. A figura 19 ilustra como é a atuação do Circuito de Controle. Há uma unidade de medição conectada à barra de baixa tensão. Esse medidor realiza a mensuração da tensão na barra ( $V_{entrada-label}$ ), que será comparado a um valor de referência ( $V_{ref}$ ). A diferença dessa aferição é o erro de tensão, que é processado por um controlador proporcional integral (PI), passando em seguida por um regulador, limitando o valor máximo (capacitivo) e mínimo (indutivo). O sinal resultante destas operações corresponde a um valor proporcional de controle do SVC, chamado de  $alpha_{control}$ . Na figura 19 é demonstrado o esquemático.

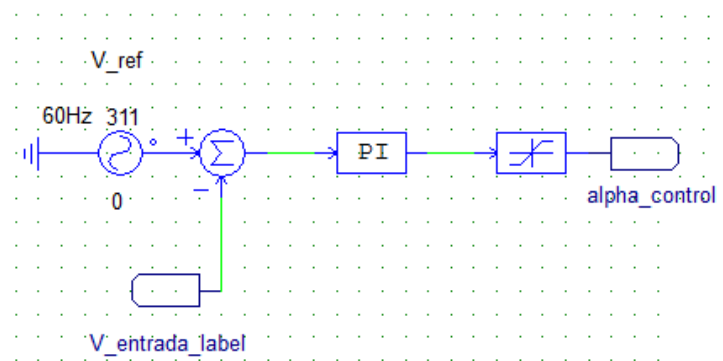


Figura 19 – Diagrama da unidade de controle dos tiristores do SVC.

Depois da aquisição do  $\alpha_{control}$ , pulsos de disparo, atualizados a cada ciclo, em sincronia com a tensão da rede são aplicados nos tiristores do *SVC*, aumentando ou diminuindo o ângulo de disparo, ou o tempo de condução, do *TCR* em cada semi-ciclo e conectando ou retirando, caso seja necessário, o *TSC* (PASSOS, 2013).



## 3 Simulações Computacionais e Resultados Parciais

### 3.1 Software de Simulação

O *PSIM* é um software de simulação de circuitos eletrônicos de alto desempenho, projetado para uso em eletrônica de potência. Ideal para simulações de conversores e condicionadores de energia, acionamentos de máquinas elétricas, sistema de energia renovável e dentre outras aplicações relacionadas a área da eletrônica de potência (OHMINI, 2013).

Além da plataforma básica e intuitiva de simulação, o *PSIM* possui módulos adicionais específicos para atender as demandas de cada um de seus clientes: Motor Drive, Digital Control, Sim Coupler, Thermal, Renewable Energy, Motor Control Design Suite, SmartCtrl e dentre outros. Isso faz com que as simulações sejam precisas e de fácil utilização. (PWERSIM, 2017).

O *PSIM* possui um compilador C integrado que permite inserir programação em C diretamente sem a necessidade de ferramentas de programação externas, Desta forma, fica fácil associar funções dedicadas para realizar o sistema de controle aos sistemas eletrônicos (OHMINI, 2013).

Para análise dos resultados de simulação, o *PSIM* possui uma módulo dedicado para o mesmo, o módulo *SIMVIEW*, com interface intuitiva e muito simples de utilizar.

Por esses motivos, foi escolhido o Software *PSIM*, em sua versão educacional para as simulações referentes ao SEP com o *SVC*, e sem o mesmo.

### 3.2 Sistema Simulado

Essa seção tem como objetivo apresentar as simulações desenvolvidas com a finalidade de analisar o desempenho de um *SVC*, caso fosse instalado na barra de uma linha de transmissão laboratorial de  $220 V_{rms}$ . Para tanto, são propostos três casos a serem explorados:

- Caso 1: Linha de Transmissão sem o *SVC*;
- Caso 2: Linha de Transmissão com o *TSC*;
- Caso 3: Linha de Transmissão com o *TSC* e o *TCR*.

Vale destacar que não foi utilizado o sistema de controle dinâmico apresentado no capítulo anterior. O controle dos tiristores foi realizado utilizando a ferramenta Alpha Controller do PSIM, que funciona com três entradas e uma saída. Uma entrada de sincronização, onda quadrada na mesma frequência da tensão da barra; uma entrada de enable; e por fim uma entrada que determina o ângulo de disparo. Configura-se internamente a ferramenta determinando a duração dos pulsos. Dessa forma, foi gerado o sinal de controle dos tiristores do *TCR* e do *TSC*.

A Figura 20 ilustra o diagrama da Linha de Transmissão, com a Fonte de Tensão, a impedância característica da linha, as cargas conectadas à barra e o Compensador Estático de Reativos.

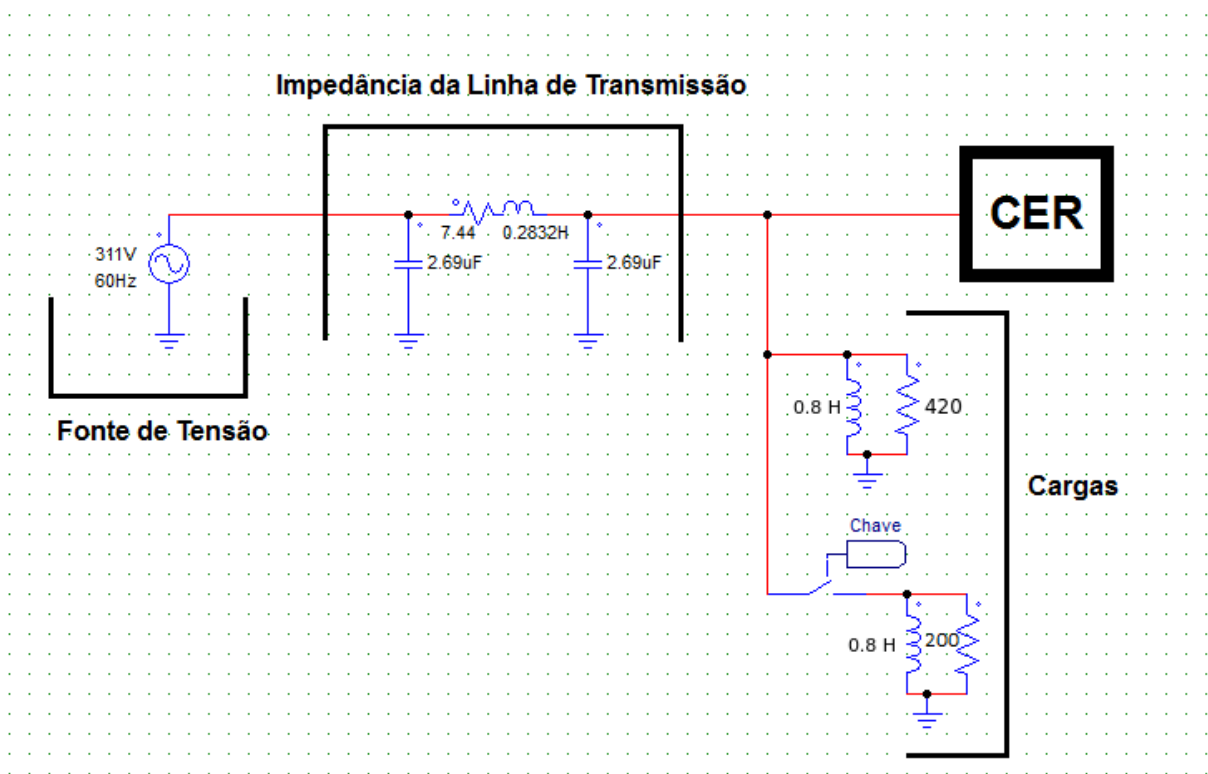


Figura 20 – Diagrama genérico do sistema simulado.

Na Tabela 1 mostra-se as impedâncias características da linha de transmissão utilizada nas simulações.

Tabela 1 – Impedâncias da Linha de Transmissão

Resistência [ $\Omega$ ]	Capacitância [ $\mu\text{F}$ ]	Indutância [H]
7,44	5,38	0,2832

Para análise da tensão, corrente e potência reativa da barra, foram utilizadas

duas cargas, uma já conectada a linha de transmissão (Tabela 2), e outra conectada posteriormente (Tabela 3).

Tabela 2 – Carga Conectada Inicialmente

Resistência [ $\Omega$ ]	Indutância [H]
420	0,8

Tabela 3 – Carga Conectada Posteriormente

Resistência [ $\Omega$ ]	Indutância [H]
200	0,8

Os valores do capacitor e indutor utilizados no *SVC* são mostrados na Tabela 4. São utilizados em série com uma resistência de 0,5  $\Omega$ .

Tabela 4 – Capacitância e Indutância do *SVC*

Capacitância [ $\mu\text{F}$ ]	Indutância [H]
50	0.5

Para os valores de indutância e capacitância escolhidos, de acordo com a Equação 2.7, a potência reativa é de, respectivamente:

$$Q_{TCR} = \frac{220^2}{168,5}$$

$$Q_{TCR} = 287,24 \text{ VAr.}$$

$$Q_{TSC} = \frac{220^2}{53,50}$$

$$Q_{TSC} = 912,34 \text{ VAr.}$$

A análise de desempenho do *SVC* foi dividida em duas partes. Foi feito o estudo do comportamento do *TSC* quando conectado à barra. Posteriormente foi realizado o estudo do chaveamento do *TCR* na barra. Para o *TCR*, foi utilizado o *TSC* para se obter uma melhor análise. Foram escolhidos três valores para o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) do tiristor do *TCR*: 90°, 120° e 150°.

### 3.2.1 Caso 1: Linha de Transmissão sem o SVC

Primeiramente, foi feita a análise da tensão, corrente e potência reativa da barra sem o *SVC*. A carga foi adicionada no instante 0,6 segundos. O circuito utilizado é exposto na Figura 21

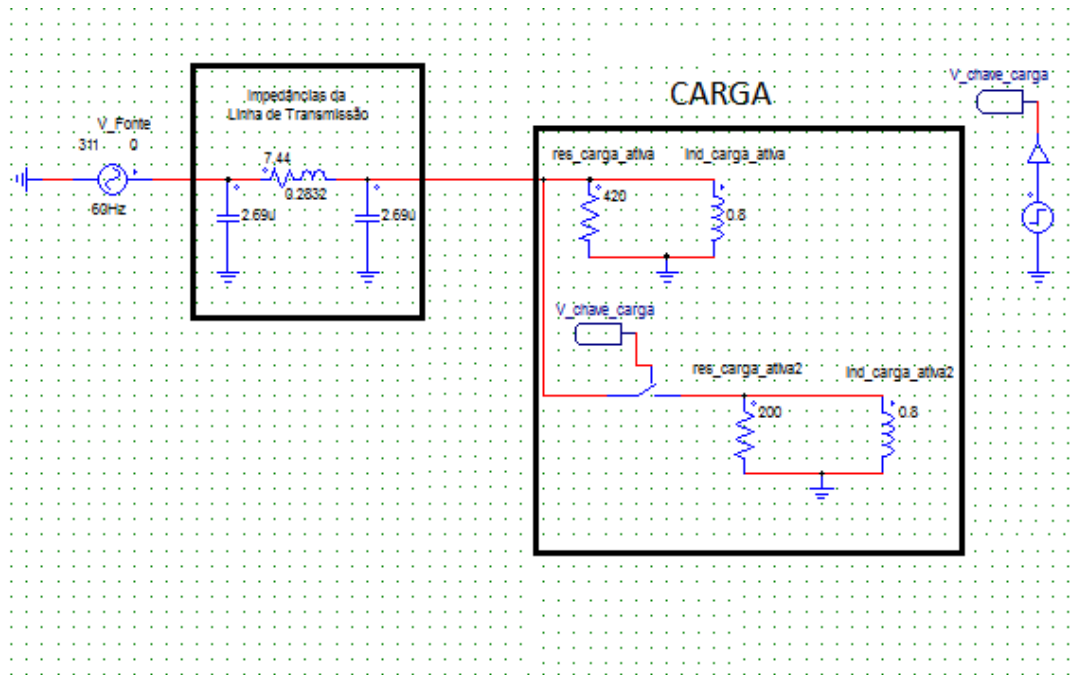


Figura 21 – Circuito simulado no *PSIM* sem o *SVC*.

O gráfico da tensão, corrente e potência reativa da barra sem o *SVC* é demonstrado na Figura 22.

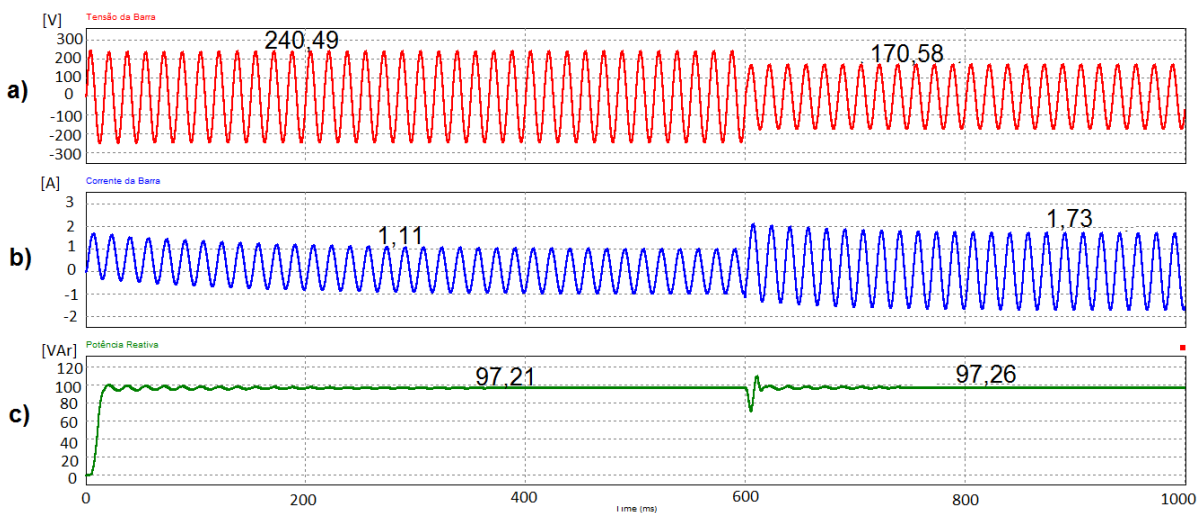


Figura 22 – a) Tensão do SEP; b) Corrente do SEP; c) Potência reativa.

No começo, a tensão da barra é de  $240,49 V_{pico}$ , devido a natureza indutiva da carga inserida ao SEP. Quando a segunda carga é conectada à barra, a tensão decaí para  $170,68 V_{pico}$ . A fonte de tensão é de  $311 V_{pico}$ .

### 3.2.2 Caso 2: Linha de Transmissão com o TSC

O circuito utilizado para modelagem do TSC é exposto nas Figuras 23 e 24.

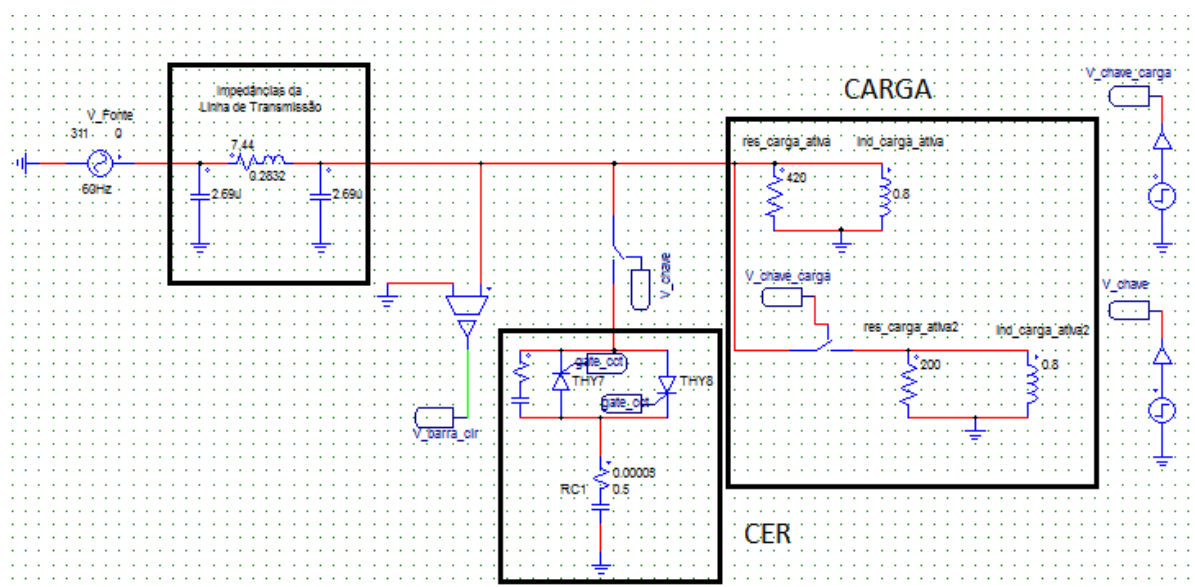


Figura 23 – Circuito simulado no *PSIM* com o TSC.

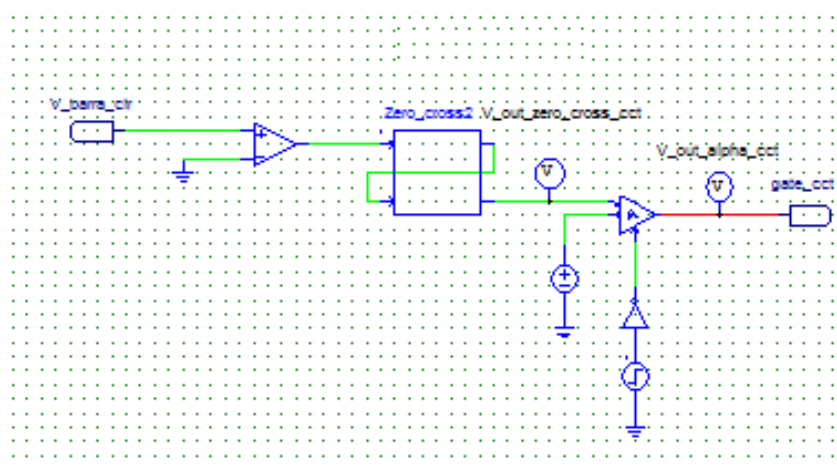


Figura 24 – Circuito simulado no *PSIM* com o controlador dos tiristores do TSC.

Os gráficos de tensão da barra e tensão da fonte com a adição do TSC são demonstrados na Figura 25. Os gráficos da corrente de barra, corrente do SVC e corrente da carga são demonstrados na Figura 26. Os gráficos de potência ativa e potência reativa

do SEP são demonstrados na Figura 25. A carga foi conectada no instante 0,3 segundos, o *TSC* foi adicionado no instante 0,6 segundos.

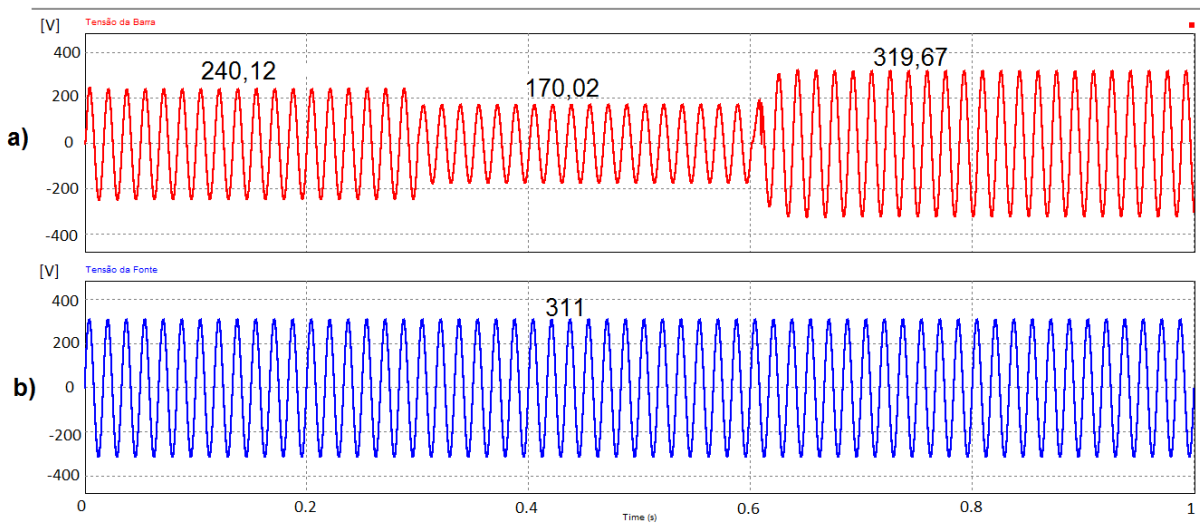


Figura 25 – a) Tensão da Barra; b) Tensão da Fonte.

Inicialmente, a tensão da barra é de  $240,1 V_{pico}$ , devido a natureza indutiva da carga inserida ao SEP. Em 0,3 segundos, quando a segunda carga é conectada à barra, a tensão sofre um decaimento para  $170 V_{pico}$ . No instante 0,6 segundos, o *TSC* é adicionado à barra, elevando a tensão da barra para  $319,67 V_{pico}$ . A tensão da fonte é de  $311_{pico}$ .

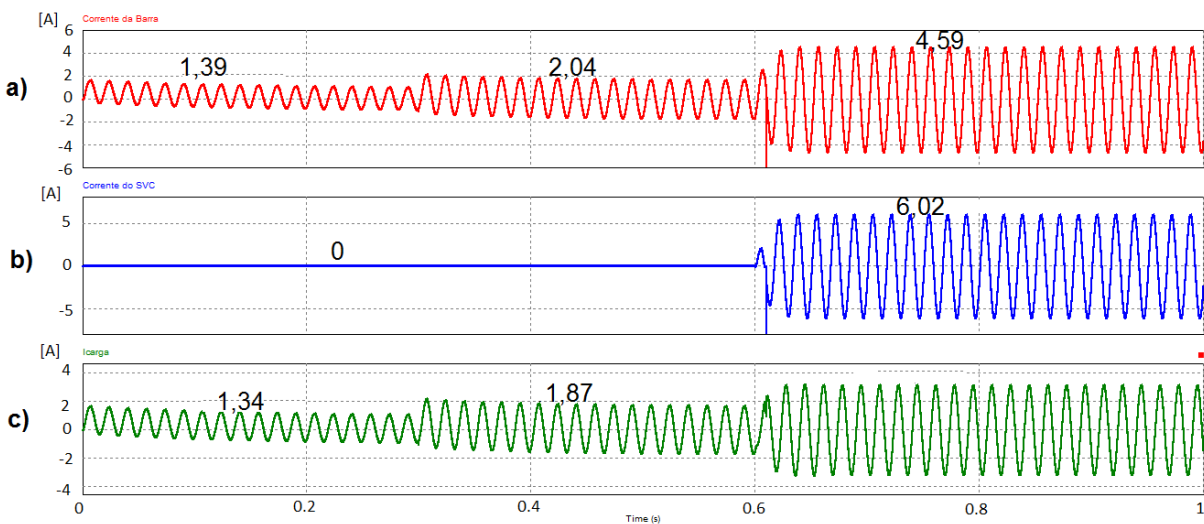


Figura 26 – a) Corrente da Barra; b) Corrente do *SVC*; c) Corrente da Carga.

De acordo com a Figura 26, quando o *TSC* é inserido ao SEP, pode-se observar que é adicionada corrente capacitiva ao sistema. A corrente da carga é elevada de  $1,87 A$  para  $3,18 A$ .

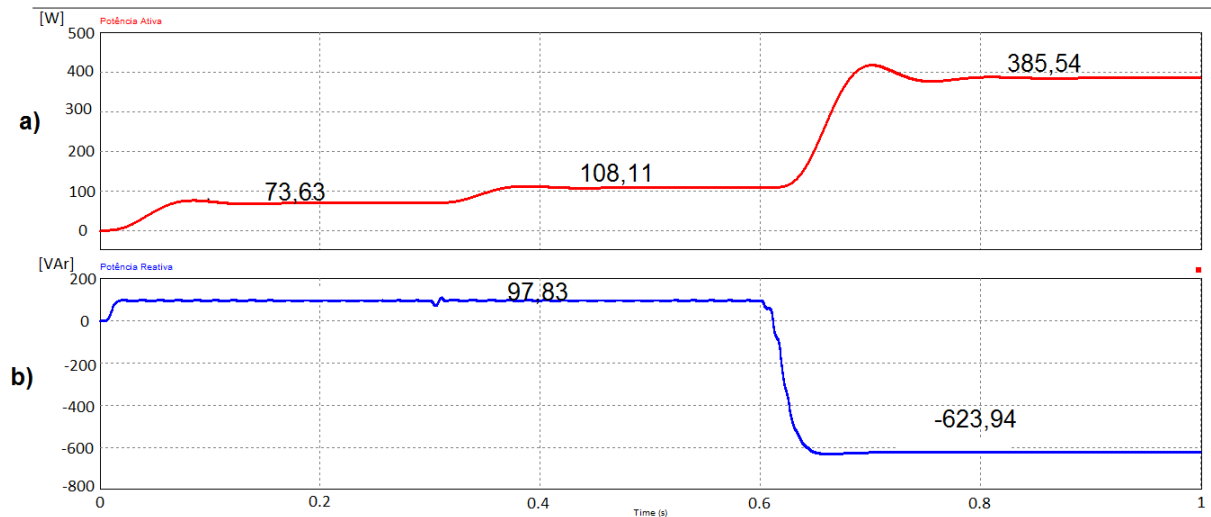


Figura 27 – a) Potência Ativa; b) Potência Reativa.

Na Figura 27, quando o *TSC* é inserido ao SEP, a potência ativa é elevada de 108,1 W para 385,5 W. Já a potência reativa decai de 97,83 VAr para -623,94 VAr.

O capacitor do *TSC* foi adicionado ao sistema no instante em que tensão da barra passa por zero, e retirado quando o valor da corrente é aproximadamente igual a zero. O ângulo de disparo dos tiristores do *TSC* é demonstrado na figura 28.

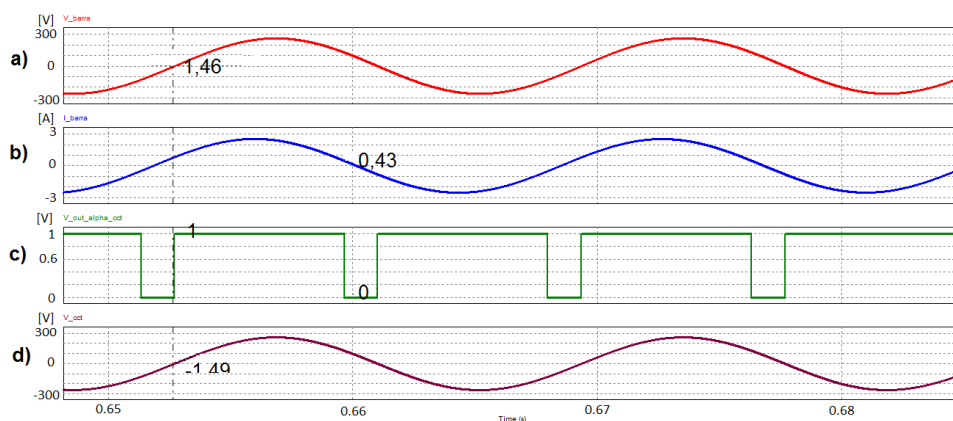


Figura 28 – Disparo dos tiristores do *TSC*.

### 3.2.3 Caso 3: Linha de Transmissão com o *TSC* e o *TCR*

O circuito utilizado para modelagem do *TSC* e do *TCR* é exposto nas Figuras 29 e 24.

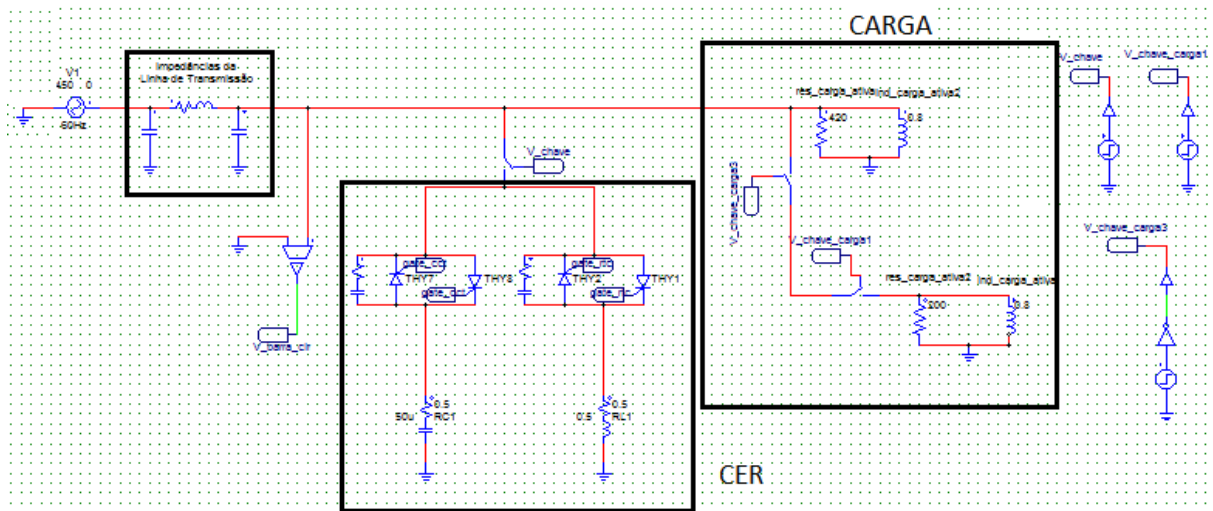


Figura 29 – Circuito Simulado no *PSIM* com o *TSC* e o *TCR*.

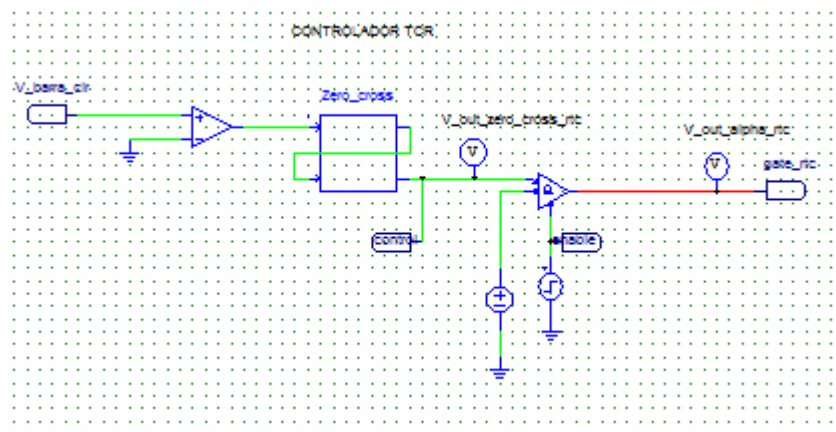


Figura 30 – Circuito simulado no *PSIM* com o controlador dos tiristores do *TCR*.

Para realizar uma análise adequada do *TCR*, utilizou-se o *TSC* em conjunto no SEP. O sistema elétrico simulado possui uma fonte de tensão com valor nominal de 450  $V_{pico}$  e uma carga (resistor em paralelo com um indutor) já conectada. Em 0,1 segundos, a segunda carga é conectada à barra. Em 0,4 segundos, o *TSC* é inserido ao sistema. Em 0,6 segundos, a carga conectada anteriormente é retirada do sistema. Em 0,8 segundos, é retirado o *TSC* do sistema e o *TCR* é inserido ao mesmo. Dessa forma, é feito o estudo do desempenho do *TCR* no SEP simulado.

Foram utilizados 3 (três) valores para o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) dos tiristores do *TCR*:  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $150^\circ$ . Para cada ângulo de disparo ( $\alpha$ ) é demonstrado os gráficos de tensão da barra, tensão da fonte, corrente da barra, corrente do *SVC*, corrente da carga, potência ativa e potência reativa do SEP simulado.



Para o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) igual a  $90^\circ$ , os gráficos de tensão da barra e tensão da fonte são demonstrados na Figura 31. Os gráficos de corrente da barra, corrente do SVC e corrente da carga são demonstrados na Figura 32. Os gráficos de potência ativa e potência reativa do SEP são demonstrados na Figura 33.

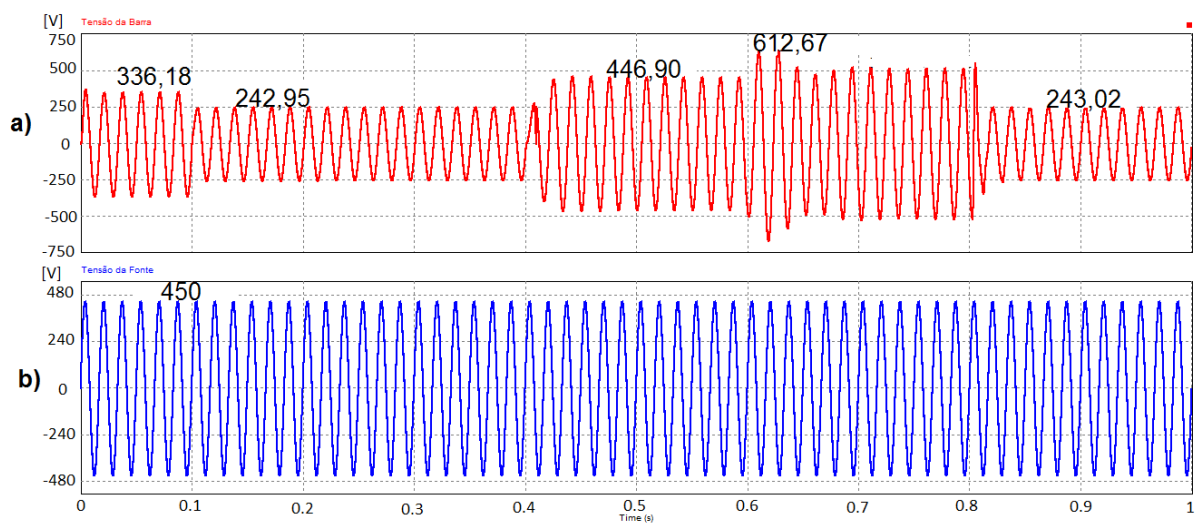


Figura 31 – a) Tensão da Barra; b) Tensão da Fonte.

Inicialmente, a tensão da barra é de  $336,18 V_{pico}$ , devido a natureza indutiva da carga já conectada ao SEP. Em 0,1 segundos, quando a segunda carga é conectada à barra, a tensão sofre um decaimento para  $242,95 V_{pico}$ . No instante 0,4 segundos, o TSC é adicionado à barra, elevando a tensão para  $446,90 V_{pico}$ . Em 0,6 segundos, a carga conectada no instante 0,1 segundos, é retirada do sistema, fazendo com que a tensão seja elevada para  $612,67 V_{pico}$  por um curto período de tempo, logo em seguida o TSC ajusta o valor da tensão para  $481,86 V_{pico}$ . Em 0,8 segundos, o TSC é retirado do sistema e o TCR é inserido ao mesmo, ocasionando um decaimento no valor da tensão para  $243,02 V_{pico}$ . A tensão da fonte é de  $450_{pico}$ .

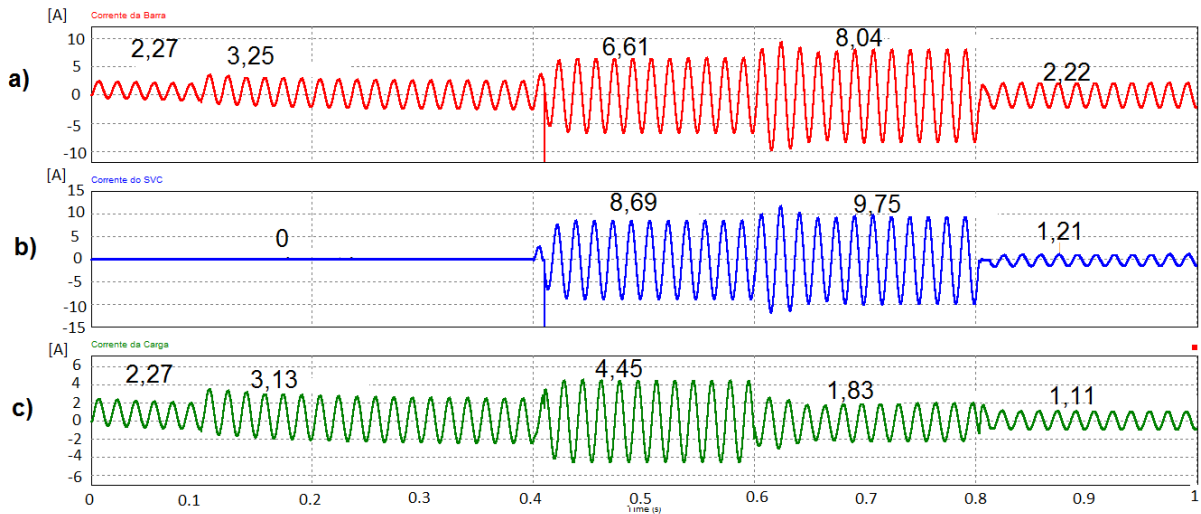


Figura 32 – a) Corrente da Barra; b) Corrente do SVC; c) Corrente da Carga.

De acordo com a Figura 32, quando o TCR é inserido ao SEP, pode-se observar que é absorvida corrente indutiva do sistema. A corrente da carga decaí de 1,83 A para 1,11 A.

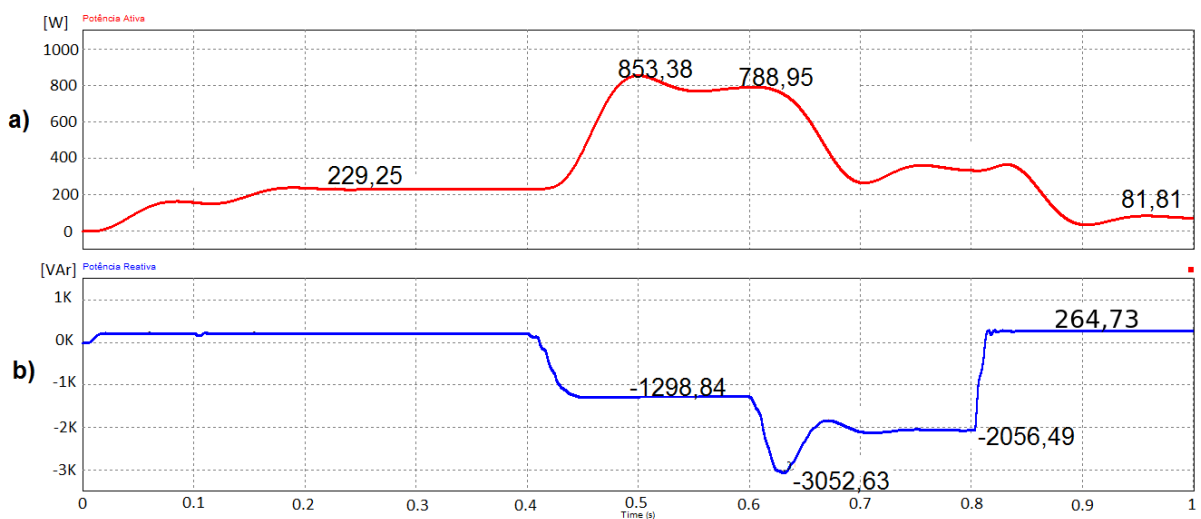


Figura 33 – a) Potência Ativa; b) Potência Reativa.

Na Figura 33, quando o TSC é inserido ao sistema, o valor da potência ativa sobe de 229,56 W para 853,38 e o valor da potência reativa decaí de 210,63 VAR para -1298,84 VAR. Quando a carga com natureza indutiva é retirada do sistema, em 0,6 segundos, a potência reativa tem um pico de decaimento para -3052,63 VAR, logo em seguida o TSC ajusta o valor da potência reativa para -2056,49 VAR. Em 0,8 segundos, instante em que o TSC é retirado do sistema e o TCR é conectado ao mesmo, o valor da potência reativa é elevada para 264,73 VAR.

Variando o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) dos tiristores do *TCR* para  $120^\circ$ , foram obtidos resultados semelhantes até o instante em que o *TCR* é inserido ao sistema, em 0,8 segundos. Os gráficos de tensão da barra e tensão da fonte são demonstrados na Figura 34. Os gráficos de corrente da barra, corrente do *SVC* e corrente da carga são demonstrados na Figura 35. Os gráficos de potência ativa e potência reativa do SEP são demonstrados na Figura 36.

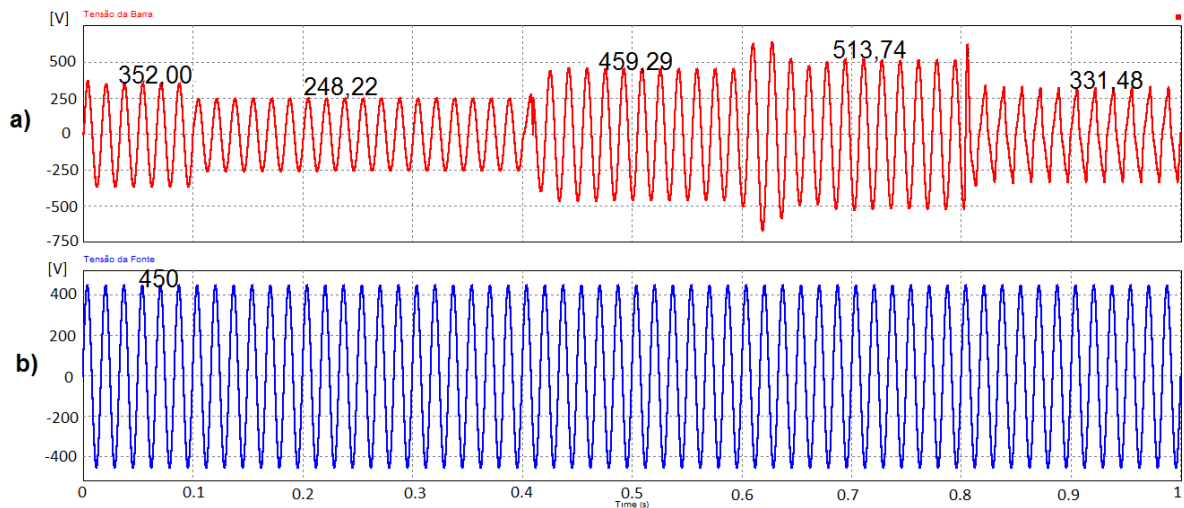


Figura 34 – a) Tensão da Barra; b) Tensão da Fonte.

Inicialmente, a tensão da barra é de  $352,00 V_{pico}$ , devido a natureza indutiva da carga já conectada ao SEP. Em 0,1 segundos, quando a segunda carga é conectada à barra, a tensão sofre um decaimento para  $248,22 V_{pico}$ . No instante 0,4 segundos, o *TSC* é adicionado à barra, elevando a tensão para  $459,29 V_{pico}$ . Em 0,6 segundos, a carga conectada no instante 0,1 segundos, é retirada do sistema, fazendo com que a tensão seja elevada para  $639,38 V_{pico}$  por um curto período de tempo, logo em seguida o *TSC* ajusta o valor da tensão para  $513,74 V_{pico}$ . Em 0,8 segundos, o *TSC* é retirado do sistema e o *TCR* é inserido ao mesmo, ocasionando um decaimento no valor da tensão para  $331,48 V_{pico}$ . A tensão da fonte é de  $450_{pico}$ .

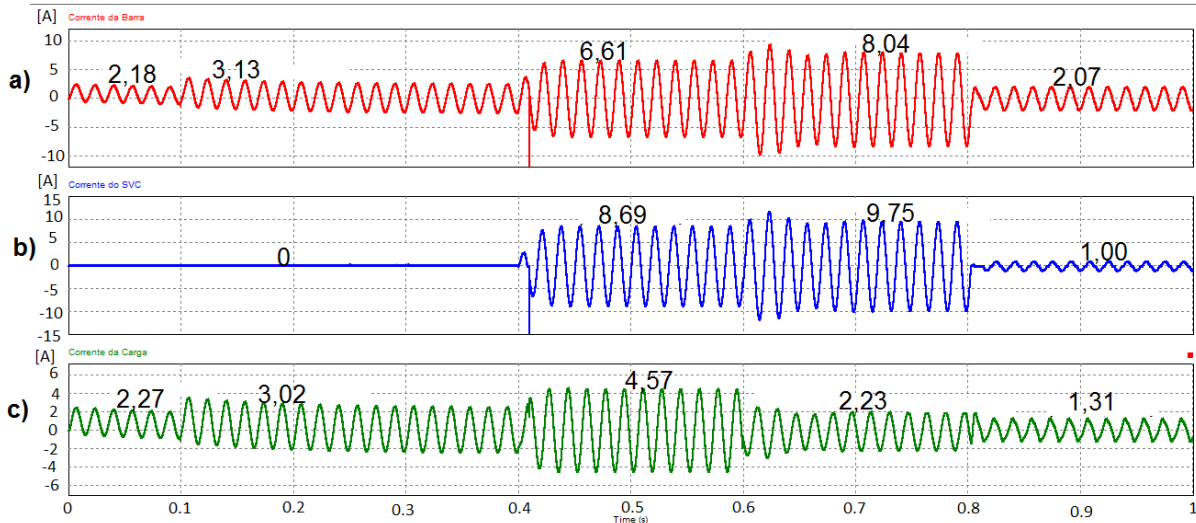


Figura 35 – a) Corrente da Barra; b) Corrente do SVC; c) Corrente da Carga.

De acordo com a Figura 35, quando o TCR é inserido ao SEP, pode-se observar que é absorvida corrente indutiva do sistema. A corrente da carga decaí de 2,23 A para 1,31 A.

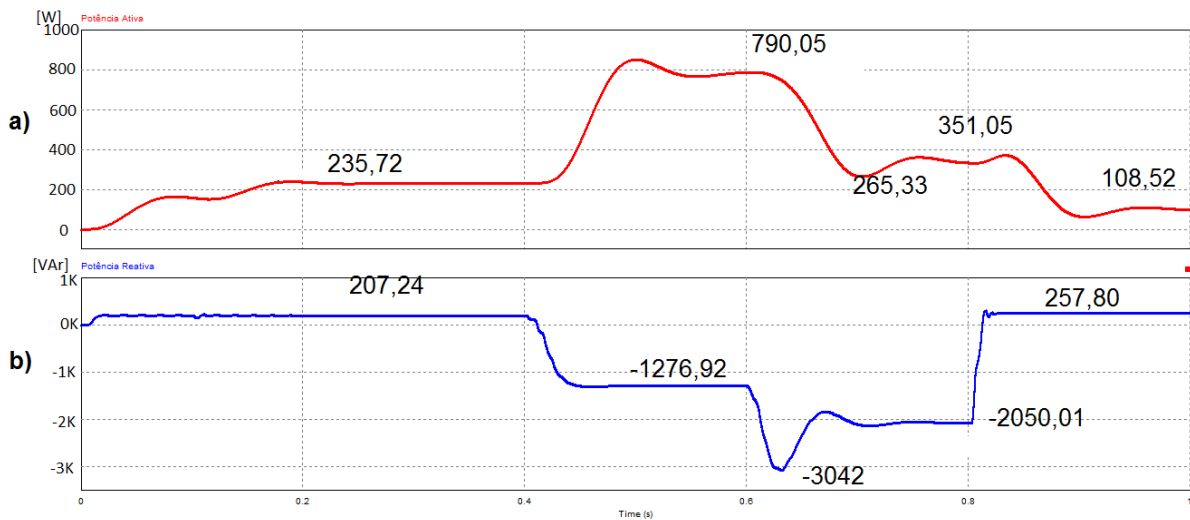


Figura 36 – a) Potência Ativa; b) Potência Reativa.

Na Figura 36, quando o TSC é inserido ao sistema, o valor da potência ativa sobe de 232,72 W para 790,05 e o valor da potência reativa decaí de 207,24 VAr para -1276,92 VAr. Quando a carga com natureza indutiva é retirada do sistema, em 0,6 segundos, a potência reativa tem um pico de decaimento para -3042 VAr, logo em seguida o TSC ajusta o valor da potência reativa para -2050,01 VAr. Em 0,8 segundos, instante em que

o *TSC* é retirado do sistema e o *TCR* é conectado ao mesmo, o valor da potência reativa é elevada para 257,80 VAR.

Modificando o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) dos tiristores do *TCR* para  $150^\circ$ , foram obtidos resultados semelhantes aos apresentados anteriormente até o instante de 0,8 segundos, momento em que o *TCR* é inserido ao sistema. Os gráficos de tensão da barra e tensão da fonte são demonstrados na Figura 37. Os gráficos de corrente da barra, corrente do *SVC* e corrente da carga são demonstrados na Figura 38. Os gráficos de potência ativa e potência reativa do SEP são demonstrados na Figura 39.

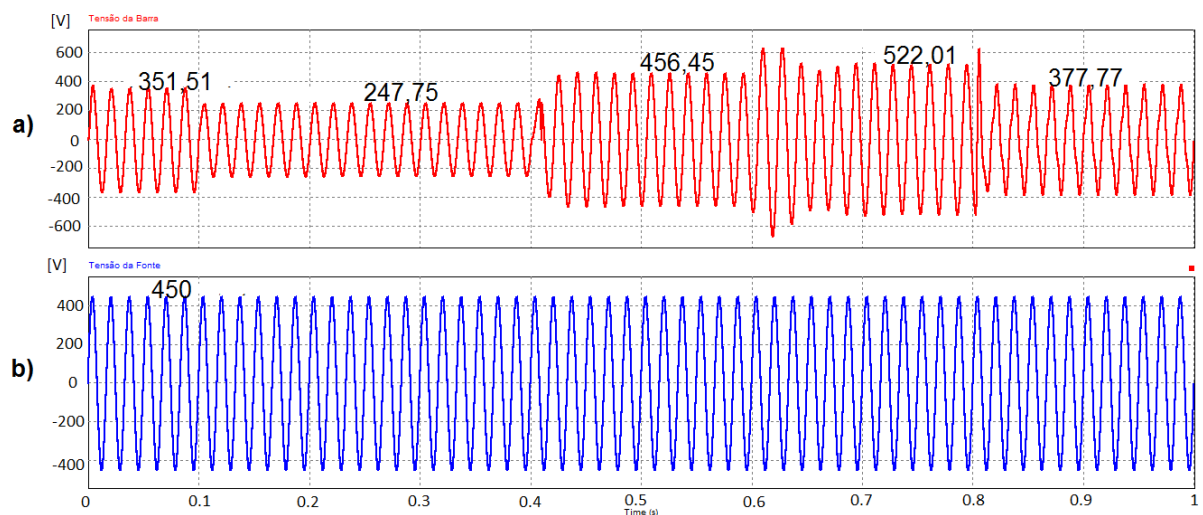


Figura 37 – a) Tensão da Barra; b) Tensão da Fonte.

Inicialmente, a tensão da barra é de  $351,51 V_{pico}$ , devido a natureza indutiva da carga já conectada ao SEP. Em 0,1 segundos, quando a segunda carga é conectada à barra, a tensão sofre um decaimento para  $247,75 V_{pico}$ . No instante 0,4 segundos, o *TSC* é adicionado à barra, elevando a tensão para  $456,45 V_{pico}$ . Em 0,6 segundos, a carga conectada no instante 0,1 segundos, é retirada do sistema, fazendo com que a tensão seja elevada para  $629,03 V_{pico}$  por um curto período de tempo, logo em seguida o *TSC* ajusta o valor da tensão para  $522,01 V_{pico}$ . Em 0,8 segundos, o *TSC* é retirado do sistema e o *TCR* é inserido ao mesmo, ocasionando um decaimento no valor da tensão para  $377,77 V_{pico}$ . A tensão da fonte é de  $450_{pico}$ .

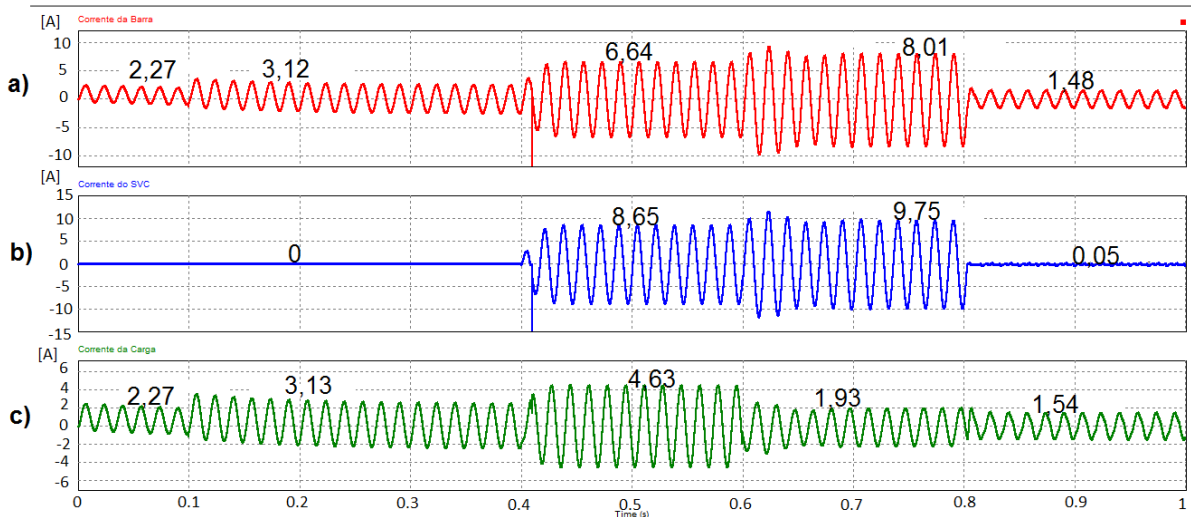


Figura 38 – a) Corrente da Barra; b) Corrente do SVC; c) Corrente da Carga.

De acordo com a Figura 38, quando o TCR é conectado ao SEP, pode-se observar que é absorvida corrente indutiva do sistema. A corrente da carga decaí de 1,93 A para 1,54 A.

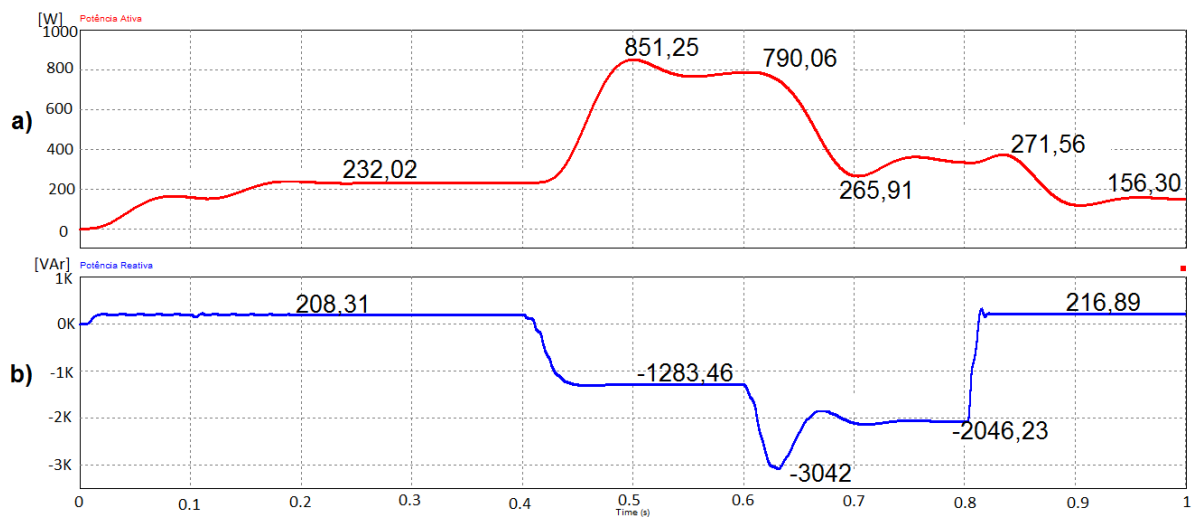


Figura 39 – a) Potência Ativa; b) Potência Reativa.

Na Figura 39, quando o TSC é inserido ao sistema, o valor da potência ativa sobe de 232,02 W para 851,25 e o valor da potência reativa decaí de 208,83 VAr para -1283,46 VAr. Quando a carga com natureza indutiva é retirada do sistema, em 0,6 segundos, a potência reativa tem um pico de decaimento para -3042 VAr, logo em seguida o TSC ajusta o valor da potência reativa para -2046,23 VAr. Em 0,8 segundos, instante em que

o *TSC* é retirado do sistema e o *TCR* é conectado ao mesmo, o valor da potência reativa é elevada para 216,89 VAr.

Analisando os resultados obtidos referentes a potência reativa, pode-se observar que quando aumenta-se o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) dos tiristores do *TCR* de  $90^\circ \rightarrow 120^\circ \rightarrow 150^\circ$ , a quantidade de potência reativa injetada na barra é reduzida.

Observando os resultados adquiridos referentes a tensão da barra e corrente da barra, pode-se constatar que quanto menor o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) dos tiristores do *TCR*, maior é a absorção de corrente indutiva da carga, dessa forma, maior é o decaimento do valor da tensão da barra.





## 4 Resultados Experimentais

Para o projeto, foi feita a análise experimental do funcionamento do *SVC* utilizando o osciloscópio de bancada do Laboratório de Qualidade de Energia da UnB, Campus Darcy Ribeiro, averiguando a tensão do indutor do *TCR*. O módulo *TSC* é inserido ao sistema por meio de um botão, podendo selecionar se o capacitor vai estar acoplado ao sistema ou não. O chaveamento do Triac do *TCR* foi realizado de forma estática, selecionando o ângulo de disparo por meio de três botões conectados ao Arduino Mega.

Foi escolhido o Arduino Mega 2560 para ser a controladora do projeto pela facilidade de ser programada pela Arduino IDE e pelo seu clock de 16MHz, dessa forma sendo possível o trabalho de acionamento do Triac por meio de um circuito de Detecção de Passagem por Zero.

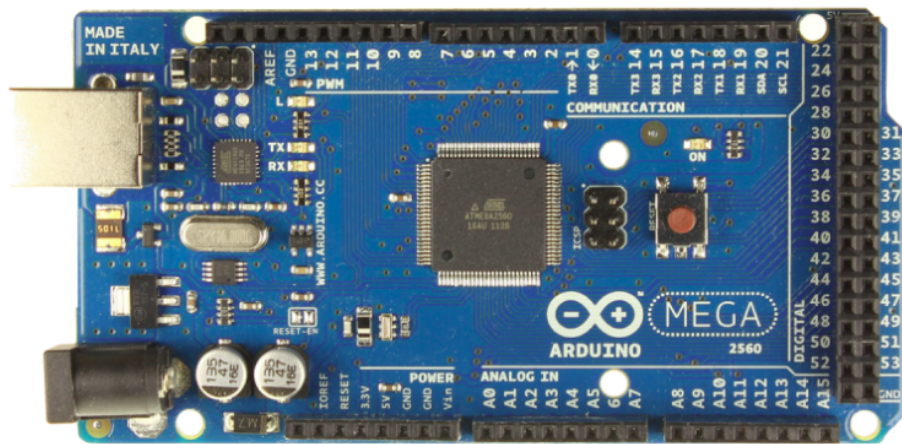


Figura 40 – Arduino Mega 2560

O circuito de Detecção de Passagem por Zero é composto por um retificador de tensão, para rebater o semi-ciclo negativo para cima, um circuito isolador, composto por um acoplador óptico, um resistor de Pull-Up e um circuito buffer Schmitt-Trigger. A saída do circuito de Detecção de Passagem por Zero emite um pulso de curta duração (1,38ms).

Antes do sinal da rede elétrica ser inserido no circuito de Detecção de Passagem por Zero, foi utilizado um transformador abaixador de  $220/127 V_{rms}$  para  $12 V_{rms}$ .

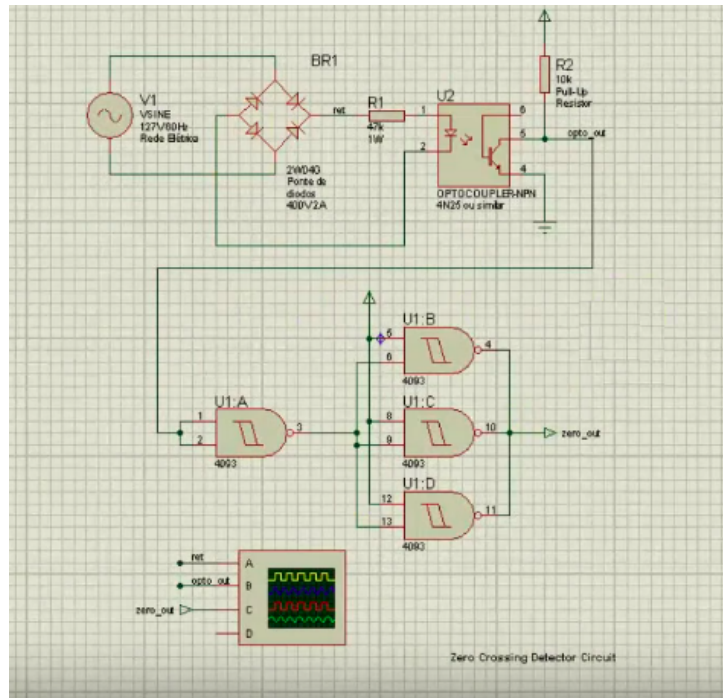


Figura 41 – Simulação do circuito de Detecção de Passagem por Zero.

O circuito integrado 4n25 é, de fato, o realizador da detecção de passagem por zero. Após o sinal ser retificado pela ponte retificadora, sempre que o sinal estiver superior a 0,7 V, o led interno do 4n25 vai estar conduzindo, logo o transistor interno vai estar saturado, fazendo com o pino 5 do CI 4n25 tenha 0 V. A medida que a tensão retificada vai se aproximando de zero, o led para de conduzir, dessa forma desligando o transistor interno, fazendo com que no pino 5 do CI 4n25 tenha 5 V, garantido pelo resistor de Pull-Up. O buffer Schmitt-Trigger (CI 4093) é utilizado para assegurar que o pulso na detecção de passagem por zero seja livre de histerese e de ruídos, um sinal que o Arduino Mega consiga interpretar perfeitamente.

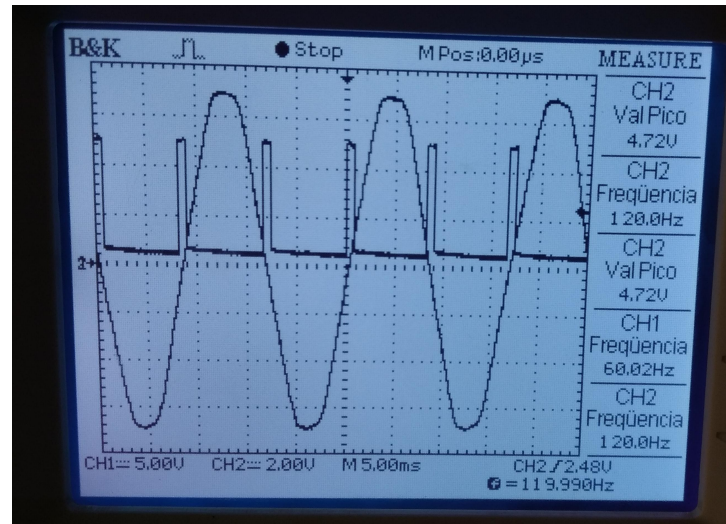


Figura 42 – Pulso de saída do circuito de Detecção de Passagem por Zero.

Na figura 42, por meio do osciloscópio, é mostrado o sinal de saída do circuito de detecção de passagem por zero no canal 2, no canal 1 é exibido o sinal da rede elétrica após passar pelo transformador abaixador de  $12 V_{rms}$ .

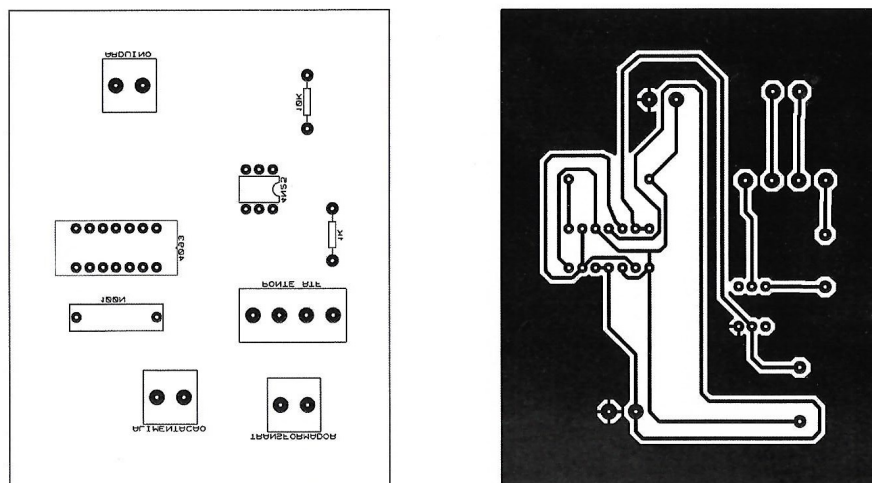


Figura 43 – Layout da placa de Detecção de Passagem por Zero.

Na figura 43, podemos ver a o layout da placa de Detecção de Passagem por Zero, ela foi confeccionada pelo método de transferência térmica, o layout da placa foi realizado pelo software Proteus 8.

O pulso de detecção de passagem por zero é inserido na porta digital 2 do Arduino Mega, pelo fato da porta ser utilizada para interrupção externa. Quando o Arduino realiza a leitura do pulso, ocorre um interrupção externa, realizando a chamada de uma função que realiza o disparo do Triac do *TCR*, com base no ângulo de disparo ( $\alpha$ ) selecionado

por meio de três botões (90°, 120° e 150°). A duração do pulso é de aproximadamente 30° (escolhido por meio da programação do Arduino Mega).

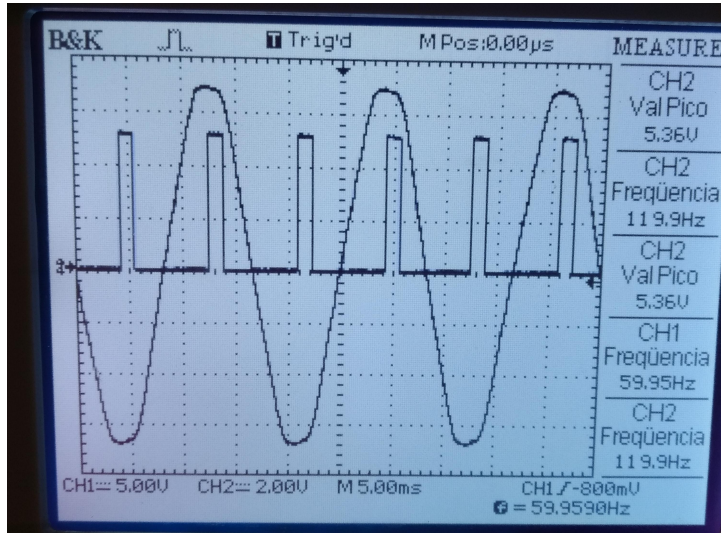


Figura 44 – Tensão de saída do Arduino Mega com ângulo de disparo de 90°.

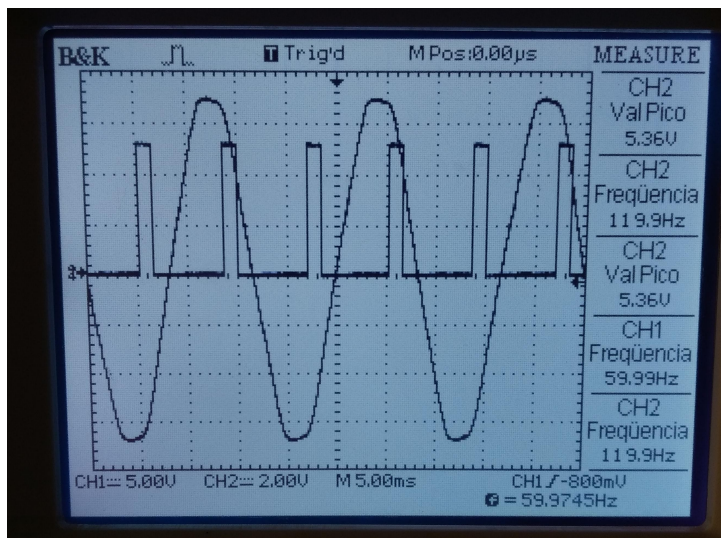


Figura 45 – Tensão de saída do Arduino Mega com ângulo de disparo de 120°.

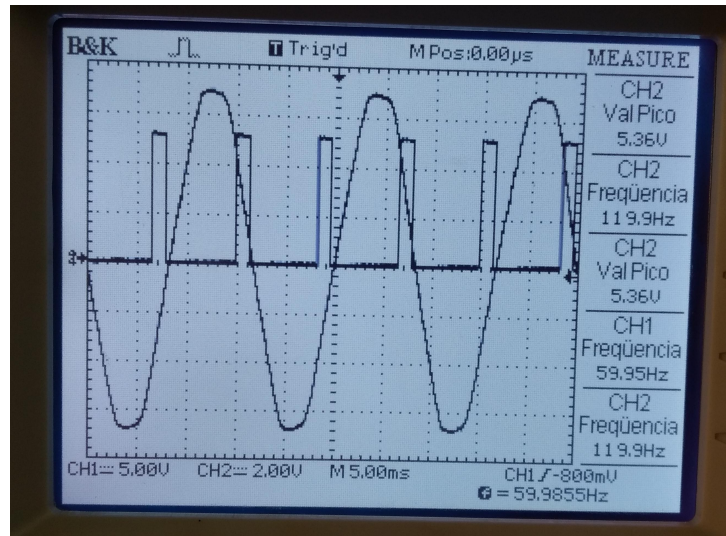


Figura 46 – Tensão de saída do Arduino Mega com ângulo de disparo de  $150^\circ$ .

Por meio do osciloscópio, temos as figuras 44, 45 e 46, que representam, respectivamente, os pulsos de saída do Arduino Mega no canal 2 para o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de  $90^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $150^\circ$ , no canal 1 o sinal representado é a saída do transformador abaixador de  $12 V_{rms}$ . Os ângulos de disparo foram escolhidos via botão.

Os testes de funcionamento da placa de Detecção de Passagem por Zero e acionamento do Triac utilizando o Arduino Mega 2560, foram realizados utilizando um resistor de potência do Laboratório de Qualidade de Energia - UnB, para averiguação dos pulsos de acionamento e comportamento do circuito.

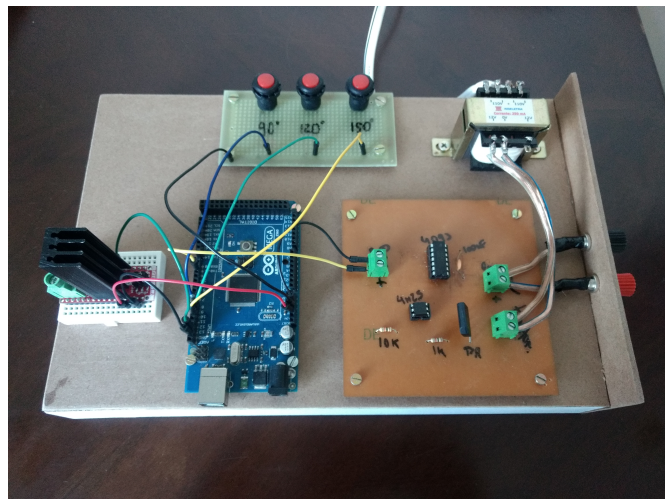


Figura 47 – Sistema de aquisição de dados e acionamento do Triac com o Arduino Mega 2560.

A figura 47 mostra o resultado da confecção do Compensador Estático de Reativos, com o *TCR* e sem o *TSC*.



Figura 48 – Tensão no resistor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de  $90^\circ$ .

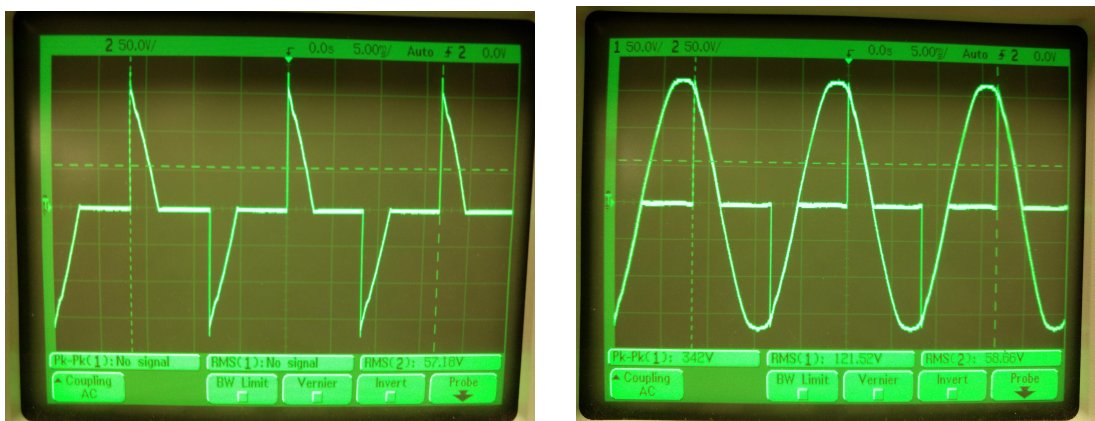


Figura 49 – Tensão no resistor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de  $120^\circ$ .

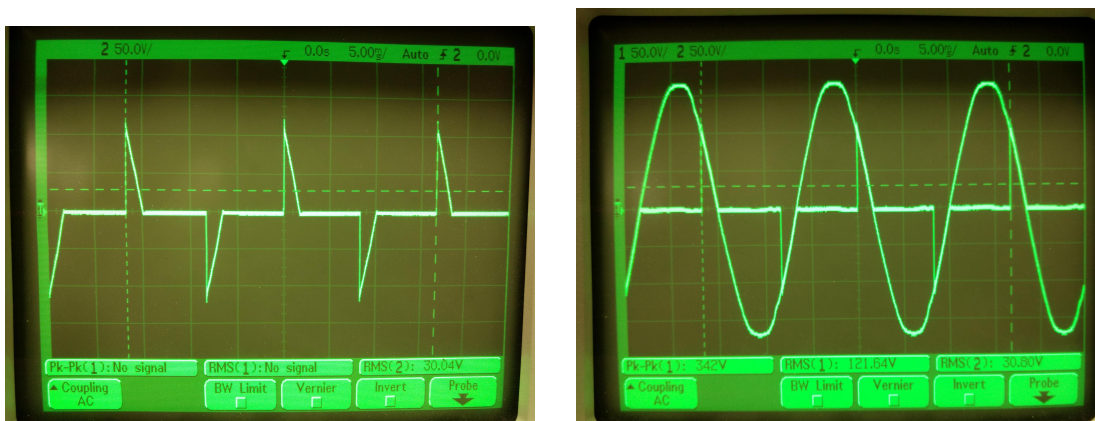


Figura 50 – Tensão no resistor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de  $150^\circ$ .

Utilizando o osciloscópio, temos as figuras 48, 49 e 50, que retratam a tensão no resistor em um canal e no outro a tensão da rede elétrica. O Arduino Mega aplica um pulso

de curta duração (1,38ms), com base no sinal originado pelo circuito de detecção de passagem por zero, dessa forma, podemos ver pelo osciloscópio a tensão no resistor de potência, com o pulso aplicado com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de 90°, 120° e 150°, respectivamente.

Após a conferência da eficiência do circuito de detecção e acionamento do Arduino Mega, foi utilizado o indutor de 0,585 H como carga a ser chaveada pelo Triac. Foi escolhido a Nanoshield Triac da EletroShields (figura 51, por motivo de eficiência energética, além do baixo custo e facilidade de implementação).



Figura 51 – Nanoshield Triac da EletroShields.

Para análise de funcionamento do componente *TCR* do *SVC*, foi mensurada a tensão no indutor, utilizando o osciloscópio, para uma tensão da rede elétrica de 110  $V_{rms}$ . Inicialmente a tensão da rede elétrica a ser utilizada era de 220  $V_{rms}$ , entretanto, a ponta de prova (x10) do osciloscópio utilizada não era suficiente para realizar as medições sem saturar o canal do osciloscópio, portanto, foi escolhido a tensão de 110  $V_{rms}$  para realizar uma melhor apuração do sinal resultante. Para isso, utilizou-se um estabilizador com saída de 110  $V_{rms}$ , sendo alimentado pela rede elétrica.

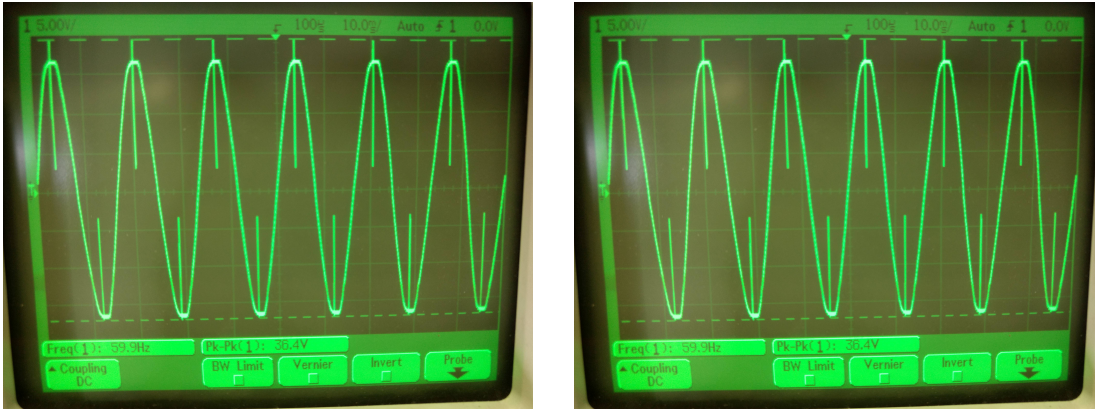


Figura 52 – Tensão no indutor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de  $90^\circ$ .

A figura 52 mostra a tensão no indutor com o chaveamento do Triac em  $90^\circ$ , com duração de aproximadamente  $30^\circ$ . Pode-se observar que a condução de tensão do indutor segue a tensão da rede elétrica, por completo. Quando é aplicado o pulso pelo Arduino com duração de  $30^\circ$ , no instante de  $90^\circ$  da tensão, o indutor começa a conduzir, e para a condução quando a corrente passa por zero, que é no instante de  $90^\circ$  da tensão, tendo em vista que, a tensão e a corrente são defasadas em  $90^\circ$ . Com o ângulo de disparo do Triac igual a  $90^\circ$ , o indutor está sempre em condução.

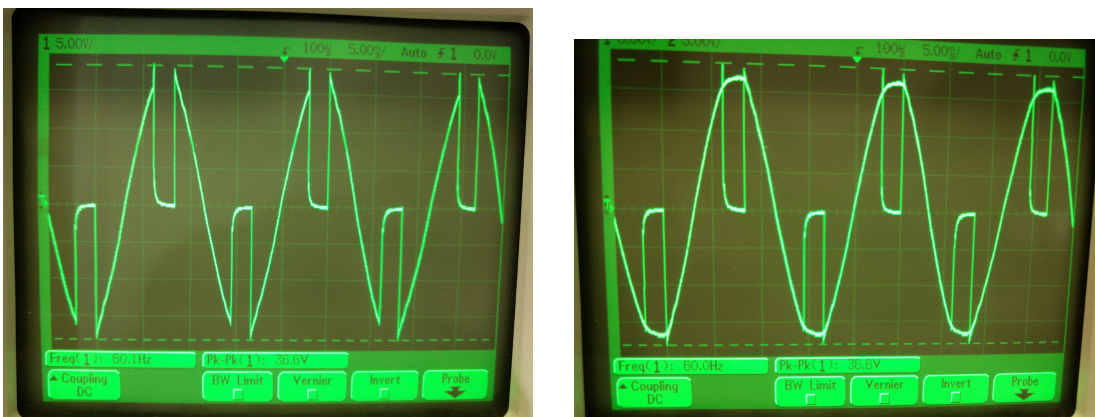


Figura 53 – Tensão no indutor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de  $120^\circ$ .

A figura 53 exibe a tensão no indutor com o chaveamento do Triac em  $120^\circ$ , com duração de aproximadamente  $30^\circ$ . Pode-se notar que quando é aplicado o pulso no Triac, o indutor começa a conduzir, e a condução ocorre até o momento em que a corrente passa por zero, no instante de aproximadamente  $60^\circ$  e  $240^\circ$  da tensão. A corrente e a tensão estão defasadas em  $60^\circ$ , devido ao chaveamento do indutor.





Figura 54 – Tensão no indutor com ângulo de disparo ( $\alpha$ ) de  $150^\circ$ .

Na figura 54 verificamos a tensão no indutor com o chaveamento do Triac em  $150^\circ$ , com duração de aproximadamente  $30^\circ$ . Pode-se constatar que quando é aplicado o pulso no Triac, o indutor começa a conduzir, e a condução ocorre até o momento em que a corrente passa por zero, no instante de aproximadamente  $40^\circ$  e  $220^\circ$  da tensão. A corrente e a tensão estão defasadas em  $40^\circ$ , devido ao chaveamento do indutor.

Observa-se que conforme altera-se o ângulo de disparo ( $\alpha$ ) do Triac, o indutor produz uma resposta diferente, alterando a defasagem entre a tensão e corrente. Conforme o ângulo de disparo é incrementado, a tensão média do indutor é reduzida, realizando uma menor troca de corrente indutiva com o sistema.



## 5 Conclusão

Conforme ressaltado anteriormente, este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo criar uma bancada experimental para realizar os estudos em um Compensador Estático de Reativos. Foi construído a bancada com o *TCR*, e a seleção do ângulo de disparo do Triac ocorre por meio de botões. O sistema está funcionando de acordo com o esperado.

O circuito de detecção de passagem por zero funcionou perfeitamente, o sinal de saída da placa é facilmente interpretado pelo Arduino Mega 2560 por meio de interrupções. Interrupções são úteis para fazer coisas automaticamente em programas de microcontroladores, e podem ajudar a resolver problemas de temporização.

A fabricação da placa de detecção de passagem por zero ocorreu pelo método de transferência térmica, um processo de fabricação um tanto trabalhoso. Mas como foi fabricada apenas uma placa, o método satisfaz os requisitos.

O sistema do Compensador Estático de Reativos está implementado apenas com o *TCR*, sendo necessário implementar o *TSC* para obter-se o sistema completo.

### 5.1 Trabalhos Futuros

Implementar o controle dinâmico do *TCR*, para isso é necessário construir um sistema de medição de tensão e corrente da rede elétrica, e dessa forma, ativar o *TCR* quando necessário. Realizar a construção e confecção do *TSC*.



# Referências

- ALMEIDA, F. A. F. de et al. Controle de tensão de um compensador estático de reativos conectado a uma rede de baixa tensão. *Revista Interdisciplinar de Tecnologias e Educação [RInTE]*, 2016. Citado na página 28.
- BAUAB, G. H. S. *Melhoria da Regulação de Tensão e do Suporte de Potência Reativa em Sistemas Integrados de Transmissão e Distribuição*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2009. Citado na página 20.
- BESSA, A. R. *Estudo de Aplicação de Compensador Estático em Derivação do Tipo SVC na Linha de Transmissão Mesquita - Viana II em 500 kV*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2015. Citado na página 35.
- BORDIM, J. R. G. *Instalação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Correção de Fator de Potência e Regulação de Tensão: Projeto e Simulação Computacional*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2011. Citado na página 23.
- CORREIA v. T. Controladores facts. *Artigo*, 2016. Universidade Federal do Paraná. Citado na página 23.
- FRONTIN, S. O. *Equipamentos de Alta Tensão*. [S.l.]: Goya Editora LTDA, 2013. Citado 7 vezes nas páginas 24, 28, 29, 30, 32, 34 e 36.
- HINGORANI, N. G.; GYUGYI, L. Understanding facts, concepts and technology of flexible ac transmission system. *IEEE*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 33.
- JÚNIOR, G. S. S. *Análise da Influência de um Compensador Estático de Reativos na Operação de Sistema Elétrico Industrial com Cogeração*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Maranhão, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 28, 32, 33 e 36.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw Hill, 1994. Citado na página 20.
- NATURESE, J. S. *A Influência de Compensadores Estáticos de Reativos na Estabilidade de Tensão de Sistemas de Energia Elétrica*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 19, 20 e 33.
- OHMINI. *Características do PSIM*. 2013. Disponível em: <[http://ohmini.com.br/pdf/caracteristicas\\_do\\_psim\\_-\\_2.pdf](http://ohmini.com.br/pdf/caracteristicas_do_psim_-_2.pdf)>. Citado na página 39.
- PASSOS, C. C. *Estudo do Desempenho de um SVC Aplicado a um Sistema Real de Barras*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Paraná, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 19, 23, 33, 35, 36 e 38.
- PWERSIM. *PSIM*. 2017. Disponível em: <<https://powersimtech.com/>>. Citado na página 39.

ROBELATTO, E. R.; FURQUIM, F.; OLIVEIRA, R. F. *Estudo e Análise de Regulação de Tensão e do Suporte de Potência Reativa em Sistemas Integrados de Transmissão de Energia Elétrica*. 2014. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 22.

RODRIGUES, J. P. C.; SILVA, L. P. *Avaliação da Proteção de Reatores Shunt de Linhas de Transmissão*. 2014. Universidade de Brasília. Citado na página 21.

TORTELLI, O. L. *Alocação e Operação de Controladores FACTS em Sistemas Elétricos de Potência*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 21, 23 e 24.

WEG. *Compensadores Síncronos Rotativos*. [S.l.], 2017.

Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/>

[WEG-compensadores-sincronos-rotativos-50041259-catalogo-portugues-br.pdf](http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-compensadores-sincronos-rotativos-50041259-catalogo-portugues-br.pdf)>.

Citado na página 22.