



**Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica**

## **Construção de uma bancada para estudo de topologias de conversores estáticos**

Adi Neves Rocha

Área de Conhecimento: Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas

**Orientadores:** Euzeli Cipriano dos Santos Júnior (UAEE/CEEI/UFCG)  
Eisenhauer de Moura Fernandes (UAEM/CCT/UFCG)

**Campina Grande – PB  
Março de 2012**

# **Construção de uma bancada para estudo de topologias de conversores estáticos**

Relatório de estágio supervisionado submetido à Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Adi Neves Rocha  
Candidato

Euzeli Cipriano dos Santos Júnior  
Orientador

**Campina Grande, Paraíba, Brasil  
Março de 2012**

## **Agradecimentos**

Agradeço a Deus pelo sentido da minha vida.

Agradeço à minha família pelo apoio.

Agradeço aos Professores Euzeli Cipriano dos Santos Júnior e Cursino Brandão Jacobina pelas oportunidades e pelos momentos de orientação.

Agradeço ao Professor Eisenhower de Moura Fernandes pela paciência necessária a todo instante e pela dedicação.

Meu agradecimento aos colegas do Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM) e em especial, a Eugênio Pachelle .

# Índice

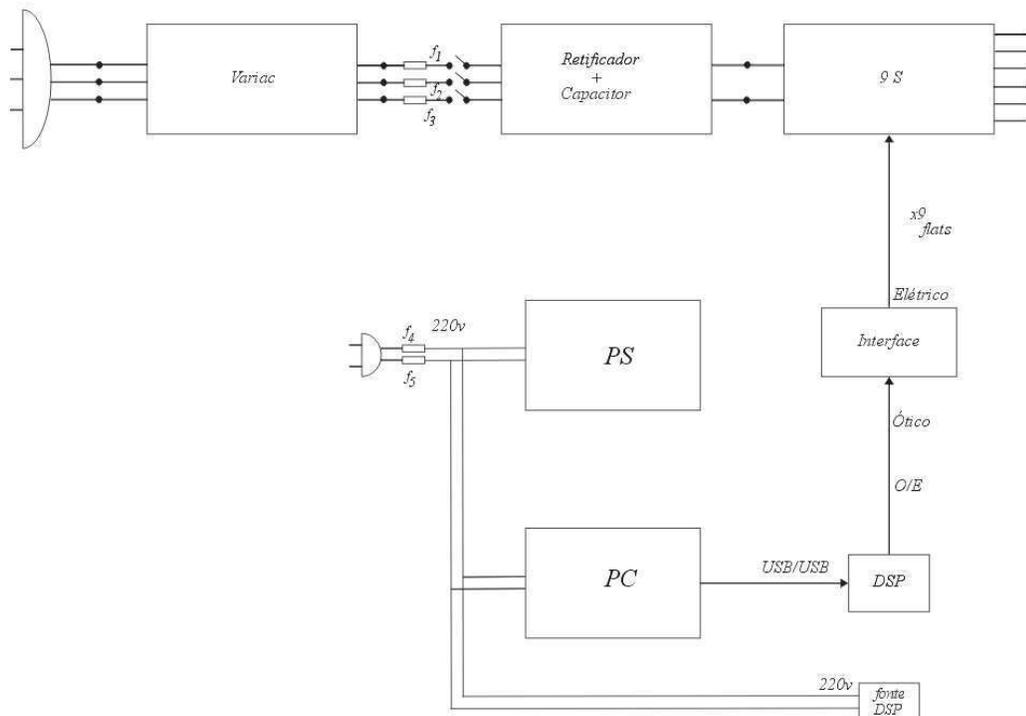
<b>1. Introdução.....</b>	<b>4</b>
<b>2. Bancada de desenvolvimento.....</b>	<b>5</b>
2.1. Projeto .....	5
<b>3. Circuito de medição de tensão e corrente .....</b>	<b>7</b>
3.1. Circuito.....	7
3.2. Equações características.....	8
3.3. Resultados experimentais.....	10
<b>4. Conversor de potência .....</b>	<b>11</b>
4.1. Módulo .....	11
4.2. Inversor. ....	11
4.3. Circuito <i>snubber</i> .....	12
4.4. Resultados experimentais.....	13
<b>5. Conclusão.....</b>	<b>15</b>

# 1 Introdução

Este relatório apresenta o trabalho desenvolvido como estagiário no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), no período compreendido entre 09 de janeiro de 2012 a 20 de fevereiro de 2012. O LEIAM é um laboratório que tem desenvolvido estudos nas áreas de acionamento e controle de máquinas elétricas; sistemas de energia alternativa e topologias de filtros ativos.

Este relatório apresenta uma documentação da bancada de estudos de conversores estáticos. O texto trata da descrição dos circuitos de comando e de potência, assim como uma descrição das placas de aquisição dos sinais de tensão e corrente. A bancada tem como aplicação o acionamento de um motor de indução hexafásico utilizando um número reduzido de componentes (interruptores de potência). Além disso, a montagem possibilitará a implementação de outras topologias.

Na Figura 1 está apresentado um diagrama de blocos, detalhando os principais circuitos e componentes da bancada.



**Fig 1:** Diagrama de blocos da bancada.

O variac é utilizado para permitir uma variação da tensão de entrada da bancada. Um conjunto de fusíveis é colocado para oferecer uma proteção à bancada; Um retificador trifásico a diodos é utilizado para manter o barramento capacitivo carregado; O inversor de tensão está ligado ao barramento capacitivo. A fonte de tensão (PS) irá alimentar as placas de interface, essas fontes são alimentadas em 220V e apresentam na saída um valor de +15V e -15V. O DSP é alimentado por uma fonte em separado também ligada em 220V. As placas de interface fazem a comunicação entre o DSP e os drives dos IGBTs, essa ligação é feita por meio de cabos óticos que permitem a isolação entre os circuitos.

## **2 Bancada de desenvolvimento**

### **2.1 Projeto**

O projeto da bancada surgiu da necessidade de se alimentar um motor de indução hexafásico a partir de um conversor estático de potência que possuísse um número reduzido de chaves, neste caso, nove chaves.

A bancada também possibilita o uso de outras topologias, inclusive a trifásica, bastando para isso configurá-la adequadamente. O controle do motor de indução e os sinais de disparo das chaves é realizado pelo Processador Digital de Sinais (DSP).

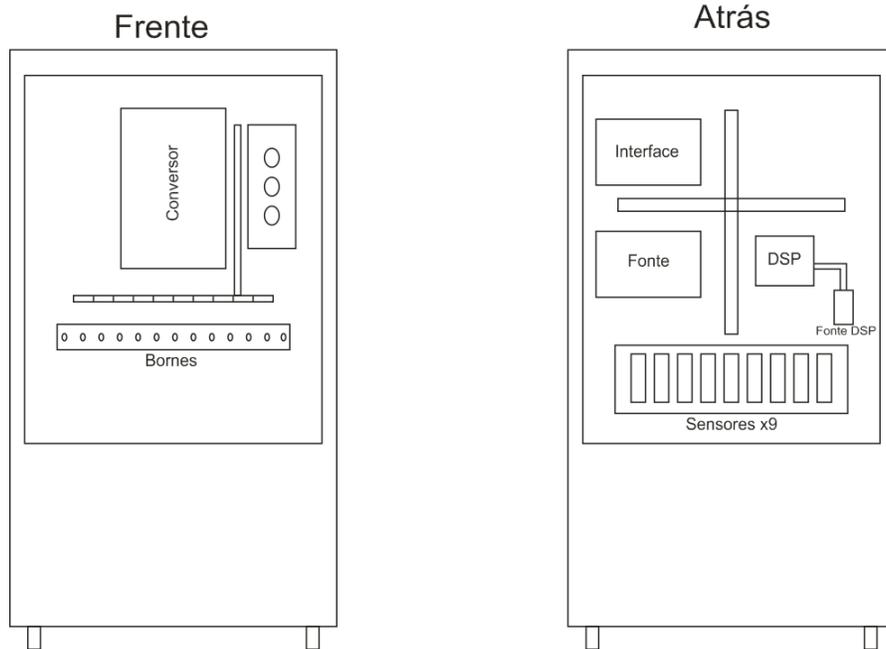
Na Figura 2 está exibido o *layout* da bancada, a parte frontal será composta pelo conversor. As nove chaves serão montadas sobre um dissipador. Um painel de bornes dará acesso às grandezas que se deseja medir, assim como permite a alterar a ligação entre os diversos componentes, alterando assim a topologia. A parte frontal ainda terá as botoeiras de controle.

A parte traseira da estrutura de suporte conterà as fontes de alimentação para o DSP, circuitos de acoplamento óticos entre computador e DSP além de circuitos de disparos das chaves (*drives*). Os circuitos de acoplamento óticos permitem a transmissão do sinal por fibra ótica entre o DSP e as chaves. Além disso, na parte de trás da estrutura estão instalados os circuitos sensores de tensão e de corrente. A base da plataforma conterà o motor de indução hexafásico e assim como resistências e indutâncias.

A alimentação da bancada é feita de duas maneiras distintas:

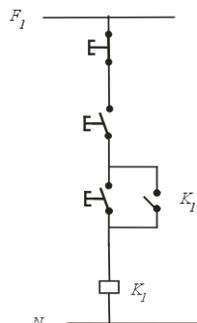
- Monofásica: Alimenta os circuitos sensores de tensão/corrente, o DSP e as placas de acoplamento óptico;
- Trifásica: alimenta o conversor de potência;

O diagrama do circuito de comando está representado na Figura 3.



**Fig 2:** Layout da bancada.

O conversor de potência será instalado na parte frontal da bancada, assim como as botoeiras de liga/desliga e emergência. Na parte frontal estarão também os bornes que darão acesso às grandezas que se deseja medir. Na parte traseira estarão as placas de interface responsáveis pela comunicação entre o DSP e os *drives* das chaves, ainda na parte traseira estarão colocados os 9 sensores de tensão e corrente, o DSP e as fontes de alimentação do DSP e das placas de interface. Os motores e indutâncias estarão colocados na parte de baixo da bancada.



**Fig 3:** Circuito de comando.

O circuito de comando é constituído por uma chave normalmente aberta e uma chave normalmente fechada; O circuito possui ainda um contactor.

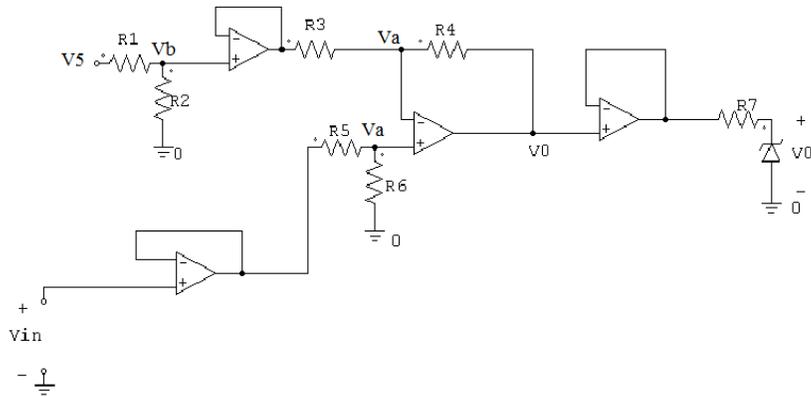
### 3 Circuito de medição de tensão e corrente

#### 3.1 Circuito

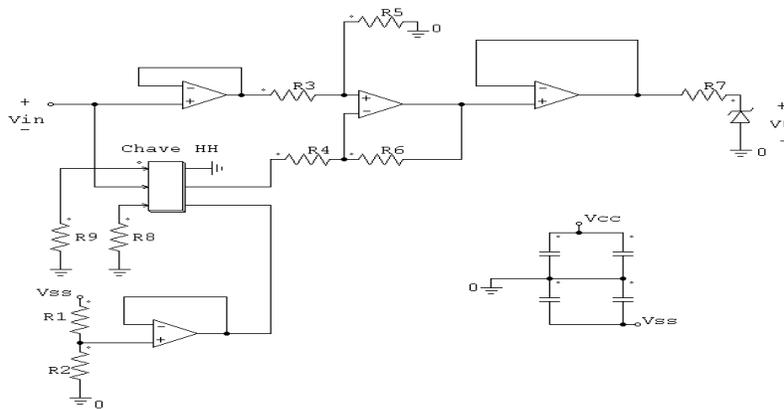
Na Figura 4 está exibido o circuito responsável pela medição de tensão e na Figura 5 apresentado o circuito utilizado para a medição de corrente. Basicamente, se trata de um elemento sensor (LEM) que efetua uma amostra do sinal que se deseja medir, a seguir o sinal é aplicado em um circuito de amplificação.

Para o acionamento do motor de indução hexafásico com o conversor da bancada, será confeccionar 9 sensores de corrente e 9 sensores de tensão para monitorar cada chave do conversor.

O elemento sensor de corrente (LEM) permite uma leitura de corrente na faixa de  $-15\text{ A}$  a  $+15\text{ A}$ , e apresenta na saída uma tensão que varia entre  $1.875$  e  $3.125$ . O elemento sensor de tensão opera na faixa entre  $10$  e  $500\text{ V}$ .



**Fig 4:** Circuito sensor de corrente.



**Fig 5:** Circuito sensor de tensão.

O circuito sensor de corrente foi projetado para funcionar na faixa de -10 A a +10 A apresentando como saída um valor que varia entre 0 V e 3 V, o circuito pode funcionar tanto no modo AC quanto no modo DC, havendo uma chave que permite tal escolha

O circuito sensor de tensão foi projetado para funcionar em um fundo de escala de 100 V ou de 400 V, A apresentando como saída um valor que varia entre 0 V e 3 V, o circuito tanto monitora tensão em modo AC quanto em modo DC, havendo uma chave que permite tal escolha

### 3.2 Equação característica

A equação característica para o circuito sensor de corrente foi obtida para melhor descrição do funcionamento. A partir das tensões Va e Vb descritas nas equações (2) e (4) e substituindo na equação (5) obtém se uma equação que relaciona as tensões V0 e Vi.

$$\frac{V_i - V_a}{R_5} = \frac{V_a}{R_6} \quad (1)$$

$$V_i \left( \frac{R_6}{R_5 + R_6} \right) = V_a \quad (2)$$

$$\frac{V_5 - V_b}{R_1} = \frac{V_b}{R_2} \quad (3)$$

$$V_5 \left( \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) = V_b \quad (4)$$

$$\frac{V_b - V_a}{R_3} = \frac{V_a - V_0}{R_4} \quad (5)$$

$$V_5 \left( \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) = V_b \quad (6)$$

$$\frac{V_5}{R_3} \left( \frac{R_2}{R_2 + R_1} \right) - \frac{V_i}{R_3} \left( \frac{R_6}{R_5 + R_6} \right) = \frac{V_i}{R_4} \left( \frac{R_6}{R_5 + R_6} \right) - \frac{V_0}{R_4} \quad (7)$$

Após algumas manipulações obtém-se a equação (8) que é a equação característica para o circuito sensor de corrente. Na expressão (8),  $V_5$  é uma fonte de tensão contínua de 5,0 V. Os valores de resistência do projeto foram escolhidos de maneira tal que o termo que acompanha  $V_i$  será unitário. O termo que multiplica  $V_5$  terá suas resistências escolhidas de modo a se tornar um valor de *offset* de 1V.

$$V_0 = V_i \left( \frac{R_4 R_6 + R_3 R_6}{R_3 (R_5 + R_6)} \right) - V_5 \left( \frac{R_4 R_2}{R_3 (R_1 + R_2)} \right) \quad (8)$$

### 3.3 Resultados experimentais

Os sensores foram testados em um conversor de potência. O objetivo era somente validar os resultados de simulação. O conversor de potência foi ligado a uma carga do tipo indutiva e rastreou-se os sinais de tensão e de corrente. Na figura 6 está exibida a corrente de referência medida e a saída apresentada pelo sensor. Na figura 7 estão exibidos os resultados para a tensão monitorada, nesse caso a tensão de entrada no sensor e a resposta obtida na saída do circuito.

Para o sensor de corrente aplicou-se uma corrente na entrada de 5A, a saída foi um valor de tensão de 2.19V. Ao circuito de tensão foi aplicado um valor de 40V obtendo na saída um valor de tensão de 390 mV, para este caso o fundo de escala do sensor estava selecionado em 400V.

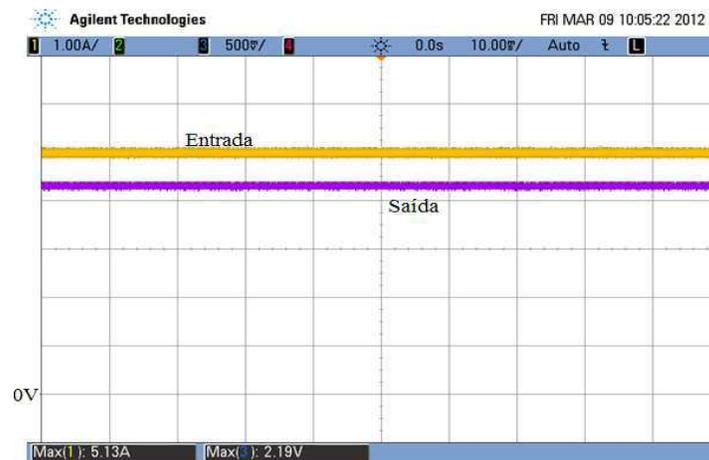


Fig 6: Circuito sensor de corrente. Corrente entrada(canal 1). Tensão saída(canal 3).

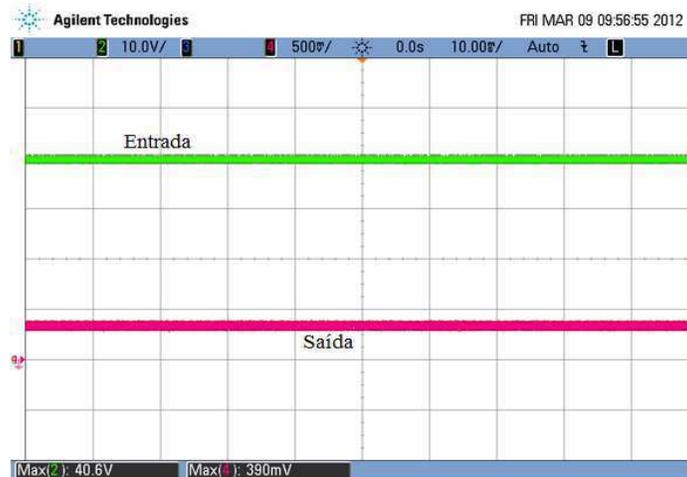


Fig 7: Circuito sensor de tensão. Tensão entrada(canal 1). Tensão saída(canal 4).

## 4 Conversor de potência

### 4.1 Módulo

O inversor é formado por um conjunto de módulos IGBT 50GB123D. Cada módulo possui duas chaves IGBT e um circuito de acionamento dos IGBTs (*driver*) de cada braço do conversor. Os módulos estão montados sobre um bloco dissipador. Na Figura 8 está apresentado um desses módulos.

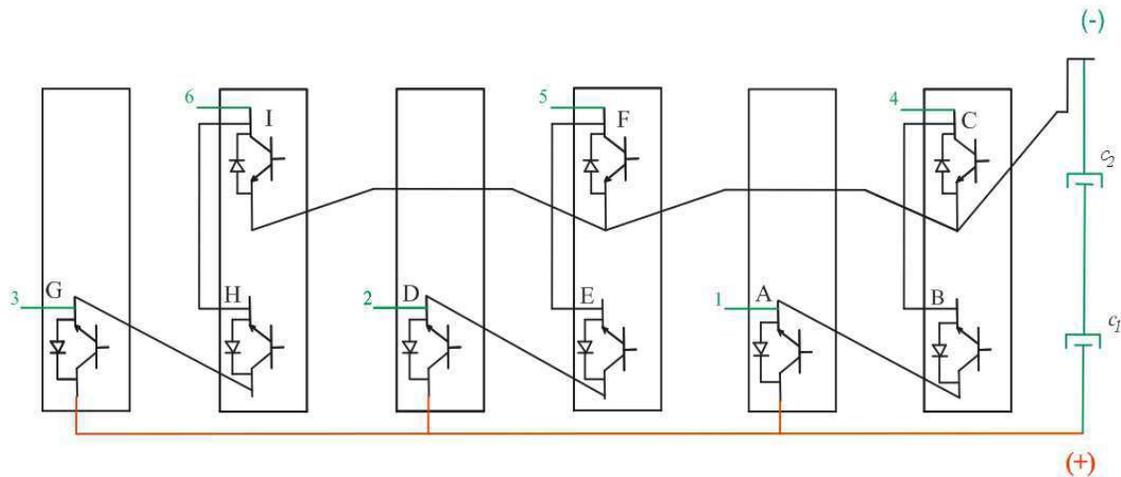


**Fig 8:** Módulo IGBT.

### 4.2 Inversor

O conversor de potência é montado com nove IGBTs com a configuração proposta na Figura 9. O barramento CC é alimentado a partir um retificador trifásico a diodos conectado à rede elétrica. Um processador digital de sinais (DSP) é responsável pelo controle do conversor. O DSP é conectado ao conversor por meio de uma fibra ótica que permite uma isolação entre a parte de controle e a parte de potência.

Observando a Figura 9 nota-se a possibilidade de curto-circuito do barramento CC quando todas as chaves de um braço estiverem fechadas. O algoritmo de chaveamento deve levar em conta essa possibilidade; os pulsos de disparo devem ser enviados à chave quando estiver garantida a condição que as demais chaves do braço já estejam abertas.

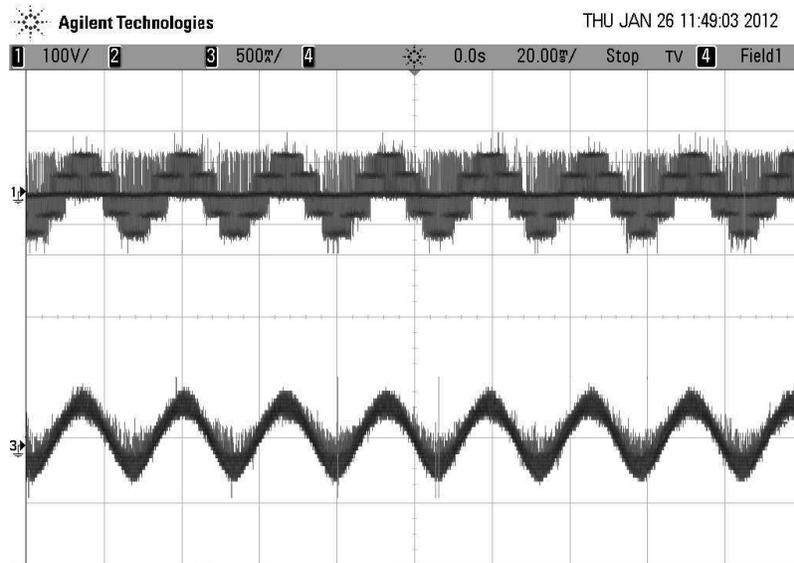


**Fig 9:** Circuito inversor de tensão- 9chaves.

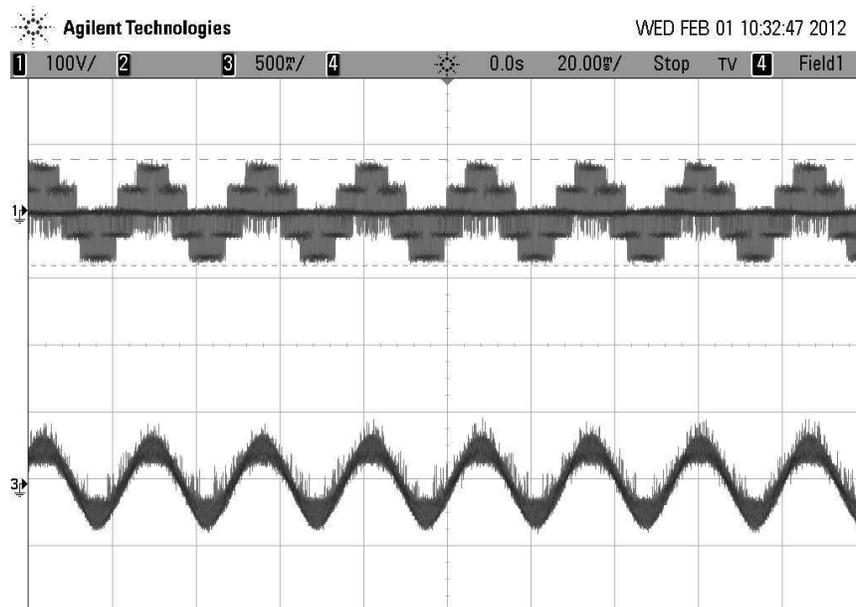
### 4.3 Circuito *snubber*

Os conversores estáticos de potência possuem reatâncias intrínsecas e elementos parasitas que são responsáveis por oscilações na tensão. Essas reatâncias intrínsecas também são responsáveis por picos de tensão e corrente durante o chaveamento da chave de potência (IGBT). Um circuito *snubber* é um circuito projetado para amortecer essas oscilações e reduzir as taxas de variação de corrente e de tensão nas chaves. Com o *snubber*, o conversor de potência estará menos sujeito às variações bruscas de tensão.

Na Figura 10 está mostrada a tensão de saída do conversor para uma topologia trifásica e exibe também as correntes de saída para uma carga indutiva, neste caso o conversor opera sem o *snubber*. Na Figura 11 está apresentada a tensão de saída e a corrente quando o circuito *snubber* é utilizado.



**Fig 10:** Tensão (canal 1) e corrente (canal 3), para o circuito sem *snubber*.

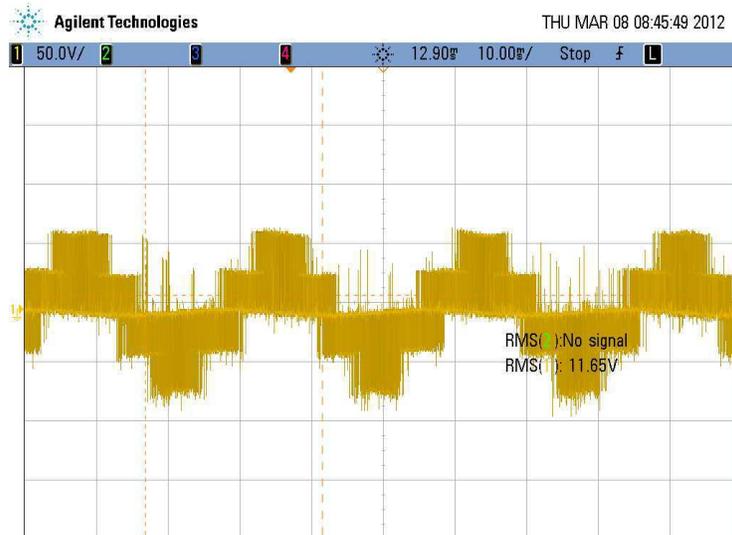


**Fig 11:** Tensão (canal 1) e corrente (canal 3) para o circuito com *snubber*.

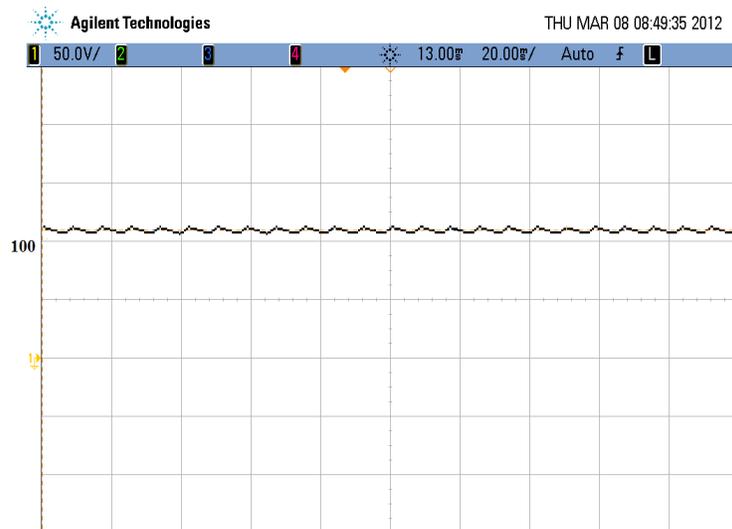
#### 4.4 Resultados experimentais

Alguns testes foram efetuados com o conversor de potência operando em modo trifásico. O objetivo dos testes foi verificar o correto funcionamento do conversor e testar os componentes da bancada.

Um teste básico realizado foi a geração de tensão para uma carga trifásica resistiva de  $20\Omega$  conectada em estrela. Na Figura 12 está apresentado a forma de onda de tensão nos terminais da carga. Na Figura 13 está apresentada a tensão medida no barramento CC do inversor.



**Fig 12:** Tensão na saída do conversor para uma carga resistiva de  $20\Omega$ .



**Fig 12:** Tensão no barramento CC.

## 5. Conclusão

O estágio no laboratório possibilitou a aplicação de teorias estudadas na graduação tais como Eletrônica e Eletrônica de Potência através do estudo e simulação das placas de medição de corrente e de tensão. Além disso, permitiu a familiarização com instrumentos de medição e componentes industriais através da montagem do conversor de potência.

Durante o período de estágio foram montados e testados foi montado o conversor de potência e o circuito *snubber*. Além disso, foram montados e testados os circuitos sensores de tensão e corrente indispensáveis para o controle e verificação do funcionamento do conversor.