

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E  
INFORMÁTICA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA  
ELÉTRICA

**TRABALHO DE ESTÁGIO**

Montagem de Bancada para Desenvolvimento  
de Pesquisas com Estruturas que Utilizem  
Inversores

Antonio de Paula Dias Queiroz

Orientador: Cursino Brandão Jacobina  
Setembro de 2009



Biblioteca Setorial do CDSA. Março de 2021.

Sumé - PB

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Bancada de Desenvolvimento</b>	<b>3</b>
2.1	Introdução . . . . .	3
2.2	<i>Layout</i> da Bancada . . . . .	3
2.3	Utilização das Placas . . . . .	4
2.4	Materiais Utilizados . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Aplicação - Modelagem de um Filtro Ativo Universal Trifásico sem Transformador de Isolação</b>	<b>6</b>
3.1	Modelo do Sistema . . . . .	7
3.2	Estratégia <i>PWM</i> . . . . .	8
3.3	Estratégia de Controle . . . . .	9
3.4	Simulações . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>12</b>

## **Agradecimento**

Agradeço a Deus que desde o início da minha vida e dos meus estudos tem iluminado meus pensamentos e me conduzindo por bons caminhos. À minha mãe e irmã por fazerem parte da instituição mais sagrada deste mundo, a família, me dando orientação, alegria e companherismo. Ao meu professor orientador Cursino Brandão Jacobina. À dedicação e paciência dos meus professores da graduação. Aos colegas do LEIAM e amigos da graduação.

# 1 Introdução

Este relatório apresenta os trabalhos desenvolvidos como estagiário no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamento de Máquinas (LEIAM), no período compreendido entre 27 de julho de 2009 e 01 de setembro de 2009.

A proposta do estágio é a confecção de uma bancada de desenvolvimento, para montagem de estruturas que utilizam inversores de frequência, juntamente com a realização de testes experimentais utilizando uma estrutura de um Filtro Ativo como aplicação. Neste laboratório já existem algumas montagens semelhantes, porém nenhuma com a capacidade proposta para esta, já que esta montagem permitirá obter resultados experimentais de estruturas que utilizem até doze braços.

## 2 Bancada de Desenvolvimento

### 2.1 Introdução

A montagem de uma estrutura deste tipo é extremamente importante em um laboratório no qual se deseja obter resultados experimentais de vários tipos de configurações que utilizam inversores de frequência. Desde o começo a idéia foi exatamente produzir algo mais robusto, que pudesse atender a essas necessidades cada vez maiores de realização de montagens com um número maior de componentes. A seguir será mostrada uma descrição dos passos tomados na realização de projeto de estágio.

### 2.2 *Layout* da Bancada

O primeiro passo foi a construção de uma bancada na qual os inversores pudessem ficar fixados de maneira organizada. Para que o aluno pudesse ter acesso fácil a todos os pontos dos quatro inversores, imaginou-se fazer um quadro de conexões. Uma bancada do tipo vertical foi escolhida e o quadro de conexões de acesso aos pontos dos inversores colocado na parte inferior. Seguindo essas características, adicionadas com a preocupação de se ter um bom projeto visual o *layout* pôde ser feito. Observe a Fig 1 e a Fig. 2.

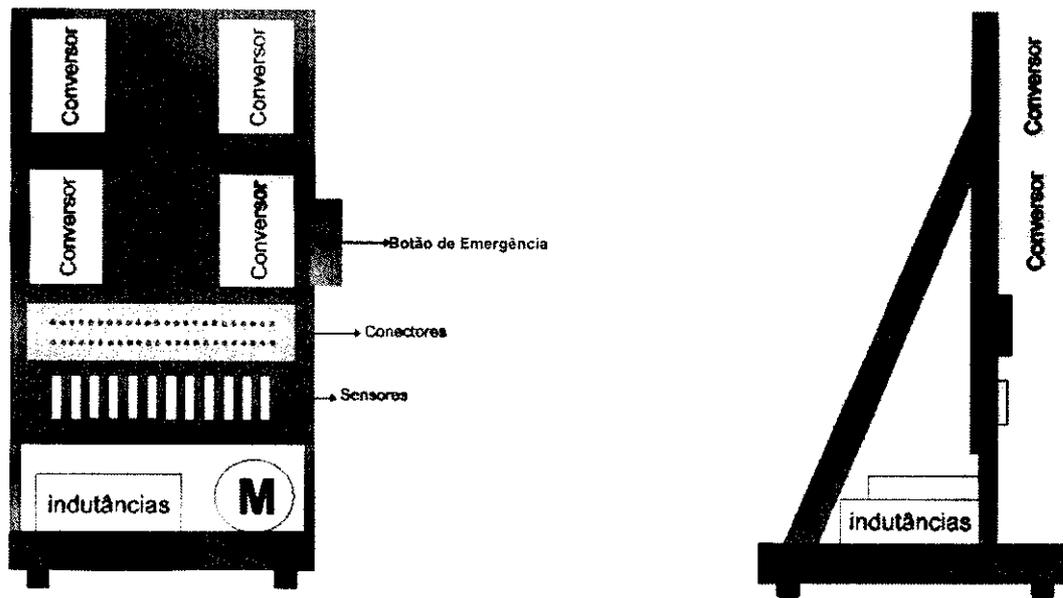


Figura 1: *Layout* da bancada.

Na Fig. 1 podem ser observados, os quatro inversores de frequências, o quadro de conexões, a chave de emergência, os doze sensores de tensão e correntes, as indutâncias e o motor.

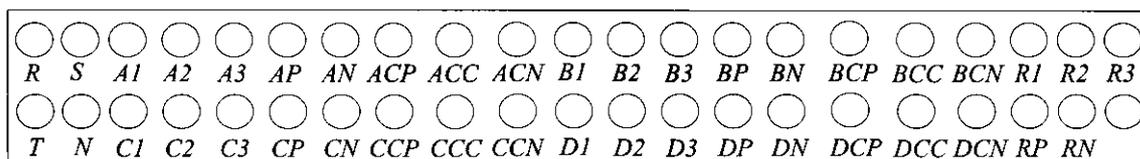


Figura 2: *Layout* do quadro de conexões.

Na Fig 2 existem indicações com letras e números que serão bem detalhadas a seguir.

### 2.3 Utilização das Placas

Os componentes dos inversores têm suas conexões elétricas feitas através de placas. Para que na utilização dos inversores pudesse ser feito qualquer estrutura contendo no máximo os doze braços algumas medidas foram tomadas quanto à estrutura das placas.

- 1) Desfazer as conexões entre o barramento CC e os inversores e retificadores;
- 2) Retirar os retificadores de três dos quatro inversores;
- 3) Desfazer as conexões entre o retificador que ficou e as placas;

Essas medidas são necessárias para que não fiquem conexões entre os componentes dos inversores, conexões essas que serão feitas, de acordo com a configuração desejada, no quadro de conexões a ser montado, no qual serão encontrados todos esses pontos dos inversores. Na Fig. 3 é mostrado a imagem do conversor adquirido para a realização da montagem e na Fig. 4 um modelo do circuito elétrico da placa e as marcações de onde as conexões serão desfeitas.

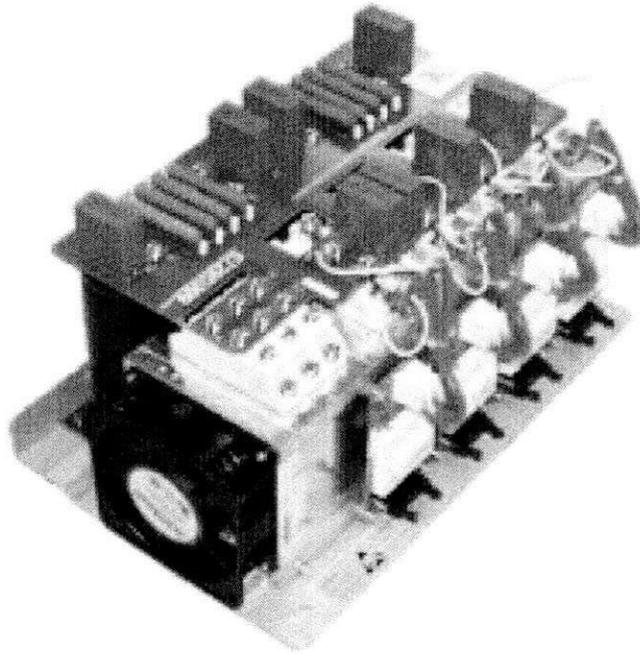


Figura 3: Conversor adquirido.

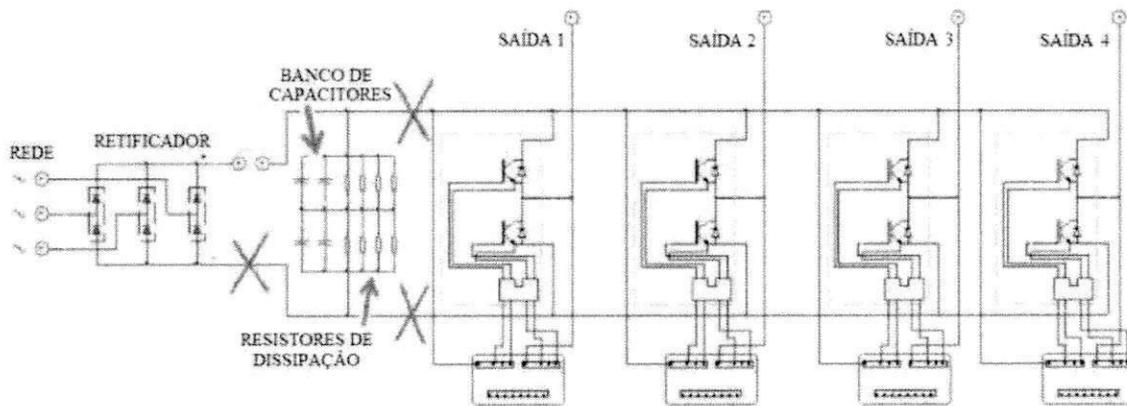


Figura 4: Circuito elétrico de cada conversor.

Na Fig.5, tem-se o circuito de potência disposto pelos quatro conversores e as respectivas conexões.

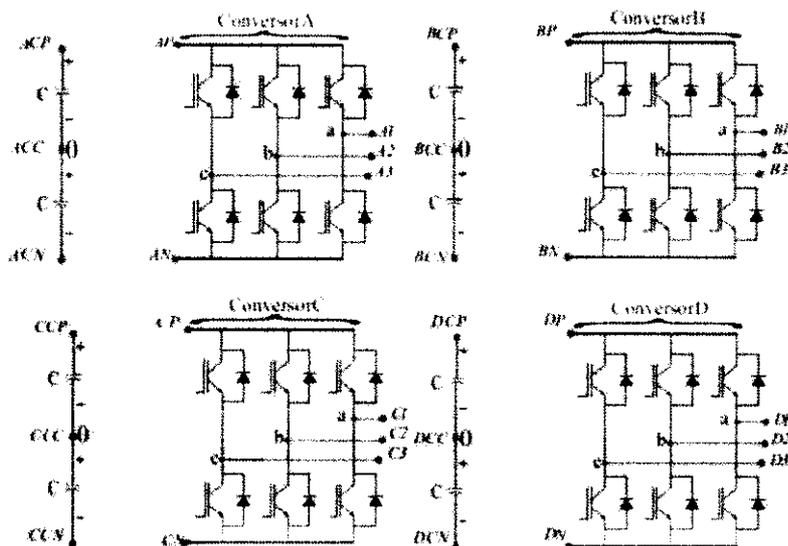


Figura 5: Configuração da bancada

Também podem ser observados na Fig. 5, as quatro pontes trifásicas controladas através da utilização de chaves do tipo IGBT's, os quatro barramentos de capacitores, um retificador trifásico não controlado e os pontos disponíveis no quadro de conexões apresentado anteriormente.

## 2.4 Materiais Utilizados

Após esse esquema preparado com a finalidade de tornar a montagem bem estruturada para a realização dos trabalhos de pesquisa, será descrita uma lista com alguns dos materiais complementares utilizados para a conclusão da montagem.

- 1) Fios  $4mm^2$  flexíveis;
- 2) Bornes para os pontos de acesso aos inversores;
- 3) Placa de acrílico para a sustentação e organização dos bornes;
- 4) Sensores de corrente e tensão;
- 5) Anilhas para a identificação de cada fio com sua determinada seqüência de letras e números;
- 6) "Esforca-gato", spiraduto e canaletas para sustentação e organização de toda a fiação.

## 3 Aplicação - Modelagem de um Filtro Ativo Universal Trifásico sem Transformador de Isolação

Devido ao crescente desejo de obtenção de qualidade de energia, desde a geração de sinais alternados até a alimentação de vários tipos de cargas, questões relativas ao bom condicionamento da linha de potência têm se tornado bastante importantes para o estudo na área da eletrônica de potência [1]. Vários tipos de equipamentos são utilizados na tentativa de melhorar a qualidade da energia, são exemplos, reguladores de tensão, fornecimento de potência ininterrupto, filtros ativos e filtros híbridos [1], [2], [3], [4], [5] e [6]. Os Filtros Ativos são implementados por um conversor tipo fonte de tensão (barramento capacitivo) ou conversor tipo fonte de cor-

rente (barramento indutivo) e elementos passivos para a filtragem dos harmônicos provindos do chaveamento do conversor.

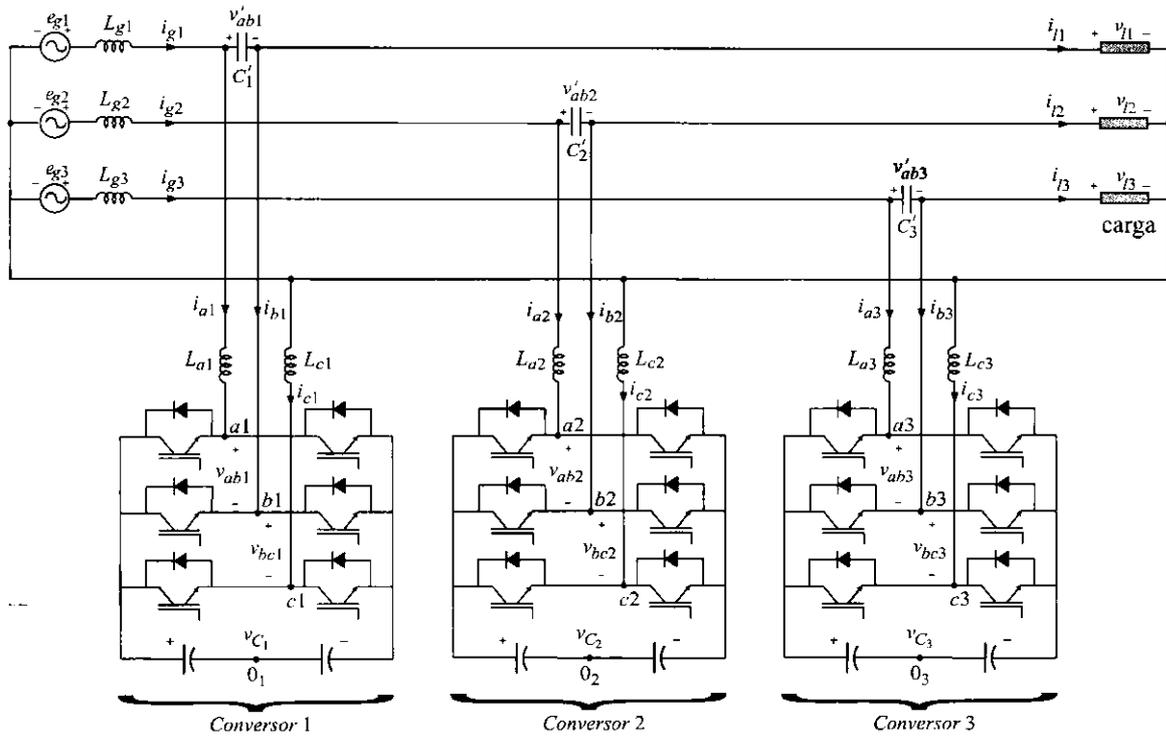


Figura 6: Filtro ativo universal - nove braços

O filtro ativo universal é um dos tipos de equipamentos desenvolvidos para executar simultaneamente a compensação de sinais harmônicos e da potência reativa. Sistemas monofásicos equivalentes que incluem o filtro ativo universal são propostos em [2], [7] e [8]. O filtro ativo universal é uma combinação do conversor paralelo com o conversor série. O conversor série utiliza um transformador para isolamento. Peso, tamanho e custos associados com o transformador fazem com que esta não seja uma das melhores soluções.

Esse trabalho propõe o estudo de uma topologia do filtro ativo universal utilizado num sistema trifásico sem transformador, como é mostrado na Fig. 6. Um sistema de controle completo, incluindo a técnica PWM, é desenvolvida. Simulações irão dar validação às considerações teóricas feitas.

### 3.1 Modelo do Sistema

O sistema proposto está mostrado na Fig. 6. Nele podem ser observados os parâmetros da rede de entrada ( $e_g, i_g$ ), a indutância interna na fonte de tensão da rede ( $L_g$ ), as variáveis da carga ( $v_l, i_l$ ), e os três conversores trifásicos.

Também a partir da observação da Fig. 6 podem ser descritas as seguintes:

$$e_{gk} = (r_{gk} + l_{gk}p)i_{gk} + v'_{abk} + v_{lk} \quad (1)$$

$$v'_{abk} - v_{abk} = (r_{ak} + l_{ak}p)i_{ak} \quad (2)$$

$$v_{bck} = (r_{ck} + l_{ck}p)(i_{lk} - i_{gk}) + v_{lk} \quad (3)$$

$$pv'_{abk} = \frac{1}{C'_k}(i_{gk} - i_{ak}) \quad (4)$$

$$i_{bk} = i_{gk} - i_{lk} - i_{ak} \quad (5)$$

$$i_{ck} = -i_{ak} - i_{bk} = i_{lk} - i_{gk} \quad (6)$$

onde  $k = 1, 2, 3$ ,  $p = d/dt$ ,  $v_{abk} = v_{ak0_k} - v_{bk0_k}$  e  $v_{bck} = v_{bk0_k} - v_{ck0_k}$  e  $i_{lk}$  é calculado usando o modelo de carga. Os símbolos  $r$  e  $l$  representam, respectivamente, a resistência e a indutância dos indutores  $L_g, L_a, L_c$ .

No caso do sistema ser balanceado ( $L_{gk} = L_g, L_{ak} = L_a, L_{ck} = L_c$ , e  $C'_k = C'_1$ ), o modelo complexo  $dq$  pode ser obtido a partir de (1)-(4)

$$\mathbf{e}_g = (r_g + l_g p) \mathbf{i}_g + \mathbf{v}'_{ab} + \mathbf{v}_l \quad (7)$$

$$\mathbf{v}'_{ab} - \mathbf{v}_{ab} = (r_a + l_a p) \mathbf{i}_a \quad (8)$$

$$\mathbf{v}_{bc} = (r_c + l_c p)(\mathbf{i}_l - \mathbf{i}_g) + \mathbf{v}_l \quad (9)$$

$$p\mathbf{v}'_{ab} = \frac{1}{C'}(\mathbf{i}_g - \mathbf{i}_a) \quad (10)$$

$$\mathbf{i}_b = -\mathbf{i}_l + \mathbf{i}_g - \mathbf{i}_a \quad (11)$$

$$\mathbf{i}_c = +\mathbf{i}_l - \mathbf{i}_g \quad (12)$$

onde  $\mathbf{x} = x_d + jx_q$ , e  $\mathbf{x}$  representa tensões e correntes do sistema.

Do ponto de vista do controle, os controladores definem o valor de  $\mathbf{v}_{ab}$  para regular a tensão da carga  $\mathbf{v}_l$ , já  $\mathbf{v}_{bc}$  controla o fator de potência e os harmônicos de  $\mathbf{i}_g$ . Caso a redução de  $\mathbf{v}_{ab}$  seja desejado, é necessário escolher o valor de  $v_{lk}^*$  em fase com  $v_{gk}^*$ . O sistema de controle será descrito de forma detalhada na Seção 3.3. A geração das tensões será discutida na Seção 3.2 a seguir.

### 3.2 Estratégia PWM

A largura dos pulsos dos sinais de controle podem ser calculados diretamente das tensões de polo de referência  $v_{ak0_k}^*$ ,  $v_{bk0_k}^*$ , e  $v_{ck0_k}^*$ .

Considere que as tensões  $v_{abk}^*$  e  $v_{bck}^*$  correspondam às referências geradas pelos controladores (veja a Seção 3.3), tem-se:

$$v_{abk}^* = v_{ak0_k}^* - v_{bk0_k}^* \quad (13)$$

$$v_{bck}^* = v_{bk0_k}^* - v_{ck0_k}^* \quad (14)$$

essas equações não são suficientes para a determinação das tensões de polo  $v_{ak0_k}^*$ ,  $v_{bk0_k}^*$ , e  $v_{ck0_k}^*$ . Uma variável auxiliar  $v_{xk}^*$ , é definida como:

$$v_{xk}^* = \frac{1}{3}(v_{ak0_k}^* + v_{bk0_k}^* + v_{ck0_k}^*) \quad (15)$$

dessa forma, as seguintes equações podem ser escritas:

$$v_{ak0_k}^* = \frac{2}{3}v_{abk}^* + \frac{1}{3}v_{bck}^* + v_{xk}^* \quad (16)$$

$$v_{bk0_k}^* = -\frac{1}{3}v_{abk}^* + \frac{1}{3}v_{bck}^* + v_{xk}^* \quad (17)$$

$$v_{ck0_k}^* = -\frac{1}{3}v_{abk}^* - \frac{2}{3}v_{bck}^* + v_{xk}^* \quad (18)$$

A tensão  $v_{xk}^*$  é calculada de forma que qualquer uma das tensões de pólo atinjam no máximo  $v_{C_k}^*/2$  e no mínimo  $-v_{C_k}^*/2$ .

$$v_{xk \max}^* = v_{C_k}^*/2 - v_{k \max}^* \quad (19)$$

$$v_{xk \min}^* = -v_{C_k}^*/2 - v_{k \min}^* \quad (20)$$

onde  $v_c^*$  é a referência de tensão para os barramentos CC,  $v_{k\max}^* = \max \vartheta_k$  e  $v_{k\min}^* = \min \vartheta_k$  com  $\vartheta = \left\{ \frac{2}{3}v_{abk}^* + \frac{1}{3}v_{bck}^*, -\frac{1}{3}v_{abk}^* + \frac{1}{3}v_{bck}^*, -\frac{1}{3}v_{abk}^* - \frac{2}{3}v_{bck}^* \right\}$ .

Então,  $v_x^*$  pode ser escolhido sendo igual a  $v_{xk\max}^*$ ,  $v_{xk\min}^*$  ou  $v_{xkave}^* = (v_{xk\max}^* + v_{xk\min}^*)/2$ . Observe que quando  $v_{xk\max}^*$  ou  $v_{xk\min}^*$  são escolhidos, um dos braços do conversor opera com frequência de chaveamento igual a zero. Por outro lado, escolhendo-se  $v_{xkave}^*$  são originados pulsos centrados de tensão, que pode melhorar o THD das tensões.

Os valores máximos ou mínimos podem ser usados eventualmente. Por exemplo, durante um determinado intervalo de tempo igual a  $\tau$  escolhe  $v_x^* = v_{x\max}^*$  e depois escolhe  $v_x^* = v_{x\min}^*$ . O intervalo de tempo  $\tau$  pode ser escolhido de modo que tenha seu valor igual ao do período de amostragem ou múltiplos, de modo a reduzir a frequência de chaveamento.

Para qualquer uma das escolhas do valor de  $v_x^*$ , as nove tensões de pólo  $v_{ak0k}^*$ ,  $v_{bk0k}^*$  e  $v_{ck0k}^*$  são definidas a partir de (16)-(18). A partir de então o sinal real pode ser obtido a partir da comparação das tensões de pólo com um sinal de portadora, que no caso, pode ser uma onda triangular de alta frequência, que vai fornecer os comandos de abertura ou fechamento das chaves de cada um dos nove braços dos inversores.

### 3.3 Estratégia de Controle

Na Fig. 7 é apresentado o diagrama de controle para o sistema. Pode-se observar que a tensão no barramento CC  $v_{Ck}$  é ajustada para o valor de referência com a ajuda do controlador  $R_{Ck}$ , que é um controlador do tipo PI. Este controlador determina a amplitude da corrente de referência  $I_{gk}^*$ . Para o controle do fator de potência e dos harmônicos, uma corrente de referência  $i_{gk}^*$  é gerada em sincronismo com a tensão  $e_{gk}$ . Esta tarefa é realizada pelo bloco  $Ge_{gk}$ , através de um esquema PLL. A corrente é controlada através do bloco  $R_{gk}$ . O controlador  $R_{gk}$  é um controlador digital de corrente mostrado em [9]. Este controlador de corrente define as tensões de entrada de referência  $v_{bck}^*$ . A fase instatânea da tensão de referência da carga  $v_{lk}^*$  pode ser determinada simplesmente utilizando um valor nominal que optimize o controle  $\delta_l$ . O controlador da tensão de carga  $R_{lk}$  define  $v_{abk}^*$ .

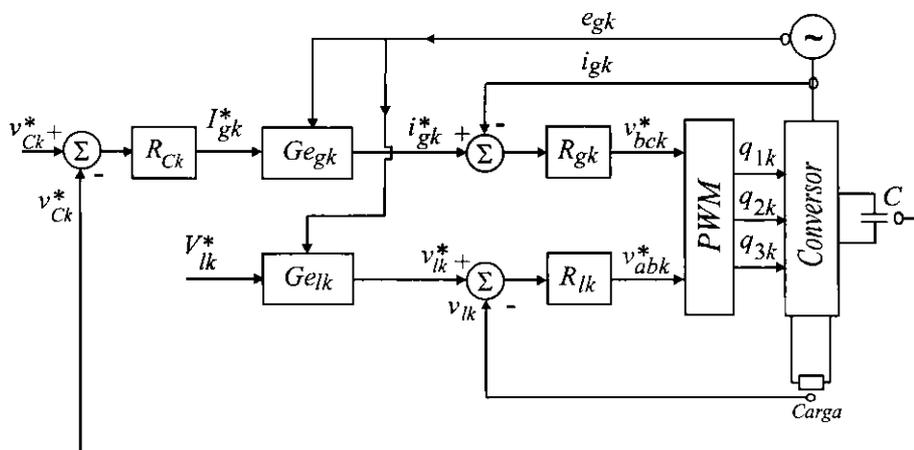


Figura 7: Diagrama de Controle

### 3.4 Simulações

A partir do circuito mostrado na Fig. 6 foram realizadas algumas simulações. Como resultados será mostrado nas Figs 8, 9 e 10, as respostas do controle de corrente, controle das tensões dos barramentos e das tensões na carga trifásica.

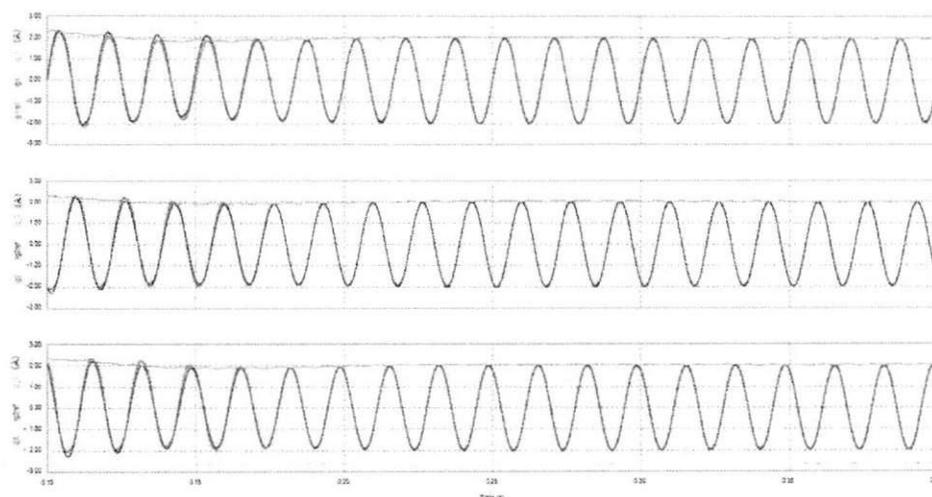


Figura 8: Controle das correntes da rede

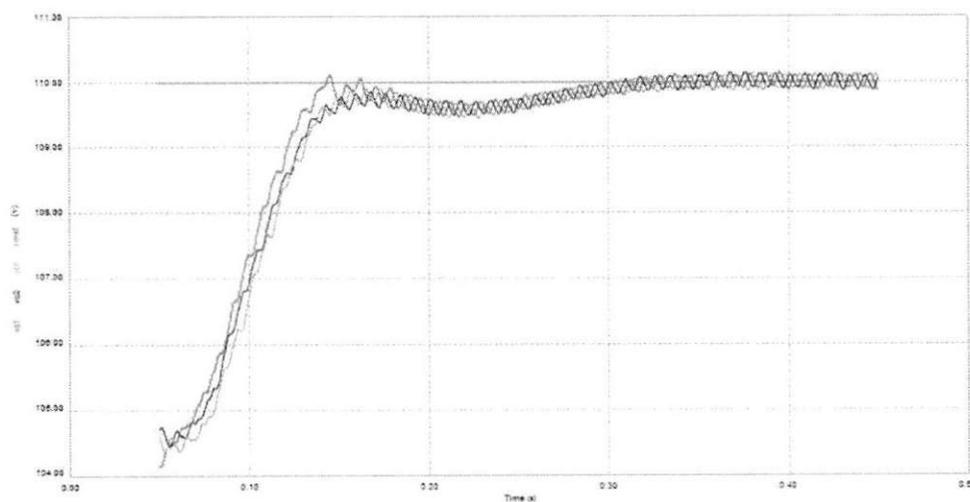


Figura 9: Tensão de referência e medida nos três capacitores.

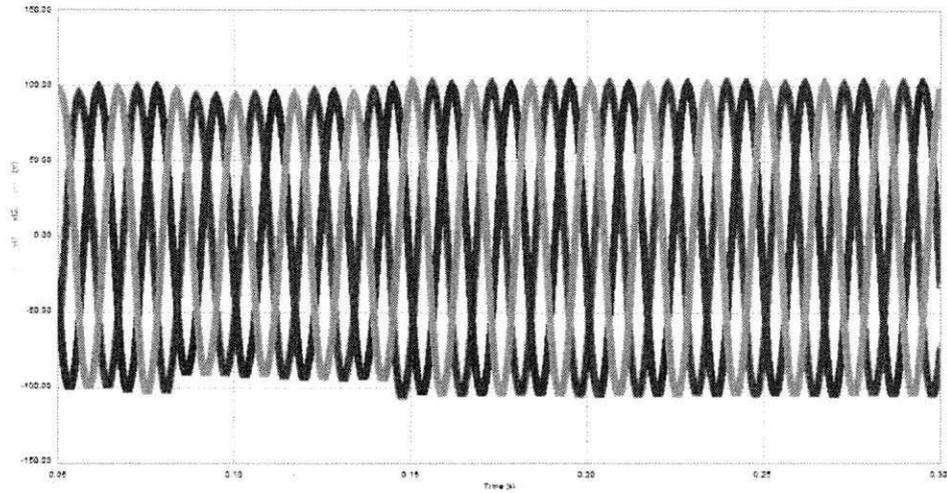


Figura 10: Tensões na carga trifásica

No controle de corrente, as correntes da rede foram controladas a partir de correntes de referência em fase com a tensão da rede e com amplitudes definidas pelo controle da tensão dos três capacitores. Para a tensão da carga trifásica foram geradas três referências de tensão balanceadas e de amplitude igual a 110 volts. Como esse é um sistema à quatro fios, é necessário o controle das tensões dos três capacitores e das três correntes da rede.

## 4 Conclusão

Neste trabalho de estágio, a montagem de uma bancada didática utilizando inversores foi proposta. A forma como essa estrutura possibilita ao aluno o fácil acesso aos pontos dos inversores, bem como as várias configurações que podem ser feitas nela, foram motivações para o desenvolvimento da mesma. Realizar um trabalho como este foi de grande aprendizado já que o acompanhamento teórico sobre o correto dimensionamento dos componentes, as formas de controle, os tipos de circuitos a serem montados, o ambiente de programação e outros, vai fazendo com que o aluno concretize conhecimentos adquiridos durante a graduação podendo pô-los em prática. Como uma aplicação foi proposta uma montagem de um filtro ativo paralelo que utiliza nove braços dos inversores. Simulações puderam ser obtidas de maneira a validar a configuração.

## Referências

- [1] H. Akagi, "Trends in active power line conditioners," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 9, no. 3, pp. 263–268, May 1994.
- [2] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, Oct. 1999.
- [3] Z. Pan, F. Z. Peng, and S. Wang, "Power factor correction using a series active filter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 20, no. 1, pp. 148–153, Jan. 2005.
- [4] S. Fukuda and T. Yoda, "A novel current-tracking method for active filters based on a sinusoidal internal model," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 37, no. 3, pp. 888–895, May/June 2001.
- [5] H. Komurcugil and O. Kukrer, "A new control strategy for single-phase shunt active power filters using a Lyapunov function," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 1, pp. 305–312, Dec. 2006.
- [6] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Detection is key - harmonic detection methods for active power filter applications," *IEEE Ind. Appl. Magazine*, vol. 13, no. 4, pp. 22–33, July-Aug. 2007.
- [7] H. Fujita and H. Akagi, "The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt-active filters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 2, pp. 315–322, March 1998.
- [8] M. Aredes, K. Heumann, and E. H. Watanabe, "An universal active power line conditioner," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 13, no. 2, pp. 545–551, Apr. 1998.
- [9] C. B. Jacobina, M. B. de R. Correa, T. M. Oliveira, A. M. N. Lima, and E. R. C. da Silva, "Current control of unbalanced electrical systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 517–525, June 2001.