

## PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM CONVERSOR CC-CA TRIFÁSICO DIDÁTICO APLICADO AO ACIONAMENTO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO

**Gilmar de Souza Junior** – gilmarsj13@gmail.com

**Diego Nasatto** – diego\_nasatto@hotmail.com

**Romeu Hausmann** – romeuh@furb.br

FURB – Universidade Regional de Blumenau

Rua Antônio da Veiga, 140 – Itoupava Seca

89030-903 – Blumenau – SC

**Resumo:** Este trabalho apresenta o projeto e implementação de um sistema de controle de torque e velocidade para um motor de indução trifásico utilizando a técnica controle escalar, o qual irá compor uma bancada didática que servirá como material pedagógico para as unidades curriculares que tenham em sua ementa conteúdos relacionados à eletrônica de potência. O sistema é composto por dois estágios de conversão, o primeiro é o retificador e o segundo é o inversor. A técnica utilizada para controle do estágio inversor é a Modulação por Largura de Pulso Senoidal, implementada através do controlador de sinal digital 56F801. Resultados experimentais são apresentados para um motor de indução trifásico de 1,5 CV.

**Palavras-chave:** Bancada didática. Controle escalar. Conversor CC-CA. Motor de indução trifásico. SPWM.

### 1 INTRODUÇÃO

Em aplicações industriais, o motor de indução trifásico (MIT) é o mais usado por possuir algumas vantagens sobre os demais tipos de motores: baixo custo, robustez, reduzida manutenção, entre outros. A grande desvantagem está no controle de torque e velocidade, é mais complexo e requer estratégias específicas.

A eletrônica de potência é atualmente conhecida como uma ciência aplicada ao ramo de conversores estáticos. Conversores estáticos são sistemas capazes de adequar a amplitude e a frequência dos sinais elétricos da tensão ou da corrente disponibilizados pela fonte de alimentação para serem aplicados à carga escolhida.

Neste trabalho será apresentado conceitualmente e funcionalmente o conversor CA-CA indireto aplicado ao controle de torque e velocidade de motores de indução trifásicos com rotor de gaiola.

### 2 MOTOR DE INDUÇÃO

Para variar a velocidade do MIT pode-se atuar em três parâmetros: número de polos, frequência de alimentação e o escorregamento do motor. O método mais simples de controlar a velocidade é variando a frequência da tensão de alimentação. (GRUPO WEG - UNIDADE MOTORES, 2016).

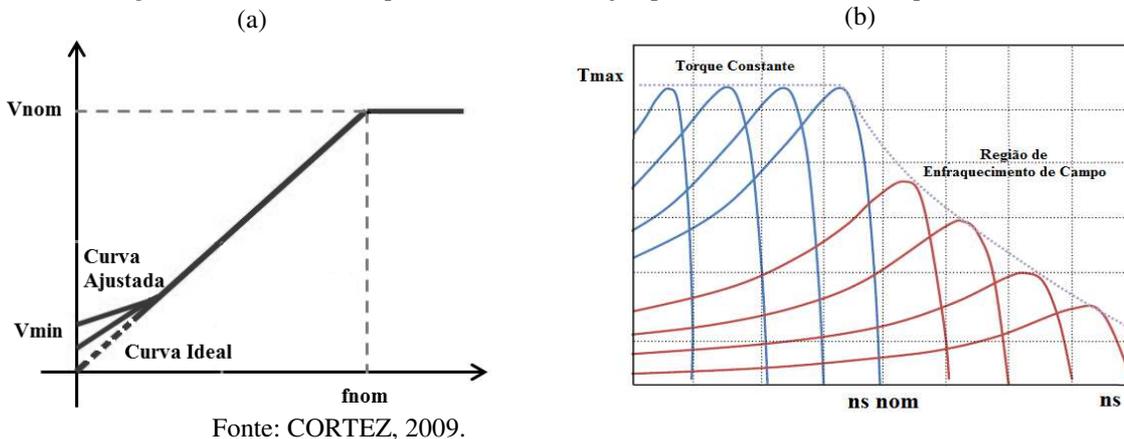
### 3 CONTROLE ESCALAR

Para possibilitar a operação do motor com torque constante para diferentes velocidades, considerando que a corrente no rotor depende da carga e que essa é constante, deve-se variar a tensão fundamental no estator ( $V_1$ ) proporcionalmente a variação da frequência fundamental de alimentação ( $f_1$ ), mantendo desta forma o torque constante. (CORTEZ, 2009). A técnica que utiliza esta premissa, variar tensão e frequência com o intuito de manter o torque constante, é conhecida como controle escalar ou controle  $V/f$ .

Sem considerar a queda de tensão na impedância do estator para frequências consideradas baixas, a variação da relação  $V_1/f_1$  é feita linearmente até a frequência nominal do motor, representada na Figura 1.a. Acima dessa frequência, a tensão deve permanecer constante e no seu valor nominal, havendo então apenas a variação da frequência aplicada nos terminais do motor. Com isso se obtém um decréscimo gradual do torque conforme o aumento da frequência. Esta região é chamada de enfraquecimento de campo e pode ser observada na Figura 1.b. (GRUPO WEG - UNIDADE MOTORES, 2016), (CORTEZ, 2009).

Figura 1.a - Curva  $V/f$ .

Figura 1.b - Curva de torque do motor de indução para várias faixas de frequência.

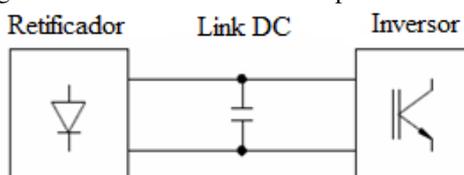


Fonte: CORTEZ, 2009.

### 4 UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE POTÊNCIA

Para se criar tal rede de alimentação, variar proporcionalmente tensão e frequência nos terminais do motor, a energia elétrica sofre duas transformações sucessivas, a primeira é a conversão da tensão alternada da rede de alimentação em tensão contínua e a segunda é a conversão dessa tensão em tensão alternada com valor eficaz e frequência variáveis, conforme diagrama de blocos da Figura 2. (VOLPIANO, 2013).

Figura 2 - Diagrama de blocos da unidade de processamento de potência.

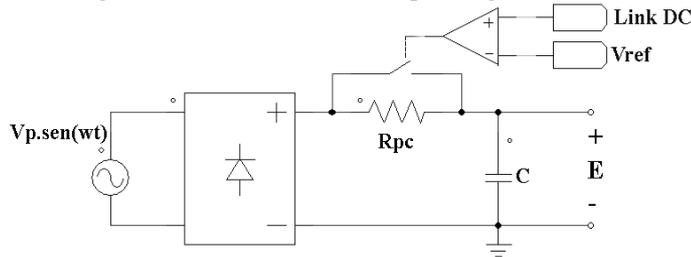


Fonte: O autor, 2018.

#### 4.1 Retificador monofásico não-controlado de onda completa em ponte com filtro capacitivo

A etapa retificadora mais *link DC*, mostrados na Figura 3, são responsáveis pela conversão CA-CC. Quanto maior o capacitor menor o *ripple* e maior o nível CC da tensão retificada. O grande inconveniente em aumentar o capacitor é a corrente de surto no momento da energização da unidade de processamento de potência. Uma maneira de limitar esta corrente é utilizando um circuito de pré-carga do capacitor, mostrado na Figura 3. (BARBI, 2006), (BONA; GARCIA, 2009).

Figura 3 - Retificador, circuito pré-carga e *link DC*.

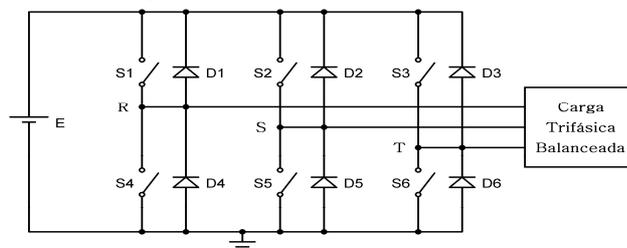


Fonte: O autor, 2018.

#### 4.2 Inversor trifásico

A etapa inversora é responsável pela conversão CC-CA. Na Figura 4 é apresentada a estrutura do inversor trifásico de tensão (*Voltage Source Inverter – VSI*). Os diodos em antiparalelo com os interruptores controlados (diodos de roda livre) fazem-se necessários quando a carga é indutiva, gerando um interruptor bidirecional em corrente. (MARTINS; BARBI, 2011).

Figura 4 - Inversor trifásico de tensão.



Fonte: MARTINS; BARBI, 2011.

Para se conseguir o efeito de fonte trifásica, é necessário que o terminal de saída de cada braço do inversor (R, S, T) seja conectado alternadamente no positivo e negativo da fonte de alimentação e a lógica aplicada para a comutação dos interruptores resulte em uma defasagem de 120° entre cada braço do inversor. (MARTINS; BARBI, 2011).

#### *Modulação por largura de pulso senoidal*

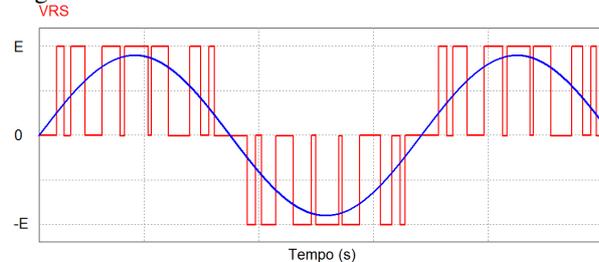
A técnica Modulação por Largura de Pulso Senoidal (SPWM) controla o tempo em que os transistores ficam ligados e desligados, de modo que os tempos ligados sejam mais longos no pico da onda. A Figura 5 mostra a tensão de linha na carga quando utilizado a técnica PWM senoidal para controle da etapa inversora. (POMILIO, 2014).

Para gerar os sinais que irão comandar a etapa inversora, é comparado uma onda triangular de alta frequência (portadora) com três ondas senoidais de baixa frequência (modulante) defasadas em 120°. A intersecção dessas formas de onda estabelece a duração dos sinais de

comando dos interruptores. Desse modo, a variação da amplitude do sinal modulante propicia a variação dos pulsos da tensão na carga, que seguem naturalmente uma lei senoidal. (VOLPIANO, 2013).

O sinal de comando enviado para cada transistor da etapa inversora é do tipo dois níveis. Desse modo, a tensão de fase se apresenta em dois níveis, enquanto a tensão de linha se apresenta em três níveis.

Figura 5 - Tensão de linha na saída do inversor trifásico.



Fonte: O autor, 2018.

O sinal modulante contém as características da tensão desejada na saída. Ele define a frequência da componente fundamental e o valor eficaz da tensão de saída. Já a onda portadora define a frequência de comutação dos interruptores controlados.

Dois índices são de importante definição nessa técnica de controle: (CORTEZ, 2009).

Índice de modulação em amplitude: Trata-se da razão entre as amplitudes do sinal modulante e a onda portadora, conforme Equação (1).

$$m_a = \frac{V_{mod}}{V_{port}} \quad (1)$$

Onde:

$m_a$  - Índice de modulação em amplitude;

$V_{mod}$  - Valor de pico do sinal modulante;

$V_{por}$  - Valor de pico da onda portadora.

O valor eficaz máximo atingível da tensão de linha da componente fundamental do inversor trifásico na região linear é dado pela Equação (2): (OLIVEIRA, 2018).

$$V_{LL1ef} = 0,612 \cdot m_a \cdot E \quad (2)$$

Onde:

$V_{LL1ef}$  - Valor eficaz da tensão de linha da fundamental;

$E$  - Valor médio da tensão no *link DC*.

Índice de modulação em frequência: Trata-se da razão entre as frequências da onda portadora e o sinal modulante, conforme Equação (3).

$$m_f = \frac{f_{port}}{f_{mod}} \quad (3)$$

Onde:

$m_f$  - Índice de modulação em frequência;

$f_{port}$  - Frequência da onda portadora;

$f_{mod}$  - Frequência do sinal modulante.

Aumentando-se a frequência da onda portadora aumenta-se  $m_f$  e, conseqüentemente, a frequência de chaveamento dos transistores. Isso permite deslocar as componentes harmônicas para frequências mais elevadas, facilitando a sua filtragem.

Por se tratar de um inversor trifásico, onde a tensão de linha é em três níveis, as harmônicas na forma de onda da tensão de linha aparecem como banda lateral, centralizadas em torno da frequência de chaveamento e seus múltiplos, ou seja, em torno dos índices  $m_f$ ,  $2m_f$  e assim por diante, minimizando o tamanho dos componentes de filtro. Este padrão geral é válido para todos os valores de  $m_a$  no intervalo 0 – 1, região linear.

A Tabela 1 apresenta as amplitudes normalizadas,  $V_{LLnp}/E$ , para várias componentes harmônicas ( $n$ ) e  $m_a$ . (OLIVEIRA, 2018).

Tabela 1 - Coeficientes de Fourier normalizados para modulação PWM senoidal a três níveis.

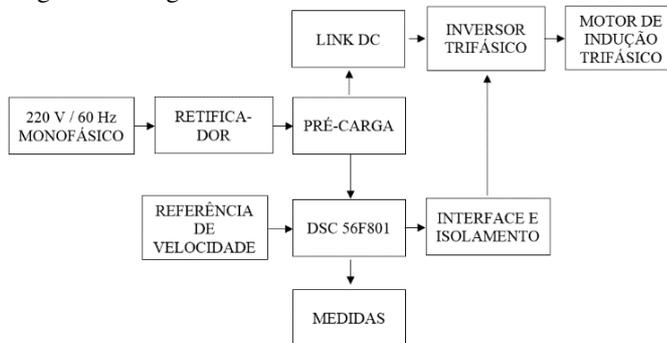
	$m_a=1$	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
$n=1$	0,866	0,779	0,693	0,606	0,520	0,433	0,346	0,260
$n=m_f \pm 2$	0,275	0,232	0,190	0,150	0,114	0,081	0,053	0,030
$n=2m_f \pm 1$	0,157	0,221	0,272	0,307	0,321	0,313	0,282	0,232

Fonte: OLIVEIRA, 2018.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

O desenvolvimento do protótipo do conversor CA-CA indireto envolveu as seguintes etapas: concepção do circuito, confecção das placas de circuito impresso, implementação do algoritmo de controle, montagem do protótipo, testes e validação. O diagrama de blocos do circuito desenvolvido pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de blocos do conversor CA-CA indireto.



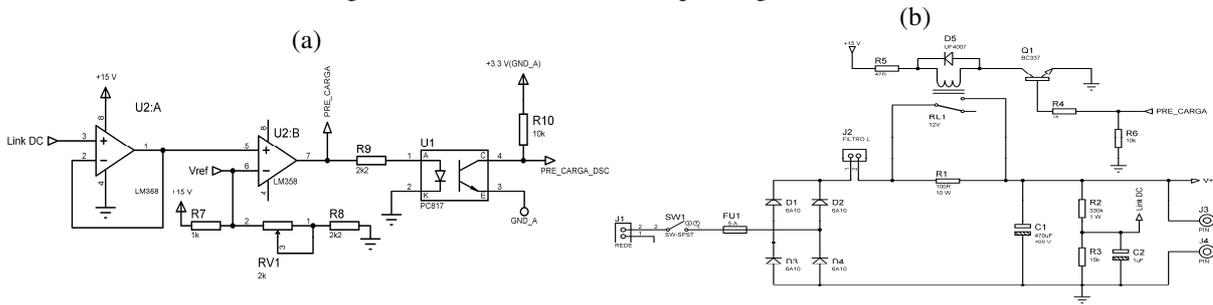
Fonte: O autor, 2018.

### 5.1 Link DC

Os circuitos pré-carga, retificador e *link DC* implementados são apresentados nas figuras Figura 7.a e Figura 7.b.

Figura 7.a - Controle do circuito pré-carga.

Figura 7.b - Retificador, circuito pré-carga e link DC.



Fonte: O autor, 2018.

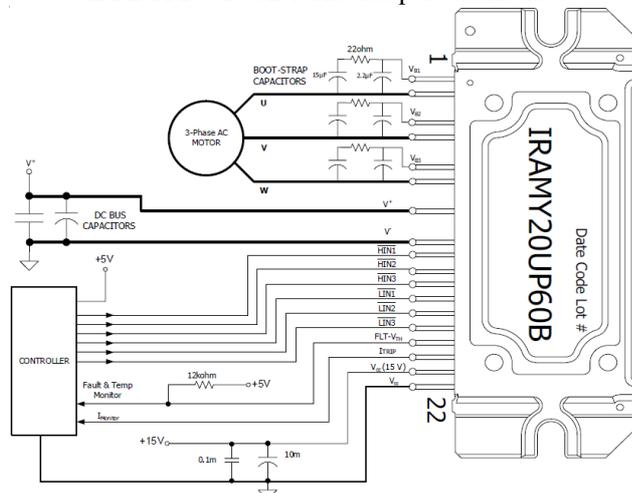
Dimensiona o capacitor do *link DC* de forma que ele possa suprir as necessidades do conversor CC-CA alimentando a carga citada anteriormente, resultando em um capacitor comercial de  $3 \times 470 \mu\text{F}$ . (BARBI, 2006).

Para o dimensionamento do resistor de pré-carga do capacitor do *link DC* adotou-se a corrente do fusível de entrada (5 A) e o valor de pico da tensão da rede como critérios de dimensionamento, resultando em um resistor comercial de  $100 \Omega/10 \text{ W}$ .

### 5.2 Módulo de potência

Para a etapa inversora utilizou-se o módulo IGBT IRAMY20UP60B fabricado pela empresa International Rectifier, disponível em estoque, atendendo as necessidades requeridas de tensão e corrente, cuja aplicação típica está ilustrada na Figura 8.

Figura 8 - Aplicação típica do módulo IGBT IRAMY20UP60B fornecida pelo fabricante.



Fonte: DATASHEET IRAMY20UP60B, 2018.

### 5.3 Algoritmo de controle

O controle do conversor CC-CA foi realizado com o auxílio do controlador de sinal digital (DSC) 56F801, da empresa NXP Semiconductor.

Têm-se como entradas a referência de velocidade e o sinal de habilita vindo do circuito pré-carga, e como saída, o PWM que irá comandar os transistores do conversor CC-CA.

A saída PWM é baseada em uma tabela seno. Essa tabela foi desenvolvida no programa EXCEL e contém as amplitudes do sinal modulante. O tempo morto entre os sinais de comando dos dois transistores de um braço do inversor é 700 ns.

## 5.4 Interface e Isolamento

Para realizar o isolamento elétrico entre o DSC e o estágio de potência, optou-se pelo uso de optoacopladores. A função dos optoacopladores também é adequar os sinais de 3,3 V vindos das saídas PWM do 56F801 para 5 V, tensão necessária para acionar o drive interno do módulo IGBT.

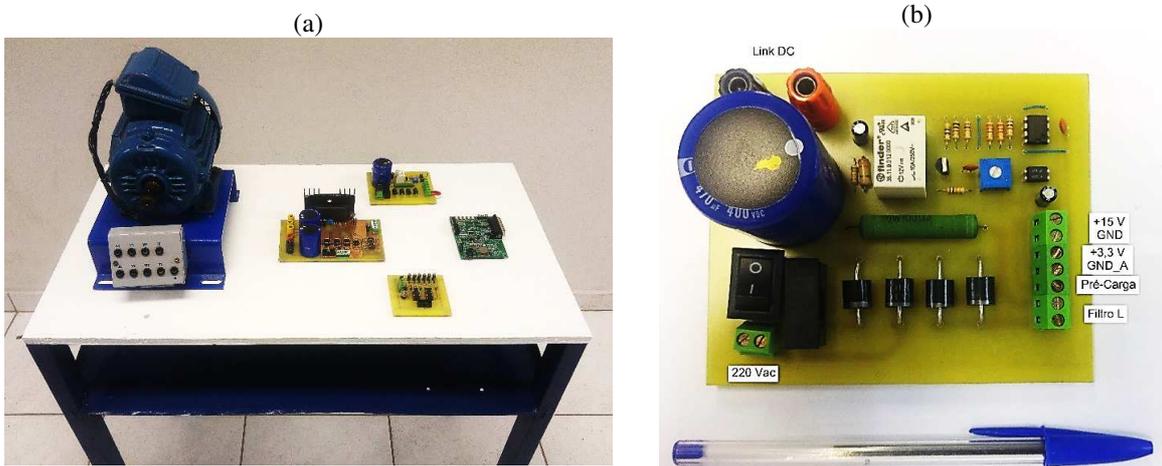
O optoacoplador utilizado é o circuito integrado HCPL2531. Esse foi escolhido devido sua resposta rápida aos sinais de entrada.

## 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A bancada didática é composta pelo motor de indução trifásico de 1,5 CV e seus circuitos de controle e acionamento. A Figura 9.a apresenta a bancada didática.

Sobre a bancada é possível observar o conversor CA-CC, Figura 9.b, o conversor CC-CA, Figura 10.a, o kit de desenvolvimento 56F801, e a placa de medidas, Figura 10.b.

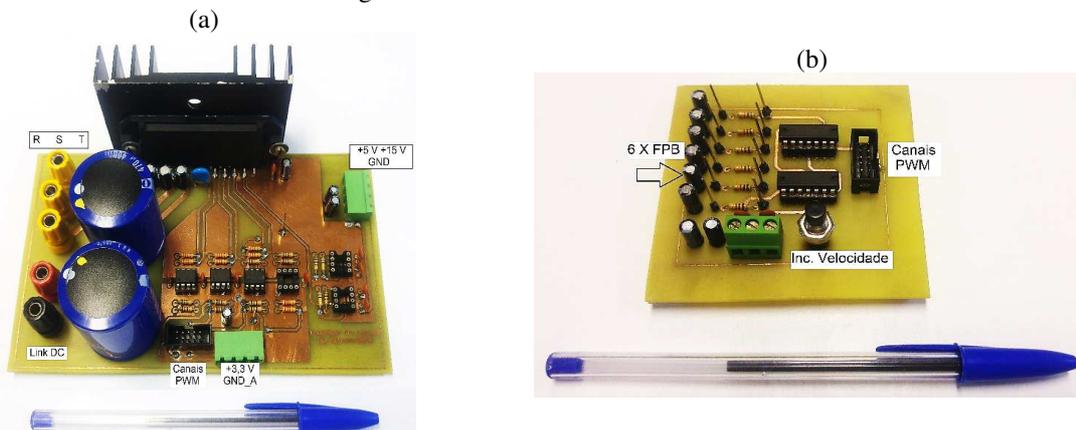
Figura 9.a - Bancada didática.  
Figura 9.b - Conversor CA-CC.



Fonte: O autor, 2018.

A placa de medidas é composta por seis filtros passa baixa (FPB) de primeira ordem com frequência de corte de 160 Hz, responsáveis por reconstruir os sinais modulante das saídas PWM com frequência de 5,02 kHz, e um botão para ajuste de velocidade do MIT.

Figura 10.a - Conversor CC-CA.  
Figura 10.b - Placa de medidas.

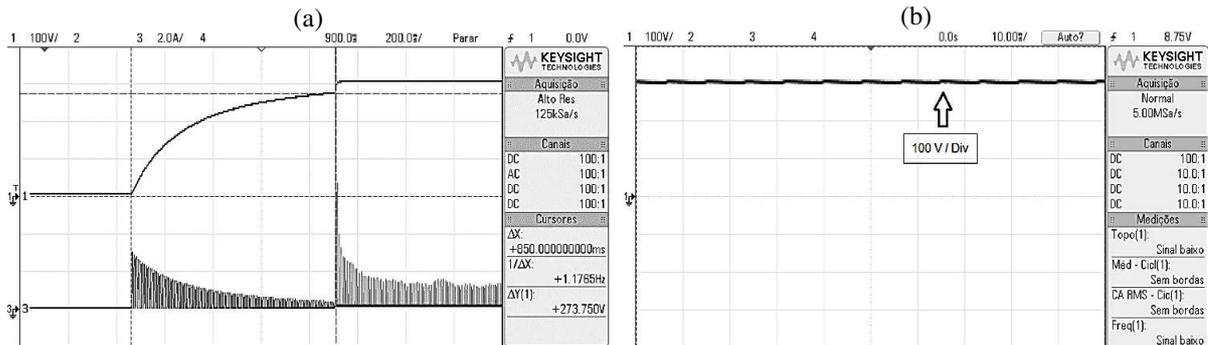


Fonte: O autor, 2018.

A verificação da operação do protótipo foi focada na manutenção da relação  $V/f$ . O motor foi ligado em delta, configurado para tensão de entrada de 220 V. Os testes foram realizados com o motor a vazio, justificando os valores de correntes abaixo dos valores nominais.

Observa-se na Figura 11.a o circuito pré-carga atuando na energização da unidade de processamento de potência. A Figura 11.b apresenta a tensão no *link DC* em regime permanente.

Figura 11.a - Tensão e corrente no link DC na energização da unidade de processamento de potência.  
Figura 11.b - Tensão no link DC em regime permanente.

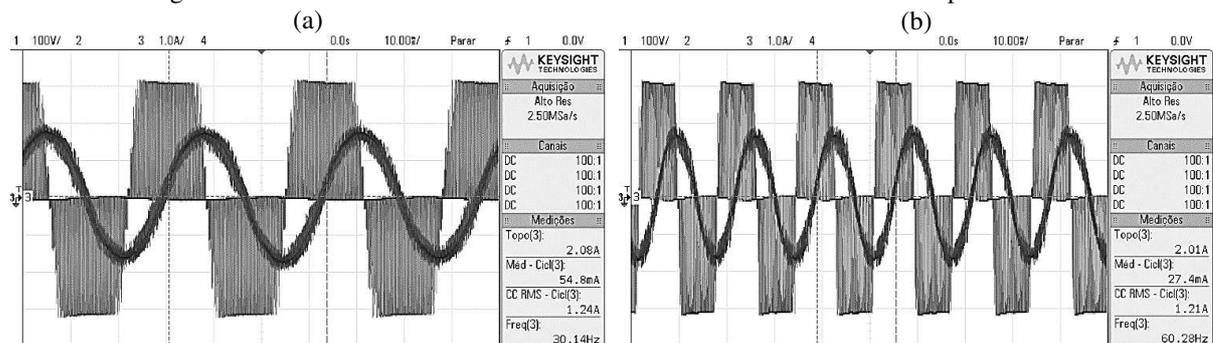


Fonte: O autor, 2018.

Nas figuras Figura 12.a e Figura 12.b são mostradas as formas de onda da tensão de linha e corrente de fase no motor de indução trifásico para duas frequências distintas. Pela análise das formas de onda e seus respectivos valores é possível constatar que a corrente no motor permanece constante com a variação da tensão e frequência no estator, conseqüentemente, o torque permanece constante.

Dada a característica indutiva da carga, atribuiu-se a corrente de saída do inversor características de sinal senoidal.

Figura 12.a - Tensão de linha e corrente de fase no motor trifásico a vazio para 30 Hz.  
Figura 12.b - Tensão de linha e corrente de fase no motor trifásico a vazio para 60 Hz.

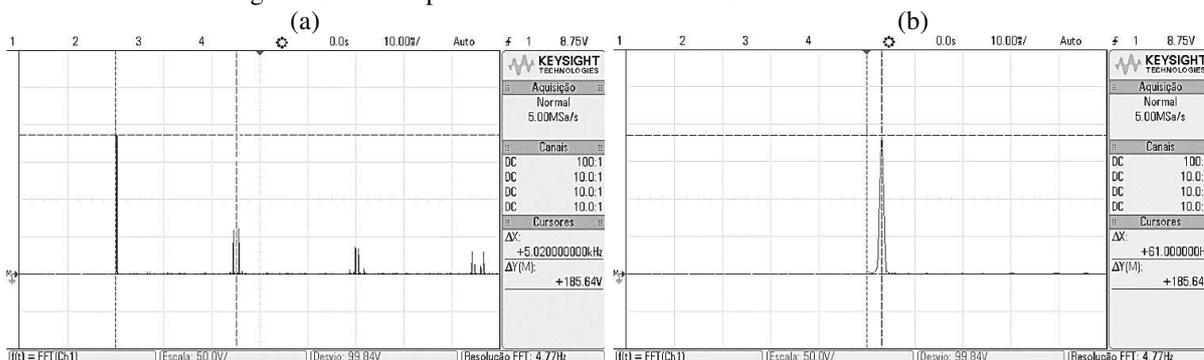


Fonte: O autor, 2018.

O espectro das frequências harmônicas da tensão de linha na saída do conversor CC-CA foi obtido para  $m_a = 1$ . Observa-se na Figura 13.a que as primeiras harmônicas de tensão aparecem em torno da frequência de chaveamento, 5,02 kHz, e que o valor eficaz da tensão de linha da componente fundamental é 185,64 V, mostrado na Figura 13.b, respeitando o valor eficaz máximo atingível com a técnica SPWM operando na região linear, conforme Equação (2).

Figura 13.a - Espectro das frequências harmônicas da tensão de linha do inversor.

Figura 13.b - Componente fundamental da tensão de linha do inversor.

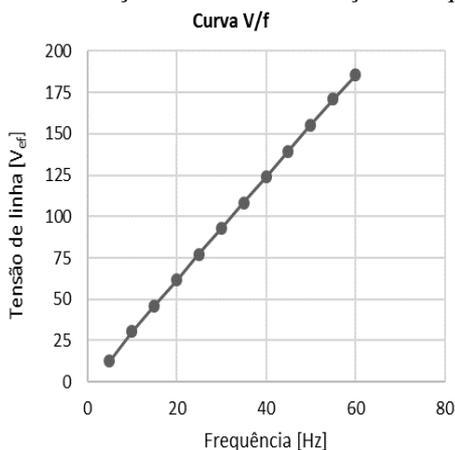


Fonte: O autor, 2018.

Utilizando a técnica SPWM na região linear, a variação da relação  $V_i/f_i$  foi linear até a frequência nominal do motor.

A Figura 14 mostra a curva  $V/f$  aplicada no controle de torque e velocidade do motor de indução trifásico.

Figura 14 - Variação da tensão em relação a frequência.



Fonte: O autor, 2018.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho apresentou o projeto e implementação de um conversor CA-CA indireto com a finalidade de acionar um motor de indução trifásico de 1,5 CV, criando uma bancada didática para as aulas práticas de eletrônica de potência. A técnica utilizada para o controle de torque e velocidade do MIT foi o controle escalar em malha aberta. Foram considerados os dados da rede de alimentação e do motor para dimensionamento da unidade de processamento de potência.

O projeto foi avaliado na prática e apresentou os resultados esperados. Os sinais obtidos de tensão e corrente corresponderam aos modelos teóricos.

Verificou-se que o conversor CC-CA sendo controlado pela técnica SPWM na região linear não atendeu as necessidades do motor, atingindo no máximo 185,64 V eficazes de linha. Recomenda-se para trabalhos futuros que a técnica SPWM seja operada na região de sobremodulação, conseguindo assim, entregar ao motor a tensão requerida.

Através da utilização da bancada didática é possível trabalhar os assuntos das unidades curriculares de eletrônica de potência, medidas e instrumentação, acionamentos elétricos e máquinas elétricas, através dos módulos que compõem a bancada.



### REFERÊNCIAS

BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 6. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2006.

BONA, Daniel Dezan de; GARCIA, Luiz Fernando. **Inversor de Frequência Monofásico para Trifásico**. 2009. Disponível em: <<http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/view/13/13>>. Acesso em: 19 out. 2018.

CORTEZ, Daniel Flores. **Estudo e Implementação de um Inversor de Frequência Baseado em Processador de Sinais**. 2009. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/32554215/Estudo-e-implementacao-de-um-inversor-de-frequencia-baseado-em-processador-de-sinais#logout>>. Acesso em: 11 jun. 2018.

GRUPO WEG - UNIDADE MOTORES (Santa Catarina). **Motores de Indução Alimentados por Inversores de Frequência PWM**. 2016. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h35/h10/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-50029351-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 16 mar. 2018.

MARTINS, Denizar Cruz; BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência: Introdução ao Estudo dos Conversores CC-CA**. 3. ed. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2011. 490 p.

OLIVEIRA, Sérgio Vidal de. **Notas de Aula de Fundamentos da PWM Senoidal**. Blumenau: FURB, 2018.

POMILIO, José Antenor. **Eletrônica de Potência: Conversores CC-CA como Fontes de Alimentação com Frequência Fixa**. 2014. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/eltpot/cap6.pdf>>. Acesso em: 07 set. 2018.

VOLPIANO, Sérgio Luiz. **Eletrônica de Potência Aplicada ao Acionamento de Máquinas Elétricas**. São Paulo: Senai-sp Editora, 2013.

### DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A THREE-PHASE DIDACTIC CC-CA CONVERTER APPLIED FOR THE DRIVE OF AN INDUCTION MOTOR

**Abstract:** *This work presents the design and implementation of a torque and speed control system for a three-phase induction motor using the scalar control technique, which will compose a didactic workbench that will serve as teaching material for the curricular units that have in their program of studies contents related to power electronics. The system consists of two stages of conversion, the first one is the rectifier and the second one is the inverter. The technique used to control the inverter stage is the Sine Pulse Width Modulation, implemented through the digital signal controller 56F801. Experimental results are presented for a three-phase induction motor of 1,5 HP.*

**Keywords:** *Didactic workbench. Scalar control. DC-AC converter. Three-phase induction motor. SPWM.*