

# PEA2502 LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

## INVERSOR PARA ACIONAMENTO DE MOTOR DE INDUÇÃO

W. KAISER C. GOLDEMBERG 02/2009

### 1. OBJETIVOS

Familiarização com a operação de um inversor para acionamento de motor de indução com frequência variável. Análise de formas de onda e desempenho do conjunto motor + inversor. Como complementação da teoria, sugere-se a apostila “Acionamento CA” utilizada nas disciplinas PEA 509 e PEA 511.

### 2. MOTOR DE INDUÇÃO

#### 2.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A grande maioria das aplicações utiliza o motor de indução trifásico com rotor em gaiola. O estator abriga três enrolamentos alojados em ranhuras defasados de  $120^\circ$  no espaço. O rotor é formado de um pacote de chapas ranhuradas nas quais são inseridas barras condutoras cujas extremidades são ligadas em curto circuito através de anéis condutores.

Quando o enrolamento estatórico é alimentado por um sistema trifásico simétrico e equilibrado com frequência  $f_{rede} = \omega_{rede} / 2 \cdot \pi$  circula um terno de correntes que estabelece um campo girante no entreferro com as seguintes características: a amplitude da densidade de fluxo  $B_{ag}$  é constante e o campo gira com uma frequência (síncrona)  $\omega_s$  em relação ao estator.

A velocidade síncrona de um motor com número de pólos  $p$  alimentado com frequência  $f_{rede}$  é dada por:

$$\omega_s = \frac{\omega_{rede}}{\frac{p}{2}} \quad (\text{rad / s}) \quad \text{ou} \quad n_s = 60 \cdot \frac{\omega_s}{2 \cdot \pi} = \frac{120}{p} \cdot f_{rede} \quad (\text{rpm}) \quad (1)$$

O fluxo no entreferro  $\phi_{ag}$  gira com velocidade síncrona em relação aos enrolamentos do estator e induz em cada fase do enrolamento estatórico uma tensão  $E_{ag}$  dada por:

$$e_{ag} = N_s \cdot \frac{d\phi_{ag}}{dt} = N_s \cdot \omega_{rede} \cdot \phi_{ag} \cdot \cos(\omega_{rede} \cdot t) \quad (2)$$

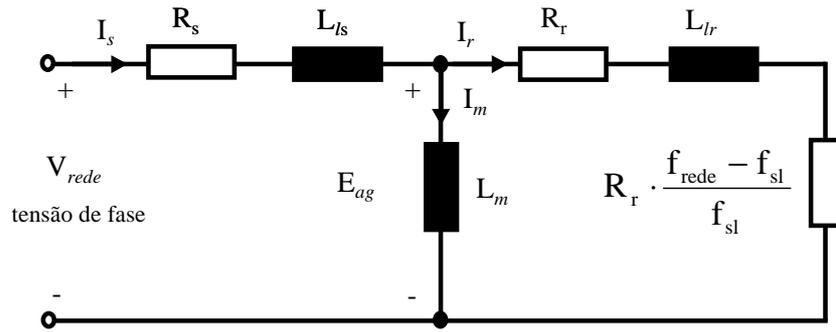
sendo  $N_s$  o número equivalente de espiras por fase do estator e cujo valor eficaz vale:

$$E_{ag} = k_1 \cdot f_{rede} \cdot \phi_{ag} \quad (3)$$

O comportamento elétrico do motor de indução pode ser modelado pelo seu circuito equivalente por fase indicado na fig. 1.

O torque no eixo é produzido como resultado da interação entre o fluxo no entreferro e as correntes rotóricas. Por esta razão o motor de indução nunca gira com velocidade síncrona  $\omega_s$  pois nesta condição não haveria movimento relativo entre o fluxo do entreferro e o rotor. Por

conseqüência a tensão induzida nas barras do rotor seria nula, não haveria circulação de correntes rotóricas e o torque seria nulo.



**Fig. 1** - Circuito equivalente por fase do motor de indução

Portanto, para haver torque, o rotor tem girar com velocidade  $\omega_r \neq \omega_s$  no mesmo sentido do fluxo do entreferro, ou seja, “escorregando” em relação a este com uma velocidade relativa  $\omega_{sl} = (\omega_s - \omega_r)$ . Na prática a velocidade de escorregamento é normalizada pela velocidade síncrona e denominada simplesmente de escorregamento  $\bar{s}$  ou seja:

$$\bar{s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (4)$$

Portanto, a velocidade do escorregamento do fluxo no entreferro  $\phi_{ag}$  em relação ao rotor é dada por  $\omega_{sl} = (\omega_s - \omega_r) = \bar{s} \cdot \omega_s$ . Pela lei de Faraday, quando o fluxo se fecha pelo rotor, as tensões induzidas e as correntes no circuito rotórico terão frequência  $f_{sl} = \bar{s} \cdot f_{rede}$ . Assumindo o mesmo número equivalente de espiras  $N_s$  do circuito estatórico, o valor eficaz da tensão induzida por fase no rotor é dado pela expressão:

$$E_r = k_1 \cdot f_{sl} \cdot \phi_{ag} \quad (5)$$

Como as barras rotóricas estão em curto-circuito, a corrente em cada fase do rotor resulta:

$$I_r = \frac{E_r}{R_r + j \cdot \omega_{sl} \cdot L_{lr}} \quad (6)$$

sendo  $R_r$  e  $L_{lr}$  respectivamente a resistência e a indutância de dispersão por fase do circuito equivalente rotórico.

O campo produzido pelas correntes rotóricas gira com frequência  $\omega_{sl}$  em relação ao rotor e com frequência síncrona  $\omega_s$  em relação estator, lembrando que  $\omega_{sl} + \omega_r = \omega_s$ . A interação entre o fluxo no entreferro  $\phi_{ag}$  e o campo girante rotórico resulta em um torque eletromagnético  $T_{em}$  dado por:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = \frac{P_{ag} - P_r}{\omega_r} \quad (7)$$

sendo  $P_{em}$ ,  $P_{ag}$  e  $P_r$  as potências eletromagnética, no entreferro e de perdas no circuito rotórico.

A potência  $P_{ag}$  no entreferro é dada por:

$$P_{ag} = 3 \cdot \text{Re}(E_{ag} \cdot I_r) \xrightarrow{(3,5)} = 3 \cdot \text{Re}\left(\frac{f_{rede}}{f_{sl}} \cdot E_r \cdot I_r\right) \xrightarrow{6} = 3 \cdot \frac{f_{rede}}{f_{sl}} \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad (8)$$

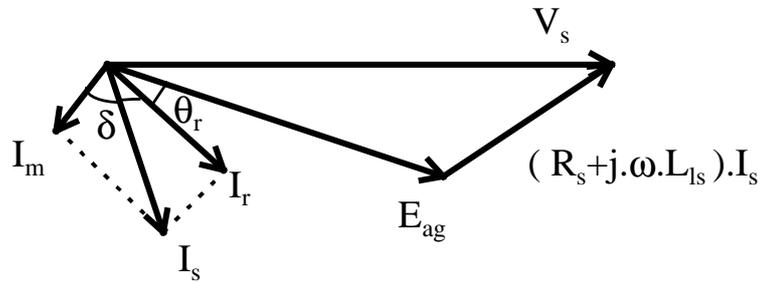
Note que o termo  $\frac{f_{rede}}{f_{sl}} \cdot R_r$  é soma das resistências  $R_r$  e  $\frac{f_{rede} - f_{sl}}{f_{sl}} \cdot R_r$  do circuito equivalente indicado na fig. 1. Portanto a potência de perdas do circuito rotórico é dada por:

$$P_r = 3 \cdot R_r \cdot I_r^2 \quad (9)$$

Substituindo-se as expressões (8) e (9) em (7) o torque eletromagnético resulta:

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_r} = 3 \cdot \frac{f_{rede} - f_{sl}}{f_{sl}} \cdot R_r \cdot I_r^2 = \frac{P_{em}}{\omega_s} \quad (10)$$

A partir do diagrama fasorial do circuito equivalente verifica-se que a corrente no enrolamento estatórico é composta de duas componentes: i)  $I_m$ , (corrente magnetizante) que produz o fluxo no entreferro  $\phi_{ag}$ , o qual se encontra atrasado de  $90^\circ$  em relação a  $E_{ag}$  e ii)  $I_r$ , que está atrasada de  $\theta_r = \tan^{-1} \frac{\omega_{sl} \cdot L_{ls}}{R_r}$  em relação a  $E_{ag}$  e é responsável pela produção do torque.



**Fig. 2** - Diagrama fasorial do circuito equivalente por fase do motor de indução

A partir das leis da conversão eletromecânica o torque também pode ser expresso na forma:

$$T_{em} = k_4 \cdot \phi_{ag} \cdot I_r \cdot \sin(\delta) = k_4 \cdot \phi_{ag} \cdot I_r \cdot \sin(90^\circ \delta - \theta_r) \xrightarrow{\omega_{sl} \cdot L_{sl} \ll R_r} \approx k_4 \cdot \phi_{ag} \cdot I_r \quad (11)$$

Por outro lado, como

$$I_r = \frac{E_r}{R_r + j \cdot \omega_{sl} \cdot L_{lr}} \xrightarrow{\omega_{sl} \cdot L_{sl} \ll R_r} \approx \frac{E_r}{R_r} = k_5 \cdot \phi_{ag} \cdot f_{sl} \quad (12)$$

Substituindo-se (12) em (11) resulta:

$$T_{em} \approx k_6 \cdot \phi_{ag}^2 \cdot f_{sl} \quad (13)$$

Assumindo-se que  $(R_r + j \cdot \omega_{sl} \cdot L_{lr}) \cdot I_s \ll E_{ag}$ , ou seja, a tensão induzida é aproximadamente igual à tensão de alimentação o fluxo no entreferro pode ser expresso na forma:

$$\phi_{ag} \cong k_7 \cdot \frac{V_s}{f_{rede}} \quad (14)$$

Finalmente a relação entre as perdas no rotor e potência eletromagnética é dada por:

$$\frac{P_r}{P_{em}} = \frac{f_{sl}}{f_{rede} - f_{sl}} \quad (15)$$

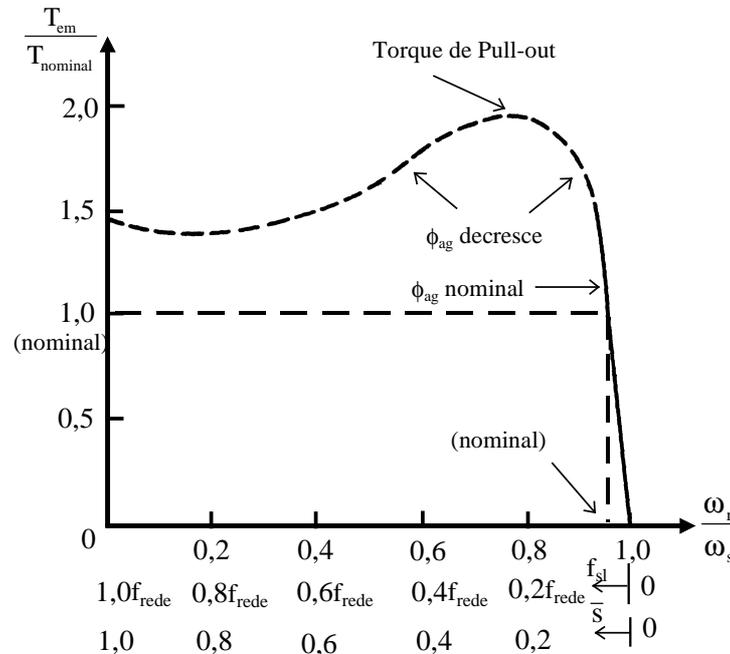
### Principais conclusões:

- A velocidade síncrona  $\omega_s$  é diretamente proporcional à frequência da rede  $f_{rede}$ .
- Para baixos valores de frequência de escorregamento  $f_{sl}$ , exceto para valores muito baixos de frequência da rede, a rotação do motor varia linearmente com a frequência da rede.
- Para manter constante o torque, o fluxo no entreferro  $\phi_{ag}$  deve ser mantido constante, assim como a relação  $\frac{V_s}{f_{rede}}$ . Em outras palavras, o valor eficaz da tensão de alimentação  $V_s$  deve variar diretamente com a frequência de alimentação  $f_{rede}$ .
- Uma vez que a componente  $I_r$  do estator é proporcional à frequência de escorregamento  $f_{sl}$ , esta deve ser limitada para que corrente estatórica  $I_s$  não exceda seu valor nominal.

## 2.2 CARACTERÍSTICAS DE TORQUE DO MOTOR DE INDUÇÃO

### I - Motor alimentado nas condições nominais de tensão e frequência

A seguir são apresentadas duas curvas normalizadas típicas de um motor de indução em gaiola: torque x rotação (fig. 3) e  $I_r$  x rotação (fig. 4).

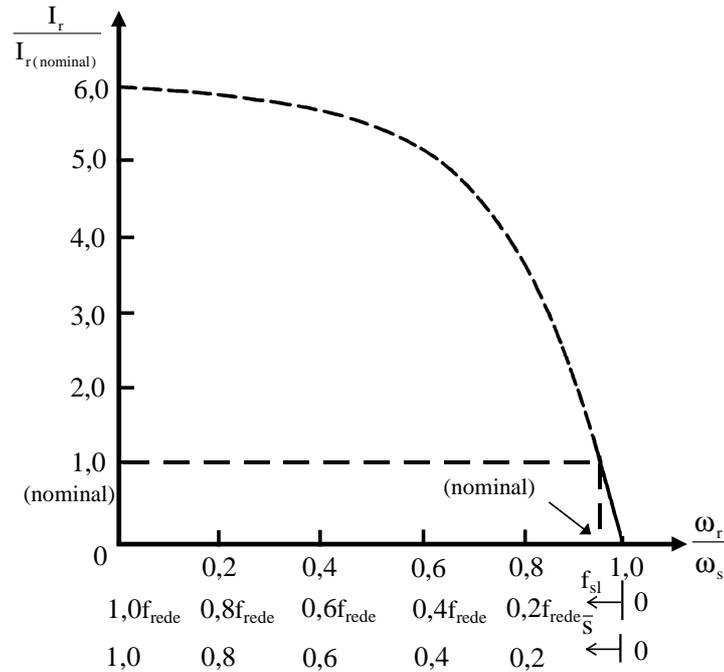


**Fig. 3** - Curva normalizada torque x rotação para tensão e frequência nominais

Nota-se que, para baixos valores de escorregamento, tanto o torque como  $I_r$  variam linearmente com a frequência de escorregamento  $f_{sl}$ . À medida que o escorregamento aumenta o comportamento de ambas as grandezas deixa de ser linear pelas seguintes razões: a) a reatância do circuito rotórico deixa de ser desprezível frente a resistência rotórica  $R_r$ ; b) o ângulo  $\delta$  da expressão (11) se afasta consideravelmente de  $90^\circ$  e c) à medida que aumenta a componente  $I_r$  (e portanto de  $I_s$ ) a queda de tensão devido a impedância do circuito estatórico torna-se significativa e a aproximação  $V_s \approx E_{ag}$  deixa de ser válida. Portanto, mantida fixa a tensão de alimentação  $V_s$

o fluxo no entreferro cai  $\phi_{ag} = k_7 \cdot \frac{E_{ag}}{f_{rede}}$  e o comportamento do torque e da corrente deixa de ser

linear conforme mostra o trecho pontilhado nas curvas apresentadas nas figs. 3 e 4.



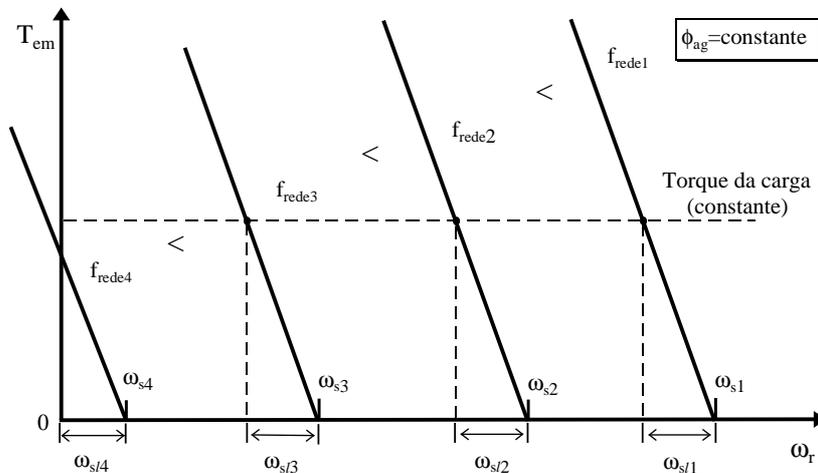
**Fig. 4** - Curva normalizada  $I_r$  x rotação para tensão e frequência nominais

Nos motores de indução comerciais o escorregamento é mantido baixo e a aproximação linear se mantém válida. Convém lembrar que durante o transitório de partida a corrente absorvida da rede pode atingir 6 a 8 vezes o seu valor nominal em regime se o motor de indução estiver ligado diretamente à rede sem um equipamento de limitação do tipo “soft-starter”.

**II - Motor alimentado com frequência variável**

Uma forma de se alterar a rotação do motor é variar a frequência de alimentação mantendo fixa a relação  $\frac{V_s}{f_{rede}}$  impondo-se o fluxo no entreferro nominal. Nestas condições, pela expressão (13) verifica-se que o torque é diretamente proporcional à frequência de escorregamento  $f_{sl}$ , ou seja, como  $\omega_{sl} = \frac{f_{rede}}{f_{sl}} \cdot \omega_s = \frac{4 \cdot \pi}{p} \cdot f_{sl}$ , têm-se:

$$\boxed{T_{em} \approx k_8 \cdot \omega_{sl}} \tag{16}$$

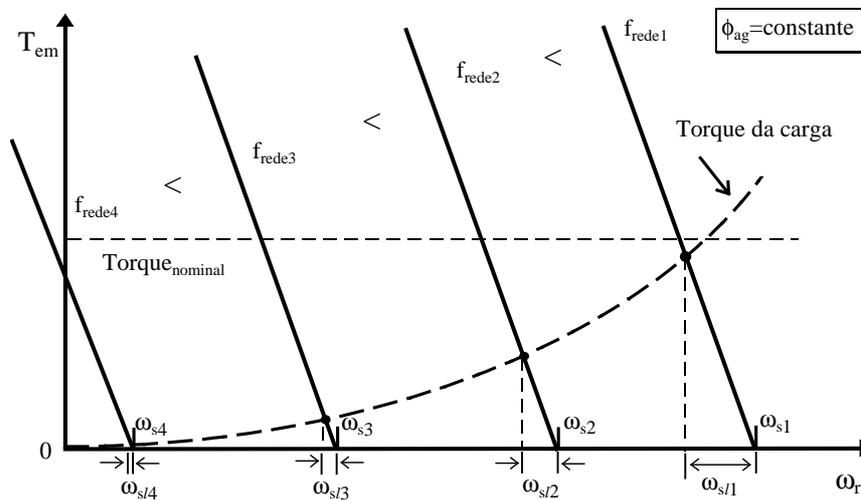


**Fig. 5** - Curva torque x rotação para uma carga mecânica de torque constante

A fig. 5 apresenta a característica de torque de um motor alimentado com frequência variável, acionando uma carga mecânica com torque constante. Mantido o fluxo no entreferro constante e variando-se a frequência de alimentação verifica-se que: i) a característica torque x rotação do motor é deslocada horizontalmente e b) para uma carga mecânica com torque constante a frequência de escorregamento se mantém constante.

Na maioria dos aplicações o torque de carga depende da rotação. A fig. 6 ilustra o comportamento do escorregamento durante o transitório de partida de um motor alimentado com frequência variável e acionando uma carga com torque quadrático (compressor, bomba centrífuga, ventilador). Mantido o fluxo no entreferro constante, verifica-se que o escorregamento é diretamente proporcional ao torque e neste caso decresce com a frequência de alimentação.

Um inversor permite impor uma partida com taxa de aceleração controlada e limitar a corrente nos enrolamentos do motor. Pela expressão (12) verifica-se que  $I_r \approx k_s \cdot \phi_{ag} \cdot f_{sl}$ . Por outro lado, nos instantes iniciais da partida  $f_{sl} \cong f_{rede}$ . Portanto a partida com taxa de aceleração controlada permite limitar a corrente  $I_s = \sqrt{I_m^2 + I_r^2}$  nos terminais do motor.



**Fig. 6** - Curva torque x rotação para uma carga mecânica de torque quadrático

### 2.3 CARACTERÍSTICAS DO MOTOR DE INDUÇÃO ALIMENTADO POR INVERSOR

A alimentação do motor de indução através de um inversor possibilita o acionamento de uma carga mecânica com rotações acima e abaixo do valor nominal do motor. No entanto as características de torque e potência do acionamento são dependentes de certas condições, conforme mostra a fig. 7. Os inversores comerciais apresentam em geral três regiões de operação: a) uma região de torque constante para frequências abaixo da nominal; b) uma região de potência constante limitada à uma faixa de frequência acima da nominal e c) uma região de altas rotações.

#### I - Frequências abaixo da nominal - Torque constante

Para rotações abaixo da nominal o fluxo no entreferro  $\phi_{ag}$  é mantido constante. A tensão de alimentação do estator é decrementada proporcionalmente à frequência de operação mantendo-se a relação  $\frac{V_s}{f_{rede}}$  constante. Desta forma o motor consegue operar nas suas condições nominais de torque, corrente e escorregamento.

Convém ressaltar que abaixo de um determinado limiar de frequência o efeito da resistência do enrolamento estático não pode mais ser desprezada. Pelo circuito equivalente da fig. 2 verifica-se que:

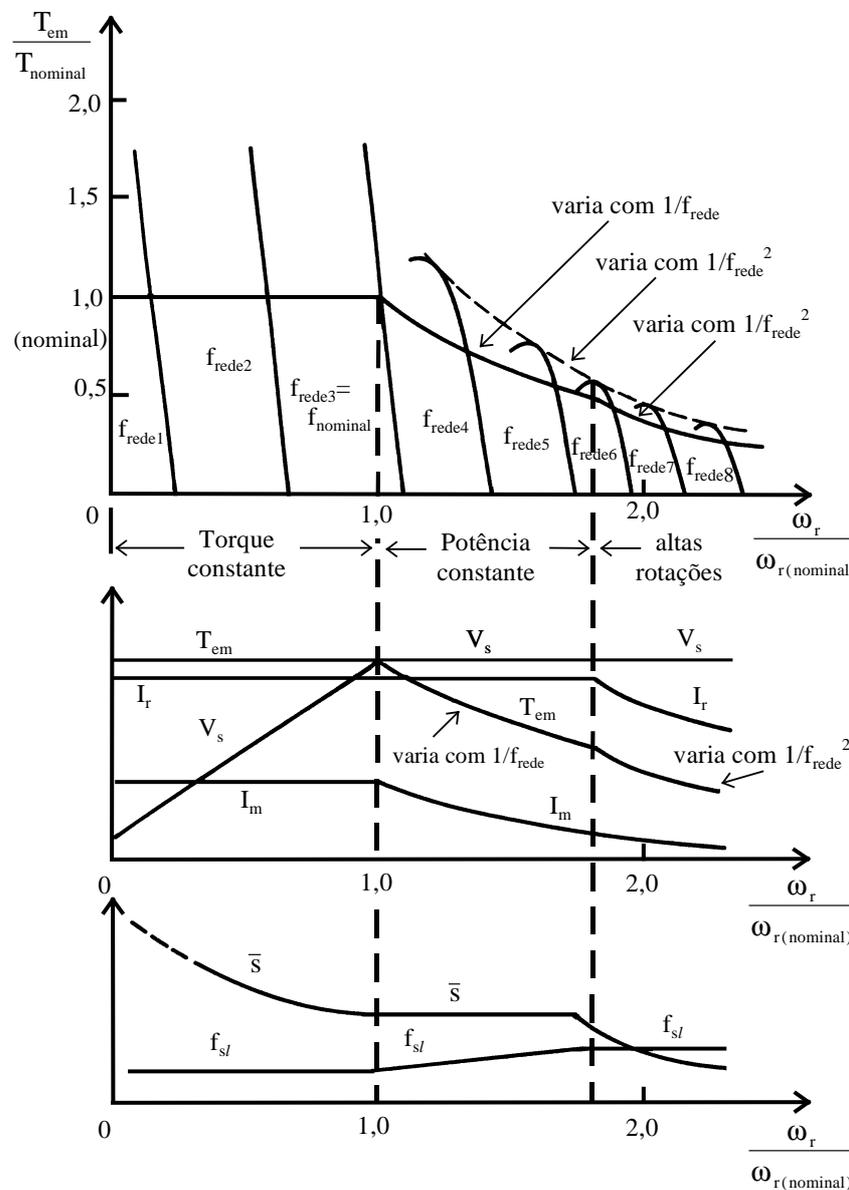
$$V_s \cong (E_{ag} + R_s \cdot I_r + \omega_{rede} \cdot L_{ls} \cdot I_m) + j \cdot (\omega_{rede} \cdot L_{ls} \cdot I_r - R_s \cdot I_m) \approx E_{ag} + R_s \cdot I_r + \omega_{rede} \cdot L_{ls} \cdot I_m$$

Portanto:

$$V_s \approx k_{11} \cdot f_{rede} + R_s \cdot I_r \quad (17)$$

Portanto, em baixas frequências é necessário incrementar-se a relação  $\frac{V_s}{f_{rede}}$  para compensar as perdas  $R_s \cdot I_r$  de forma a manter o fluxo  $\phi_{ag}$  constante.

É importante lembrar que: i) em regime, a priori as perdas rotóricas são constantes (vide expressão (9)) e ii) para baixas rotações existe uma redução na capacidade de ventilação, sendo necessária a utilização de ventilação forçada (motoventilador externo) para garantir a dissipação das perdas.



**Fig. 7** - Curvas características e um motor de indução alimentado por inversor

## II - *Frequências acima da nominal - Potência constante*

A maioria dos inversores não consegue alimentar o motor com valores de tensão acima do nominal. Portanto, se  $V_s \approx V_{s(\text{nominal})}$  resulta que  $T_{em} \approx k_{12} \cdot \frac{\omega_{sl}}{f_{rede}^2}$ . Limitando-se a corrente  $I_s$  (e portanto  $I_r$ ) no seu valor nominal, o motor opera com escorregamento constante.

Como  $I_r = k_{13} \cdot \frac{f_{sl}}{f_{rede}} = k_{14} \cdot \bar{s}$  e  $\omega_r = (1 - \bar{s})\omega_s = k_{15} \cdot f_{rede}$  resulta:

$$T_{em} = \frac{f_{rede(\text{nominal})}}{f_{rede}} \cdot T_{em(\text{nominal})} \quad \text{e} \quad P_{em(\text{max})} = T_{em(\text{max})} \cdot \omega_r = \text{constante} \quad (18)$$

## III - *Região de altas rotações*

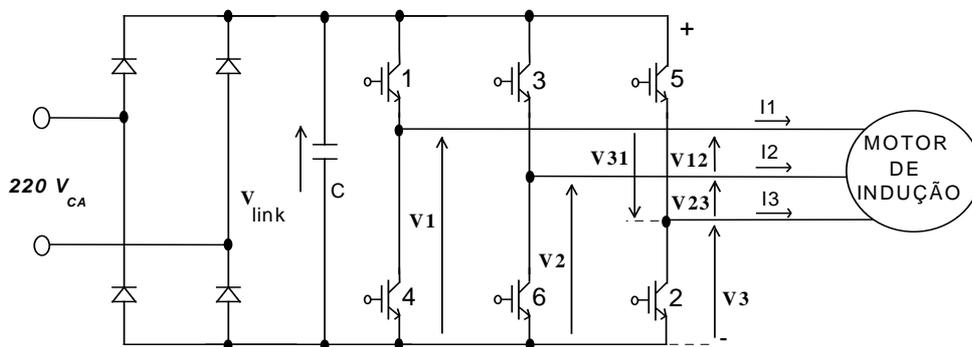
Mantendo-se a tensão de alimentação  $V_s$  do motor limitada ao seu valor nominal, para rotações acima de 1,5 a 2 vezes o valor nominal o fluxo no entreferro fica reduzido ao ponto que o torque de pull-out do motor nestas condições cair abaixo do torque nominal (vide fig. 7). Verifica-se que a capacidade de torque máxima decai segundo a relação

$$T_{em,\text{max}} = \frac{k_{16} f}{f_{rede}^2} \quad (19)$$

## 3. INVERSOR

A grande maioria dos motores comerciais de baixa tensão são alimentados através de inversores do tipo fonte de tensão, ou seja, o inversor é alimentado através de um retificador (trifásico ou monofásico) com filtro capacitivo conforme mostrado na fig. 8.

O inversor é constituído de uma ponte trifásica utilizando IGBTs como interruptores e a amplitude da tensão e a frequência de alimentação do motor são controladas através de modulação por largura de pulso (PWM) dos interruptores do inversor. Cada perna do inversor é constituído de dois interruptores que conectam os enrolamentos de duas fases do motor no ponto “+” (“-”) e o outro enrolamento no ponto “-” (“+”) do capacitor. Desta forma existem 8 combinações possíveis para se conectar os enrolamentos do motor à tensão  $V_{link}$  sendo que duas fornecem tensão de linha nulas ao motor. Por uma questão de simetria, durante um ciclo da frequência de operação cada enrolamento do motor permanece conectado aos terminais “+” e “-” durante intervalos de tempo iguais.



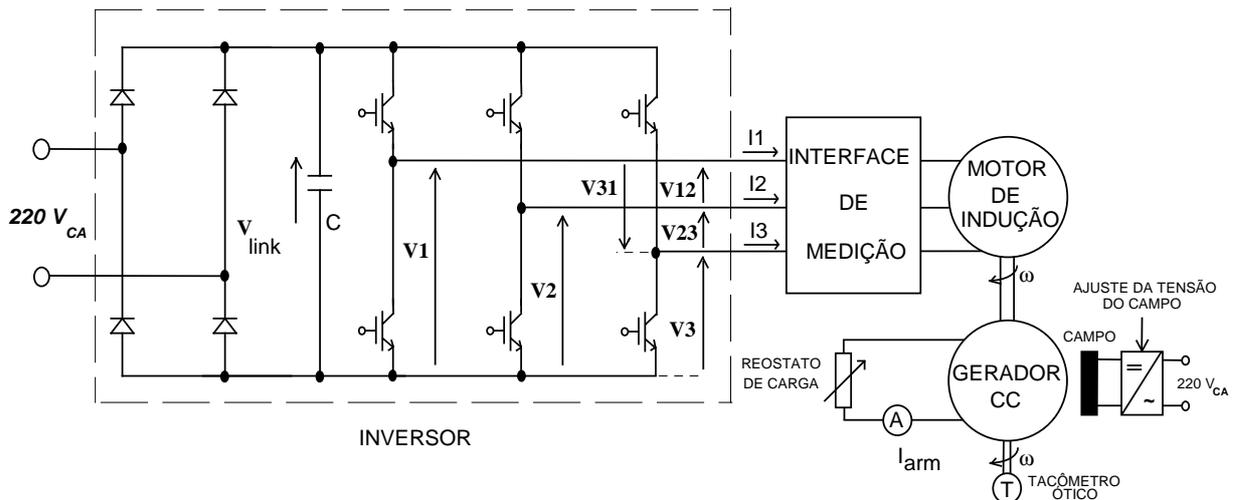
**Fig. 8** - Inversor de tensão

Existem diversas formas para se gerar os sinais de controle dos interruptores do inversor. Uma delas consiste em gerar pulsos através da comparação de um terno de tensões senoidais na frequência de operação desejada para o motor com ondas triangulares de frequência elevada

(denominada frequência da portadora). No Anexo 1 encontram-se as formas de onda de tensão e corrente para uma frequência de portadora 12 vezes superior à frequência aplicada ao motor.

#### 4. ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental apresentado na fig. 9 é constituído de um inversor comercial da marca SIEMENS (modelo SIMOVERT MICRO MASTER MM150, 220V, 1,5 kW corrente nominal 6,4 A) com modulação do tipo PWM e um motor de indução trifásico da marca EBERLE (220 V, 60 Hz, 1700 rpm, 736 W, 3,8 A) acionando uma carga mecânica constituída de um gerador CC da marca LAVILL (180 V, 3,6 A, 1800 rpm, 550 W, campo independente) e de um reostato de 60  $\Omega$ . Entre o inversor e o motor de indução encontra-se uma interface de medição para registro das principais grandezas elétricas do inversor.



**Fig. 9** - Diagrama de blocos do arranjo experimental

A interface utiliza sensores de corrente de efeito Hall e amplificadores operacionais e não provê isolamento galvânica, porém cria um potencial de medição comum, isolado da rede, ao qual podem ser referenciadas todas as grandezas elétricas indicadas na fig. 9. A interface disponibiliza os seguintes pontos de medição:

- i) tensões de fase (V1, V2, V3) em relação ao potencial negativo do capacitor C, atenuadas de um fator 30;
- ii) tensões de linha (V12, V23, V31) atenuadas de um fator 30;
- iii) correntes de linha (I1, I2, I3), onde 2,5 V correspondem a 1 A;
- iv) tensão do barramento CC (Vlink) atenuada de um fator 30;
- v) tensão de “neutro” ( $V_o = (V1+V2+V3)/3$ ) atenuada de um fator 30;
- vi) sinal de sincronismo (TRIGGER) gerado a partir da corrente I2;
- vii) sinal do tacômetro (TACO), onde 1,66 V correspondem a 1000 rpm.

Para o ajuste dos parâmetros do inversor utilizam-se dois painéis:

- i) um painel superior com “display” numérico de 4 dígitos e botões para ajuste de parâmetros e visualização de algumas grandezas;
- ii) um painel frontal com um potenciômetro de 10 voltas com vernier para setar a rotação do motor e um conjunto de chaves do tipo liga/desliga que comandam a ligação e o desligamento, bem como o sentido de rotação do motor;

Para produzir um sistema trifásico de tensão e frequência variáveis a energia elétrica sofre duas transformações sucessivas: de CA (rede elétrica) para CC e posteriormente de CC para CA (tensão do motor). Nesta experiência, por se tratar de um motor de baixa potência, o inversor é alimentado com um tensão monofásica de 220 V e uma ponte a diodos com filtro capacitivo gera a tensão CC. O inversor não possui uma chave de liga/desliga, sendo a sua energização comandada pela botoeira da bancada.

Como carga mecânica utiliza-se um gerador CC, cuja armadura está conectada através de um amperímetro de ferro móvel a um reostato. O campo do gerador é independente, sendo excitado através de um conversor CA/CC monofásico, alimentado em 220V e incorporado à carcaça. A tensão CC do campo é ajustada através de um potenciômetro de 10 voltas com vernier localizado na caixa de ligação do gerador.

A carga mecânica no eixo do motor de indução é composta pela potência dissipada no reostato e pelas perdas em vazio (perdas mecânicas do motor + gerador e perdas elétricas do gerador CC) do conjunto. Neste caso não são levadas em consideração as perdas no enrolamento da armadura e no comutador. As perdas em vazio do conjunto dependem da rotação e são fornecidas pelo gráfico da fig. 10.

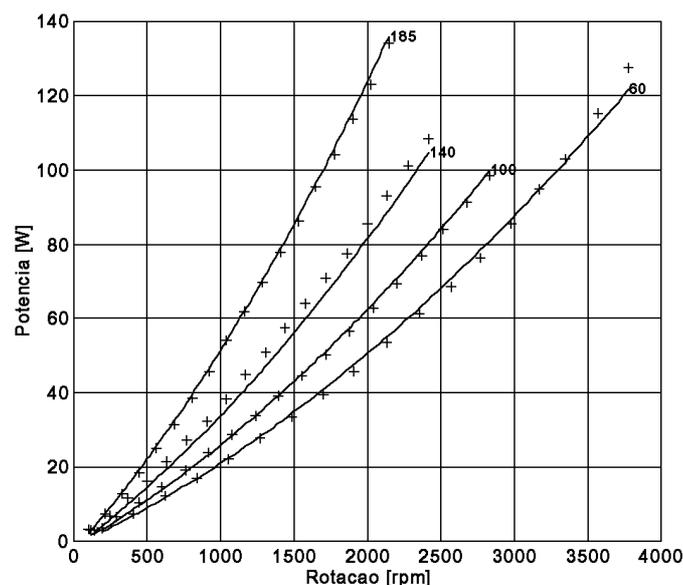
As perdas em vazio em função da rotação  $\omega$  (em rpm) do conjunto podem ser aproximadas pela expressão matemática abaixo:

$$\text{Perdas (W)} = \left[ 9 \cdot 10^{-6} \omega \cdot (\omega + 5000) \right] / K_f \quad (20)$$

Para campo pleno, ou seja, para a tensão de campo nominal ( $V_{\text{campo nominal}} = 180 \text{ V}$ ), a constante  $K_f$  é unitária. Para campo reduzido, a constante  $K_f$  assume o valor:

$$K_f = -2,1 \cdot \left( \frac{V_{\text{campo}}}{V_{\text{campo nominal}}} \right) + 3,1 \quad (21)$$

O vernier do potenciômetro de campo, localizado na caixa de ligação da máquina CC possui uma escala linear de zero a dez. Portanto a relação  $V_{\text{campo}}/V_{\text{campo nominal}}$  pode ser substituída por um décimo do valor indicado no vernier.



**Fig. 10** - Curvas da *Perdas x rotação* do conjunto motor + gerador parametrizadas na tensão de campo

## 4.1 PARTIDA DO INVERSOR

Para **ligar o motor** adotar o procedimento fornecido a seguir:

- colocar as duas *chaves liga/desliga de haste comprida* localizadas no painel lateral à direita do potenciômetro e responsáveis pelo sentido de rotação do motor na posição “**LOW**” (*haste para baixo*);
- ajustar o potenciômetro de controle de campo do gerador CC na posição “zero”;
- ligar a botoeira da bancada e esperar alguns segundos até o acendimento do display;
- selecionar o sentido de rotação do motor, colocando a chave correspondente na posição “**HIGH**” (*haste para cima*). Neste instante o motor começa a girar.

Para **inversão do sentido de rotação**, inclusive com o motor em operação, coloca-se a chave de haste longa correspondente ao sentido desejado na posição “*High*” e em seguida coloca-se a outra na posição “*Low*”.

Para **desligar o motor**, coloca-se as duas chaves na posição “*Low*”. O LED amarelo aceso no display superior indica que o motor está girando no sentido horário.

## 4.2 AJUSTE DE PARÂMETROS DO INVERSOR

A programação dos parâmetros do inversor é realizada através do conjunto de botões localizados no painel superior. Como o display é de quatro dígitos, por exemplo a frequência 50.0 Hz aparece com a indicação **050.0**. Cada parâmetro é identificado pela letra “P” seguida de um número de três dígitos. Para a visualização ou alteração do valor de um parâmetro deve-se adotar o procedimento descrito a seguir:

*Seleção do parâmetro:*

Apertar a tecla **P**  , aparecendo no display a letra P seguida do código do parâmetro. Em seguida apertar as teclas  ou  para incrementar ou decrementar o código do parâmetro respectivamente. Um breve toque na tecla causa uma variação incremental de um dígito. Para a variação de vários dígitos, manter a tecla apertada.

*Visualização do valor do parâmetro:*

Apertar novamente a tecla **P** .

*Alteração do valor do parâmetro:*

Apertar as teclas  ou  para incrementar ou decrementar o valor do parâmetro respectivamente.

*Setar a alteração do parâmetro e/ou seleção de outro parâmetro:*

Apertar novamente a tecla **P**  . Seguir os passos anteriores.

## 4.3 DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS

O aluno terá acesso apenas aos parâmetros listados abaixo: **Ajustes nos demais parâmetros podem eventualmente danificar o acionamento e não estão autorizados.**

**P000** - indica o valor do parâmetro selecionado em P001. Na condição de “stand-by” a indicação no display será atualizada a cada 1,5 s com o valor de setpoint da grandeza selecionada em P001.

Em caso de falha, o display passa a piscar, aparecendo um código de falha caracterizado pela letra “F” seguida de um número de três dígitos.

**P001** - seleção do display: 0 = valor atual da frequência (Hz);

1 = valor do setpoint da frequência (Hz);

2 = corrente do motor (A);

3 = Tensão ( $V_{link}$ ) do barramento CC (V);

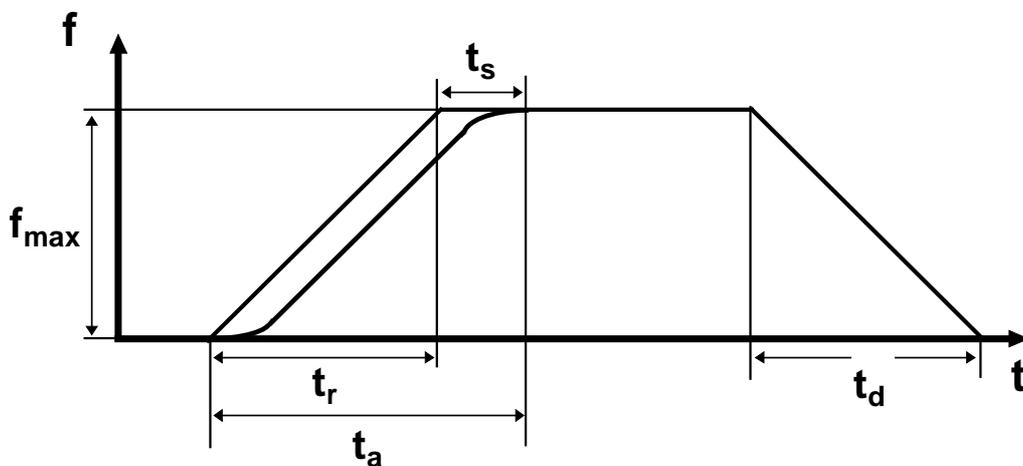
4 = Torque (% em relação ao torque nominal)

**P002** - tempo de subida  $t_a$  da frequência (de 0 a  $f_{max}$ ) ajustável de 0 a 650 s.

**P003** - tempo de decaimento  $t_d$  da frequência (de  $f_{max}$  a 0) ajustável de 0 a 650 s.

**P004** - arredondamento  $t_s$  no tempo de subida da frequência, ajustável de 0 a 40 s.

Nestas condições o tempo total de aceleração é dado por  $t_a = t_r + t_s$ .



**Fig. 11** - Rampas de subida e de descida da frequência

## 5. PARTE PRÁTICA

### 5.1 Familiarização com a operação do inversor

A finalidade deste item é familiarizar o aluno com o inversor.

**5.1.1.** Setar P001 em 0 de forma a visualizar a frequência no display em P000. Ligar o inversor **conforme explicado no item 4.1**, com o motor em vazio (reostato no máximo e potenciômetro de campo no mínimo) e variar a frequência atuando no potenciômetro. A frequência máxima está limitada em 120 Hz. Verifique também no display os valores da corrente e do torque em vazio.

**5.1.2.** Medir a rotação do motor com o tacômetro ótico manual, apontando-o para a tarja refletora no acoplamento e apertando o botão lateral. Determinar o escorregamento do motor nestas condições.

**5.1.3.** Inverter o sentido de rotação do motor.

**5.1.4.** Desligar o motor, alterar a rampa de aceleração. Ligar novamente o motor.

### 5.2 Análise de formas de onda do inversor

Nesta parte será analisado o comportamento do inversor alimentando o motor na sua frequência nominal (60 Hz), em alta frequência (120 Hz) e em baixa frequência (20 Hz)

variando-se a frequência da portadora PWM. Para tanto será utilizado o osciloscópio e a interface de medição.

**5.2.1** Com o motor em vazio, alimentado na frequência nominal (60 Hz) e com frequência da portadora de 3 kHz visualizar (ou registrar) as formas de onda da tabela abaixo:

- Para setar a frequência da portadora selecionar a função **P076**. A frequência de 3 kHz corresponde ao código **006**.
- Para os sinais de tensão e corrente utilizar as escalas de 5 V/div e 2 V/div respectivamente.
- Utilizar uma terceira ponta de prova (pode ser x1) conectada no EXT INPUT do osciloscópio e ligada ao sinal TRIGGER para realizar o sincronismo. Operar o osciloscópio no modo digital.

canal 1	canal 2	base de tempo	atividade	ação
Vlink	ondul. Vlink	5 ms/div	i)	Visualização
V2	V1	5, 2 e 1 ms/div	ii)	Visualização
V2	V3	5 ms/div	ii)	Visualização
V23	V12	5 ms/div	iii)	Visualização
V23	V31	5 ms/div	iii)	Visualização
V2	V0	2 e 1 ms/div	iv)	Registrar
I2	I1	5 ms/div	v)	Visualização
I2	I3	5 ms/div	v)	Visualização
V1	V2	2 ms/div	vi)	Visualização
V1	V12	2 ms/div	vi)	Registrar
V12	I2	2 ms/div	vii)	Registrar

- i) Qual o valor da tensão do barramento CC? Justifique. Determinar o valor percentual da ondulação.
- ii) Quantos níveis de tensão são impostos pela modulação? Qual a defasagem entre as tensões de “fase” em relação potencial negativo do barramento CC (V1,V2,V3 da fig. 1)? Qual o número de pulsos por ciclo?
- iii) Quantos níveis de tensão são impostos pela modulação? Qual a defasagem entre as tensões de linha (entre os terminais do motor)?
- iv) Justifique a forma de onda da tensão de neutro do motor em relação ao potencial negativo do barramento (V0)? Quantos níveis de tensão são impostos pela modulação?
- v) Analisando as tensões, a forma de onda da corrente observada é coerente? Justifique.
- vi) Somar o sinal do canal 1 (V1) com o sinal do canal 2 invertido (-V2). Comparar a forma obtida com a tensão de linha V12.
- vii) Relacionar as oscilações de alta frequência da corrente com os chaveamentos impostos pela tensão de linha.

**5.2.2** Com o motor em vazio, alimentado em baixa frequência (20 Hz) e com frequência da portadora de 3 kHz registrar (escolhendo uma base de tempo adequada) as formas de onda da tabela abaixo:

canal 1	canal 2	base de tempo	atividade	ação
---------	---------	---------------	-----------	------

V2	V0	5 ou 2 ms/div	i)	Registrar
V1	V12	5 ou 2 ms/div	i)	Registrar
V12	I2	5 ms/div	i)	Registrar

i) Estimar o número de pulsos por ciclo na tensão V1. Em seguida alterar a frequência da portadora para 8 kHz e 16 kHz e comparar com os valores obtidos.

**Obs.:** Com o motor em funcionamento, selecionar a função **P076**. As frequências de 8 kHz e 16 kHz correspondem aos códigos **003** e **001** respectivamente

**5.2.3** Com o motor em vazio, alimentado em alta frequência (120 Hz) e com frequência da portadora de 3 kHz registrar (escolhendo uma base de tempo adequada) as formas de onda da tabela abaixo:

canal 1	canal 2	base de tempo	atividade	ação
V1	V0	2 ou 1 ms/div	i)	Registrar
V1	V12	2 ou 1 ms/div	i)	Registrar
V12	I2	2 ms/div	i)	Registrar

i) Qual o número de pulsos por ciclo na tensão V1? Verificar alterações das formas de onda em relação aos valores obtido para 60 Hz.

**5.2.4** Admitindo a tensão Vlink constante e interruptores com intervalos de condução de 180°, desenhar as formas de onda (teóricas) do inversor indicadas a seguir:

- i) Tensões de fase (V1, V2, V3) em relação ao potencial negativo de Vlink;
- ii) tensões de linha (V12, V23, V31) no motor e a tensão de neutro (V0) do motor (admitir que esteja ligado em Y) em relação ao potencial negativo de Vlink.
- iii) Identificar em cada caso qual chave encontra-se em condução.
- iv) Achar as expressões matemáticas que relacionam as tensões de fase do motor com as tensões medidas na saída do inversor em relação ao ponto “-”.

### 5.3 Características do acionamento (frequência da portadora de 16 kHz)

#### 5.3.1 Rampa de subida da frequência

Ajustar a frequência indicada na tabela e o reostato de carga para o máximo valor de resistência e ligar o motor. Em seguida ajustar o potenciômetro da tensão de campo no máximo e variar o reostato para se obter uma corrente indicada na tabela.

Desligar o motor e ajustar o valor do tempo de subida da rampa de frequência nos valores pedidos.

Ligar o motor e acompanhar o transitório de partida observando a corrente I2 (2 V/div) e o sinal do tacômetro ótico (1V/div ou 2 V/div) utilizando uma base de tempo de 0,1 a 0,5 s/div com o osciloscópio no modo single sweep.

**Obs.:** No amperímetro utilize sempre um fundo de escala de 5 A. Antes de cada mudança de escala com o motor em funcionamento, colocar o amperímetro em curto-circuito.

Frequência (Hz)	Corr. de armadura (A)	Tempo de subida (s)
60	3,2	2, 1 e 0,5
120	3,2	2, 1 e 0,5

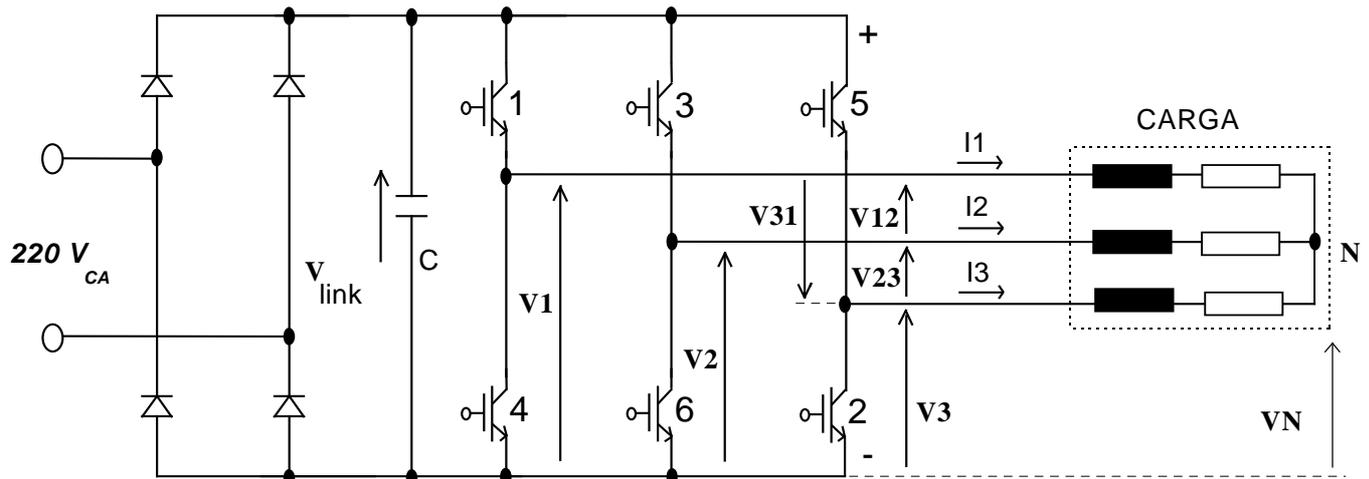


20								
----	--	--	--	--	--	--	--	--

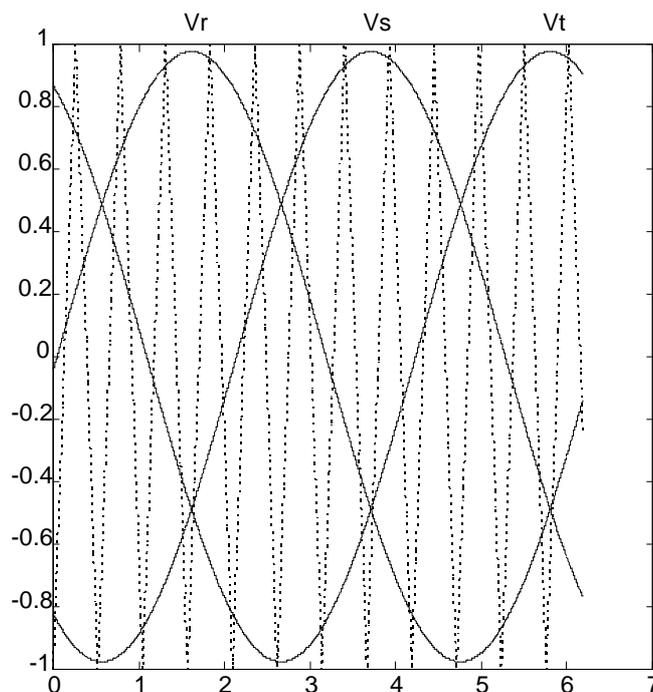
# ANEXO 1

## Formas de onda do inversor de tensão

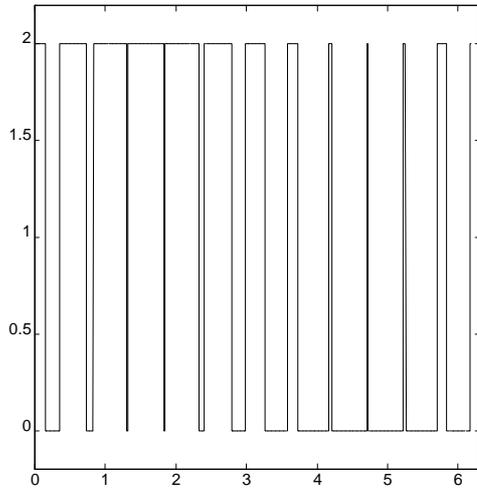
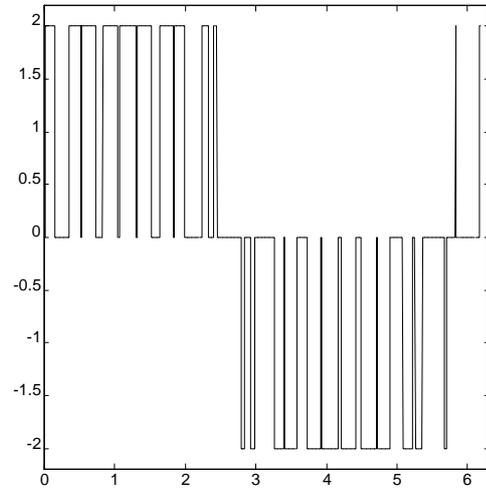
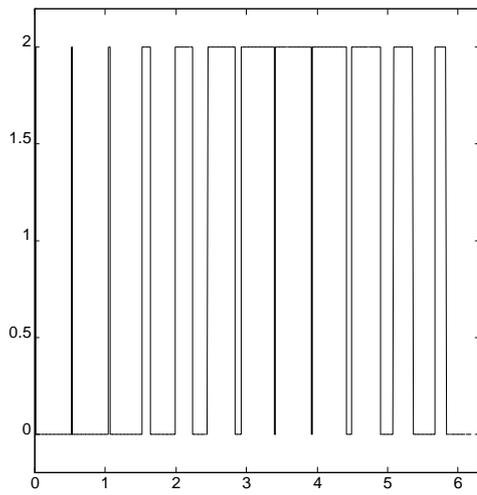
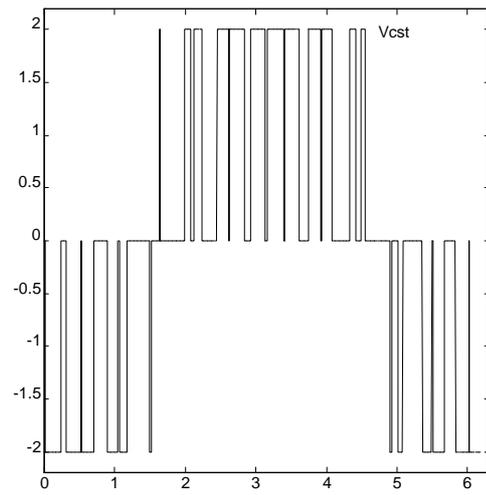
Na seqüência serão apresentas algumas formas de onde de um inversor alimentando uma carga resistivo- indutiva. Os pulsos de comando dos interruptores são gerados através da comparação de um terno de tensões senoidais na freqüência de operação desejada para o motor com ondas triangulares de freqüência elevada (denominada freqüência da portadora). Neste caso é utilizada uma freqüência de portadora 12 vezes superior à freqüência aplicada ao motor.

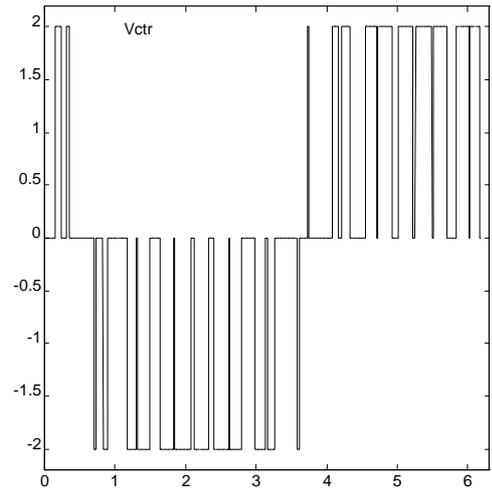
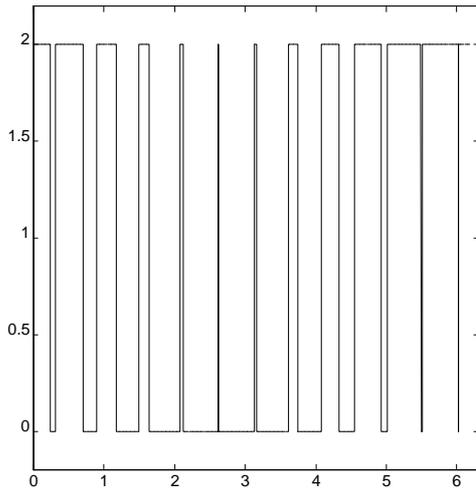


Esquema elétrico do inversor de tensão

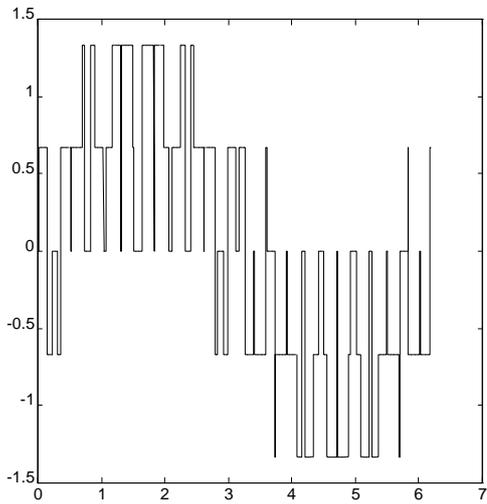


Senóides de referência e portadora triangular da fase R

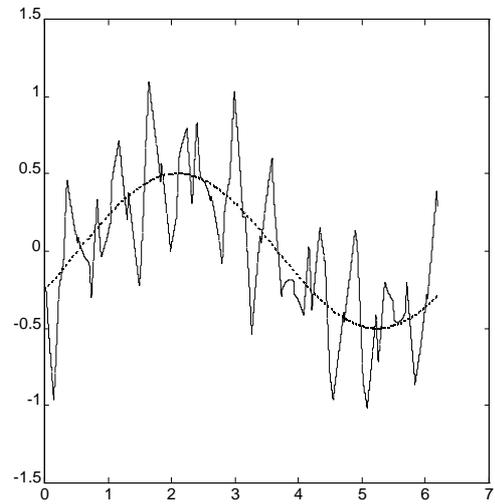
**Tensão V1****Tensão V12****Tensão V2****Tensão V23****Tensão V3****Tensão V31**



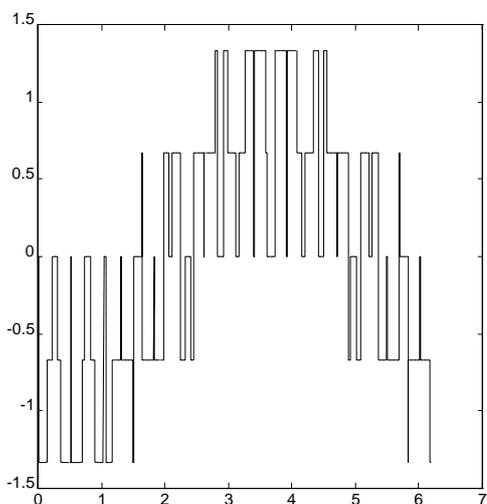
**Tensão V1N**



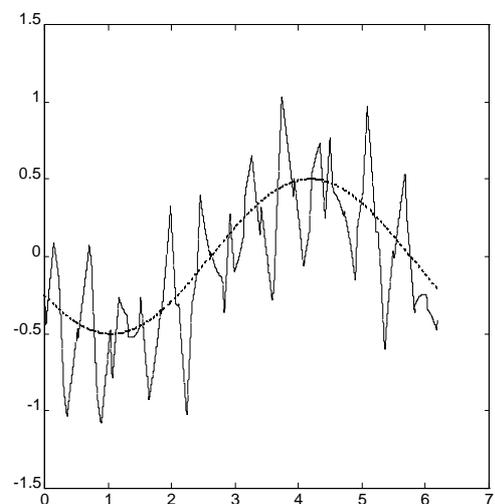
**Corrente I1**



**Tensão V2N**



**Corrente I2**

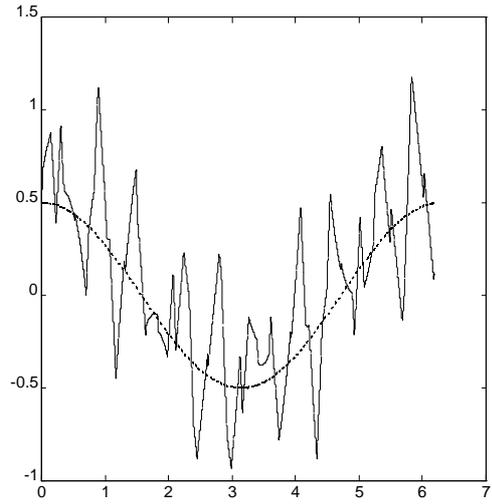
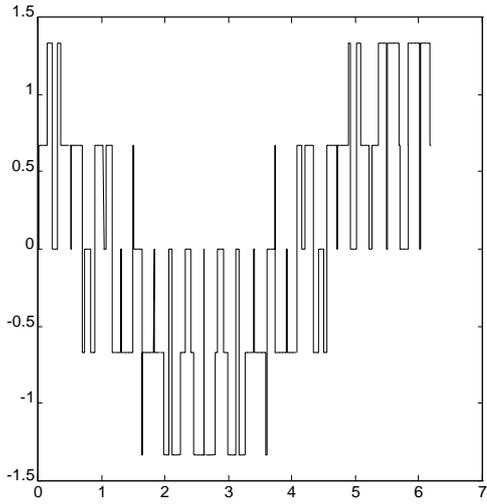


**Tensão V3N**



**Corrente I3**





**Tensão VN**

