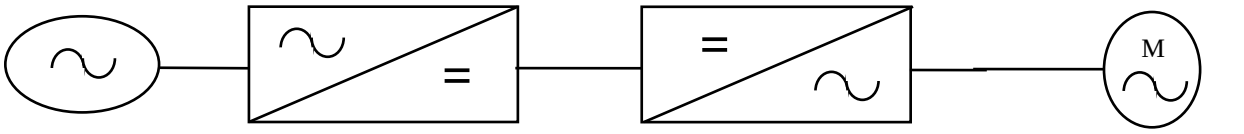
INVERSORES DE FREQUÊNCIA

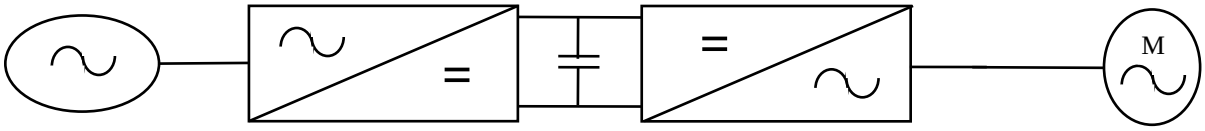
A variação da frequência da tensão fornecida ao estator é o melhor método para controle da velocidade de um motor de indução. O inversor de frequência, também chamado conversor de frequência, é a unidade de conversão de potência em um sistema CA de controle de velocidade por ajuste de frequência. Atualmente, são fabricados com dispositivos eletrônicos de potência que efetuam o controle do valor eficaz e da frequência da tensão (ou corrente) enviada ao motor CA com a finalidade de variação da velocidade e do torque. É constituído no mínimo por dois estágios separados de conversão da potência: um retificador e um inversor, ligados nesta ordem.

O retificador pode ser controlado ou não e converte a energia CA em CC e pode também alterar o valor eficaz da corrente ou tensão (no caso de um retificador controlado). Após a conversão CA/CC, o estágio inversor transforma a energia da forma contínua para alternada novamente, utilizando um chaveamento controlado. A forma de onda enviada ao motor não é propriamente uma senóide, mas um trem de pulsos com ciclos positivos e negativos.



fonte CA (rede elétrica) — retificador — inversor — motor CA

Em alguns inversores podemos encontrar um barramento intermediário entre o retificador e o inversor com filtro e dispositivos de medida da tensão e corrente.



fonte CA (rede elétrica) — retificador — barramento intermediário — inversor — motor

1. Equações do Motor C.A.

- **Rotação síncrona**

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

f → frequência do campo magnético girante produzido pelo estator em Hz
p → número de pares de pólos
N_s → velocidade síncrona em rpm

- **Rotação do rotor**

$$N_r = \frac{60.f}{p} \cdot (1-s)$$

s → Escorregamento relativo

Desta equação verificamos que a velocidade do motor pode ser controlada mediante os seguintes valores: frequência da tensão enviada ao motor, número de pares de pólos e o escorregamento relativo. Como o número de pólos do motor é uma característica construtiva do

mesmo e o escorregamento uma perda dependente da carga, a melhor maneira de se controlar a velocidade em um motor CA é variando o valor da frequência da tensão/corrente fornecida, e é o modo como os inversores de frequência atuam.

- **Escorregamento relativo**

$$s = \frac{N_s - N_r}{N_s}$$

Obs.: Quando o escorregamento estiver alto, o motor está com muita carga ou tem muitas perdas.

- **Torque**

O torque é uma composição vetorial do fluxo magnético e corrente no rotor.

$T = K.\varnothing.I_w$

$K \rightarrow$ constante característica do motor

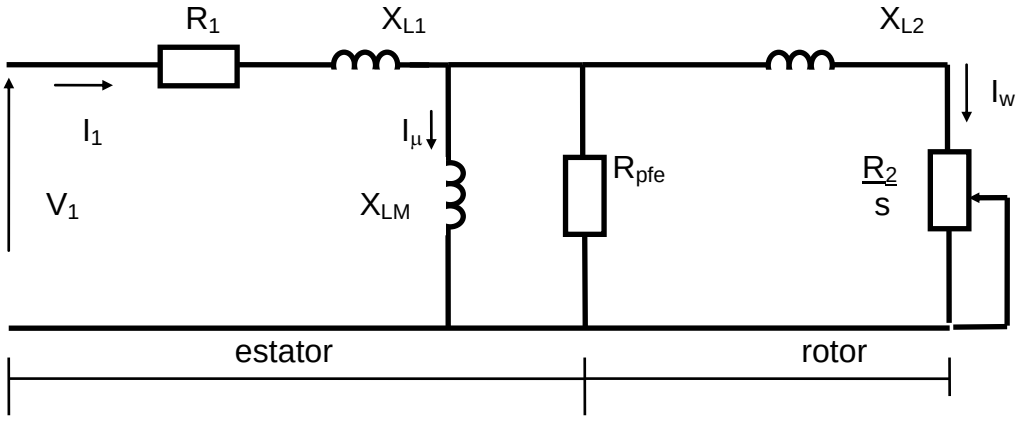
$\varnothing \rightarrow$ fluxo magnético

$I_w \rightarrow$ corrente eficaz ativa induzida no rotor

Da equação do torque verificamos que o mesmo pode ser alterado variando-se $\varnothing$ e I_w.. Os tipos de inversores diferem pelo modo como controlam o fluxo magnético no estator ou o valor eficaz da corrente ativa no rotor.

2. Circuito equivalente do motor CA:

O motor funciona como um transformador curto-circuitado no secundário: o enrolamento primário do trafo equivale ao estator e o enrolamento secundário equivale ao rotor. Deste modo, podemos modelar um circuito equivalente do motor de indução semelhante ao circuito equivalente do transformador:



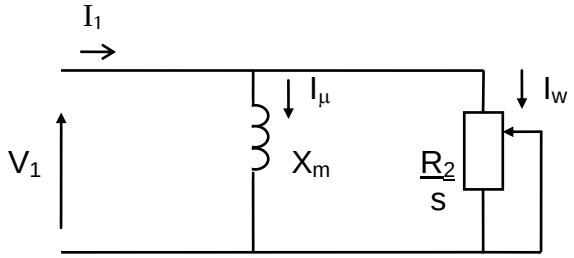
$\mathbf{V_1} \rightarrow$ tensão eficaz no estator

$\mathbf{I_1} \rightarrow$ corrente eficaz no estator

$\mathbf{I_\mu} \rightarrow$ corrente eficaz de magnetização

$\mathbf{I_w} \rightarrow$ corrente eficaz ativa no rotor

Modelo desprezando as perdas:



Do circuito acima verificamos que I_1, ao entrar no motor, se divide em duas componentes: I_μ no estator e I_w no rotor. Simplificando, I_μ pode ser considerada reativa, pois é

dissipada no estator que é uma indutância (responsável pela campo magnético). I_w é considerada ativa (responsável pela energia mecânica que produz trabalho) e o seu valor varia com a carga. Temos então:

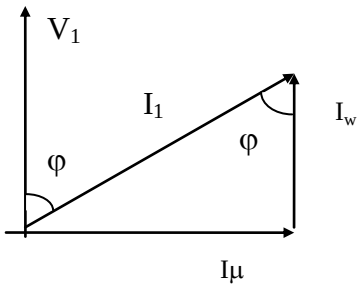
Função da parte magnética do motor:

$$I_\mu = \frac{V_1}{X.L_M} = \frac{V_1}{2\pi.f.L_M} \rightarrow \text{reativa}$$

Função da carga:

$$I_w = \frac{s.V_1}{R_2} \rightarrow \text{carga ativa}$$

I_w equivale a corrente de armadura do motor CC e I_μ equivale a corrente de campo do motor CC. Decompondo vetorialmente I_1 teremos:



F.P. = cosφ

$I_w = I_1.\cos\varphi \rightarrow$ ativa

$I_\mu = I_1.\text{sen}\varphi \rightarrow$ reativa

3. Controle para inversores

a) **Controle de velocidade tensão/frequência (escalar):**

Neste tipo de controle a velocidade do motor é ajustada modificando-se a frequência da tensão de alimentação do motor e o torque é variado (ou mantido constante) alterando conjuntamente o valor eficaz desta tensão. O inversor de frequência com controle escalar funciona como uma fonte chaveada, possibilitando a ligação de um ou mais motores (multimotor) em paralelo alimentados pelo inversor, respeitando o limite de potência dado pelo inversor.

$$N_r = (1-s).\frac{60.f}{p} \rightarrow$$ varia-se a frequência da tensão de alimentação para alterar a velocidade do motor

Para analisar o controle do torque por controle escalar, desenvolvemos a equação abaixo:

$$T = K.\varnothing.I_w$$

$$L_M = \frac{\varnothing}{I_\mu} \rightarrow \varnothing = L_M.I_\mu$$

$$T = K.L_M.I_\mu.I_w$$

Como $$I_\mu = \frac{V_1}{X_M} = \frac{V_1}{2\pi.f.L_M}$$

$$T = K.L_M.\frac{V_1}{2\pi.f.L_M}.I_w$$

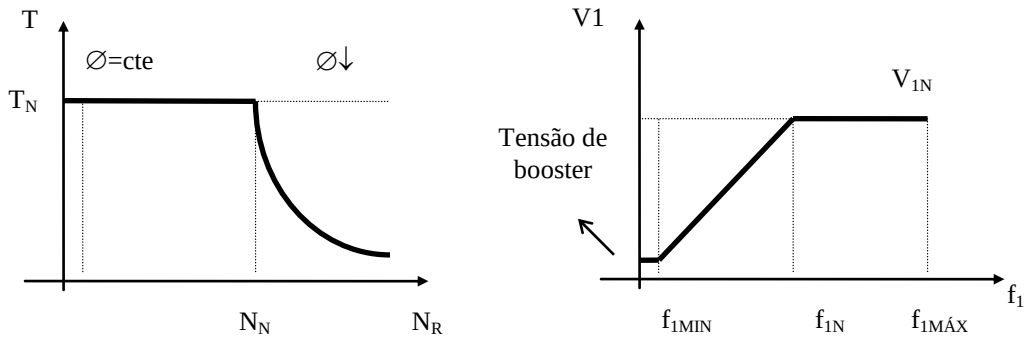
Eliminando L_M e chamando a constante de valor $K/2\pi$ de K_2, temos:

$$T = K_2.\frac{V_1}{f_1}.I_w$$

Desta equação resultante verificamos que podemos variar o torque do motor CA mudando o valor da razão V_1/f_1 (tensão de alimentação/frequência). Quando a velocidade muda, f_1 muda e se o torque deve permanecer constante, o inversor de frequência deve alterar o valor de V_1 também, de modo que a razão V_1/f_1 permaneça constante.

Como I_w varia com a carga ligada ao rotor, devemos ajustar o inversor de frequência por controle escalar de acordo com a carga, de modo a manter o valor de I_w constante.

Curva na área de potência **Curva de controle**



A tensão de booster é para a elevação na curva V/f e serve para variar o valor eficaz..

b) **Controle vetorial (mono motor):**

O controle vetorial também trabalha com a variação da frequência e do valor da tensão para alterar a velocidade e o torque do motor CA, mas estes valores são alterados com uma finalidade diferente do controle escalar.

No controle escalar, V_1 e f_1 são alterados de modo a variar a razão V_1/f_1, controlando também o torque, desde que I_w permaneça constante, ou seja, que a carga não varie. No controle vetorial, o inversor recebe uma realimentação da carga, como uma "resposta". Deste modo, o inversor calcula os valores de R_1, X_{L1}, X_M, R_{PFE} e R_2 através de cálculos com base no circuito equivalente do motor. O torque é controlado variando-se o valor de I_w, e $I\mu$, como demonstrado na equação resultante abaixo:

$$T = K.\varnothing.Iw \therefore \varnothing = L_M.I\mu$$

$$T = K.L_M.I\mu.Iw$$

$$T = K_2.I\mu.Iw$$

Varia-se I_w por V_1/f_1 (curva V_1/f_1), pois, alterando o valor e a frequência da tensão fornecida ao motor são alterados os valores de I_μ e I_w, como demonstrado pelas equações abaixo:

$$I_\mu = \frac{V_1}{X.L_M} = \frac{V_1}{2\pi.f.L_M} = \frac{K.V_1}{f_1}$$

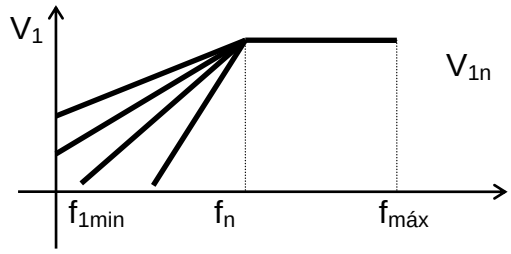
$$I_w = \frac{s.V_1}{R_2}$$

Deste modo, consegue-se obter também o escorregamento real:

$$\frac{Iw}{I\mu} = \frac{s.V1/R_2}{V1/X_M} = s.\frac{X_M}{R_2} = K.s$$

escorregamento real

O inversor de frequência pode ser programado para compensar o escorregamento com um adicional na velocidade.



→ Acha-se o ponto ideal para operar o motor pela área V1/f1.

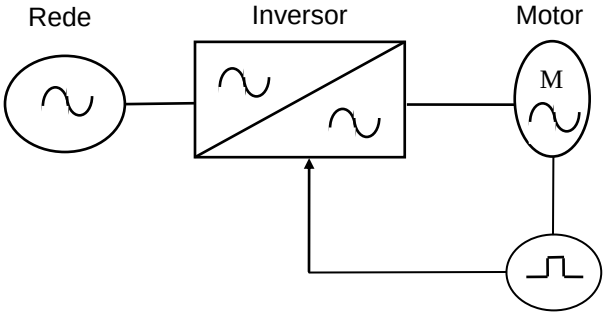
Com o controle de I_μ e I_w , obtemos o controle de I_1 , do fator de potência e do escorregamento, fornecendo ao motor somente a corrente necessária à operação da carga, resultando em economia de energia. O inversor por controle vetorial é monomotor, pois calcula os parâmetros do motor (R_1, X_{L1}, X_M, R_{PFE} e R_2). Ao se ligar dois motores, o controle vetorial considera como um motor ao efetuar os cálculos.

Tipos de controle vetorial:

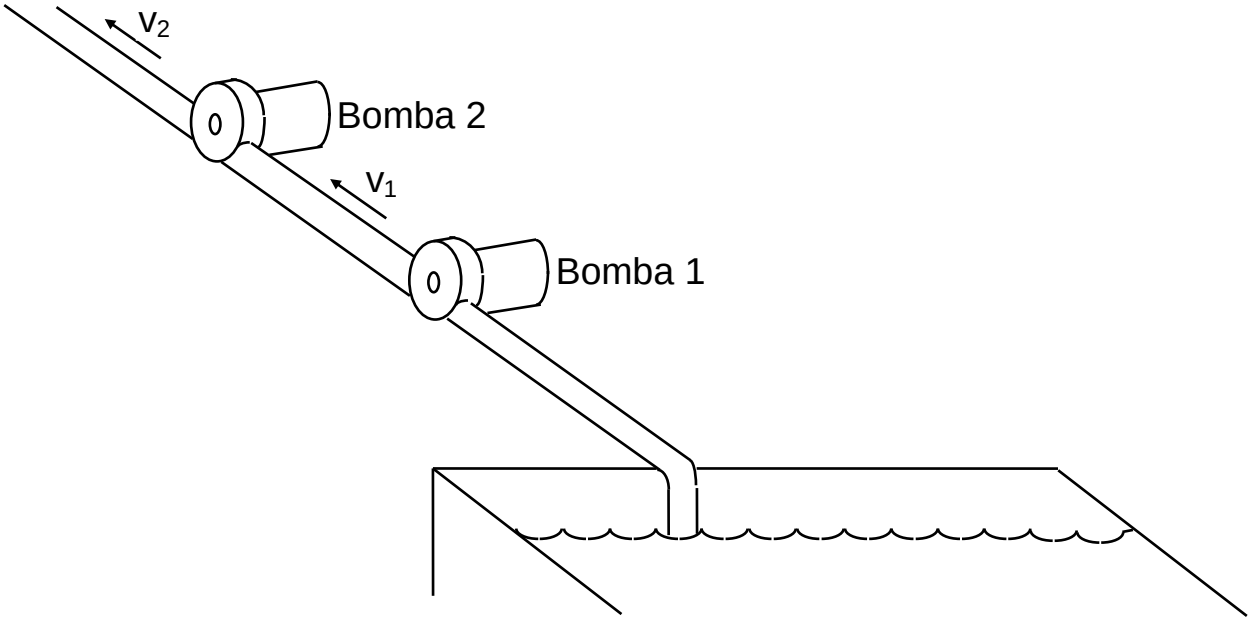
Nos tipos controle vetorial descritos abaixo, realimentação se refere aos dados que o inversor de frequência obtem do motor e referência é o item controlado (velocidade ou torque). A referência pode partir da ação de um operador no painel de controle do inversor, de outro motor, de acionamentos eletromecânicos,...

a) **Com realimentação de velocidade e referência de velocidade**

Geralmente neste tipo de controle é utilizado um encoder, que indica a posição do eixo do motor ao inversor. Deste modo, se obtem a velocidade, a aceleração, a força e o torque.



Ex.: Em sistemas hidráulicos pressurizados, com bombas em série, a velocidade das bombas deve ser sincronizada de modo a manter a mesma vazão do fluido.

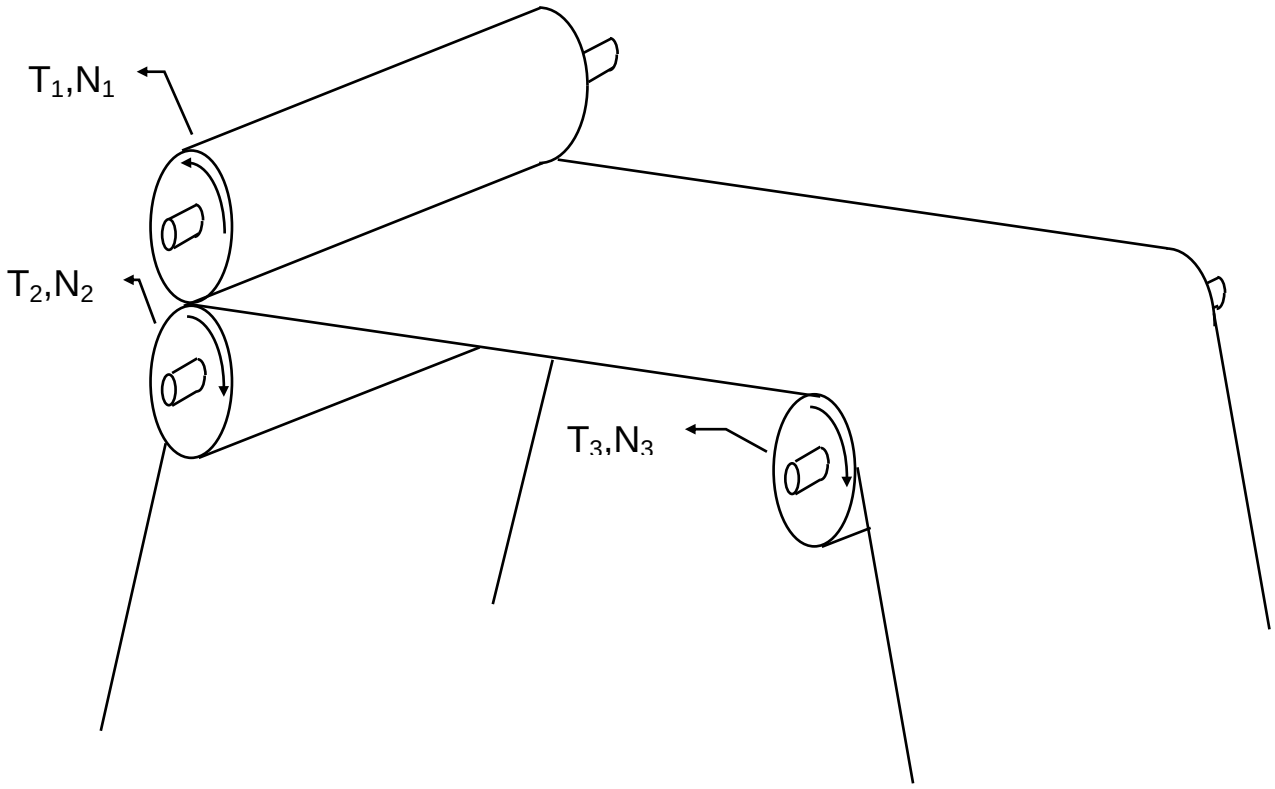


Do exemplo acima, se a velocidade "V_1" for diferente da velocidade "V_2", ou seja, a velocidade do motor da bomba "1" for diferente da bomba "2", ocorrerá uma diferença de pressão entre os encanamentos por onde circula o fluido.

b) **Com realimentação de velocidade e referência de torque**

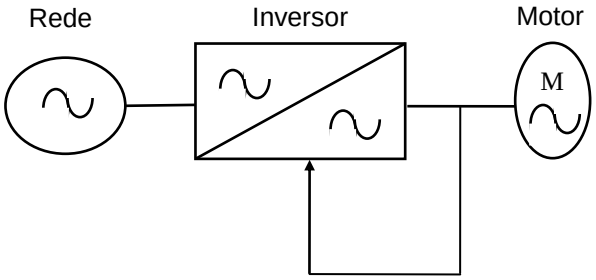
É utilizado no caso em que o motor parte com velocidade nominal e torque zero (funciona como gerador) e aumenta o torque gradativamente até o valor desejado.

Ex.: Calandras em indústrial de papel, onde o motor que aciona um rolo deve partir do torque zero até se igualar ao torque do motor que aciona o outro rolo.



c) **Com realimentação de frequência e referência de velocidade**

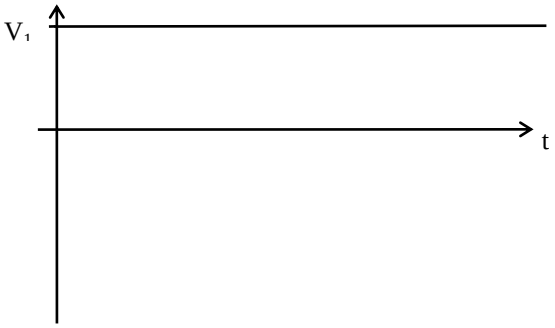
Do valor de Iw, que é medido indiretamente na saída do inversor, se obtém o torque, a força, a aceleração e a velocidade. Este é o tipo mais simples de controle vetorial.

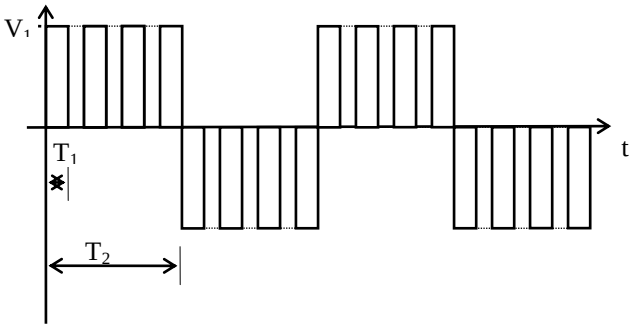


4. INVERSORES

Nos sistemas inversores atuais, o estágio inversor é geralmente um circuito de chaveamento fabricado com componentes eletrônicos, que efetuam um chaveamento sincronizado na tensão ou corrente contínuas fornecida pelo retificador, resultando em um trem

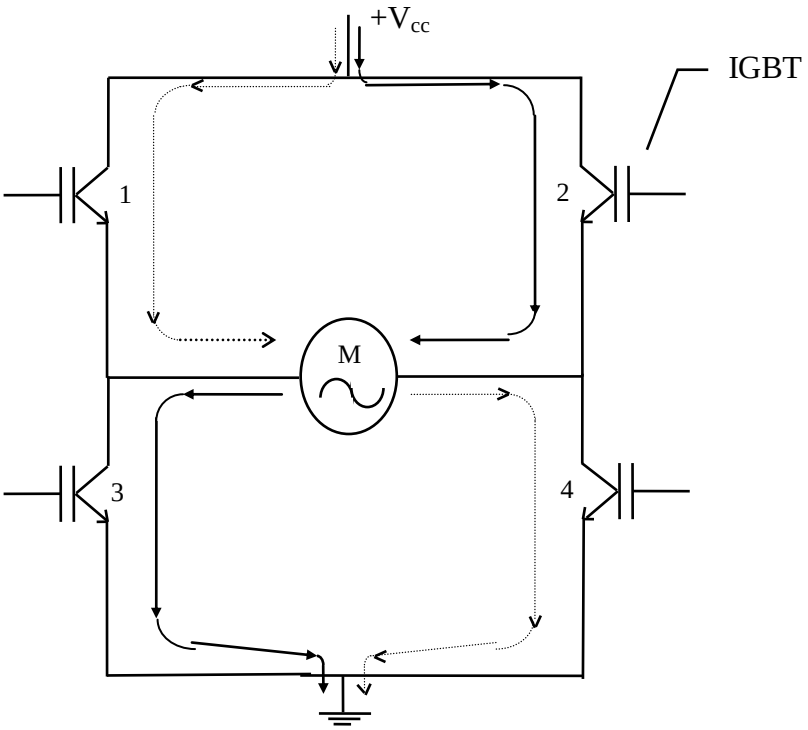
de pulsos com um ciclo positivo e outro negativo, como mostrado abaixo. O valor eficaz da grandeza é alterado pela largura do pulso, dada por T_1 e a frequência é alterada pelo tempo de inversão do ciclo de onda, dado por T_2. O valor da amplitude, dado abaixo por V_1, se mantém constante.





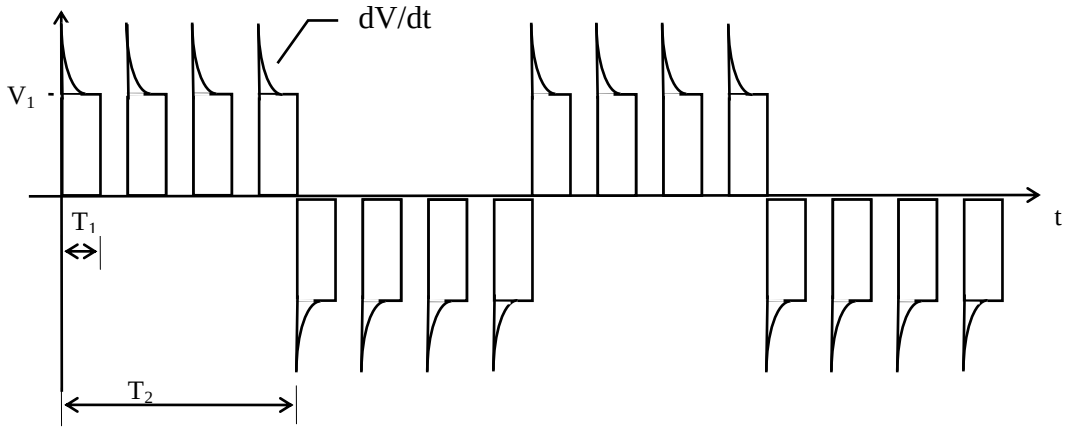
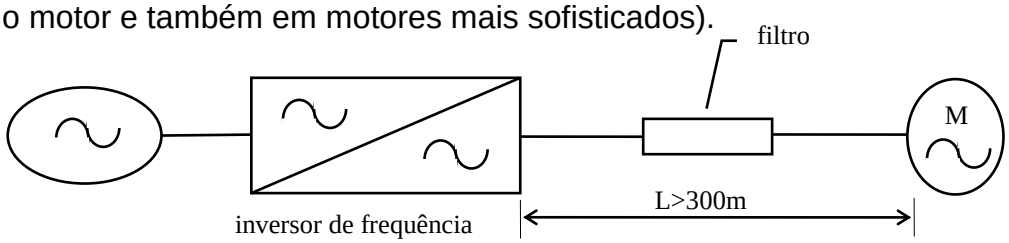
saída do retificador/entrada do inversor PWM saída do inversor PWM

Um exemplo de um circuito inversor simples com IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor, para uma fase de um motor é representado abaixo, mostrando como se efetua o chaveamento em uma fase de um motor CA para controle da inversão do ciclo positivo para o negativo e para o chaveamento dos pulsos:



O IGBT funciona como uma chave eletrônica, sendo conectado a um microprocessador que controla o tempo de passagem da corrente por cada um dos IGBT's. A inversão dos ciclos é feita alternando-se a ligação dos dispositivos: para um ciclo os dispositivos 2 e 3 são acionados para conduzir a corrente e os dispositivos 1 e 4 para bloquearem; após o período T_1 inverte-se o ciclo: os dispositivos 1 e 4 são acionados para conduzir e 2 e 3 para bloquear. O sentido da corrente em cada ciclo está indicado pelas setas no desenho acima. O chaveamento que determinara a largura dos pulsos dentro de cada ciclo é feito acionando um dos dois dispositivos que estão conduzindo.

Obs.Para distâncias entre a saída do inversor e o motor maiores que 300m, a indutância dos condutores que alimentam o motor e a alta frequência de chaveamento da tensão podem levar ao seguinte efeito:



Isto, com o tempo, pode danificar o isolamento dos condutores e é solucionado com a inclusão de um filtro dV/dt para evitar estas harmônicas. De acordo com a tensão do motor, este filtro pode ser caro. Outro tipo de filtro é o senoidal, que transforma o PWM em uma senoide (é utilizado no caso de se usar um trafo na saída do inversor para aumentar a tensão jogada no motor e também em motores mais sofisticados).