

Figura B – Elemento mecânico para conversão do movimento rotativo em linear.

Da equação (5) obtém-se as duas relações (6) e (7) com a relação de transmissão i_{FP} .

$$i_{FP} = \frac{F}{\eta_{FP} T_2} \Leftrightarrow F = i_{FP} \eta_{FP} T_2 \Leftrightarrow T_2 = \frac{F}{\eta_{FP} i_{FP}} \quad (6)$$

$$i_{FP} = \frac{\omega_2}{v} \quad (7)$$

A Figura C representa de forma esquemática o carro de massa M no plano inclinado. Para o ângulo α são indicadas as três forças resultantes da massa M .

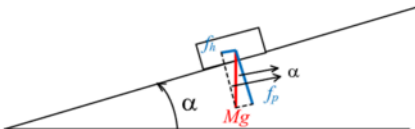


Figura C – Diagrama com os vectores das forças aplicadas ao carro de massa M .

A análise da figura C permite obter as relações (8) e (9) com a aceleração da gravidade $g=9,8\text{ms}^{-2}$. A força f_h tem a direcção do movimento e a força f_p é perpendicular ao plano inclinado. O peso do carro de massa M vale Mg .

$$\sin(\alpha) = \frac{f_h}{Mg} \Leftrightarrow f_h = Mg \sin(\alpha) \quad (8)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{f_p}{Mg} \Leftrightarrow f_p = MR \cos(\alpha) \quad (9)$$

A força de inércia F resultante do carro de massa M é obtida com (10). Esta força pode ser relacionada com a aceleração linear a , velocidade linear v e posição/deslocamento linear x .

$$F_i = Ma \Leftrightarrow F_i = M \frac{dv}{dt} \Leftrightarrow F_i = M \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) \Leftrightarrow F_i = M \frac{d^2x}{dt^2} \quad (10)$$

A força F_m (F_{m1} , F_{m2} e F_{m3}) associada às três molas, desprezando a sua própria massa é obtida por (11). Resulta do coeficiente de elasticidade k_e e da posição/deslocamento linear x .

$$F_m = F_{m1} + F_{m2} + F_{m3} \Leftrightarrow F_m = k_e x + k_e x + k_e x \Leftrightarrow F_m = 3k_e x \quad (11)$$

Com (9), (10) e (11) é obtido o somatório de forças total F_T (12). Admite-se constante o coeficiente de elasticidade e igual para a tracção ou compressão da mola.

$$F_T = Mg \sin(\alpha) + F_i + F_m \Leftrightarrow F_T = Mg \sin(\alpha) + M \frac{d^2x}{dt^2} + 3k_c x \quad (12)$$

Resolução para controlo de posição x com $T_m=f(x)$.

Substituir (12) em (6) para obter (13).

$$T_2 = \frac{F}{\eta_{FP} i_{FP}} \xrightarrow{F=T_T} T_2 = \frac{Mg \sin(\alpha) + M \frac{d^2x}{dt^2} + 3k_c x}{\eta_{FP} i_{FP}} \Leftrightarrow T_2 = \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_{FP} i_{FP}} + \frac{M}{\eta_{FP} i_{FP}} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{3k_c x}{\eta_{FP} i_{FP}} \quad (13)$$

Substituir (13) em (3) para obter (14).

$$T_1 = \frac{T_2}{\eta_R i_R} \Leftrightarrow T_1 = \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{3k_c x}{\eta_{FP} i_{FP}} \quad (14)$$

Resolver (4) em ordem a ω_1 com a substituição de (7) para obter (15).

$$i_R = \frac{\omega_1}{\omega_2} \Leftrightarrow \omega_1 = i_R \omega_2 \xrightarrow{i_{FP} \omega_2 \Leftrightarrow \omega_2 = i_{FP} v} \omega_1 = i_R i_{FP} v \quad (15)$$

Derivando a ordem ao tempo (15) para obter (16).

$$\omega_1 = i_R i_{FP} v \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \frac{d\omega_1}{dt} = i_R i_{FP} \frac{dv}{dt} \quad (16)$$

A relação entre a velocidade linear v com o deslocamento x é obtida por (17).

$$v = \frac{dx}{dt} \xrightarrow{\frac{d}{dt}} \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) \Leftrightarrow \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (17)$$

Substituir (14) em (1) com (15), (16) e (17) para obter (18).

$$\begin{aligned} T_m &= J_m \frac{d\omega_1}{dt} + k_{Dm} \omega_1 + T_1 \Leftrightarrow \\ T_m &= J_m i_R i_{FP} \frac{dv}{dt} + k_{Dm} i_R i_{FP} v + \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{3k_c x}{\eta_{FP} i_{FP}} \xrightarrow{\frac{v}{\frac{dx}{dt}} \Leftrightarrow \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right)} \\ T_m &= J_m i_R i_{FP} \frac{d}{dt} \left(\frac{dx}{dt} \right) + k_{Dm} i_R i_{FP} \frac{dx}{dt} + \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{3k_c x}{\eta_{FP} i_{FP}} \Leftrightarrow \\ T_m &= J_m i_R i_{FP} \frac{d^2x}{dt^2} + k_{Dm} i_R i_{FP} \frac{dx}{dt} + \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{3k_c x}{\eta_{FP} i_{FP}} \Leftrightarrow \\ T_m &= \left(J_m i_R i_{FP} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right) \frac{d^2x}{dt^2} + k_{Dm} i_R i_{FP} \frac{dx}{dt} + \frac{3k_c x}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} + \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \end{aligned} \quad (18)$$

b) O motor eléctrico é alimentado a partir de um variador electrónico de velocidade (VEV). O conjunto formado pelo VEV e o motor eléctrico é controlado adequadamente, permitindo desenvolver um binário (T_m) proporcional a um sinal de comando u_c , e é caracterizado com uma aproximação de primeira ordem à FT: $T_m(s)/U_c(s) = K/(1 + s\tau_c)$, em que K representa o ganho e τ_c a constante de tempo de atraso. Justificadamente, sem efectuar qualquer tipo de dimensionamento, apresente uma possível solução de um diagrama de blocos representativo de um sistema de accionamento para **controlo da posição linear x** .

Passar para o domínio da frequência a equação (18) para obter (19) com as regras das transformadas de Laplace.

$$\begin{aligned}
 T_m &= \left(J_m \ddot{x}_{FP} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right) \frac{d^2 x}{dt^2} + k_{Dm} \dot{x}_{FP} \frac{dx}{dt} + \frac{3k_c x}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} + \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \xrightarrow{TL} \\
 T_m(s) &= s^2 \left(J_m \ddot{x}_{FP} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right) X(s) + s k_{Dm} \dot{x}_{FP} X(s) + \frac{3k_c}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} X(s) + \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \Leftrightarrow \\
 T_m(s) &= \left[s^2 \left(J_m \ddot{x}_{FP} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right) + s k_{Dm} \dot{x}_{FP} + \frac{3k_c}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right] X(s) + \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \Leftrightarrow \quad (19) \\
 \frac{X(s)}{T_m(s) - \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}}} &= \frac{1}{s^2 \left(J_m \ddot{x}_{FP} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right) + s k_{Dm} \dot{x}_{FP} + \frac{3k_c}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}}}
 \end{aligned}$$

Dividir (19) por $\left(J_m \ddot{x}_{FP} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right)$ para simplificação e obter (20).

$$\begin{aligned}
 \frac{X(s)}{T_m(s) - \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}}} &= \frac{1}{s^2 \left(J_m \ddot{x}_{FP} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right) + s k_{Dm} \dot{x}_{FP} + \frac{3k_c}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}}} \Leftrightarrow \quad (A) \\
 \frac{X(s)}{T_m(s) - \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}}} &= \frac{1}{s^2 + s \frac{k_{Dm} \dot{x}_{FP}}{\left(J_m \ddot{x}_{FP} + \frac{M}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}} \right)} + \frac{3k_c}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}}} \Leftrightarrow \\
 \frac{X(s)}{T_m(s) - \frac{Mg \sin(\alpha)}{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}}} &= \frac{\frac{\eta_R i_R \eta_{FP} i_{FP}}{J_m i_R^2 i_{FP}^2 \eta_R \eta_{FP} + M}}{s^2 + s \frac{k_{Dm} i_R^2 i_{FP}^2 \eta_R \eta_{FP}}{J_m i_R^2 i_{FP}^2 \eta_R \eta_{FP} + M} + \frac{3k_c}{J_m i_R^2 i_{FP}^2 \eta_R \eta_{FP} + M}} \Leftrightarrow \quad (20)
 \end{aligned}$$

Diagrama de blocos com uma possível solução para um sistema de accionamento com controlo da posição linear x , representada na Figura D.

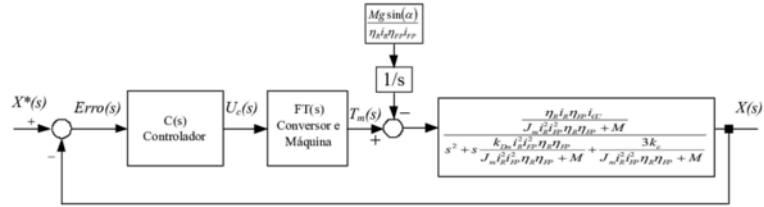


Figura D – Diagrama de blocos do accionamento para controlo da posição x .

- A FT $U_c(s)/\text{Erro}(s)$ representa FT do compensador. A FT do compensador será escolhida de acordo com a ordem da FT dos restantes blocos e da ordem da FT global exigida.
- A FT $T_m(s)/U_c(s)$ representa a FT com a dinâmica formada/constituída pelo conjunto Variador Electrónico de Velocidade, a parte eléctrica do motor eléctrico e o controlo adequado para imposição do binário motor T_m . Normalmente é considerada uma FT aproximada de primeira ordem, caracterizada por um ganho e uma constante de tempo.
- A FT $\frac{X(s)}{T_m(s)}$ representa a FT obtida na equação (20).

c) Para o diagrama de blocos da alínea b), realizando as simplificações necessárias, dimensione os parâmetros de um **compensador PI**, utilizando o critério mínimo ITAE, relativamente à resposta óptima de entrada em escalão para **sistemas de segunda ordem**. Considere para a FT apresentada na **alínea b)**, $T_m(s)/U_c(s) = K/(1 + s\tau_c)$, $K=10$ e $\tau_c=1\text{ms}$. Considere que a FT obtida na **alínea a)**, tem um ganho 50 e dois pólos reais de valor -10 e -100 .

A correspondência entre a função de transferência do enunciado do problema, ganho 50 e dois pólos -10s^{-1} e -100s^{-1} , e a obtida em (20), com o sistema fuso-porca, carro de massa M e as suas molas é obtida com (21).

$$\frac{X(s)}{T_m(s)} = \frac{\frac{\eta_R^2 \eta_{FP}^2 i_{FP}^2}{J_m i_R^2 i_{FP}^2 \eta_R^2 \eta_{FP}^2 + M}}{s^2 + s \frac{k_{Dm} i_R^2 i_{FP}^2 \eta_R^2 \eta_{FP}^2}{J_m i_R^2 i_{FP}^2 \eta_R^2 \eta_{FP}^2 + M} + \frac{3k_c}{J_m i_R^2 i_{FP}^2 \eta_R^2 \eta_{FP}^2 + M}} \Rightarrow \quad (21)$$

$$\frac{X(s)}{T_m(s)} = \frac{50}{(s+10)(s+100)}$$

Desenvolvendo (21) matematicamente o denominador na forma $(1+as)$ e $(1+bs)$ para cancelamento dos pólos com o zero da FT do compensador PI é obtida (22).

$$\begin{aligned} \frac{X(s)}{T_m(s)} &= \frac{50}{(s+10)(s+100)} \Leftrightarrow \frac{X(s)}{T_m(s)} = \frac{50}{10\left(1+\frac{1}{10}s\right)100\left(1+\frac{1}{100}s\right)} \Leftrightarrow \\ &= \frac{5}{1000\left(1+\frac{1}{10}s\right)\left(1+\frac{1}{100}s\right)} \Leftrightarrow \frac{X(s)}{T_m(s)} = \frac{\frac{5}{100}}{\left(1+\frac{1}{10}s\right)\left(1+\frac{1}{100}s\right)} \end{aligned} \quad (22)$$

A Função de Transferência do compensador PI é obtida com (23). Esta FT é caracterizada por um ganho k_c e uma constante de tempo τ_c .

$$C(s) = \frac{k_c(1+s\tau_c)}{s} \quad (23)$$

A Função de Transferência da cadeia de acção do sistema tem quatro pólos (Figura E): **i)** o pólo na origem do PI (24), **ii)** o pólo igual a $-10s^{-1}$ (25), **iii)** o pólo igual a $-100s^{-1}$ (26), **iv)** o pólo associado à constante de tempo de atraso τ_c (27).

$$s = 0 \quad (24)$$

$$s = -10s^{-1} \quad (25)$$

$$s = -100s^{-1} \quad (26)$$

$$1+s\tau_c = 0 \Leftrightarrow s = -\frac{1}{\tau_c} \xrightarrow{\tau_c=1ms} s = -1000s^{-1} \quad (27)$$

De acordo com o enunciado do problema, para que a **FT do sistema global seja de segunda ordem**, uma solução com duas condições é: **i)** desprezar a dinâmica da constante de tempo τ_c do atraso estatístico do conversor, **ii)** com o zero do PI cancelar o pólo dominante (**o mais próximo da origem**) $s = -10s^{-1}$.

Para **não ser considerada a dinâmica da constante de tempo τ_c do atraso do conversor**, tem de ser cumprida a seguinte regra:

5.2.3 Simplificação de funções de transferência: “Quando existem pólos no sistema muito afastados dos pólos dominantes (**afastamento da ordem de 10 vezes a localização dos pólos dominantes**), para a resposta do sistema, podem ser desprezados aqueles pólos localizados no interior do SCE (devendo ser mantido o ganho estático do referido sistema)”.

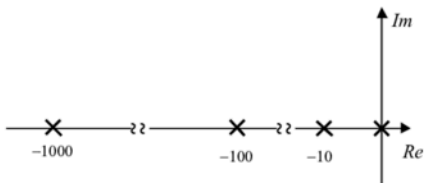


Figura E – Mapa de pólos e zeros do accionamento em estudo.

Utilizar o zero do compensador PI (23) para anular o pólo dominante em (22) e obter τ_c (28).

$$\tau_c = \frac{1}{10} \text{ s}^{-1} \quad (28)$$

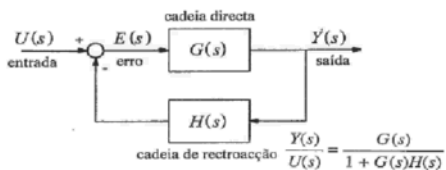


Fig. 5.2 – Diagrama de blocos de um sistema de controlo genérico univariável em cadeia fechada.

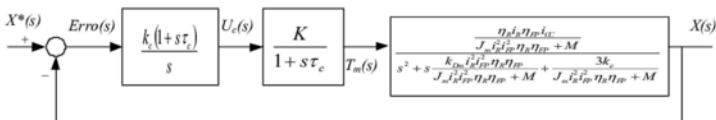


Figura F – Diagrama de blocos do accionamento em estudo. Função de transferência global $X(s)/X^*(s)$ de quarta ordem.

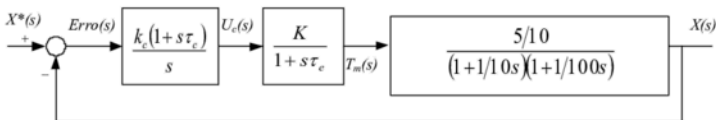


Figura G – Diagrama de blocos do accionamento em estudo. Função de transferência global $X(s)/X^*(s)$ de quarta ordem.

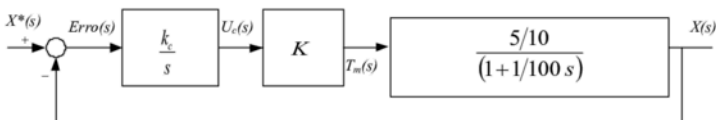


Figura H – Diagrama de blocos do accionamento em estudo. Função de transferência global $X(s)/X^*(s)$ de segunda ordem.

Com a Figura H, a função de transferência da cadeia de acção $G(s)$ do sistema é obtida com (29).

$$G(s) = \frac{k_c}{s} \times K \times \frac{\frac{5}{100}}{\left(1 + \frac{1}{100}s\right)} = \frac{\frac{5k_c K}{100}}{s \left(\frac{100+s}{100}\right)} = \frac{5k_c K}{s(100+s)} \quad (29)$$

Com a Figura H, a função de transferência global do sistema em cadeia fechada é obtida com (30).

$$FT_{CF} = \frac{G(s)}{1 + G(s)H(s)} = \frac{\frac{5k_c K}{s(100+s)}}{1 + \frac{5k_c K}{s(100+s)}} = \frac{5k_c K}{s(100+s)} \times \frac{s(100+s)}{s(100+s) + 5k_c K} = \quad (30)$$

$$\frac{5k_c K}{s(100+s) + 5k_c K} = \frac{5k_c K}{s^2 + 100s + 5k_c K} \Rightarrow FT_{CF} = \frac{5k_c K}{s^2 + 100s + 5k_c K}$$

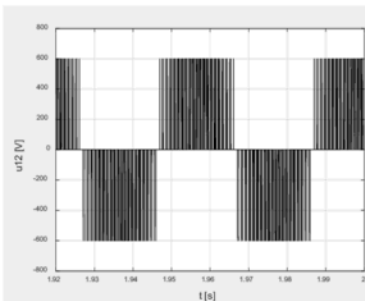
Aplica-se o critério do ITAE 2ª ordem [Palma 1999; Quadro 5.2, pp. 214] (31) com um factor de amortecimento de $\xi = \sqrt{2}/2$ para dimensionar k_c (32).

$$\frac{\omega_o^2}{s^2 + 2\xi\omega_o s + \omega_o^2} \xrightarrow{\xi=\sqrt{2}/2} \frac{\omega_o^2}{s^2 + 2\sqrt{2}/2 \omega_o s + \omega_o^2} \xrightarrow{\sqrt{2}=1,41} \frac{\omega_o^2}{s^2 + 1,41\omega_o s + \omega_o^2} \quad (31)$$

$$\begin{cases} 2\xi\omega_o = 100 \\ \omega_o^2 = 5k_c K \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \omega_o = \frac{100}{2\xi} \\ \left(\frac{100}{2\xi}\right)^2 = 5k_c K \Leftrightarrow k_c = \frac{\left(\frac{100}{2\xi}\right)^2}{5K} \xrightarrow[\frac{\xi=\sqrt{2}/2}{K=10}]{} k_c = \frac{\left(\frac{100}{2 \times \sqrt{2}/2}\right)^2}{5 \times 10} = 100 \end{cases} \quad (32)$$

Problema 2

Um Variador Electrónico de Velocidade (VEV), com comando V/f, alimenta uma máquina assíncrona trifásica com as seguintes características nominais: 220/380V; 50Hz; 2,2kW; 1460rpm. A característica tensão-frequência de comando é obtida com $U = \max(U_0 + 2,9 \times f; U_n / f_n \times f)$ e tensão $U_0 = 30V$.



a) Justificadamente, apresente o esquema de blocos com uma possível solução para implementar a técnica de comando V/f com opção de inversão do sentido de rotação. Identifique a tensão U_0 e descreva a sua função/objectivo. Para a **ligação em triângulo** dos enrolamentos do estator, justificadamente apresente o gráfico com a característica tensão-frequência para o intervalo $0 \leq f \leq f_n$. [cotação: 2 valores]

b) A figura representa a evolução temporal da tensão composta u_{12} de saída do VEV e aplicada no estator da máquina assíncrona trifásica. O valor eficaz da primeira harmónica da tensão composta u_{12} de saída do VEV, com o índice de modelação de amplitude m_a , e tensão U_{dc} no barramento DC, é dado por: $U_{12,1s} = \left[\sqrt{3} / (2\sqrt{2}) \right] m_a U_{dc}$. Calcule o valor da tensão aplicada pelo Variador Electrónico de Velocidade à máquina (**ligação em triângulo**) e o índice de modelação de amplitude m_a .

[cotação: 2 valores]

c) Acoplado à máquina assíncrona trifásica existe um redutor e uma carga conforme representado na

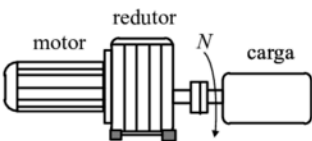
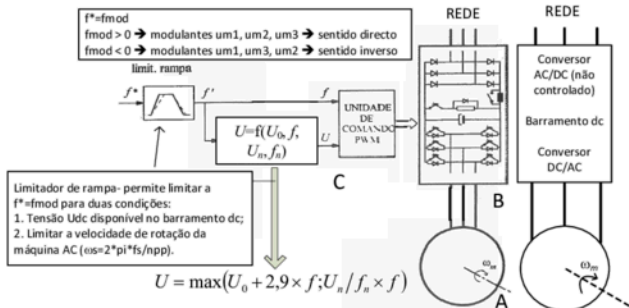


Figura. Desprezar os binários resistentes do motor e redutor. Admita uma relação de transmissão para o redutor de 10 e um binário de atrito viscoso ($k_D = 0,941 \text{ Nms}$) para a carga. Admita constante o escorregamento para todas as características electromecânicas V/f. Para uma velocidade $N = 88 \text{ rpm}$ (saída do redutor) calcule justificadamente: frequência fundamental das tensões de saída do VEV, o

valor de m_a , a velocidade de rotação, o binário desenvolvido e o rendimento. Admita novamente que o valor eficaz da primeira harmónica da tensão composta (**ligação em triângulo** dos enrolamentos do estator) é obtido com $U_{12,1s} = \left[\sqrt{3} / (2\sqrt{2}) \right] m_a U_{dc}$.

[cotação: 2 valores]

a) Justificadamente, apresente o esquema de blocos com uma possível solução para implementar a técnica de comando V/f com opção de inversão do sentido de rotação. Identifique a tensão U_0 e descreva a sua função/objectivo. Para a ligação em triângulo dos enrolamentos do estator, justificadamente apresente o gráfico com a característica tensão-frequência para o intervalo $0 \leq f \leq f_n$.

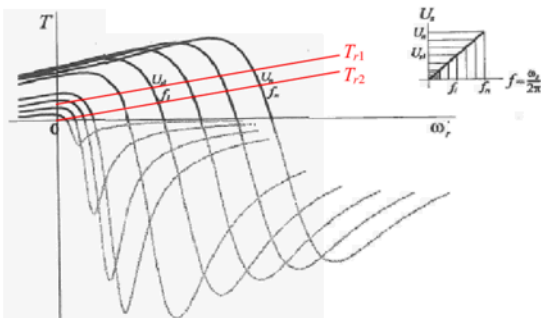


Uma possível solução deverá conter os seguintes blocos ou subsistemas:

- **Subsistema A:** Máquina assíncrona trifásica;
- **Subsistema B:** Circuito de potência constituído por: i) rectificador monofásico ou trifásico (dependente da potência) habitualmente em ponte não controlado, ii) resistência de pré-carga do condensador, iii) barramento de corrente contínua, iv) chopper e resistência de energia de retorno, v) ondulator de tensão trifásico em ponte com circuito de guiamento/drivers;
- **Subsistema C:** Circuito de comando que permita o cálculo da amplitude da modulante A_{mod} em função da frequência da modulante f_{mod} . Neste cálculo é necessário o valor da tensão U_{dc} no barramento de corrente contínua. A amplitude A_{mod} permite definir a amplitude de três sinusóides que serão comparados em cada instante com um sinal auxiliar chamado onda portadora. Esta onda portadora, será habitualmente uma onda triangular, definida por uma amplitude A_{port} e uma frequência f_{port} . A frequência da portadora é um aspecto importante porque impõe a frequência de comutação dos dispositivos semicondutores do circuito de potência. Este circuito de potência funciona como um ondulator de tensão, ou seja, um conversor com modo de funcionamento DC-AC. A amplitude da onda portadora deverá ser sempre superior à amplitude da modulante para evitar sobremodulações.

Identificar a tensão U_0 e descrever a sua função/objectivo:

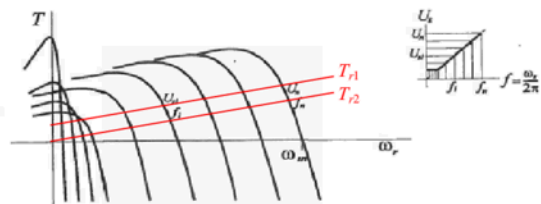
A tensão U_0 habitualmente é identificada como tensão de pedestal (boost). Permite estabelecer um valor mínimo da tensão aplicada no estator de máquina para uma frequência mínima (f_{min}). Este valor de frequência mínima deverá ser superior a zero (Figuras A, B e C). Torna-se importante estabelecer este valor mínimo de U_0 que irá corresponder um valor mínimo de binário, $T = f(U^2)$. Este valor mínimo de binário é importante e necessário quando existem características de binários de carga ou resistentes T_r elevados (Figuras A, B e C). No exemplo representado nas Figuras A, B e C o binário T_{r1} e T_{r2} determina o valor mínimo da tensão a aplicar à máquina assíncrona trifásica (tensão U_0). Para o binário T_{r1} o valor mínimo da tensão U_0 será diferente de zero.



$$\begin{cases} T_{r1} = K_{D1}\omega_r \\ T_{r2} = K_{D2}\omega_r \\ K_{D1} > K_{D2} \end{cases}$$

Fig. 7.11 – Características electromecânicas com a "técnica V/f" ($U_s/f = \text{constante}$).

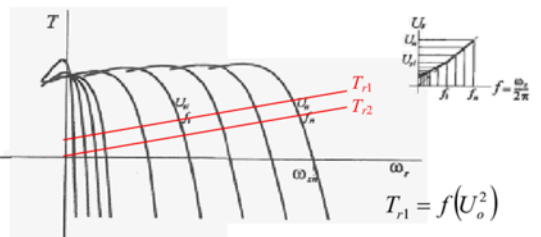
Figura A



$$\begin{cases} T_{r1} = K_C + K_{D1}\omega_r \\ T_{r2} = K_{D2}\omega_r \\ K_{D1} > K_{D2} \end{cases}$$

Fig. 7.12 – Características electromecânicas com a técnica V/f modificada. De cada curva está representada apenas uma porção com efectivo interesse para o funcionamento em regime estacionário.

Figura B



$$\begin{cases} T_{r1} = K_C + K_{D1}\omega_r \\ T_{r2} = K_{D2}\omega_r \\ K_{D1} > K_{D2} \end{cases}$$

$$T_{r1}(\omega_r = 0) = f(U_o^2) = K_C$$

Fig. 7.13 – Características electromecânicas com outra variante da técnica V/f.

Figura C