

# Dimensionamento de Pequenos Motores Eléctricos

J. Guerreiro Gonçalves(\*)

Mestre Eng.º Electrotécnico (IST/UTL)

Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve

C. Pereira Cabrita(\*)

Dr. Eng.º Electrotécnico (IST/UTL), Prof. Auxiliar (IST)

Prof. Coordenador Convidado (Escola Náutica Infante D. Henrique)

(\*) Centro de Automática da Universidade Técnica de Lisboa - Laboratório de Mecatrónica

## Summary

*The vast majority of commercially manufactured electric motors are used in low power home and industrial applications. These small motors are manufactured in mass production, meaning in several countries, meaning an important industrial fact. For universal and asynchronous motors, the power output formulas, in terms of design parameters, are derived and analysed.*

*The typical values of those design parameters for both motors are also presented. Finally, based on experimental power output formulas, a comparison between dimensions of motors is made.*

## Resumo

*A grande maioria dos motores eléctricos fabricados comercialmente destina-se a aplicações domésticas e industriais de pequena potência. Os pequenos motores eléctricos são produzidos em massa nalguns países, e representam um peso económico significativo no domínio da indústria electrotécnica. O artigo apresenta a dedução das expressões da potência, que é expressa em termos dos parâmetros de dimensionamento usuais, para motores universais e para motores assíncronos. Apresentam-se ainda os valores práticos daqueles parâmetros, que permitem o dimensionamento destes motores. Finalmente, faz-se um estudo teórico comparativo entre dimensões para os motores estudados.*

## 1. Introdução

Os pequenos motores eléctricos são comumente designados por motores de potência fraccionária e sub-fraccionária, entendendo-se na prática por motores de potência fraccionária todo aquele cuja potência é igual ou inferior a 1 CV, e por motor de potência sub-fraccionária quando a potência for igual ou inferior a 1/20 CV [1]. No entanto, esta definição não é rígida e, hoje em dia, já se incluem nesta classificação os motores até 3 kW. Estes pequenos motores fazem já parte

do nosso quotidiano, e são utilizados nos seguintes domínios [1, 2, 3]:

- Maquinaria informática e escritório.
- Aparelhagem audiovisual.
- Aparelhagem de relojoaria.
- Electrodomésticos.
- Indústria automóvel.
- Indústria naval.
- Indústria aeronáutica.
- Indústria ferroviária.
- Aquecimento e ar condicionado.
- Aparelhagem de medida e de controlo.
- Robótica.

Os motores de potência fraccionária são produzidos em massa, o que se justifica não só pelo seu larguíssimo espectro de aplicações – basta ver quantos motores existem apenas em electrodomésticos numa habitação – como também pelo aumento dos índices de consumo. Em termos económicos, o seu peso é significativo no conjunto das indústrias electrotécnicas. Para corroborar estas afirmações, vejam-se os seguintes exemplos:

- Em 1966, comercializaram-se nos E.U.A. mais de 138 milhões de unidades, representando mais de 10<sup>9</sup> dólares [1].
- Em 1974, comercializaram-se em França mais de 24 milhões de unidades, apenas para electrodomésticos [2].
- Actualmente, um único fabricante alemão produz por ano mais de 10 milhões de unidades [3].

## 2. Potência de Dimensionamento

### 2.1. Motores universais

Sejam:

$A$  - valor eficaz da carga linear específica, Acond/m

$B$  - valor eficaz médio espacial do campo de indução magnética no entreferro, Wb/m<sup>2</sup>

$c$  - número de pares de circuitos derivados do enrolamento induzido

$D$  - diâmetro do induzido, m

$E_a$  - valor eficaz da f.e.m.

$I_a$  - valor eficaz da corrente, A

$L$  - comprimento do induzido, m

$N$  - velocidade de rotação, 1/s

$n$  - número de condutores activos do induzido

$P$  - potência de dimensionamento, W

$p$  - número de pares de pólos

$\Phi$  - valor eficaz do fluxo útil por pólo, Wb

$\Psi$  - razão arco polar/passos polar

$\tau$  - passo polar, m

Sendo

$$P = E_a I_a$$

como

$$E_a = \frac{p}{c} n N \Phi$$

$$\Phi = B \Psi \tau L$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

$$A = \frac{n I_a}{2 \pi c D}$$

obtém-se

$$P = \pi^2 N \Psi A B D^2 \quad (1)$$

## 2.2. Motores assíncronos trifásicos

Sejam:

$A$  - valor eficaz da carga linear específica, Acond/m

$B_M$  - valor máximo do campo de indução magnética no entreferro, Wb/m<sup>2</sup>

$\cos \varphi$  - factor de potência

$D$  - diâmetro do induzido, m

$E_j$  - valor eficaz da f.e.m. nos enrolamentos do estator, V

$f$  - frequência, Hz

$I_j$  - valor eficaz da corrente nos enrolamentos do estator, A

$L$  - comprimento do rotor, m

$N_s$  - velocidade de sincronismo, 1/s

$N_j$  - número de condutores activos de cada enrolamento do estator

$P$  - potência de dimensionamento, W

$p$  - número de pares de pólos

$\Phi_M$  - valor máximo do fluxo no entreferro, Wb

$\Psi$  - razão largura dos dentes estatóricos por pólos/passos polar

$\tau$  - passo polar, m

$\eta$  - rendimento

Sendo

$$P = 3 E_j I_j \eta \cos \varphi$$

como

$$E_j = \frac{\sqrt{2}}{2} \pi f N_j \Phi_M$$

$$f = p N_s$$

$$\Phi_M = B_M \Psi \tau L$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}$$

$$A = \frac{3 N_j I_j}{\pi D}$$

obtém-se

$$P = \pi^2 N_s \Psi A B_M D^2 L \eta \cos \varphi \quad (2)$$

## 3. Parâmetros Característicos

### 3.1. Motores universais

Para os valores usuais do diâmetro do rotor

$$2,5 \leq D \leq 6 \text{ cm}$$

tem-se [2, 4],

$$60 \leq A \leq 100 \text{ Ac/cm}$$

$$0,25 \leq B \leq 0,40 \text{ Wb/m}^2$$

Quanto ao arco polar relativo, o seu valor está compreendido entre os limites [4]

$$0,65 \leq \Psi \leq 0,75$$

### 3.2. Motores assíncronos trifásicos

Para os valores usuais do diâmetro do rotor,

$$2,5 \leq D \leq 12 \text{ cm}$$

tem-se [2],

$$0,50 \leq B \leq 0,80 \text{ Wb/m}^2 \quad (2 \text{ pólos})$$

$$0,40 \leq B \leq 0,75 \text{ Wb/m}^2 \quad (4 \text{ pólos})$$

e para os valores usuais da potência

$$0,5 \leq P \leq 3 \text{ CV}$$

tem-se [5]

$$135 \leq A \leq 185 \text{ Ac/cm} \quad (2 \text{ pólos})$$

$$195 \leq A \leq 230 \text{ Ac/cm} \quad (4 \text{ pólos})$$

$$0,624 \leq \eta \cos \varphi \leq 0,690 \quad (2 \text{ pólos})$$

$$0,496 \leq \eta \cos \varphi \leq 0,640 \quad (4 \text{ pólos})$$

Quanto ao arco polar relativo, o seu valor normal é [5]

$$\Psi = 0,65$$

Tendo em consideração os valores típicos de dimensionamento que se expõem, as expressões (1) e (2) passam a escrever-se, respectivamente,

• **Motores universais:**

$$P = (0,47 \text{ a } 1,26) \cdot D^2 L \left( \frac{N}{3000} \right) \quad (3)$$

para  $2,5 \leq D \leq 6 \text{ cm}$  e  $N \oplus 3000 \text{ 1/min.}$

• **Motores assíncronos bipolares:**

$$P = (1,32 \text{ a } 3,21) \cdot D^2 L \quad (4)$$

para  $2,5 \leq D \leq 12 \text{ cm}$

• **Motores assíncronos tetrapolares:**

$$P = (0,61 \text{ a } 1,73) \cdot D^2 L \quad (5)$$

para  $2,5 \leq D \leq 12 \text{ cm.}$

Nas expressões (3) a (5) tem-se  $P$  em W e  $D$  e  $L$  em cm.

Como se constata das expressões (1) e (2), a potência de dimensionamento é uma função quer do produto  $AB$ , quer do produto  $D^2L$ .

Por outro lado, os parâmetros  $A$  e  $B$  aumentam com o diâmetro do rotor  $D$ , na prática segundo uma lei do tipo

$$Y = aD^b$$

com  $a, b$  constantes. Por conseguinte, tem-se

$$P = kD^n L$$

sendo  $k$ , obviamente, uma constante construtiva do motor. Para  $2,5 \leq D \leq 12 \text{ cm}$  é válido considerar-se  $n = 3$  [2], ou seja,

$$P = kD^3 L$$

Consequentemente, as expressões (3) a (5) passam a ser, respectivamente [2],

$$P = (0,07 \text{ a } 0,10) \cdot D^3 L \left( \frac{N}{3000} \right) \quad (6)$$

$$P = (0,40 \text{ a } 0,50) \cdot D^3 L \quad (7)$$

$$P = (0,17 \text{ a } 0,22) \cdot D^3 L \quad (8)$$

## 4. Comparação entre Motores

Como complemento do estudo apresentado, interessa comparar, entre si, as dimensões e o momento de inércia destes motores, como base no critério da potência. O momento de inércia é calculado por meio da seguinte expressão

$$J = \frac{MD_i^2}{4}$$

sendo  $J$  o momento de inércia em  $\text{kg.m}^2$ ,  $M$  a massa do rotor em kg, e  $D_i$  o diâmetro de inércia em m. Como

$$M = dV$$

$$D_i^2 = \frac{D^2}{2}$$

em que  $d$  é a densidade do rotor, suposto um corpo homogéneo, em  $\text{kg/m}^3$ , e  $V$  é o volume do rotor em  $\text{m}^3$ . Têm-se assim

$$J = \frac{dVD^2}{8}$$

### 4.1. Comparação entre motores assíncronos

Utilizando-se os índices 2 e 4 para designar respectivamente os parâmetros do motor com 2 pólos e os parâmetros do motor com 4 pólos, as expressões (7) e (8) escrevem-se

$$P_2 = K_2 D_2^3 L_2$$

$$P_4 = K_4 D_4^3 L_4$$

Por divisão membro a membro, se se atender a que

$$K_2 \cong 2,3K_4$$

obtém-se

$$\frac{P_2}{P_4} = 2,3 \left( \frac{D_2}{D_4} \right)^3 \frac{L_2}{L_4}$$

No Quadro I apresentam-se os resultados aproximados desta comparação entre motores com 2 e 4 pólos, para as seguintes situações:

- Mesmas dimensões dos rotores
- Mesma potência e mesmo comprimento dos rotores
- Mesma potência e comprimento do motor com 2 pólos igual a 80% do comprimento do motor com 4 pólos

QUADRO I

Comparação entre motores assíncronos.

Motor	P	D	L	V	J
4 pólos	1	1	1	1	1
2 pólos	2,30	1	1	1	1
4 pólos	1	1	1	1	1
2 pólos	1	0,76	1	0,58	0,34
4 pólos	1	1	1	1	1
2 pólos	1	0,80	0,80	0,50	0,32

Se a comparação tivesse sido feita a partir das expressões iniciais (4) e (5), os resultados seriam sensivelmente idênticos, como se pode constatar.

#### 4.2. Comparação entre o motor universal e o motor assíncrono

As expressões (6) e (7) escrevem-se, utilizando-se os índices *u* e 2 para designar respectivamente o motor universal e o motor assíncrono bipolar,

$$P_u = K_u D_u^3 L_u$$

$$P_2 = K_2 D_2^3 L_2$$

Se o motor universal fosse dimensionado para uma velocidade a plena carga igual a 3000 1/min, ter-se-ia

$$K_2 \cong 5K_u$$

apresentando-se no Quadro II os resultados teóricos que se obtiveram da comparação entre estes dois tipos de motores, para as mesmas imposições de 4.1.

QUADRO II

Comparação entre o motor universal e o motor assíncrono bipolar, para  $N_{univ} = 3000$  1/min

Motor	P	D	L	V	J
univ.	1	1	1	1	1
ass.	5	1	1	1	1
univ.	1	1	1	1	1
ass.	1	0,58	1	0,34	0,11
univ.	1	1	1	1	1
ass.	1	0,63	0,80	0,32	0,13

Os motores universais são máquinas de baixo rendimento (50 a 70%) e com um factor de potência compreendido entre 0,4 e 0,6, sendo penalizados essencialmente devido aos problemas de comutação. Daí que os seus parâmetros de dimensionamento sejam francamente inferiores aos dos motores assíncronos. Como se constata do Quadro II, para uma velocidade de 3000 1/min, o motor universal é bastante inferior ao motor assíncrono bipolar. No entanto, os motores

universais funcionam numa gama de velocidades bastante alargada, cujo valor nominal se situa entre 4000 e 16000 1/min para os de maior potência e em 20000 1/min para os de menor potência. Assim, para uma velocidade de 18000 1/min, os valores são mais favoráveis no motor universal, como se constata no Quadro III, e que aliás se confirma na prática.

QUADRO III

Potência, peso e potência mássica de motores universais e assíncronos trifásicos produzidos comercialmente.

Motor	P	D	L	V	J
univ.	1	1	1	1	1
ass.	0,88	1	1	1	1
univ.	1	1	1	1	1
ass.	1	1,05	1	1,10	1,21
univ.	1	1	1	1	1
ass.	1	1	1,10	1,10	1,10

### 5. Conclusões

As equações de cálculo apresentadas, bem como os valores típicos dos parâmetros principais de dimensionamento destes dois tipos de motores de potência fraccionária, permitem avaliar as limitações que são impostas ao seu cálculo. Por outro lado, o estudo comparativo entre dimensões tem como finalidade sensibilizar o leitor para as diferenças existentes entre essas pequenas máquinas, uma vez que o seu domínio de aplicação é diferenciado, ou seja, não se deve utilizar o motor assíncrono no accionamento de máquinas-ferramentas portáteis, nem o motor universal no accionamento de um pequeno compressor. No entanto, em termos absolutos e para uma mesma potência, o motor universal de velocidade superior a 15000 1/min. é o que apresenta a maior potência mássica, logo seguido pelo motor assíncrono bipolar. O motor universal é construído para potências até 1 CV para funcionamento em regime permanente, e para potências até 2 CV para regime intermitente, que é aliás, o seu tipo de regime ideal. Finalmente, no Quadro IV apresentam-se os valores da potência, do peso e da potência mássica relativos a alguns motores universais e assíncronos trifásicos produzidos comercialmente [3].

QUADRO IV

Potência, peso e potência mássica de motores universais e assíncronos trifásicos produzidos comercialmente.

Motor	W	kg	W/kg
universal	270	1,9	142
	530	2,7	196
assíncrono 2 pólos	370	4,7	79
	620	5,9	105
assíncrono 4 pólos	250	4,6	54
	550	6,5	85