

Desenho e Construção de um Motor Linear de Indução de Baixa Velocidade

Rodolfo A. D. Oliveira⁽¹⁾, A. Leão Rodrigues⁽²⁾

Departamento de Engenharia Electrotécnica
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Universidade Nova de Lisboa
2825-114 Caparica – PORTUGAL
e-mail: ⁽¹⁾rado@uninova.pt; ⁽²⁾leao@uninova.pt;

Resumo

Esta comunicação apresenta o trabalho desenvolvido durante o projecto, construção, e ensaio de um motor linear de indução (MLI) de baixa velocidade. Descreve-se um protótipo desenvolvido com fins experimentais. Numa primeira fase, apresenta-se e comparam-se vários desenhos de motores deste tipo. Seguidamente, analisa-se a constituição do protótipo. Finalmente, avaliam-se as suas características eléctricas e mecânicas apresentando os resultados experimentais obtidos através dos ensaios efectuados.

Palavras chave: Motor linear de indução, levitação electromagnética.

1. Introdução

O motor linear de indução (MLI) não é um accionamento eléctrico recente. Na realidade, o primeiro motor linear para aplicação em tracção eléctrica foi patenteado em 1841 por Zehdan. Daí em diante, foi feita investigação em diferentes desenhos, tendo sido construídos centenas de protótipos diferentes. No entanto, a maioria dos protótipos apresentados necessitam de um grande investimento económico para que possam ser construídos. A ideia do presente trabalho foi a de construir um protótipo de um MLI de baixo custo, o qual permitisse verificar os conceitos teóricos associados a este tipo de motor.

De todos os desenhos investigados, optou-se por estudar em profundidade o MLI constituído pela associação de vários levitadores electromagnéticos, como mostra a figura 1, cuja construção é a mais económica.

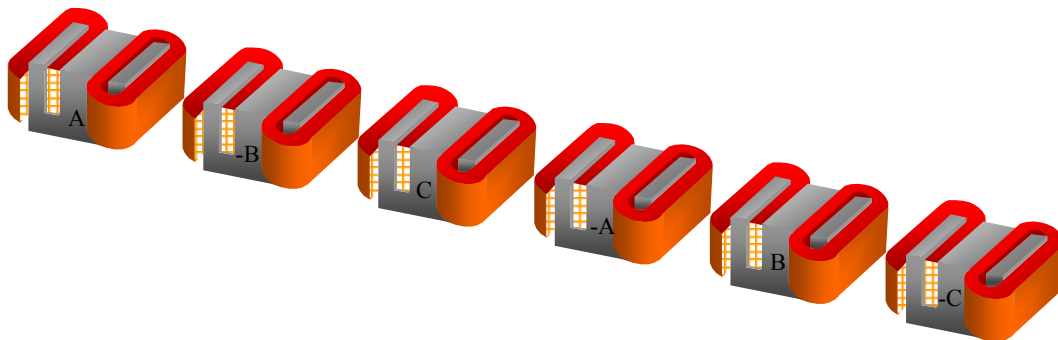


Figura 1. MLI constituído por 6 levitadores.

O primeiro levitador estudado, representado na figura 2, é constituído por um conjunto de várias chapas ferromagnéticas apertadas em forma de E, onde são introduzidas duas bobinas ligadas em série. Para este tipo de núcleo, podem existir duas possíveis soluções quanto à localização das bobinas:

- A colocação de uma só bobina no núcleo do levitador (a envolver a haste central do circuito magnético em forma de E).
- A colocação de duas bobinas ligadas em série no estator (a envolver cada uma das hastes laterais do núcleo em forma de E).

Sendo ni a força magnetomotriz ($f.m.m.$) de cada bobina, o fluxo Φ que atravessa a chapa rotórica será

$$\Phi = P n i \quad (1)$$

onde P é a permeância total do circuito magnético. Logo, para uma dada permeância magnética, o fluxo abraçado pela chapa é tanto maior quanto maior for a $f.m.m.$. Conclui-se que a utilização de duas bobinas ligadas em série e colocadas nas colunas laterais, é mais vantajosa do que no caso de ter uma só bobina colocada na coluna central do bloco estatórico.

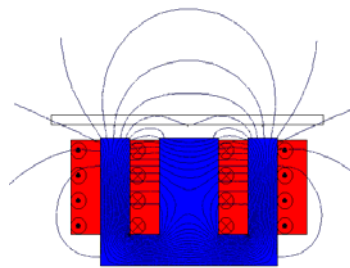


Figura 2. Distribuição das linhas de fluxo transversal num estator em E.

Como se pode observar na figura 2, existe sempre fluxo de dispersão lateral, o qual não abraça a chapa rotórica. Um pormenor muito importante é o facto de haver ainda fluxo que se fecha através da coluna central da chapa, fluxo esse que sendo aproveitado produziria uma melhoria no rendimento do motor. Consequentemente a coluna central reduz as características do dispositivo. Eliminando a coluna central do perfil em forma de E, este reduz-se ao perfil em forma de U.

Observando a figura 3a, onde são montadas duas bobinas nas duas colunas do perfil em U, pode concluir-se o seguinte:

- a não existência da coluna central disponibiliza uma quantidade de fluxo superior para atravessar a chapa rotórica.
- a não existência da coluna central possibilita que as bobinas possam ter um maior volume de cobre de forma a aumentar o valor da $f.m.m.$ produzida por cada levitador.

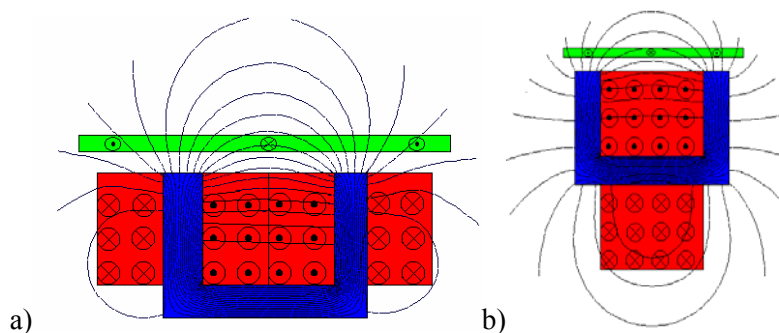


Figura 3. Desenhos com núcleo em forma de U com duas e uma bobina, respectivamente.

Entre os dois levitadores representados na figura 3, o levitador indicado na figura 3a possui melhor rendimento porque apresenta maior quantidade de fluxo magnético a atravessar a chapa rotórica, além de só necessitar de 80% do cobre necessário para bobinar o levitador apresentado na figura 3b.

2. Descrição do protótipo

Embora o levitador em forma de U fosse electromagneticamente mais vantajoso, decidiu-se construir o protótipo com chapas em forma de E as quais se encontravam disponíveis no laboratório.

O MLI tem as seguintes características:

• Potência máxima consumida:	4.8 kVA
• Alimentação:	160 V, 3 fases
• $\cos \varphi$	0.63
• Tipo de ligação:	Estrela (Y)
• Corrente:	10 A
• Frequência:	50 Hz
• Comprimento do estator:	520 mm
• Comprimento do passo polar:	260 mm
• Largura do estator:	126 mm
• Altura das cavas:	48 mm
• Número de espiras (por bobina):	225
• Número de bobinas:	12
• Número de levitadores:	6
• Diâmetro do fio de bobinagem:	1.5 mm
• Factor de enchimento:	60.5 %
• Arrefecimento:	Por convecção natural

Um motor deste tipo, apresenta valores de escorregamento muito elevados, e daí ser classificado como um MLI de baixa velocidade. Este tipo de motores têm grande aplicação como máquinas de força (actuadores), sendo por isso muito importante o conhecimento das suas características estáticas. Na prática, para obter as características estáticas basta possuir a instrumentação necessária para efectuar os ensaios no próprio motor. No entanto, para determinar as características dinâmicas o motor, sendo um MLI com chapa rotórica rectangular como mostra a figura 4a, não permite a realização dos ensaios dinâmicos. Para encontrar as características dinâmicas, efectuou-se uma montagem dos levitadores dispostos geometricamente de modo a formarem um hexágono regular, como mostra a figura 4b.



Figura 4.a. MLI com rotor rectangular.



Figura 4.b. MLI com rotor em disco.

Deste modo, e sendo ligados electricamente de modo a criarem um campo girante como mostra a figura 5, ao colocar-se um disco de material condutor e não ferromagnético, como por exemplo alumínio, este ficará a girar, podendo assim obter-se as características dinâmicas do motor, tais como velocidade e o escorregamento para

diferentes valores de frequência de alimentação, e, para diferentes binários aplicados ao veio do disco. Deste modo, para desenvolver tanto o MLI com chapa rotórica rectangular como o MLI em disco, com os mesmos levitadores, foram realizadas duas plataformas. Numa são montados os electromagnetos de modo linear, noutra são montados os electromagnetos de modo a formarem o estator para o MLI em disco.

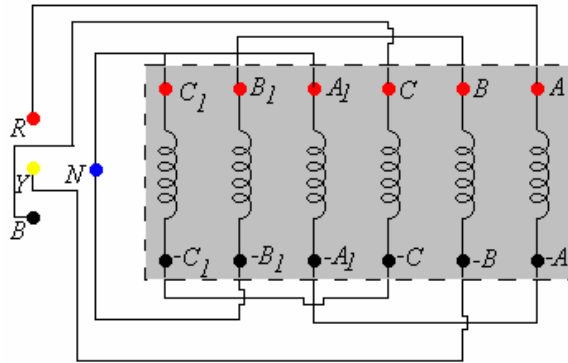


Figura 5. Circuito de ligação das bobinas do estator.

O utilizador limita-se a ligar os seis levitadores a um circuito previamente elaborado na plataforma, ligando as tomadas das diferentes bobinas convenientemente. Desta forma, consegue-se montar o MLI em disco e o MLI com chapa rotórica rectangular utilizando os mesmos levitadores, e sem que se tenham que fazer ligações eléctricas sempre que se tenha que mudar de configuração.

3. Resultados experimentais

3.1 Ensaio em vazio em regime estático.

Depois de medida a resistência óhmica e o coeficiente de auto-indução de cada fase do MLI, calculou-se a média aritmética destes valores tendo-se obtido respectivamente os valores de $R_1 = 2.7 \Omega$ e $L=26,0$ mH.

Através de uma bobina de prova mediu-se a *f.e.m. induzida* E_0 , colocando esta bobina a várias distâncias g do estator tendo-se obtido os resultados indicados na tabela 1.

g (mm)	U_0 (V)	I_1 (A)	P_0 (W)	E_0 (V)
5.0	160.0	10.0	1025.0	41.0
7.5	159.0	10.0	1025.0	41.0
10.0	157.7	10.0	1020.0	40.5
15.0	156.0	10.0	1000.0	39.2
20.0	154.0	10.0	980.0	36.8
30.0	153.8	10.0	960.0	35.8
∞	152.4	10.0	960.0	34.9

Tabela 1 – Valores experimentais obtidos no ensaio em vazio.

Os parâmetros Z_1 , X_0 , $X_{1,e}$, R_0 do circuito eléctrico equivalente por fase do MLI representado na figura 6, foram obtidos a partir dos valores experimentais indicados na tabela 1 e estão representados na figura 7.

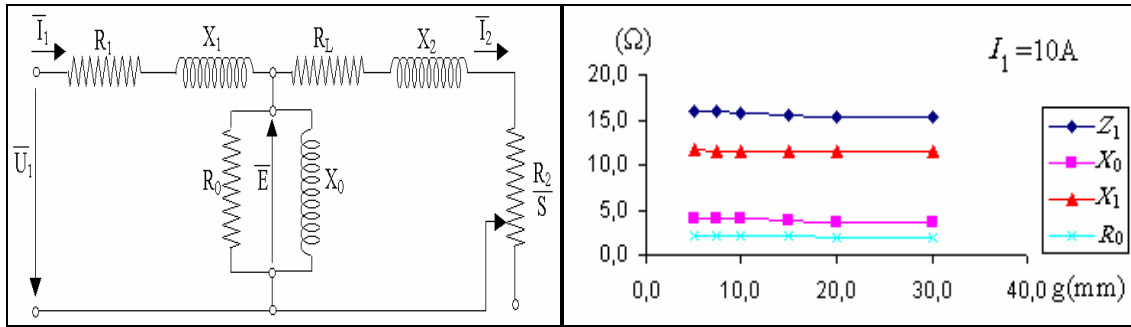


Figura 6. Circuito equivalente do MLI.

Figura 7. Variação de Z_1 , X_0 , X_1 , e R_0 com g .

3.2 Ensaio com a chapa rotórica bloqueada.

Este ensaio foi efectuado com a chapa rotórica bloqueada, o que equivale à situação de rotor bloqueado num motor rotativo convencional, ou seja com escorregamento unitário. A chapa usada, era de alumínio com as dimensões 70x15 cm, e 2 mm de espessura, tendo uma massa de 567 gramas. Os resultados obtidos estão indicados na tabela 2.

g (mm)	U_f (V)	I_1 (A)	P_f (W)	E (V)	$\cos \varphi$	I_2 (A)	X_1 (Ω)	R_0 (Ω)	X_2 (Ω)
5.0	162.0	10.0	1025.0	40.0	0.63	2.2	7.6	2.1	18.2
7.5	159.0	10.0	1000.0	39.9	0.63	2.3	7.4	2.2	17.3
10.0	158.3	10.0	1020.0	39.6	0.64	2.1	7.7	2.1	16.9
15.0	157.3	10.0	1000.0	38.0	0.64	2.5	7.2	2.0	15.4
20.0	157.2	10.0	980.0	35.6	0.62	2.5	7.1	1.8	14.6
30.0	155.9	10.0	960.0	34.1	0.62	3.0	6.5	1.7	11.2
∞	156.0	10.0	960.0	33.0	0.62	3.3	6.2	1.6	10.1

Tabela 2 – Valores calculados a partir dos dados experimentais obtidos no ensaio com a chapa rotórica bloqueada.

A partir destes valores calcularam-se respectivamente o factor de potência $\cos \varphi$, a corrente rotórica I_2 , a reactância do estator X_1 e do rotor X_2 por fase, e a resistência R_0 . estes valores estão indicados graficamente na figura 8.

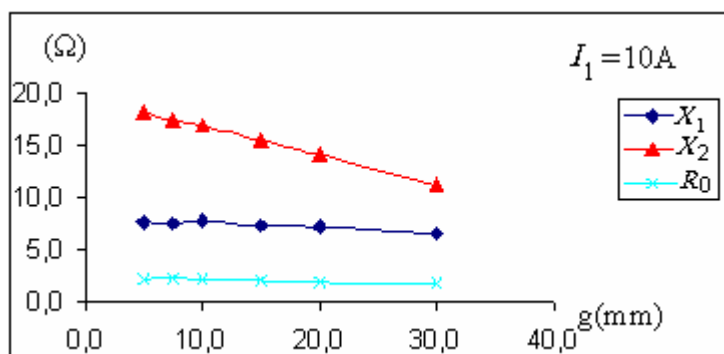


Figura 8 – Variação de X_1 , X_2 , e, R_0 com o entreferro g .

A força longitudinal desenvolvida no rotor foi medida através de um dinamómetro tendo-se ensaiado duas chapas de materiais diferentes. Os resultados constam da tabela 3.

Material	Dimensões(mm)	Massa(kg)	g(mm)	Força(N)
Alumínio	70x15x2	0.58	18	4.25
Duralumínio	70x20x1.5	0.5	8	5

Tabela 3 – Força sentida nas diferentes chapas rotóricas.

3.3 Ensaio em regime dinâmico.

Em regime dinâmico ensaiou-se o MLI com o estator circular. Utilizou-se para isso uma coroa circular em alumínio com uma espessura de 2mm, diâmetro interior de 180 mm e exterior de 390 mm.

g(mm)	I_1 (A)	U_1 (V)	ν (rpm)	S	Q	η (%)
10	7	130	84	97.2	2.99	2.0
12	8	146	106	96.5	2.49	2.5
14	9	163	136	95.5	2.13	3.2
15	10	184	144	95.2	1.99	3.4

Tabela 4 – Resultados do ensaio dinâmico.

Com esta coroa circular o motor teve um comportamento instável, e por isso, ensaiou-se o motor com um disco de 390 mm de diâmetro e 2 mm de espessura. O disco usado tinha uma massa de 670 gramas, tendo-se obtido os resultados indicados na tabela 4.

4. Conclusões

Os resultados experimentais mostram claramente que este dispositivo possui duas componentes de força; uma vertical F_v ou de levitação, e outra longitudinal F_e ou de propulsão. A força de levitação é cerca de 5 vezes superior à força de propulsão, o que mostra que este sistema pode ser utilizado no voo electromagnético.

A força longitudinal comparada com o potência absorvida pelo dispositivo F_e/P é relativamente pequena e isso deve-se ao facto de se terem usado perfis em E e entreferos elevados. Esta relação poderia ter sido melhorada compensando a potência reactiva do sistema e/ou utilizando materiais supercondutores na construção das bobinas. No entanto, a construção deste protótipo permitiu estudar vários fenómenos electromagnéticos a ele associados, constituindo assim um bom modelo pedagógico.

Referências

- [1] A. Leão Rodrigues, “Design of Low Speed Linear induction Motor”, Tese de Mestrado, Londres, 1973.
- [2] E. R. Laithwaite, “Induction Machines for special purposes”, John Wright & Sons, 1966.
- [3] E. R. Laithwaite, “Propulsion Without Wheels”, The English Universities Press, 1970.
- [4] I. Boldea, Syed A. Nasar, “Linear Electric Actuators and Generators”, Cambridge University Press, 1997.