



PPE/COPPE/UFRJ

RELATÓRIO FINAL - APÊNDICES

Projeto: **Avaliação dos Índices de Eficiência Energética para Motores Trifásicos de Indução**

Cliente: UN/DESA / CLASP

Coordenador: Roberto Schaeffer, D.Sc.

Equipe: Sebastião Ércules Melo de Oliveira, D. Sc.

Agenor Gomes Pinto Garcia, M. Sc.

Tatiana Lauria Vieira da Silva, M. Sc.

Luís Fernando Corrêa Monteiro, M. Sc.

RIO DE JANEIRO – BRASIL

08.setembro.2005

SUMÁRIO

Apêndice A	Metodologia para cálculo da energia consumida por motores	3
A.1	Avaliação do rendimento.....	3
A.2	Avaliação do carregamento	4
A.2.1	Por medição de potência elétrica.....	4
Apêndice B	Tabelas de RCB.....	8
Apêndice C	O Uso da Eletrônica de Potência para Acionamentos de Motores de Indução	13
C.1	Evolução dos dispositivos semicondutores de potência e da micro-eletrônica	14
C.2	Conversores eletrônicos empregados em acionamentos	17
C.3	Técnicas de controle de motores de indução com acionamentos eletrônicos.	20
C.4	Ganho efetivo com o uso dos controles escalar e vetorial em relação à operação convencional	22
C.5	Necessidade de Normas Técnicas.....	23
C.6	Tecnologias e tendências futuras.....	24
	Referências	25
Apêndice D	Motores de Rendimento Otimizado.....	26

Apêndice A METODOLOGIA PARA CÁLCULO DA ENERGIA CONSUMIDA POR MOTORES

Por uma questão didática de seqüência lógica na apresentação das fórmulas utilizadas, apresentaremos primeiro a avaliação do rendimento operacional, suposto conhecido o carregamento, para em seguida mostrar a estimação da carga. Claro está que o processamento normal dos dados é primeiro estimar-se o carregamento para em seguida avaliar-se o rendimento.

Uma boa avaliação dos métodos disponíveis de estimação pode ser vista em Shindo (1997), que comparou as avaliações passíveis de execução no campo com medições precisas de laboratório. Aqui, procurou-se apenas um método expedito, que permitisse um processamento ágil dos dados.

A.1 Avaliação do rendimento

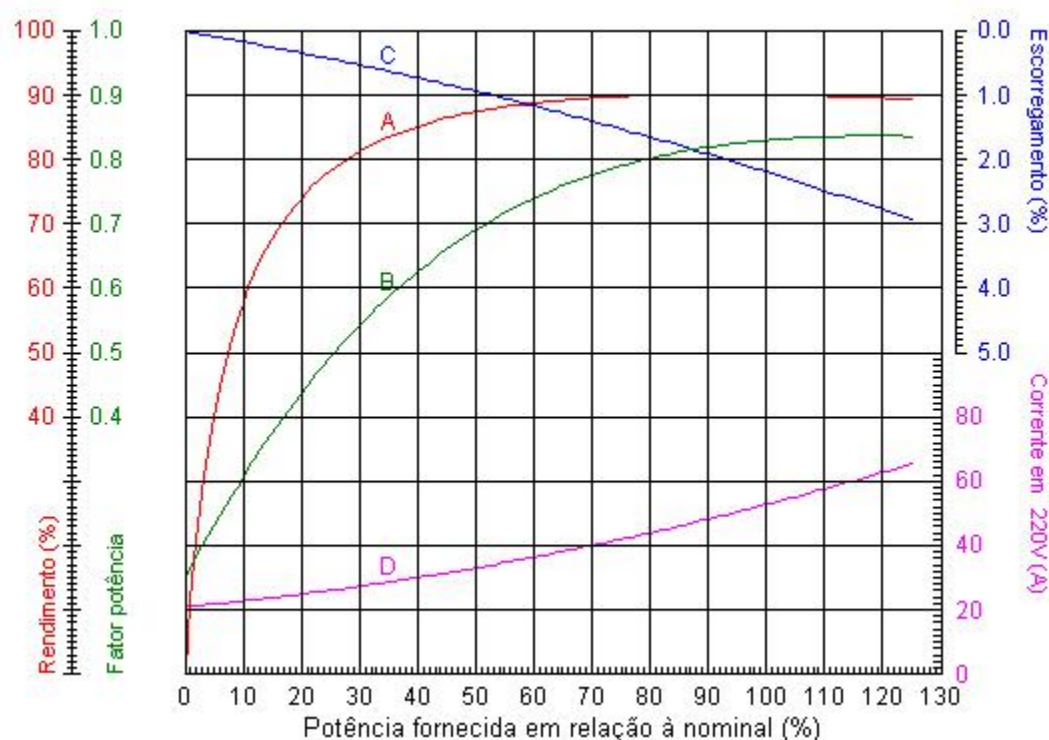


Figura A-1 – Curvas de desempenho de um motor

Fonte: Catálogo WEG. Disponível em: <http://www.weg.com.br/>. Acesso em: 27.ago.2003.

Conhecido o carregamento, e supondo-se uma curva rendimento x carregamento (na verdade, as curvas de catálogo são dadas por 3 pontos, a 50, 75 e 100% de carga nominal), a avaliação do rendimento é feita por interpolação. Neste trabalho, pela semelhança entre a curva exponencial e a empírica (ver a Figura A-1) supôs-se que esta curva tivesse a forma da Equação 1:

$$\eta = A \cdot (1 - e^{-a \cdot \gamma}) \dots\dots\dots \text{Equação 1}$$

η	Rendimento	[1]
A	Parâmetro da curva	[1]
a	Parâmetro da curva	[1]
γ	Carregamento	[1]

Aos pontos conhecidos da curva – rendimento a 50, 75 e 100% da carga – chamaram-se η_{50} , η_{75} e η_n . Deduz-se, então:

$$A = \frac{\eta_{50}^2}{2 \cdot \eta_{50} - \eta_n} \dots\dots\dots \text{Equação 2}$$

A	Parâmetro da curva	[1]
η_{50}	Rendimento a 50% de carga	[1]
η_n	Rendimento nominal	[1]

$$a = -\ln\left(1 - \frac{\eta_n}{A}\right) \dots\dots\dots \text{Equação 3}$$

a	Parâmetro da curva	[1]
η_n	Rendimento nominal	[1]
A	Parâmetro da curva	[1]

A aplicação destas fórmulas às curvas dos motores Weg mostra bons resultados: os valores de η_{50} e η_n são exatamente iguais e os η_{75} têm um erro médio de 0,4%, desvio-padrão de 0,4% e máximo de 2,7%.

Através dos dados de catálogo, portanto (rendimentos a 50, 75 e 100% de carga), podem-se estimar os parâmetros A e a e, através da Equação 3, o rendimento para cada valor de carregamento.

A.2 Avaliação do carregamento

A.2.1 Por medição de potência elétrica

Com um wattímetro alicate, mede-se a potência em uma fase (a potência do motor será o triplo da lida), ou mede-se a potência nas três fases, somando-as. Pode-se também usar o método dos dois wattímetros, medindo-se, primeiro, a potência com a corrente da fase A, por exemplo, e a tensão entre as fases A e B, somando-se com a potência lida com a corrente na fase C e a tensão entre as fases B e C (este método, porém, requer muita concentração por parte do executante, não sendo indicado quando se está fazendo uma bateria de medidas). Quando se usa um analisador de grandezas elétricas, que

possui 3 alicates amperímetros e mede as tensões nas 3 fases simultaneamente, a potência total é precisamente medida a cada instante.

Tendo-se o valor da potência elétrica, precisa-se estimar o carregamento. A combinação das diversas equações acima e a expressão da potência mecânica do motor leva à Equação 4, que expressa o carregamento em função da potência elétrica.

$$\frac{1 - e^{-a\gamma}}{\gamma} = \frac{P_{nom} \cdot 0,736}{A \cdot P} \dots\dots\dots \text{Equação 4}$$

a	Parâmetro da curva	[1]
γ	Carregamento	[1]
P_{nom}	Potência nominal	[cv]
0,736	Conversão cv para kW	[kW/cv]
A	Parâmetro da curva	[1]
P	Potência trifásica medida	[kW]

Considerando a função da Equação 5, a raiz corresponderá à solução da Equação 4, e pode ser encontrada pelo método de Newton-Raphson.

$$f(\gamma) = \frac{1 - e^{-a\gamma}}{\gamma} - \frac{P_{nom} \cdot 0,736}{A \cdot P} \dots\dots\dots \text{Equação 5}$$

a	Parâmetro da curva	[1]
γ	Carregamento	[1]
P_{nom}	Potência nominal	[cv]
0,736	Conversão cv para kW	[kW/cv]
A	Parâmetro da curva	[1]
P	Potência trifásica medida	[kW]

O algoritmo, implantado na planilha em *Excel*, é descrito abaixo.

Função $\gamma(a, P_{mec}, A, P)$

$\gamma = 0,0001$

Para $i = 1$ *ate* 100, $\Delta i = 1$

$$f(\gamma) = \frac{1 - e^{-a\gamma}}{\gamma} - \frac{P_{mec} \cdot 0,736}{A \cdot P}$$

$$f'(\gamma) = \frac{\gamma \cdot a \cdot e^{-a\gamma} - 1 + e^{-a\gamma}}{\gamma^2}$$

Se $|f(\gamma)| \leq 0,0001$ *Entao Fim. Senao*

$$\gamma = \gamma - \frac{f(\gamma)}{f'(\gamma)}$$

Pr oximo i

A.2.1.1 Por medição de corrente

Na medição por corrente, menos precisa, mede-se a corrente em uma das fases ou, preferencialmente, tira-se a média das três fases. É conveniente também medir-se as tensões entre as três fases e fazer-se a média entre elas. Calcula-se, então, o percentual de potência aparente em relação ao valor nominal.

$$i = \frac{E_{med} \cdot I_{med}}{E_{nom} \cdot I_{nom}} \dots\dots\dots \text{Equação 6}$$

i	Corrente percentual	[1]
E_{med}	Tensão entre fases medida (média)	[V]
I_{med}	Corrente medida (média)	[A]
E_{nom}	Tensão entre fases nominal	[V]
I_{nom}	Corrente nominal (placa)	[A]

Para o ajuste de correntes, em função do carregamento, dispõe-se novamente de 3 pontos, a 50, 75 e 100% de carga. A semelhança da curva (ver Figura A-1) fez supôr-se uma função do tipo:

$$i = A \cdot e^{b \cdot \gamma} \dots\dots\dots \text{Equação 7}$$

i	Corrente percentual	[1]
A	Parâmetro de ajuste	[1]
b	Parâmetro de ajuste	[1]
γ	Carregamento	[1]

Neste caso, pode-se deduzir que o parâmetro b vale:

$$b = -2 \ln(i_{50}) \dots\dots\dots \text{Equação 8}$$

b	Parâmetro de ajuste	[1]
i_{50}	Corrente percentual a 50% de carga	[1]

A corrente a meia carga vale:

$$i_{50} = \frac{1}{2} \cdot \frac{fp_{nom} \cdot \eta_{nom}}{fp_{50} \cdot \eta_{50}} \dots\dots\dots \text{Equação 9}$$

i_{50}	Corrente percentual a 50% de carga	[1]
fp_{nom}	Fator de potência nominal	[1]
η_{nom}	Rendimento nominal	[1]
fp_{50}	Fator de potência a 50% de carga	[1]
η_{50}	Rendimento a 50% de carga	[1]

E o carregamento pode ser obtido diretamente:

$$\gamma = 1 + \frac{1}{b} \cdot \ln(i) \dots\dots\dots \text{Equação 10}$$

γ	Carregamento	[1]
b	Parâmetro de ajuste	[1]
i	Corrente percentual medida	[1]

A aplicação destas fórmulas aos motores padrão Weg, mais uma vez fez coincidir os valores nominais e a 50%, com um erro médio para 75% de 2,4%, desvio-padrão de 1,4% e máximo de 5,2% (menor que a incerteza das medições de campo).

Apêndice B TABELAS DE RCB

Tabela B-1 - RCB para indústria (Finame) – 2 e 4 pólos

Horas/ano	8000	8000	4000	4000	
Carregamento	1,0	0,5	1,0	0,5	
Viáveis	100%	98%	81%	75%	
	cv				
2 pólos	1,0	0,25	0,32	0,50	0,64
	1,5	0,15	0,28	0,30	0,56
	2,0	0,21	0,35	0,42	0,70
	3,0	0,11	0,16	0,23	0,32
	4,0	0,23	0,50	0,45	1,00
	5,0	0,29	0,34	0,59	0,68
	6,0	0,19	0,57	0,37	1,15
	7,5	0,29	0,79	0,58	1,57
	10,0	0,26	0,26	0,53	0,51
	12,5	0,27	0,51	0,53	1,01
	15,0	0,19	0,26	0,38	0,53
	20,0	0,08	0,16	0,16	0,32
	25,0	0,21	0,36	0,43	0,72
	30,0	0,38	1,72	0,76	3,43
	40,0	0,12	0,25	0,24	0,50
	50,0	0,24	0,36	0,48	0,73
	60,0	0,41	0,42	0,81	0,84
	75,0	0,62	0,32	1,24	0,65
	100,0	0,89	0,65	1,79	1,31
	125,0	0,36	0,41	0,72	0,82
	150,0	0,43	0,34	0,86	0,67
	175,0	0,56	0,39	1,13	0,79
	200,0	0,57	0,36	1,13	0,71
	250,0	0,58	0,44	1,15	0,88
	4 pólos	1,0	0,34	0,36	0,68
1,5		0,41	0,35	0,81	0,70
2,0		0,47	0,84	0,94	1,67
3,0		0,37	0,40	0,74	0,81
4,0		0,23	0,41	0,46	0,82
5,0		0,29	0,49	0,57	0,97
6,0		0,16	0,27	0,31	0,55
7,5		0,24	0,52	0,48	1,04
10,0		0,26	0,45	0,52	0,91
12,5		0,21	0,39	0,42	0,78
15,0		0,18	0,37	0,37	0,73
20,0		0,17	0,32	0,33	0,64
25,0		0,33	0,50	0,66	1,00
30,0		0,23	0,37	0,45	0,73
40,0		0,26	0,29	0,53	0,57
50,0	0,39	0,28	0,78	0,56	
60,0	0,61	0,69	1,23	1,37	
75,0	0,46	0,49	0,93	0,97	

Horas/ano	8000	8000	4000	4000
Carregamento	1,0	0,5	1,0	0,5
Viáveis	100%	98%	81%	75%
cv				
100,0	0,37	0,62	0,73	1,23
125,0	0,36	0,32	0,71	0,63
150,0	0,38	0,39	0,77	0,78
175,0	0,70	0,52	1,41	1,03
200,0	0,60	0,31	1,21	0,62
250,0	0,59	0,39	1,19	0,78

Fonte: Elaboração própria.

Tabela B-2 - RCB para indústria (Finame) – 6 e 8 pólos

Horas/ano	8000	8000	4000	4000	
Carregamento	1,0	0,5	1,0	0,5	
Viáveis	89%	70%	39%	18%	
cv					
6 pólos	1,0	0,17	0,24	0,35	0,48
	1,5	0,49	0,50	0,99	0,99
	2,0	0,18	0,35	0,35	0,70
	3,0	0,22	0,54	0,44	1,08
	4,0	0,18	0,28	0,37	0,56
	5,0	0,26	0,53	0,53	1,05
	6,0	0,24	0,53	0,48	1,06
	7,5	0,27	0,56	0,55	1,11
	10,0	0,35	0,55	0,70	1,09
	12,5	0,42	0,62	0,83	1,24
	15,0	0,66	0,68	1,32	1,37
	20,0	0,82	1,11	1,64	2,23
	25,0	0,57	0,91	1,13	1,82
	30,0	0,47	1,05	0,94	2,11
	40,0	0,82	1,20	1,65	2,40
	50,0	0,68	0,52	1,35	1,04
	60,0	0,51	0,96	1,02	1,92
	75,0	1,04	1,06	2,07	2,12
	100,0	0,70	0,63	1,41	1,27
	125,0	0,57	0,77	1,14	1,53
150,0	0,79	0,59	1,59	1,17	
175,0	0,83	0,70	1,67	1,41	
200,0	0,77	0,48	1,53	0,96	
8 pólos	1,0	0,30	0,54	0,61	1,09
	1,5	0,37	0,40	0,74	0,81
	2,0	0,45	0,70	0,89	1,39
	3,0	0,24	0,35	0,48	0,70
	4,0	0,19	0,33	0,37	0,66
	5,0	0,49	0,88	0,99	1,76
	6,0	0,57	0,82	1,15	1,64
	7,5	0,52	0,51	1,04	1,02
	10,0	0,77	0,82	1,54	1,64
	12,5	0,57	0,89	1,13	1,79

Horas/ano	8000	8000	4000	4000
Carregamento	1,0	0,5	1,0	0,5
Viáveis	89%	70%	39%	18%
cv				
15,0	0,76	1,09	1,53	2,19
20,0	0,94	0,90	1,89	1,80
25,0	0,77	0,71	1,54	1,41
30,0	1,52	2,52	3,04	5,04
40,0	1,03	2,44	2,05	4,87
50,0	1,13	2,24	2,26	4,48
60,0	1,05	1,80	2,11	3,61
75,0	0,87	2,69	1,74	5,37
100,0	0,77	2,40	1,55	4,80
125,0	0,89	1,74	1,77	3,47
150,0	0,82	1,66	1,64	3,31

Fonte: Elaboração própria.

Tabela B-3 - RCB para indústria (capital próprio) - 2 e 4 pólos

Horas/ano	8000	8000	4000	4000	
Carregamento	1,0	0,5	1,0	0,5	
Viáveis	98%	94%	65%	50%	
cv					
2 pólos	1,0	0,32	0,41	0,64	0,83
	1,5	0,19	0,36	0,38	0,72
	2,0	0,27	0,45	0,55	0,91
	3,0	0,15	0,20	0,30	0,41
	4,0	0,29	0,65	0,58	1,30
	5,0	0,38	0,44	0,76	0,88
	6,0	0,24	0,74	0,48	1,49
	7,5	0,38	1,02	0,75	2,04
	10,0	0,34	0,33	0,68	0,66
	12,5	0,35	0,67	0,71	1,35
	15,0	0,25	0,35	0,50	0,70
	20,0	0,10	0,21	0,21	0,42
	25,0	0,28	0,48	0,57	0,95
	30,0	0,51	2,28	1,02	4,57
	40,0	0,16	0,33	0,31	0,67
	50,0	0,32	0,48	0,64	0,97
	60,0	0,54	0,56	1,08	1,12
	75,0	0,83	0,43	1,66	0,86
	100,0	1,19	0,87	2,38	1,74
	125,0	0,49	0,56	0,98	1,12
	150,0	0,59	0,46	1,18	0,92
	175,0	0,77	0,54	1,54	1,08
	200,0	0,78	0,49	1,55	0,98
	250,0	0,79	0,60	1,58	1,21
	4 pólos	1,0	0,44	0,47	0,87
1,5		0,53	0,45	1,05	0,90
2,0		0,61	1,08	1,21	2,17
3,0		0,48	0,52	0,96	1,05

Horas/ano	8000	8000	4000	4000
Carregamento	1,0	0,5	1,0	0,5
Viáveis	98%	94%	65%	50%
cv				
4,0	0,30	0,53	0,59	1,06
5,0	0,37	0,63	0,74	1,26
6,0	0,20	0,36	0,41	0,71
7,5	0,31	0,68	0,62	1,35
10,0	0,34	0,59	0,67	1,18
12,5	0,28	0,52	0,56	1,03
15,0	0,25	0,49	0,49	0,97
20,0	0,22	0,43	0,44	0,85
25,0	0,44	0,67	0,87	1,33
30,0	0,30	0,49	0,60	0,97
40,0	0,35	0,38	0,70	0,76
50,0	0,52	0,37	1,04	0,75
60,0	0,82	0,91	1,63	1,83
75,0	0,62	0,65	1,24	1,30
100,0	0,49	0,82	0,98	1,64
125,0	0,49	0,43	0,97	0,87
150,0	0,53	0,54	1,05	1,07
175,0	0,96	0,71	1,93	1,42
200,0	0,83	0,42	1,65	0,85
250,0	0,81	0,53	1,63	1,07

Fonte: Elaboração própria.

Tabela B-4 - RCB para indústria (capital próprio) – 6 e 8 pólos

Horas/ano	8000	8000	4000	4000
Carregamento	1,0	0,5	1,0	0,5
Viáveis	59%	52%	27%	11%
cv				
1,0	0,23	0,31	0,45	0,62
1,5	0,64	0,64	1,28	1,28
2,0	0,23	0,46	0,46	0,91
3,0	0,28	0,70	0,57	1,39
4,0	0,24	0,36	0,47	0,72
5,0	0,34	0,68	0,68	1,37
6,0	0,31	0,68	0,63	1,37
7,5	0,36	0,72	0,71	1,44
10,0	0,45	0,71	0,91	1,41
12,5	0,55	0,83	1,11	1,65
15,0	0,88	0,91	1,75	1,82
20,0	1,09	1,48	2,18	2,97
25,0	0,75	1,21	1,51	2,42
30,0	0,63	1,40	1,25	2,81
40,0	1,09	1,60	2,19	3,20
50,0	0,90	0,69	1,80	1,39
60,0	0,68	1,28	1,35	2,56
75,0	1,38	1,41	2,76	2,82
100,0	0,94	0,84	1,87	1,69

6 pólos

Horas/ano	8000	8000	4000	4000
Carregamento	1,0	0,5	1,0	0,5
Viáveis	59%	52%	27%	11%
cv				
	125,0	0,78	1,05	2,10
	150,0	1,09	0,80	1,61
	175,0	1,14	0,96	1,93
	200,0	1,05	0,66	1,32
8 pólos	1,0	0,39	0,70	1,41
	1,5	0,48	0,52	1,04
	2,0	0,58	0,90	1,80
	3,0	0,31	0,46	0,91
	4,0	0,24	0,43	0,86
	5,0	0,64	1,14	2,28
	6,0	0,74	1,06	2,12
	7,5	0,67	0,66	1,32
	10,0	1,00	1,06	2,13
	12,5	0,75	1,19	2,38
	15,0	1,01	1,45	2,91
	20,0	1,26	1,20	2,39
	25,0	1,02	0,94	1,88
	30,0	2,03	3,35	6,71
	40,0	1,37	3,24	6,49
	50,0	1,50	2,98	5,96
	60,0	1,40	2,40	4,80
	75,0	1,16	3,57	7,15
	100,0	1,03	3,20	6,39
	125,0	1,21	2,38	4,76
150,0	1,12	2,27	4,54	

Fonte: Elaboração própria.

Apêndice C O USO DA ELETRÔNICA DE POTÊNCIA PARA ACIONAMENTOS DE MOTORES DE INDUÇÃO

A importância da eletrônica de potência na automação industrial, geração de energia e conservação e, de uma forma indireta, na redução da poluição do meio ambiente, é enorme. Com o avanço da tecnologia no desenvolvimento de semicondutores e uma conseqüente redução do custo, a eletrônica de potência está se expandindo em diversas aplicações como sistemas UPS (*Uninterruptible Power Supplies*), filtros ativos, sistemas HVDC, sistemas foto-voltaicos, acionamento de máquinas com frequência variável entre outras. O acionamento de motores possivelmente se constitui na maior área de atuação da eletrônica de potência, onde estas aplicações incluem periféricos de computadores, bombas e ventiladores, sistema de geração eólica, propulsão de navios entre outras [1].

A melhoria da eficiência no processo de conversão da energia consumida pelos equipamentos eletro-eletrônicos contribui, com o apoio da eletrônica de potência, para a redução do consumo e, de uma forma indireta, reduz a poluição do meio ambiente com a redução nos níveis de geração de energia elétrica. De acordo com [1], é estimado que entre 15% a 20% do consumo de energia elétrica pode ser evitado com o uso extensivo da eletrônica de potência. Nos Estados Unidos, aproximadamente 60% da energia gerada é consumida por motores, onde 75% destes motores são constituídos por bombas e ventiladores [2].

O custo adicional associado à inserção dos conversores eletrônicos para o acionamento dos motores pode ser recuperado com o tempo de utilização dos mesmos, de acordo com a utilização de tarifas menores de consumo de energia elétrica. A idéia básica é a mesma associada à utilização de motores gaiola de alto rendimento alimentados por fontes de tensão convencionais a frequência constante nas situações em que a eficiência aumentada na operação próxima ao ponto nominal resulta na redução das perdas. Esta redução de perdas permite recuperação dos custos com a aquisição de um motor mais caro após um determinado tempo de utilização do mesmo.

Em um contexto diferente, de aumento muito maior na eficiência do acionamento ou na recuperação da eficiência em condições de operação em faixa muito maior de variação de velocidade, o uso de conversores eletrônicos para o acionamento de motores de indução nos processos industriais pode também resultar na recuperação, após determinado período de tempo, dos custos relativamente maiores com a aquisição do

motor e do acionamento associado. Por exemplo, a aplicação da eletrônica de potência ao acionamento de compressores de ar-condicionado pode gerar redução de até 30% no consumo global de energia elétrica. O potencial de redução de consumo é tanto que no Japão 70% dos equipamentos de ar-condicionado usados nas residências usam acionamentos de velocidade variável para economizar energia [2].

Na área de iluminação, por exemplo, é estimado que nos Estados Unidos 20% da energia gerada é consumida nesta forma de utilização de energia. A utilização de lâmpadas fluorescentes de alta frequência, com o apoio da eletrônica de potência, pode acarretar em uma economia de até 20% de energia, se comparado ao consumo das lâmpadas fluorescentes convencionais. No caso dos acionamentos, portanto, os números acima citados para o aumento na eficiência se apresentam em escala bem acima daqueles associados à operação dos motores gaiola de alta eficiência de utilização geral já que estão normalmente associados à necessidade de variação ampla na velocidade da máquina impossível de ser obtida de forma eficiente sem a utilização dos acionamentos eletrônicos.

Os dados acima apresentados mostram um pouco do que o uso da eletrônica de potência em acionamentos de motores pode proporcionar em termos de economia da energia consumida e de melhor uso do equipamento, podendo resultar em aumento de sua vida útil. Os tópicos descritos a seguir permitem discutir e apresentar o impacto sobre a carga acionada associado à utilização de acionamentos de motores de indução baseados na eletrônica de potência.

- a. Evolução dos dispositivos semicondutores de potência e da micro-eletrônica;
- b. Conversores eletrônicos empregados em acionamentos;
- c. Técnicas de controle de motores de indução com acionamentos eletrônicos;
- d. Ganho efetivo com o uso dos controles escalar e vetorial em relação à operação convencional;
- e. Necessidade de normas técnicas;
- f. Tecnologias e tendências futuras.

C.1 Evolução dos dispositivos semicondutores de potência e da micro-eletrônica

Em 1958, a disponibilidade comercial dos tiristores representou o início de uma nova era para o acionamento de máquinas de corrente contínua. A limitação do tiristor

para o acionamento de máquinas de corrente alternada está no fato de ser um semicondutor de controle parcial, ou seja, apenas o seu disparo pode ser controlado. O bloqueio é feito através do comportamento transitório do próprio circuito controlado. Nas décadas de 70 e 80 surgiram os semicondutores de potência com capacidade de disparo e bloqueio, tornando assim viável o uso destas chaves para o acionamento de máquinas de corrente alternada. Adiante segue uma tabela apresentando a evolução dos semicondutores de potência.

Tabela C-1 - Evolução dos semicondutores de potência

1ª geração (1958-1975)	Tiristor
2ª geração (1975-1985)	MOSFET de potência GTO (Gate Turn-Off Thyristor)
3ª geração (1985-...)	IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) SIT (Static Induction Transistor) SITH (Static Induction Thyristor) MCT (Mos Controlled Thyristor)

Fonte: Elaboração própria.

Com relação à perda de energia destes semicondutores, pode-se dizer que se concentra primordialmente nos instantes em que ocorrem as mudanças de estado de condução (*turn-on*) e bloqueio (*turn-off*). Nestes instantes, a tensão e corrente presentes sobre o semicondutor gera uma perda não desprezível, como pode ser observado na Figura C-1. Entende-se aí a importância de dispositivos que apresentem baixas perdas durante a comutação, permitindo que o semicondutor possa operar com uma frequência de chaveamento mais elevada.

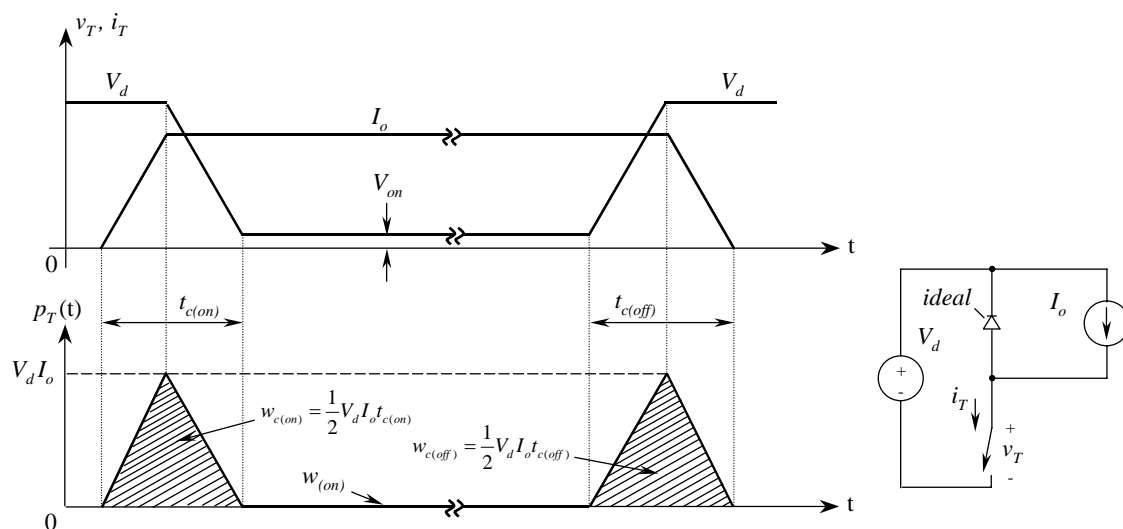


Figura C-1 - Perdas nos semicondutores durante os intervalos de comutação

No final dos anos 90 passou a ser comercializado um novo semiconductor desenvolvido pela ABB, denominado IGCT (*Integrated Gate-Commutated Thyristor*). Além da ABB, outros fabricantes vêm desenvolvendo chaves semicondutoras operando com frequências de chaveamento mais elevadas, suportando tensões e correntes cada vez maiores.

As pesquisas continuam com o objetivo de aprimorar estes dispositivos eletrônicos. De acordo com [3], atualmente deposita-se uma grande expectativa nos semicondutores à base de diamantes e acredita-se que esta será uma nova geração de semicondutores de potência.

Em paralelo ao avanço dos dispositivos semicondutores, nestas últimas décadas houve também grandes progressos na área da micro-eletrônica. Como exemplos desta evolução, temos a presença cada vez maior de micro-computadores tanto nas indústrias como nas residências, equipamentos eletro-eletrônicos mais sofisticados e assim por diante.

No acionamento de máquinas, a disponibilidade de micro-computadores, DSP's (*Digital Signal Processor*), uso de cabos óticos, entre outros fatores, vem permitindo a aplicação de técnicas de controle mais sofisticadas (controle vetorial, controle *fuzzy*, redes neurais, controle sem sensores). O uso de micro-computadores permitiu um grande salto no projeto de sistemas de controle, com o apoio de programas de simulação, e no projeto de máquinas elétricas, com o uso de programas para cálculo de campos eletromagnéticos por elementos finitos.

Atualmente, são pesquisados dispositivos que combinam a micro-eletrônica com a eletrônica de potência gerando os chamados “smart power devices”, que se pode traduzir como “módulos inteligentes de potência” [3]. Conhecimentos tecnológicos para apoio ao desenvolvimento de dispositivos eficientes e confiáveis já estão disponíveis [3]. A micro-eletrônica pode colaborar e muito na evolução destes módulos fornecendo componentes ASIC (*Application Specific Integrated Circuits*). Isto irá aumentar a confiabilidade bem como diminuir os problemas de compatibilidade eletromagnética (EMC) encontrados na eletrônica de potência.

C.2 Conversores eletrônicos empregados em acionamentos

Um conversor consiste basicamente em um conjunto de semicondutores de potência que opera para transformar a tensão na entrada em uma tensão controlada. Historicamente a evolução dos conversores acompanha a dos semicondutores de potência [1].

A era moderna dos acionamentos de frequência variável surgiu com a introdução dos inversores de comutação forçada a tiristores, como os inversores McMurray, McMurray-Bedford, Verhoef, entre outros. Com exceção dos inversores do tipo load commutated ou line commutated, os inversores de comutação forçada a tiristores vem gradualmente se tornando obsoletos devido à baixa eficiência e confiabilidade.

Uma topologia comum de acionamento CA encontrado no mercado pode ser vista na Figura C-2. Este acionamento consiste no uso de dois conversores conectados ao mesmo elo de tensão CC, cuja configuração é conhecida como *back-to-back*. O conversor conectado entre a linha CA e o elo de tensão CC é denominado retificador, enquanto que o conversor conectado entre o elo de tensão CC e o motor de indução é conhecido como inversor.

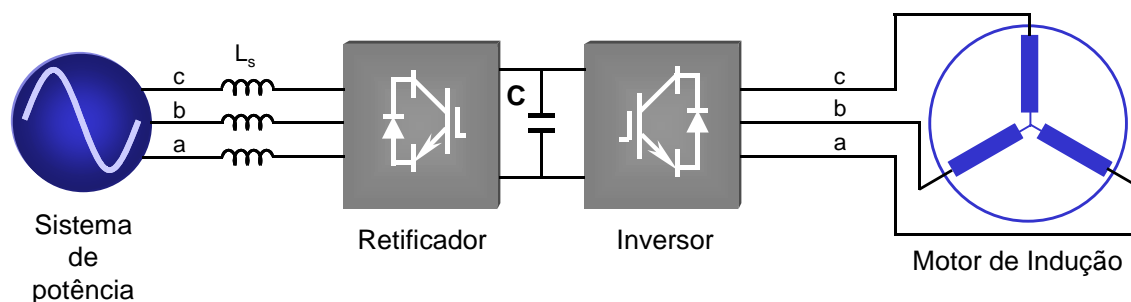


Figura C-2 - Acionamento eletrônico composto por dois conversores conectados em Back-to-Back

A Figura C-3, apresenta um acionamento eletrônico composto por dois conversores conectados em “*Back-to-Back*”, onde o retificador é composto por tiristores e o inversor por IGBT’s. Esta configuração permite um acionamento com controle reversível e “regenerativo” em uma faixa ampla de velocidade, incluindo velocidade zero e região de enfraquecimento de campo. A proteção deste equipamento contra sobrecorrentes é feita no seu próprio drive de controle.

Um dos problemas associados à utilização de retificadores a diodo ou a tiristores está no fato destes injetarem no sistema CA correntes com elevado conteúdo harmônico, poluindo o sistema de energia elétrica e resultando em fator de potência indesejável.

A alternativa para superar estas desvantagens consiste no uso de acionamentos onde ambos os conversores são compostos por IGBT's, conforme mostra a Figura C-4. Apesar do uso de IGBT's representar um custo adicional, com esta topologia é possível operar o retificador de tal forma que a corrente na rede CA apresente forma de onda praticamente senoidal e em fase com as tensões do sistema, evitando assim a deterioração do fator de potência além da injeção de harmônicos no sistema.

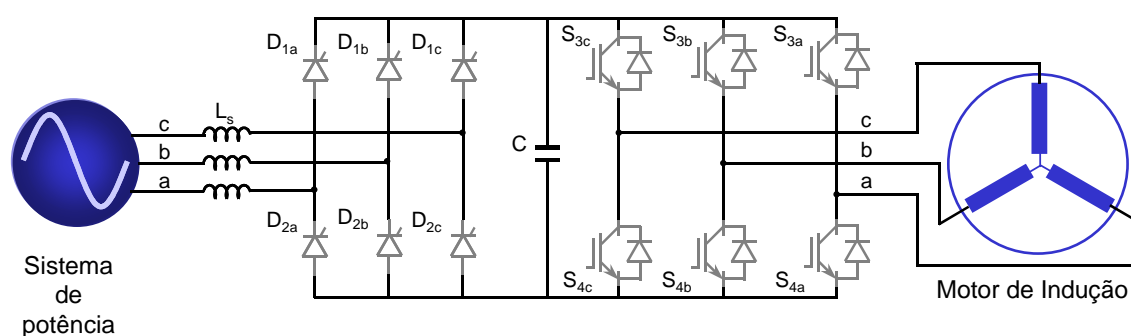


Figura C-3 - Acionamento composto por um retificador a tiristores e um inversor por IGBT's

A alta controlabilidade do conversor a IGBT permite atuação rápida sobre a amplitude e sobre o ângulo de fase da componente fundamental da tensão CA, conferindo grande capacidade a este tipo de conversor para controle do fator de potência visto pela rede CA associada.

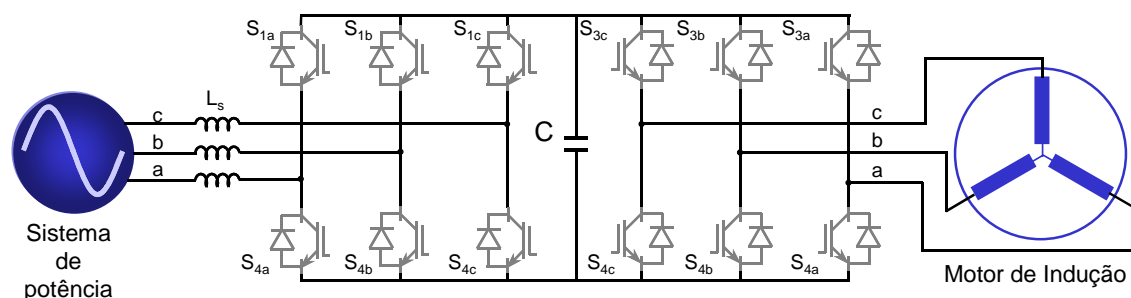


Figura C-4 - Acionamento composto por conversores com semicondutores do tipo IGBT

Nos dias de hoje, conversores com topologia multinível [4] vêm sendo cada vez mais usados para acionamentos de motores. A Figura C-5 apresenta um conversor de três níveis NPC (*Neutral-Point Clamped*). Na literatura podem ser encontradas diversas topologias do tipo multinível, para diferentes aplicações [5] [6] [7]. A adoção da

alimentação multinível permite uma melhor controlabilidade do conversor, resultando em possibilidade de fixação de uma menor frequência de chaveamento para sintetizar o sinal desejado e de operação em faixas de potência mais altas, se comparado com a faixa de potência em que o conversor de dois níveis opera.

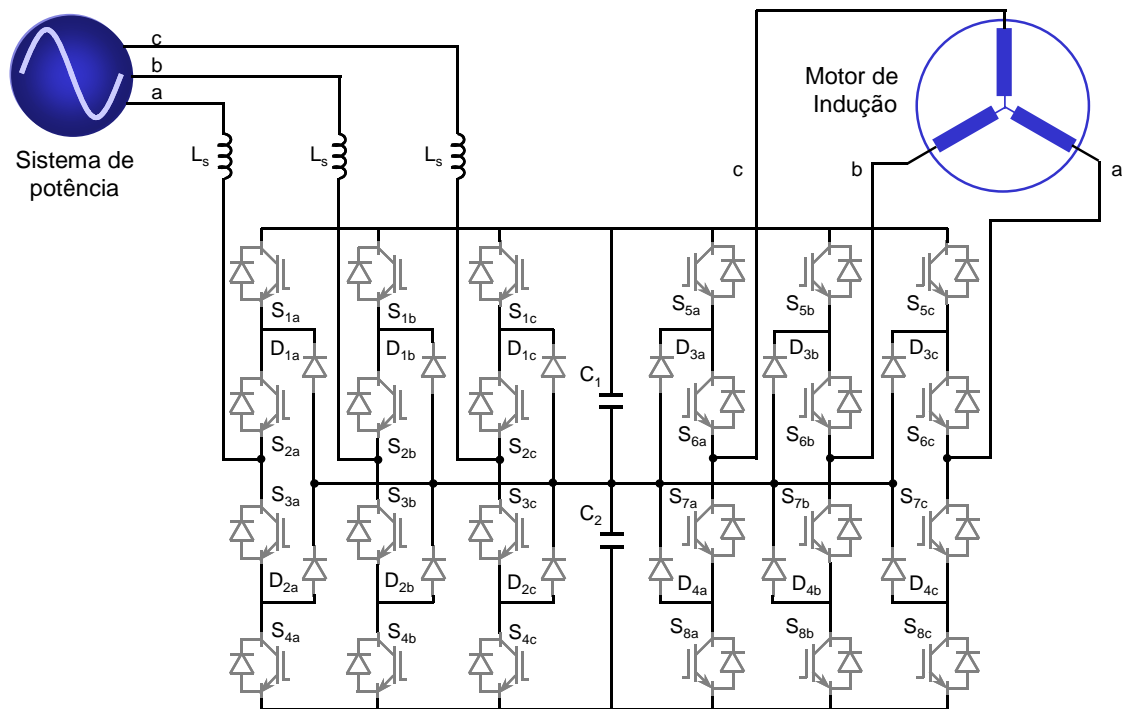


Figura C-5 - Acionamento composto por conversores de topologia multinível

Uma configuração antiga, porém ainda muito utilizada pode ser observada na Figura C-6. Esta configuração apresenta o retificador constituído por diodos, o que resulta em tensão de saída não controlada. Para permitir, entretanto, que a tensão de alimentação do inversor seja do tipo controlada pode ser empregado um conversor CC - CC, conhecido também como chopper. Os conversores *chopper* têm a capacidade de, a partir da tensão CC obtida na saída do retificador, modular a tensão CC entregue ao inversor para que este opere de forma mais adequada. Outros detalhes envolvendo estes conversores podem ser observados na literatura [8].

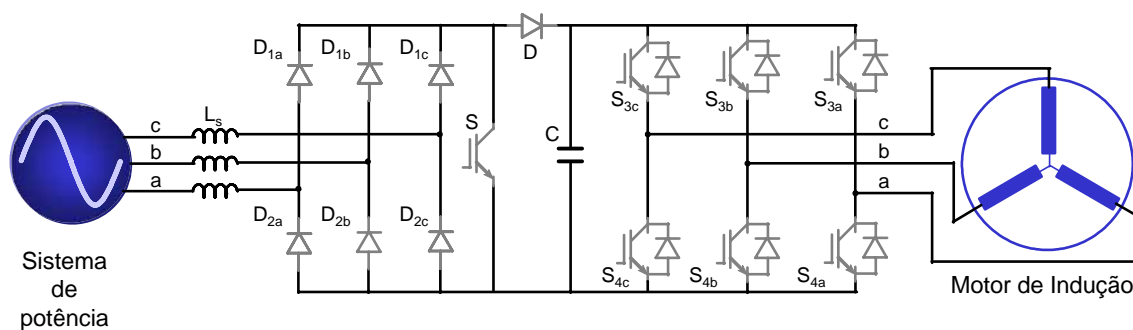


Figura C-6 - Uso do conversor *chopper* com o retificador não controlado

C.3 Técnicas de controle de motores de indução com acionamentos eletrônicos

Basicamente, os conversores para o acionamento de motores CA surgiram com o desenvolvimento dos condutores da chamada 2^a geração. A partir daí, os motores CA, que eram vistos como de difícil controle, passaram a ser usados em acionamentos com ampla variação de velocidade, ocupando o espaço dos motores CC [3]. A variação coordenada da tensão (u) e da frequência (f) de alimentação do motor permite hoje o controle de velocidade sem perda da capacidade de conjugado (T). A Figura C-7 apresenta as curvas ($T \times \omega$) características de um motor de indução (MI), com a possibilidade adicional da variação da frequência e da tensão de alimentação.

Os primeiros conversores de frequência operavam com controle ESCALAR (ou V/f) e chaveamento PWM. A tecnologia do modo de controle de velocidade escalar se baseia na utilização das variáveis de controle tensão [V] e frequência [f].

No modo de controle escalar (também conhecido por V/f) são utilizadas como variáveis a tensão e a frequência, as quais são aplicadas diretamente ao enrolamento polifásico do estator do motor de indução de forma a manter uma relação V/f constante.

Esta relação V/f , ou seja, tensão por frequência, é fornecida de forma proporcional, sendo estas grandezas limitadas até a frequência de inflexão (frequência da rede) e a tensão de alimentação do conversor (também tensão da rede).

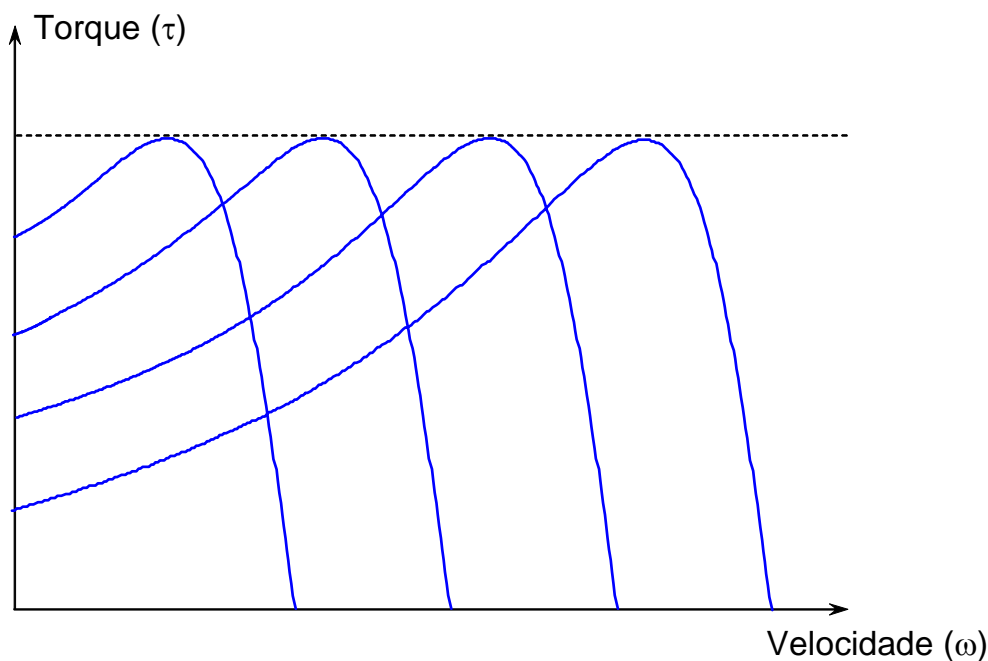


Figura C-7 - Curvas ($T \times \omega$) dos MI mantendo a relação entre tensão e frequência de alimentação constante

Acima da frequência de inflexão (60 Hz no Brasil), os conversores de frequência têm a capacidade de elevar a frequência de saída, porém a limitação fica por conta da tensão (limitada à tensão da rede).

Outra característica restritiva do controle escalar é que ele se baseia simplesmente na operação no motor de indução em regime permanente. Assim, para aplicações de alto desempenho dinâmico, como em robótica, o motor de indução não apresentará comportamento otimizado quando operando sob este modo de controle.

As chamadas técnicas de “controle vetorial” de motores vieram a preencher esta deficiência apresentada pelo controle escalar em termos de desempenho dinâmico. Esta técnica passou do meio acadêmico para a indústria em menos de 20 anos. Acionamentos para motores de indução empregando o controle vetorial são oferecidos hoje por diversos fabricantes.

De acordo com [3], uma das grandes dificuldades do uso do controle vetorial consiste no fato de estar baseado no referencial do fluxo enlaçado pelo rotor. Esta determinação exige, pelo menos, as informações da velocidade e de alguns parâmetros da máquina, alguns dos quais variam com a saturação e temperatura. Para superar este problema, a micro-eletrônica tem auxiliado na implementação de métodos de

identificação e processamento de sinais que eliminam a necessidade do uso de sensores de velocidade.

C.4 Ganho efetivo com o uso dos controles escalar e vetorial em relação à operação convencional

A operação da máquina de corrente contínua com seu fluxo magnético produzido pelo enrolamento de armadura agindo ortogonalmente em relação ao fluxo de campo em razão da orientação dada pelo anel comutador e posicionamento ideal das escovas é tida como condição de referência para a operação da máquina de indução operando com campo vetorial orientado. É uma condição que minimiza as correntes nos enrolamentos para uma determinação amplitude do conjugado eletromagnético ou que maximiza o conjugado produzido para determinados valores de corrente de campo e de armadura.

Enquanto a utilização de motores de indução de eficiência aumentada está vinculada apenas à minimização das perdas magnéticas e mecânicas obtida por projeto e à redução das perdas ôhmicas advinda da utilização de condutores de cobre de maiores bitolas, a adoção do controle escalar e do controle vetorial representam, respectivamente, passos à frente, intermediário e final, na busca de maior eficiência no processo de conversão eletromecânica de energia, ambos os passos dados em um contexto de necessidade de operação com variação ampla na velocidade de operação dos acionamentos.

Com o controle escalar ficam garantidos tanto a produção de conjugado em determinado nível máximo quanto a operação com redução sensível nas perdas cobre rotóricas, redução impossível de ser obtida no contexto de necessidade de variação ampla na velocidade. Este impacto sobre a manutenção da eficiência da máquina associado à adoção do controle escalar não poderia ser obtido mesmo com a utilização pura e simples dos motores de alto rendimento.

Com a adoção do controle vetorial, por sua vez, pode ser obtido ainda um maior impacto sobre a eficiência do processo de conversão de energia, aproximando-se o desempenho da máquina de indução daquele normalmente apresentado pelos motores de corrente contínua, tanto no que diz respeito à produção do conjugado eletromagnético com minimização das perdas rotóricas e estáticas quanto na operação em faixa ampla de variação de velocidade. Esta eficiência aumentada e a redução no consumo de energia associadas à operação do acionamento no modo de controle vetorial permite

compensar, em determinado período de tempo, pelo custo adicional do acionamento e controle.

C.5 Necessidade de Normas Técnicas

As normas técnicas devem ter como objetivo estabelecer documentação onde se descreva a experiência acumulada ao longo dos anos de operação de determinado equipamento, e com emprego de uma dada tecnologia. Esta documentação tem por objetivo balizar de forma mais adequada tanto a utilização apropriada quanto os futuros projetos do equipamento referido [9].

Enquanto as normas orientativas para definição da eficiência operativa dos motores de indução convencionais e de eficiência aumentada já foram referidas em outras seções do presente relatório, neste item o objetivo é discutir a possibilidade e propriedade de definição de normas para operação dos motores de indução com conversores de frequência na função de fonte de alimentação.

Pode ser dito, portanto, com relação ao estabelecimento de normas técnicas para operação dos motores de indução no contexto dos acionamentos eletrônicos, que se trata de assunto que embora não muito novo ainda apresenta uma relativa falta de compreensão com respeito ao desempenho e dificuldades operativas. O estabelecimento final de normas técnicas para operação dos acionamentos com controle de campo orientado parece um pouco distante. Alguns dos problemas estão associados à injeção de harmônicos gerada pela grande maioria dos conversores existentes na indústria e, ainda, às variação rápida de tensão inerentes às formas de onda produzidas. As normas IEEE 519-1992 e IEC 555-3 já abordaram o problema da presença de harmônicos nos sistemas elétricos, restando então uma norma brasileira que faça esta regulamentação no contexto dos acionamentos eletrônicos.

Contudo, há aspectos ainda não tratados. Por exemplo, para efetuar medições os tradicionais instrumentos de ferro móvel e eletrodinâmicos muitas vezes não são adequados [10]. Uma outra questão diz respeito à dificuldade para derivação expedita de modelos visando representação do motor neste contexto de variação ampla de velocidade e de frequência e à fixação de ensaios apropriados para obtenção dos parâmetros destes modelos. Por outro lado, no Brasil já existem algumas normas para dispositivos semicondutores e para acionamento eletrônico de máquina CC [e.g. EB-1405, EB-1125, EB-1727, EB-1733, EB-1313].

Em relação aos inversores eletrônicos para o acionamento de máquinas CA ainda não há normas em vigência. De acordo com [3], a norma EB-2077, baseada na IEC 146-2, poderia ser tomada como ponto de partida. Para isto, uma ampla discussão entre fabricantes, usuários, grupos de pesquisa e órgãos do governo precisa ser realizada com o objetivo de elaborar um documento que estabeleça parâmetros para o projeto e fabricação de acionamentos para máquinas CA de forma a minimizar os impactos sobre o sistema elétrico de alimentação. Naturalmente que o trabalho de modelagem e derivação de parâmetros para apoio a estas normas deverá ser bastante complexo no contexto dos acionamentos de máquinas CA. As aplicações mais difundidas poderiam ser usadas como ponto de partida, já que sobre elas deve existir experiência acumulada relevante em todos os aspectos de importância, dos pontos de vista do fabricante e dos consumidores.

C.6 Tecnologias e tendências futuras

A engenharia moderna prima pelo desenvolvimento de equipamentos cada vez mais robustos, versáteis e menos agressivos ao meio ambiente. A eletrônica de potência vêm por contribuir e muito nessa nova tendência, apresentando requisitos necessários para enfrentar este desafio. As aplicações de acionamentos de velocidade variável para a conservação de energia são várias. Os campos de aplicação vão do uso de equipamentos eletro/eletrônicos presentes tanto nas indústrias como nas residências, às aplicações no setor de transportes, comercial e de sistemas de potência.

Novos dispositivos com capacidade de comando para condução e bloqueio, em conjunto com topologias do tipo multinível, possivelmente substituirão os conversores que empregam tiristores para potências de 10 MW ou superiores.

Métodos de identificação de parâmetros, auto-comissionamento, eliminação de sensores de posição e velocidade, controle adaptativo e controle *fuzzy* já estão disponíveis comercialmente.

Com o avanço cada vez maior na área dos conversores eletrônicos, em conjunto com a micro-eletrônica, uma melhor integração do processamento de sinais com a eletrônica de potência deverá ocorrer. Isto irá contribuir para uma redução ainda maior do volume e provavelmente dos preços dos conversores estáticos.

O uso de cabos de fibra-óptica permite uma maior confiabilidade do controle do conversor sem o problema de possíveis interferências devido a medições de grandezas elétricas.

Referências

- [1] Bose, B. K., “Power Electronic and Motor Drives – Recent Technology Advances,” Proceedings of the ISIE 2002, International Symposium on Industrial Electronics, vol. 1, July 2002, pp. 22-25.
- [2] Bose, B. K., “Energy, Environment, and Advances in Power Electronics,” IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 15, NO. 4, July 2000, pp. 688-701.
- [3] Stephan, R. M., Hanitsch, R., “Acionamento Eletrônico de Motores Elétricos: História e Tendências,” IV ENIE – Encontro Nacional de Instalações Elétricas, São Paulo, Outubro / Novembro 1995.
- [4] McGrath, B. P., Holmes, D. G., Lipo, T. A., “Optimized Space Vector Switching for Multilevel Inverters,” IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 18, NO. 6, November 2003, pp. 1293-1301.
- [5] Lin, B. R., Chien, Y. P., Lu, H. H., “Multilevel Inverter with Connection of H-Bridge Cells,” PEDS’99 International Conference on Power Electronics and System Drives, July 1999, pp. 859-864.
- [6] Tolbert, L. M., Habetler, T. G., “Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method,” IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 35, NO. 5, September/October 1999, pp. 1098-1107.
- [7] Loh, P. C., Holmes, D. G., Fukuta, Y., Lipo, T. A., “Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method,” IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 35, NO. 5, September/October 1999, pp. 1098-1107.
- [8] Mohan, N., “Power Electronics-Converters, Applications and Design,” Second Edition, John Wiley & Sons, 1995.
- [9] Hayes, R. L., Messec, F. L., “Codes, Standarts and Recommended Practices for Electrical Systems,” IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 30, NO. 6, 1994, pp. 1506-1513.
- [10] Cavalcante, F., Americo, M., Mello, A., A.G.G., Stephan, R. M., “Measurements in Power Electronics PWM-Inverters,” COBEP-95 – Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência-1995, São Paulo, Brasil.

Apêndice D MOTORES DE RENDIMENTO OTIMIZADO

Das cargas observadas no sistema elétrico, os motores provavelmente são as mais encontradas, variando de motores de baixa potência encontrados nos equipamentos eletrodomésticos presentes nas residências a motores de alta potência presentes nos acionamentos de bombas e ventiladores nas indústrias. Os motores consomem mais da metade de toda a energia gerada, sendo que dois terços desta carga está presente na indústria [1]. Assim há um vasto potencial para aumento da eficiência dos motores, proporcionando um menor consumo de energia com custo reduzido.

Os motores de indução são os que aparecem em maior número no sistema elétrico, devido ao custo reduzido, confiabilidade e eficiência. Motores síncronos são empregados em aplicações onde é preciso ter velocidade constante, elevada eficiência de operação e fator de potência controlável. Os últimos dois fatores são particularmente importantes para motores de potência acima de 1000 HP. Motores CC são usados por algumas indústrias em aplicações de tração elétrica.

Após a segunda guerra mundial até o início dos anos 70, havia uma tendência em projetar motores ineficientes com minimização do uso de materiais tais como alumínio, cobre e aço silício. Estes motores apresentavam um menor custo para aquisição. Em contrapartida geravam custos elevados em operação, devido às suas perdas.

A partir do momento em que o custo da eletricidade aumentou de forma considerável (em meados dos anos 70), a maioria dos construtores de motores aderiram em suas linhas de venda os motores de rendimento otimizado (*EEM – Energy Efficient Motor*). Estes motores apresentavam um projeto otimizado, com circuitos elétricos e magnéticos usando materiais de alta qualidade. Melhoria na eficiência pode se obtida com o uso de materiais especiais como, por exemplo, o aço silício amorfo. A otimização do projeto pode ser feita com base nas tecnologias desenvolvidas com a ajuda de computadores. Os motores de rendimento otimizado oferecem uma melhora na eficiência que tipicamente varia de 6%, para motores de 5 HP, a 3% em motores de 150 HP [1].

Os motores EEM apresentam em relação aos motores convencionais (Standard) um custo superior de 15-25%, o que pode ser traduzido em um custo adicional de 8\$-12HP. Em novas aplicações, e para motores com tempo de operação elevado, o retorno do investimento feito leva, aproximadamente, dois anos [1].

Em [2] é feita uma comparação entre dois tipos de motores, sendo um convencional e o outro de rendimento otimizado, a partir de uma série de parâmetros. Com o objetivo de realizar uma comparação acurada, os motores foram submetidos a testes com condições similares de operação.

As Tabela D-1 e Tabela D-2 apresentam uma comparação entre os projetos e critérios de desempenho dos motores convencional e o de rendimento otimizado. As diferenças dos projetos elétricos estão descritas da uma forma generalizada na Tabela D-1. A Tabela D-2 apresenta diferenças no projeto mecânico dos motores referidos.

Tabela D-1 - Projeto Elétrico do Motor Convencional e de Rendimento Otimizado

PART \ TYPE	STANDARD	ENERGY EFFICIENT
Electrical Steel	2.5 – 3.0 Watts/Lb.	1.5 – 2.0 Watts/Lb.
Lam. Thickness Range	.0185” - .035”	.0185” - .025”
Slot Comb. Of Rtr & Str	SAME	
Stator Slot	Small	Large
Rotor Slot	Single or Double Cage	
Rotor Skew	Range from 0 to 1 slot	
Air Gap	Normal	Same or Slightly Larger
Rotor Construction	Die Cast	Die Cast
Winding	Machine or Hand Wound	

Tabela D-2 - Projeto Mecânico do Motor Convencional e de Rendimento Otimizado

PART \ TYPE	STANDARD	ENERGY EFFICIENT
Frame	SAME	
Brackets	SAME	
Fan Cover	SAME	
Fans	May be Different	

Shaft Seals	Optional	IP 54 or IP 55
Outlet Box	SAME	
Bearing	Usually the Same	
Lubrificant	Usually the Same	
Shaft	SAME	
Bearing Caps	Optional	Required

Mais a frente são apresentados gráficos de onde podem ser extraídas informações sobre a operação dos motores convencional e de rendimento otimizado, em relação aos parâmetros estabelecidos em [2] e descritos ao longo do texto. Devido a uma forte interligação entre os parâmetros que serão mencionados, será interessante observar que é praticamente impossível para o projetista desenvolver um motor que atenda a todas estas condições ao mesmo tempo. Em algumas situações, estes parâmetros se conflitam, forçando o projetista priorizar algumas destas características.

Assim, o estudo feito em [2] foi direcionado com o objetivo de otimizar a eficiência sobre alguns dos parâmetros mencionados, mantendo os demais em limites aceitáveis. Em seguida podem ser observados os gráficos ilustrando o desempenho dos motores testados de acordo com os parâmetros usados.

As Figura D-1 e Figura D-2 apresentam comparações entre os motores no que diz respeito aos aspectos de eficiência e fator de potência. As características envolvendo eficiência e fator de potência são clássicas para os motores de rendimento otimizado [2]. A partir de informações sobre uma determinada quantidade de materiais (aço, cobre e alumínio) utilizados em determinado projeto, pode-se proceder à otimização visando, por exemplo, a maximização da eficiência e do fator de potência do motor.

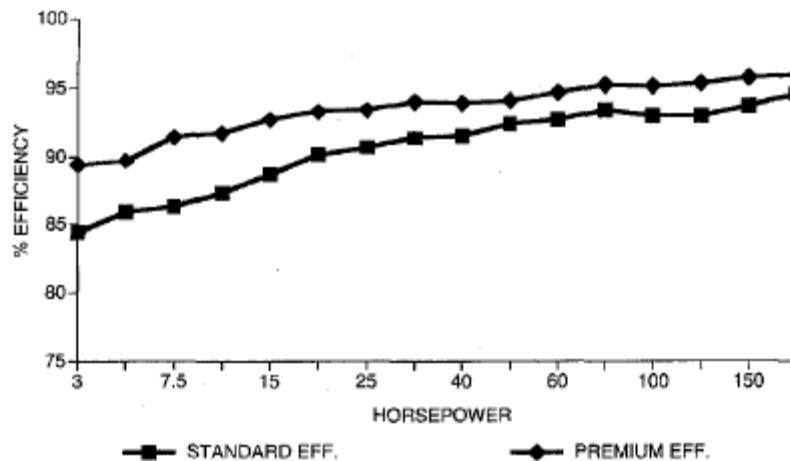


Figura D-1 - Eficiência dos motores submetidos em condições similares

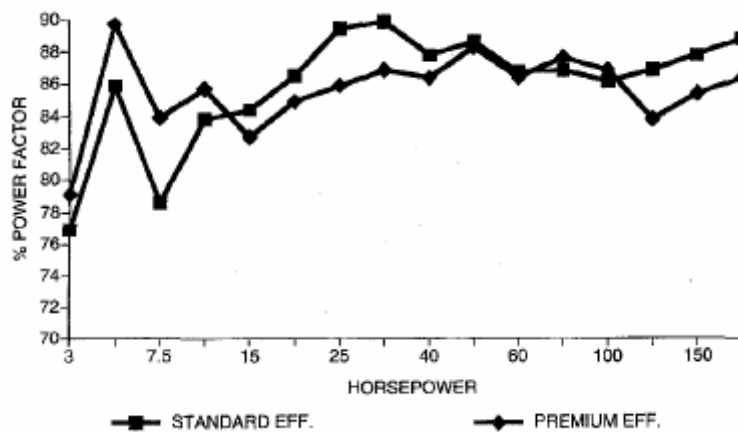


Figura D-2 - Fator de Potência dos motores

Uma comparação direta envolvendo a expectativa de vida útil da máquina com a temperatura é apresentada na Figura D-3. Estes valores foram derivados a partir do fato que a vida útil do isolamento dos enrolamentos é dobrada para cada redução de 10°C na temperatura média de operação.

A Figura D-4 apresenta informações sobre a temperatura média dos enrolamentos dos motores em operação. Como era esperado, devido às modificações mecânicas realizadas nos motores de rendimento otimizado, estes operam com temperaturas mais baixas, para potências menores do que 50 HP. Em motores com potência acima de 50 HP, esta diferença de temperatura reduz consideravelmente, sendo, praticamente, inexistente para motores com potência acima do 100 HP.

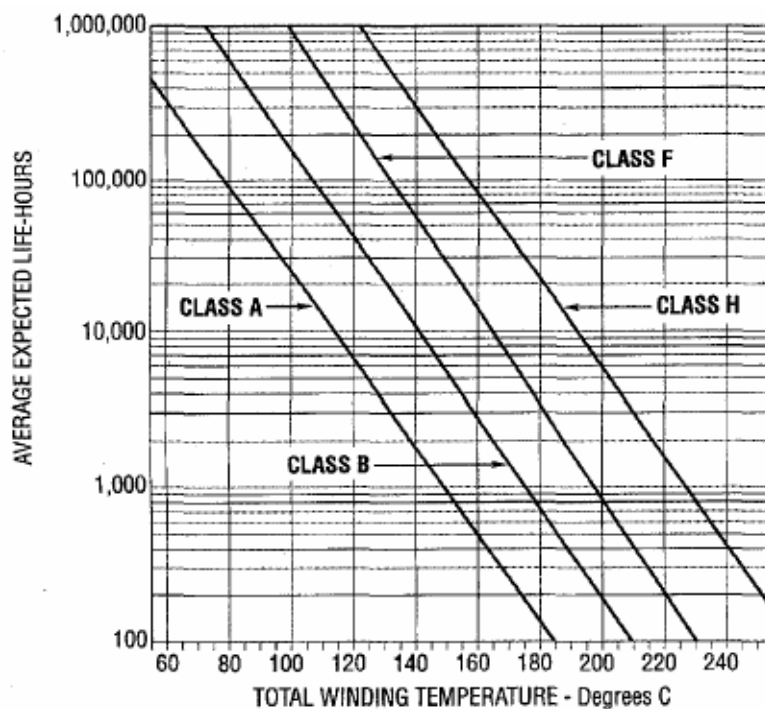


Figura D-3 - Gráfico relacionando temperatura e expectativa de vida útil da máquina em serviço

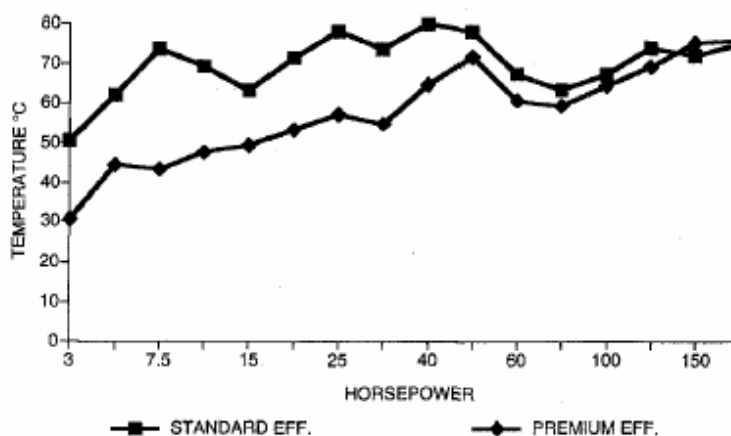


Figura D-4 - Temperatura média dos enrolamentos dos motores em operação

A Figura D-5 ilustra o conjugado de partida dos motores convencional e de rendimento otimizado. Como pode ser observado, o conjugado para os motores em questão não varia de forma significativa. A Figura D-6 indica a rotação à plena carga dos motores em estudo. Os motores com rendimento otimizado e de baixa potência (1-30 HP) apresentam alta rotação ou baixo escorregamento. Estes baixos níveis de escorregamento, com conseqüente redução das perdas do rotor e temperatura (Figura D-7), proporcionam um aumento da vida útil do rotor e dos mancais.

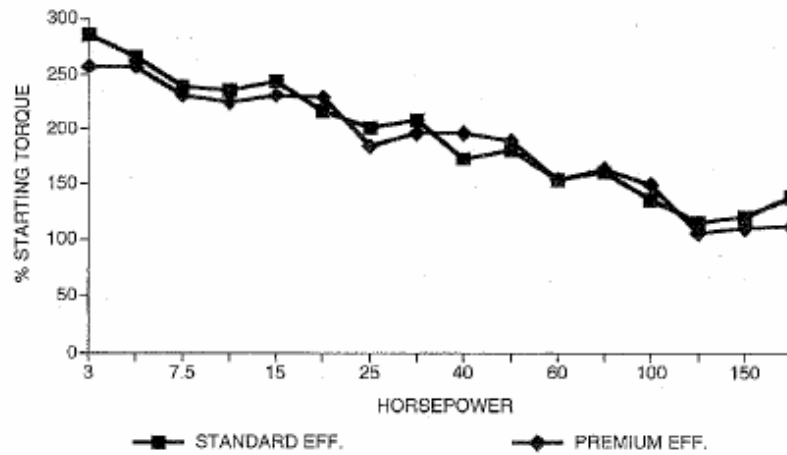


Figura D-5 - Torque de partida dos motores

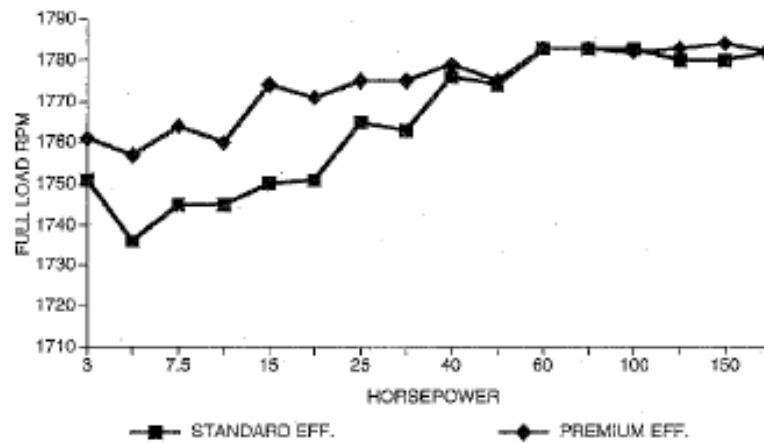


Figura D-6 - Rotação (rpm) em plena carga dos motores

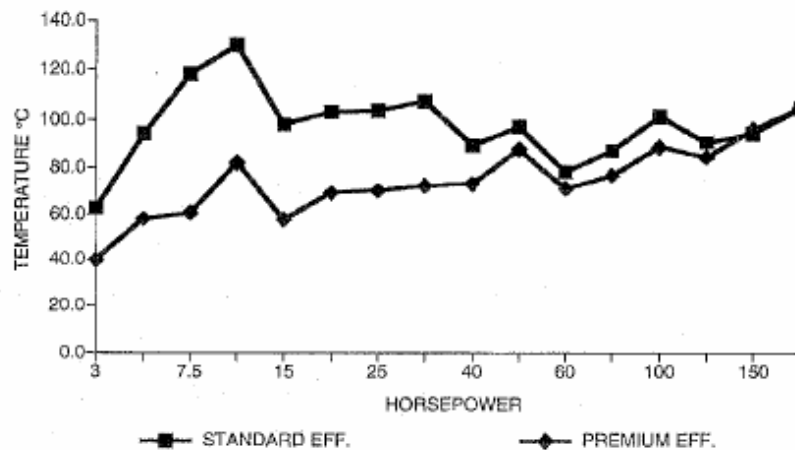


Figura D-7 - Temperatura máxima do rotor

A Figura D-8 apresenta uma comparação do entreferro usado nos motores em estudo. Como pode ser observado, o entreferro normalmente não costuma ser reduzido

nos projetos para os motores de rendimento otimizado. A redução do entreferro pode ser feita, entretanto, quando o objetivo for realizar aumento adicional do fator de potência.

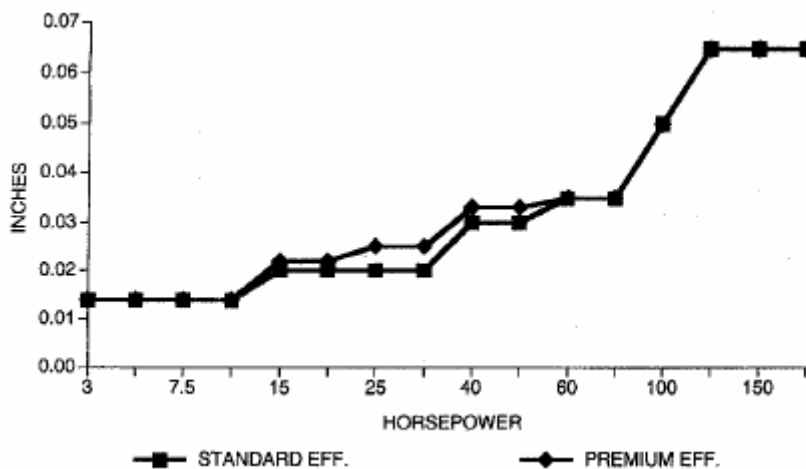


Figura D-8 - Comparação do entre – ferro dos motores

A Figura D-9 apresenta a relação X/R entre os motores convencional e de rendimento otimizado. Como pode ser observado, não há uma diferença significativa para motores com potência até 100 HP. A relação X/R é basicamente controlada pelo projeto eletro-magnético do motor.

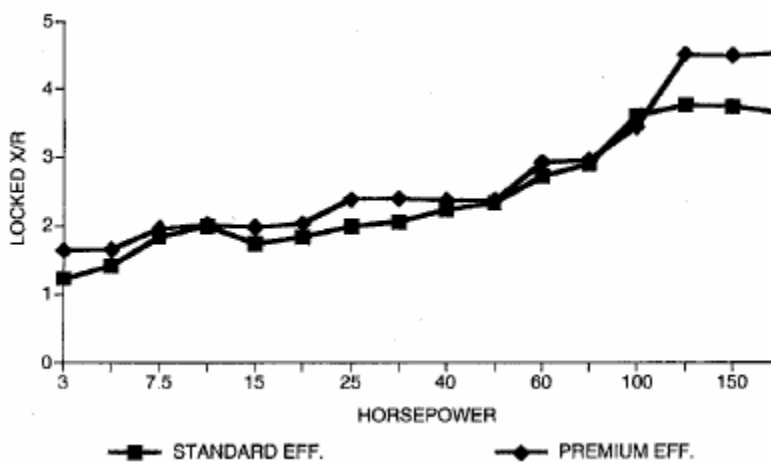


Figura D-9 - Comparação da relação X/R entre os motores

Um outro aspecto que deve ser considerado é o ganho efetivo em se usar motores de rendimento otimizado [3]. Considerando que 30% da energia consumida pelos sistemas de energia elétrica correspondem à utilização de motores de indução em baixa tensão, torna-se necessário um estudo para determinar o ganho efetivo global que pode ser obtido com o uso de motores de rendimento otimizado.

Três tipos de aplicações de motores são apresentados nas Tabela D-3 e Tabela D-4, cada qual apresentando um motor convencional e um motor de rendimento otimizado. Os motores são do tipo TEFC (Totally Enclosed Fan-Cooled), com tensão de 460 V operando em uma temperatura de 40°C.

Como pode ser observado na Tabela D-3, a carga mecânica acionada pelo motor é um fator importante pois afeta diretamente sua eficiência e seu fator de potência. De acordo com esta tabela, os motores operam com eficiência máxima com 75% da carga nominal. Já o fator de potência é máximo quando considerando a operação com 100% da carga nominal. O fator de potência deve ser controlado para reduzir as perdas no sistema de distribuição, evitando também que as empresas sejam penalizadas pelas empresas responsáveis pela distribuição da energia elétrica.

O carregamento e os ciclos de trabalho apresentados na Tabela D-4 são, tipicamente, de operações em indústrias de cimento e argamassa. Os motores em questão foram submetidos a duas condições de operação. Na primeira operaram 8 hr por dia, cinco dias por semana, resultando em um total de 2000 hr. Na segunda foram 24 horas por dia, sete dias por semana, com um período equivalente a 8000 hr. Em todos estes exemplos, a importância da diferença de custo inicial do motor de rendimento otimizado em relação ao motor convencional pode ser minimizada quando considerando o custo total de operação ao longo de determinado período de vida útil do motor.

Devido a energia perdida pelo motor, transformada em calor, os motores menos eficientes tendem a operar em temperaturas mais elevadas, diminuindo assim a sua vida útil, com elevação de custo. Assim um investimento inicial, na manutenção do motor, pode fazer com que o custo final seja reduzido, além de melhorar o desempenho do motor.

Tabela D-3 - Motores Estudados

Motor	Eficiência	HP	Eficiência 50% da carga	Eficiência 75% da carga	Eficiência 100% da carga	Fator de Potência 50% da carga	Fator de Potência 75% da carga	Fator de Potência 100% da carga
I	Convencional	5	87,5%	87,7%	87,5%	70,9%	80,6%	85,9%
I	Rendimento otimizado	5	89,5%	89,7%	89,5%	67%	78%	84%
II	Convencional	25	92,3%	92,6%	92,4%	74,3%	80%	83,8%
II	Rendimento otimizado	25	93,6%	93,8%	93,6%	76%	83%	86%
III	Convencional	100	94,4%	94,7%	94,5%	80,8%	85,3%	85,8%

Motor	Eficiência	HP	Eficiência 50% da carga	Eficiência 75% da carga	Eficiência 100% da carga	Fator de Potência 50% da carga	Fator de Potência 75% da carga	Fator de Potência 100% da carga
III	Rendimento otimizado	100	95,4%	95,7%	95,4%	81%	86%	87%

Tabela D-4 - Custo dos motores

Motor	Eficiência	HP	Tensão	Velocidade (rpm)	% Carga	Horas-ano	Custo Inicial (US\$)	Custo Total (US\$)
I	Convencional	5	460/3ph/60	1.800	75	2.000	388	5.715
I	Rendimento otimizado	5	460/3ph/60	1.800	75	2.000	428	5.484
I	Convencional	5	460/3ph/60	1.800	75	8.000	388	11.943
I	Rendimento otimizado	5	460/3ph/60	1.800	75	8.000	428	11.571
II	Rendimento otimizado	25	460/3ph/60	1.800	75	2.000	1.659	20.704
II	Convencional	25	460/3ph/60	1.800	75	8.000	1.614	50.771
II	Rendimento otimizado	25	460/3ph/60	1.800	75	8.000	1.659	49.795
III	Convencional	100	460/3ph/60	1.800	75	2.000	6.697	74.219
III	Rendimento otimizado	100	460/3ph/60	1.800	75	2.000	7.751	73.764
III	Convencional	100	460/3ph/60	1.800	75	8.000	6.697	189.463
III	Rendimento otimizado	100	460/3ph/60	1.800	75	8.000	7.751	187.791

Neste texto focalizamos algumas características relacionadas aos motores de rendimento otimizado, suas vantagens e os custos associados à sua utilização. Em paralelo, vem sendo desenvolvidas tecnologias emergentes de motores, como por exemplo o motor de relutância com comutação eletrônica, entre outros. É importante comentar que estes motores com novas tecnologias apresentam acionamento com base em conversores eletrônicos. Desse modo, pode-se observar a importância da eletrônica de potência, permitindo o desenvolvimento de novos motores com maior eficiência e viabilizando sua utilização em determinadas aplicações especiais. Nos apêndices deste trabalho, são apresentados alguns dos benefícios proporcionados pela eletrônica de potência no acionamento de motores de indução.

Referências

- [1] Aníbal T. Almeida; Steve Greenberg; Carl Blumstein, “Demand-Side Management Opportunities Through the use of Energy-Efficient Motor Systems,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 5, Nº 3, August 1990.

- [2] Austin H. Bonnett, "Reliability Comparison Between Standard and Energy Efficient Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 33, N° 1, January/February 1997.
- [3] John J. Stroker, "What is the Real Cost of Higher Efficiency?" *IEEE Industry Applications Magazine*, May/June 2003, pp. 32 - 37