

VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA
I SEMINÁRIO LATINO AMERICANO DE ENERGIA

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MOTORES
ELÉTRICOS TRIFÁSICOS

JAIME ANTÔNIO BURGOA - CEMIG
NELSON WANDER BEIRÃO SIMÕES - CEMIG
JOÃO ROBERTO GOGO - EFEI

OBJETIVO

Apresentar os principais resultados do projeto **Avaliação do Desempenho dos Motores Elétricos Trifásicos**, desenvolvido sob a coordenação da CEMIG e executado pela EFEI/FUPAI com recursos financeiros da ELETROBRÁS/PROCEL. Analisa-se a performance dos motores seriados mais difundidos no Brasil, na faixa de potência de 1 a 100 [CV].

PERDAS A VAZIO - P_0

As Perdas a vazio compõem-se de:

- 1 - Perdas por atrito e ventilação (P_{AV})
- 2 - Perdas Joule no enrolamento do estator (P_{JO})
- 3 - Perdas por Histerese e Foucault no estator (P_{HF})

Resultados:

Motores de 3 a 15 [CV] apresentam perdas a vazio entre: 6 a 17% da potência nominal.

Os motores de maior porte (> 15 [CV]). Tiveram suas perdas entre: 3,4 a 8% da potência nominal.

São altas quando comparadas com as perdas totais nominais, que chegaram a valores entre: 31 a 61% da potência nominal.

POTÊNCIA [CV]	FABRICANTE			
	A	B	C	D
3	42,8	44,7	49,6	50,6
5	53,8	61,3	55,6	54,3
7,5	38,8	55,5	43,8	43,0
10	52,6	54,9	47,8	50,0
15	52,8	41,0	36,3	53,3
20	31,1	-	-	-
25	34,3	-	-	-
30	-	49,6	39,3	39,6
40	-	50,2	-	-
60	-	-	-	42,2
75	36,4	-	-	-
100	-	-	40,7	-

Obs.: Os motores de 60 e 100 [CV] dos fabricantes C e D respectivamente não atingiram a potência nominal devido a problemas de vibração excessiva.

TABELA 2 - INFLUÊNCIA DAS PERDAS NO FERRO (P_{HF}) NAS PERDAS A VAZIO (P_0) - VALORES EM PORCENTAGEM				
POTÊNCIA [CV]	FABRICANTE			
	A	B	C	D
3	59,2	73,6	68,5	78,9
5	67,8	77,7	67,7	75,1
7,5	53,3	79,6	65,0	78,7
10	63,0	77,2	66,1	74,3
15	55,8	79,0	64,8	76,5
20	63,7	-	-	-
25	50,5	-	-	-
30	-	65,4	67,2	75,6
40	-	71,4	-	-
60	-	-	56,8	81,9
75	61,9	-	-	-
100	-	-	76,0	53,4

TABELA 3 - INFLUÊNCIA DA CORRENTE A VAZIO (I_0) NA CORRENTE NOMINAL (I_N) - VALORES EM PORCENTAGEM				
POTÊNCIA [CV]	FABRICANTE			
	A	B	C	D
3	56	54	58	54
5	56	64	50	50
7,5	47	52	43	46
10	50	47	46	41
15	40	45	39	43
20	44	-	-	-
25	36	-	-	-
30	-	44	35	30
40	-	44	-	-
60	-	-	31	31
75	33	-	-	-
100	-	-	35	30

FAB.	P_{TOTAL}	P_{J1}	%	P_{HF}	%
A	1,7096	0,437	25,56	0,566	33,11
B	1,2118	0,335	27,62	0,514	42,38
C	1,6104	0,368	22,85	0,509	31,61
D	1,3171	0,315	23,92	0,489	37,13
(%)*	40,96	38,73		15,75	

FAB.	P_{AV}	%	P_{J2}	%	P	%
A	0,230	13,45	0,1854	10,84	0,2912	17,03
B	0,080	6,60	0,1809	14,92	0,1089	8,48
C	0,180	11,18	0,1460	9,07	0,4074	25,3
D	0,120	9,11	0,1690	12,83	0,2241	17,01
(%)*	187,5		26,99		182,99	

(%) Representa as maiores variações de perdas entre os motores. Verifica-se que as perdas por efeito joule, no circuito do estator (P_{J1}) e as por histerese e Foucault são as que mais influenciam as perdas totais.

Especificação das Perdas	% Em Relação as Perdas Totais	Fatores que Influenciam nestas Perdas
Perdas no Estator	35 a 40	Dimensão dos condutores do estator
Perdas no Rotor	15 a 20	Dimensão dos condutores do rotor
Perdas no Ferro	15 a 20	Tipo e quantidade de material magnético
Perdas por Atrito e Ventilação	5 a 10	Seleção/projeto de mancais e ventiladores
Perdas por Dispersão	10 a 15	Métodos de projeto e fabricação

POTÊNCIA [CV]	FABRICANTE				VARIACÃO (%)
	A	B	C	D	
3	73,30	77,40	74,30	76,55	5,6
5	81,97	81,50	80,90	81,30	1,3
7,5	83,50	84,16	82,88	80,85	4,1
10	81,13	85,84	82,03	84,80	5,8 ←
15	84,01	86,50	84,28	85,28	3,0
30	-	88,60	87,40	87,10	1,7

CORRENTE NOMINAL

Os valores obtidos para a corrente nominal dos motores ensaiados e a comparação destes com os fornecidos em catálogo, resultou em Pequenas Variações.

CORRENTE DE PARTIDA

Na maioria dos motores ensaiados os valores obtidos para a corrente de partida apresentam valores superiores aos especificados em catálogo, atingindo em alguns casos Variações Maiores que 50%.

DIFICULDADES:

- Maior queda de tensão na partida;
- Necessidades de adequação ou substituição de proteções e condutores (sobreaquecimento de cabos e atuação indevida das proteções);
- Possibilidade de redução da vida útil, (sobreaquecimento do motor por ocasião de partidas sucessivas).

ORIGEM DO PROBLEMA:

- Seção, qualidade e quantidade dos condutores, disposição dos enrolamentos do estator e entreferro (reatâncias de dispersão e de magnetização);
- Qualidade das chapas utilizadas nos núcleos do estator e rotor (reatâncias de dispersão e de magnetização);
- Formato das ranhuras que alojam as barras do rotor (resistência e reatância de partida do enrolamento do rotor).

MOTOR	P _{EIXO} [CV]	I (A)	N%	FP	TENSÃO
		22,38	66,09	0,345	110% U _N
	3	16,47	67,47	0,414	100% U _N
		16,48	69,35	0,469	90% U _N
		24,30	75,65	0,475	110% U _N
	5	20,72	78,75	0,578	100% U _N
		19,23	81,41	0,661	90% U _N
15 [CV]		27,14	80,55	0,600	110% U _N
	7,5	25,13	83,81	0,703	100% U _N
		24,09	85,13	0,781	90% U _N
		30,58	82,95	0,0691	110% U _N
	10	29,25	84,47	0,779	100% U _N
		30,13	85,11	0,834	90% U _N
		39,22	84,50	0,794	110% U _N
	15	40,49	84,01	0,849	100% U _N
		44,17	83,23	0,873	90% U _N

MOTOR [CV]	P _{EIXO} [CV]	I (A)	N%	FP	TENSÃO
3	3	9,36	74,91	0,742	110% U _N
		9,84	73,30	0,804	100% U _N
		11,46	86,56	0,848	90% U _N
5	5	15,97	80,00	0,686	110% U _N
		15,40	81,97	0,763	100% U _N
		15,90	81,77	0,824	90% U _N
7,5	7,5	21,78	79,82	0,755	110% U _N
		21,09	83,50	0,822	100% U _N
		22,45	82,93	0,872	90% U _N
10	10	29,89	80,80	0,725	110% U _N
		30,04	21,13	0,791	100% U _N
		32,29	80,37	0,827	90% U _N

MOTOR	P _{EIXO} [CV]	I %	N%	FP	MOTOR
15 [CV]	3	+ 139,10	- 9,10	- 53,50	3 [CV]
	5	+ 52,16	- 5,44	- 30,76	5 [CV]
	7,5	+ 24,61	+ 0,92	- 20,53	7,5 [CV]
	10	+ 2,31	+ 2,66	- 4,69	10 [CV]

SOBREDIMENSIONAMENTO DO MOTOR

A análise de uma instalação elétrica visando a economia de energia, deve ser feita levando-se em conta os motores elétricos e todos os parâmetros envolvidos tais como:

- O perfil da tensão de alimentação;
- Corrente;
- Fator de potência;
- Momento de inércia;
- Número de partidas por hora;
- Etc.

MOTOR	P _{EIXO} [CV]	I %	N%	FP	MOTOR
15 [CV]	3	+ 87,70	- 7,65	- 48,51	3 [CV]
	5	+ 34,55	- 2,71	- 24,25	5 [CV]
	7,5	+ 19,16	- 0,37	- 14,48	7,5 [CV]
	10	- 2,63	+ 4,12	- 1,52	10 [CV]



MOTOR	P_{EIXO} [CV]	I %	N%	FP	MOTOR
15 [CV]	3	+ 43,81	+ 4,19	- 44,69	3 [CV]
	5	+ 20,94	- 0,44	- 19,78	5 [CV]
	7,5	+ 7,31	+ 2,65	- 10,44	7,5 [CV]
	10	- 6,69	+ 5,90	- 0,85	10 [CV]

↑ ↑ ↑
PERDAS COM O MOTOR OPERANDO A PLENA CARGA

Os valores obtidos das perdas para motores de mesma potência e de fabricantes diferentes, apresentou uma ampla faixa de variação, permitindo concluir que é possível reduzi-las sem incorrer em aumento substancial do custo do motor, uma vez que se usou, nestas comparações, os motores encontrados normalmente no mercado.

FATOR DE POTÊNCIA

O fator de potência de um motor é significativamente influenciado pela carga acionada.

Para variação de 100% para 50% da carga no eixo provoca-se reduções entre: 9,6 a 21,3%.

Influencia: O carregamento dos condutores
Transformadores de alimentação.

Obs: Portaria Nº 085 de 25/03/92 publicada no D.O.U. dia 26/03/92, Pág. 3954, Seção I pelo DNAEE:

“Altera o valor do fator de potência de referência de 0,85 atual para 0,92”.

RENDIMENTO

A Norma ABNT NBR-5383 apresenta diversos métodos para determinação do rendimento.

1 - MÉTODOS DIRETOS

- Ensaio através de freio mecânico;
- Ensaio através de dinamômetros;
- Ensaio com máquina calibrada;
- Ensaio de oposição elétrica e mecânica.

2 - MÉTODOS INDIRETOS

- Determinação das perdas separadamente para sua adição;
- Determinação das perdas totais;
- Circuito equivalente;
- Diagrama circular tipo L.

Utilizou-se o método direto e intitulado “Ensaio Através de Dinamômetros”.

CONJUGADO DE PARTIDA

Na maioria dos motores, o conjugado de partida obtido nos ensaios foi maior que os fornecidos nos catálogos dos fabricantes e especificados na Norma (NBR-7094 (1981) – Especificação).

Ordem do problema: - Condições de ensaio.

INFLUÊNCIA DA QUALIDADE DOS MATERIAIS NAS PERDAS DOS MOTORES

Tomando como base apenas os motores na faixa de 3 a 15 [CV], os resultados dos testes mostram que o rendimento dos motores varia de 73,3 até 86,5% com as perdas representando valores compreendidos entre 36,43 a 15,61% respectivamente, das potências nominais dos motores.

Ao analisar esta ampla faixa de variação do rendimento e cada uma das perdas separadamente, fabricante por fabricante, nota-se que é possível reduzi-las individualmente, aproveitando as melhores características existentes em cada um deles.

As reduções seriam possíveis nos seguintes pontos:

- A participação das perdas no ferro nas perdas totais que atingem valores de 47,64% podem ser reduzidas para valores em torno de 30%;
- As perdas por efeito Joule representando valores que chegam a alcançar até 35,33% podem ser reduzidas para valores da ordem de 25% do total;
- As perdas por atrito e ventilação representando valores que atingem 19,53% podem ser reduzidas para valores em torno de 5%;
- As perdas por efeito Joule no rotor representando valores que atingem até 25% podem ser reduzidas para valores em torno de 15%.

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os resultados obtidos impulsionaram a revisão da Norma ABNT iniciando-se pela parte de especificação (NBR 7094-1981) e, futuramente, a parte de testes (NBR 5383-1982) de motores. A exposição das metodologias de ensaios e os detalhes de especificação deverão se tornar mais claros.

Note que métodos de testes diferentes, se utilizados em um mesmo motor, podem resultar em valores com diferenças significativas.

Os fabricantes não indicam em seu catálogo qual o método que foi utilizado na determinação dos parâmetros do seu motor. As conseqüências recaem sobre o usuário que, sem maiores informações, adquire o motor influenciado apenas pelo fator preço, sem levar em consideração aspectos de eficiência energética e de durabilidade.

A não definição do método de ensaio impossibilita a comparação de resultados de catálogo entre motores de mesma potência e de fabricantes diferentes, pois um motor de boa qualidade pode apresentar o mesmo valor de rendimento que um de má qualidade, simplesmente porque os métodos de ensaio utilizados não são os mesmos.

A - NORMAS

- Revisar as Normas ABNT (NBR 7094-1981 - Especificação de motores, em fase de Elaboração, e a de Método de Ensaio NBR 5383-1982);
- Definir claramente um método único de ensaio para determinação do rendimento e especificação dos motores pelos fabricantes. Recomenda-se o método do “Dinamômetros com segregação de Perdas”, utilizando-se dinamômetros ou transdutores de torque com medição direta de todas as perdas;
- Determinar a inclusão dos valores do rendimento, fator de potência e corrente a vazio na placa de identificação dos motores → é o assunto da reunião do dia 10/05/92 no COBEI;
- Realizar revisões periódicas nas Normas de testes;
- Estabelecer valores mínimos e/ou faixa de valores para determinados parâmetros para os motores;
- Ampliar o fórum para discussão das Normas de forma a envolver cada vez mais técnicos e entidades.

B - FABRICANTES

- Procurar utilizar materiais mais uniformes, com qualidade e quantidade adequados na fabricação dos motores, principalmente no que se refere ao aço e cobre;
- Realizar revisões nos projetos, visando otimizar as curvas características de rendimento e fator de potência;
- Atualizar periodicamente os dados de catálogos de forma a refletir o mais próximo possível a realidade.

C - CONCESSIONÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA

- Fornecer energia elétrica com tensões equilibradas e nos níveis adequados, tendo em vista os efeitos que a variação da tensão acarreta nos motores.

D - PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - PROCEL

- Intermediar a negociação entre as entidades envolvidas para implantação das medidas recomendadas;
- Viabilizar juntamente com o Instituto Nacional de Metrologia INMETRO, o lançamento de um projeto de etiquetagem de motores de âmbito nacional, para certificação de conformidade com a norma. Recomenda-se esta providência para motores com potências até 10 [CV];
- Viabilizar o credenciamento pelo INMETRO de laboratório idôneos para realizar e apresentar os resultados dos ensaios previstos na Norma, estes laboratórios devem ser aferidos por um deles que será considerado padrão;
- Atuar junto aos fabricantes de máquinas e usuários, no sentido de evitar o sobredimensionamento de motores;
- Promover campanhas publicitárias e elaborar manuais e roteiros para sensibilizar e orientar os fabricantes de máquinas e os usuários quanto a melhor especificação e utilização dos motores, bem como estimular o uso de motores que possam, efetivamente, um maior rendimento.

RECOMENDAÇÕES

Com base na análise dos resultados obtidos neste projeto foi possível identificar algumas medidas orientativas que poderão possibilitar a melhora da performance dos motores.

MÉTODO DE ENSAIO DOS MOTORES

Foram baseados na Norma ABNT NBR-5383 (1982).

As medições foram realizadas por um sistema de aquisição de dados acoplados a um microcomputador. Evita erros de leitura e transposição de dados pelo operador.

ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA TENSÃO NO COMPORTAMENTO DO MOTOR

Na operação com tensão menor que a nominal em plena carga, a corrente e as perdas aumentaram. Com uma conseqüente redução no rendimento.

Na operação a vazio e com carregamento abaixo da nominal, as perdas e a corrente, na maioria dos motores, diminuíram devido a redução sensível das perdas no ferro que representam uma grande parcela das perdas totais.

O funcionamento de um motor com tensão e carregamento abaixo do nominal, aparentemente, é benéfico sob o aspecto de conservação da energia.

Entretanto, o conjugado desenvolvido por um motor varia aproximadamente com o quadrado da tensão. Assim, uma redução de tensão em 10% acarretará uma redução do conjugado em 21% o que pode ocasionar sérios problemas nos motores que partem com carga.

- Operação do motor com tensão abaixo da nominal.

Condição de Carga	Parâmetros Analisados	0,90 UN	Variação (%)	Frequência *
A Vazio	Perdas	Diminuem	12,20 a 34,00	100%
	Corrente	Diminui	11,83 a 28,05	100%
	Fator Potência	Aumenta	0,72 a 19,17	90%
Abaixo da Nominal	Rendimento	Aumenta	0,29 a 10,52	83%
	Corrente	Diminui	0,50 a 15,54	70%
	Fator Potência	Aumenta	4,81 a 25,38	93%
Nominal	Rendimento	Diminui	0,13 a 9,20	93%
	Corrente	Aumenta	3,25 a 16,46	100%
	Fator Potência	Aumenta	0,58 a 7,99	100%

A elevação da tensão prejudica sensivelmente o comportamento dos motores.

Na condição a vazio e com carga abaixo da nominal, verificou-se aumento significativo das perdas e da corrente de alimentação (saturação).

Na condição de operação com plena carga, o efeito da elevação de tensão é também prejudicial, porém em menor proporção do que nas operações a vazio e com carga inferior a nominal.

- Operação do motor com tensão acima da nominal.

Condição de Carga	Parâmetros Analisados	+ 1,10 UN	Variação (%)	Frequência *
A Vazio	Perdas	Aumentam	13,48 a 66,25	100%
	Corrente	Aumenta	20,18 a 52,14	100%
	Fator Potência	Diminui	0,64 a 18,52	87%
Abaixo da Nominal	Rendimento	Diminui	0,42 a 21,05	96%
	Corrente	Aumenta	0,37 a 36,41	96%
	Fator Potência	Diminui	7,34 a 24,88	100%
Nominal	Rendimento	Diminui	0,13 a 4,41	78%
	Corrente	Diminui	0,39 a 6,25	68%
	Fator Potência	Diminui	3,60 a 10,59	100%

* Percentual de motores que sofreram variação dos parâmetros quando foi alterada a tensão de alimentação para valores superiores a nominal.

INFLUÊNCIA DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÕES NO COMPORTAMENTO DO MOTOR

De um modo geral, nos motores ensaiados, a influência deste desequilíbrio de tensões (5 a 10%) afetou, de forma significativa, o rendimento da maioria dos motores, diminuiu em 7,97 a 7,12% do seu valor nominal.