

ANÁLISE E DETERMINAÇÃO DAS PERDAS NO FERRO DO ESTATOR EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

João Roberto Cogo*, Ângelo Stano Júnior*
Evandro Santos Ponzetto**

Artigo publicado na Revista Eletricidade Moderna
Ano XXVI, nº 295 - Outubro de 1998 - páginas 191 à 197

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma metodologia de ensaio para a determinação das perdas no estator por efeitos de Histerese e correntes parasitas de Foucault (perdas no ferro), em motores de indução trifásicos (MIT's). Apresenta-se ainda as considerações e comparações acerca dos valores obtidos para estas perdas.

ABSTRACT

This work purposes to present a test methodology for determination of the stator losses by hysteresis and eddy currents (Foucault losses), in three-phase induction motors. Considerations and comparisons about the values obtained for such losses are presented as well.

1 - PERDAS EM MIT's

Um motor de indução trifásico, assim como qualquer máquina elétrica, apresenta perdas durante o seu funcionamento, perdas estas que podem ser função da tensão, da corrente, da frequência, da qualidade e quantidade de material empregado, etc...

Estas perdas determinam um rendimento para o processo de transformação de energia efetuado pela máquina. Cabe ressaltar que o custo destas perdas, ao longo da vida útil do motor, resulta, na maioria dos casos, em um valor muito maior que o custo de aquisição do equipamento [1], conforme mostrado no gráfico da Figura 1.

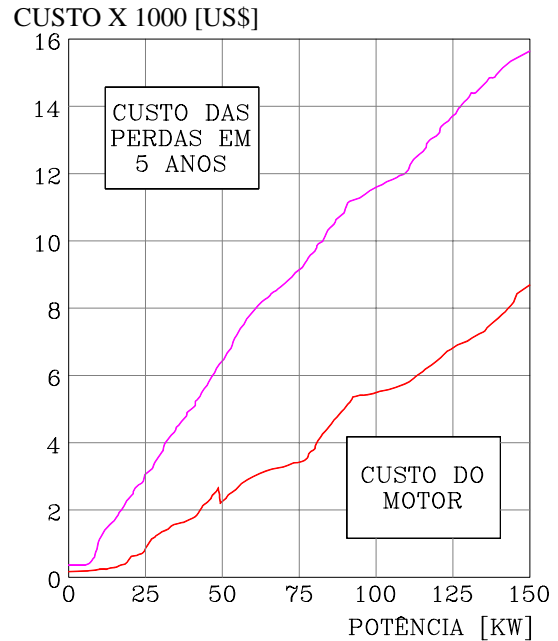


Fig. 1 - Custo do motor e custo das perdas em 5 anos (motores de 4 pólos).

Este fato, fundamental entre outros [2], assumiu tal importância que, a mais recente revisão da norma brasileira NBR-7094 referente a "Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução - Especificação" [3] prevê a inclusão do rendimento como sendo dado de placa do motor, possibilitando ao comprador efetuar uma estimativa do custo das perdas.

A Figura 2 a seguir apresenta um fluxograma das perdas inerentes ao funcionamento de uma máquina de indução, incluindo a indicação da parte da máquina onde elas ocorrem (estator ou rotor).

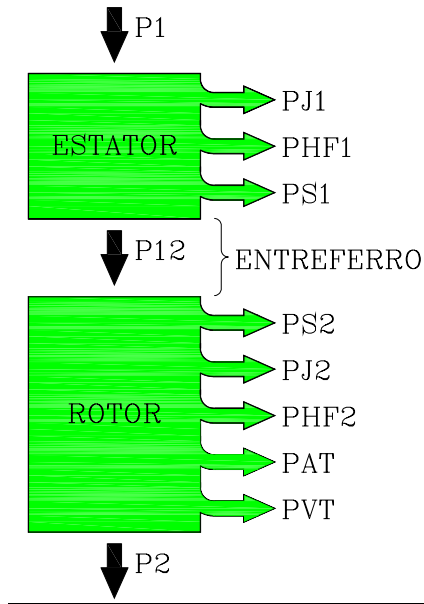


Fig. 2 - Fluxograma das perdas em máquinas de indução

Na Figura 2 têm-se:

P1	Potência entregue ao estator
PJ1	Perda por efeito Joule no estator
PHF1	Perda por Histerese e correntes parasitas de Foucault no estator
PS1	Perda suplementar no estator
P12	Potência disponível no entreferro
PS2	Perda suplementar no rotor
PJ2	Perda por efeito Joule no rotor
PHF2	Perda por Histerese e correntes parasitas de Foucault no rotor
PAT	Perda por atrito
PVT	Perda por ventilação
P2	Potência entregue à carga

O valor total das perdas pode ser obtido com base no rendimento da máquina, utilizando-se a expressão (1) a seguir.

$$PT_N = P_N \left(\frac{1}{\eta_N} - 1 \right) \quad (1)$$

onde:

PT_N - Perdas totais nominais da máquina;
 P_n - Potência nominal da máquina ;
 η_N - Rendimento nominal da máquina

As Tabelas 1 e 2, a seguir, indicam como as perdas a vazio (determinadas com o rotor livre) e as perdas no ferro (do estator PHF1 e do rotor PHF2) são distribuídas para cada potência de motor [2]. Já a Tabela 3 indica a porcentagem da corrente a vazio em relação a corrente nominal do motor [2].

Tabela 1 - Influência das perdas a vazio (P_0) nas perdas totais (P_T) - valores em porcentagem [2].

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	-

2 - SEPARAÇÃO DAS PERDAS

Para determinação de cada uma das perdas anteriormente citadas, utiliza-se o método de separação das perdas, que consiste em se determinar, através de ensaios específicos, cada uma das perdas existentes na máquina [3]. É assim por exemplo que, através do ensaio de rotor travado, pode-se obter as perdas totais por efeito Joule nos enrolamentos do rotor e do estator (PJT), sem grande influência das perdas por histerese e Foucault, visto que a tensão aplicada é bastante reduzida. As perdas por efeito Joule no estator (PJ1) podem ser obtidas através do produto da resistência do estator pela corrente nominal da máquina, sendo que as perdas por efeito Joule no rotor (PJ2) dadas por:

$$PJ2 = PJT - PJ1 \quad (2)$$

Tabela 2 - Influência das perdas no ferro (P_{HF}) nas perdas a vazio (P_0) - valores em porcentagem [2].

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

Através da realização de outros ensaios, pode-se então obter, separada-mente, cada uma das perdas da máquina [3].

3 - PERDAS POR HISTERESE E FOUCAULT NO ESTATOR

Para determinação das perdas por Histerese e Foucault no estator (perdas no ferro), serão considerados neste trabalho dois métodos distintos, e será feita uma comparação entre eles.

Tabela 3 - Influência da corrente a vazio (I_0) na corrente nominal (I_N) - valores em porcentagem [1], [2], [3].

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

Assim, apresenta-se o método do ensaio a vazio, previsto em [3] e um método aqui denominado de “método da velocidade síncrona”.

3.1 - Método do Ensaio a Vazio

O método do ensaio a vazio consiste em se aplicar ao estator uma tensão senoidal equivalente a 120% da nominal, que irá sendo reduzida gradativamente, e mede-se a potência e a corrente entregues ao motor. Enquanto a tensão está sendo reduzida, a corrente também é reduzida. No instante em que, a uma redução da tensão, ocorrer um aumento de corrente, o ensaio deverá ser encerrado.

Com base nos resultados assim obtidos, traça-se então um gráfico da potência e da corrente em função da tensão, devendo a curva da potência ser extrapolada, a partir do ponto onde o ensaio foi suspenso (U_{min}), até encontrar o eixo Y (de P e I). Este ponto corresponde a uma tensão zero no estator, sendo portanto a potência encontrada equivalente às perdas por atrito e ventilação. A Figura 3 a seguir esclarece.

Medindo-se a potência absorvida pelo motor sob tensão nominal com a máquina operando sem carga no eixo, ou seja, com o rotor livre, e considerando-se desprezíveis as perdas no rotor, admite-se poder obter, nestas condições, as perdas por histerese e Foucault no estator, através da equação (3) a seguir.

$$P_{HF} = P_0 - P_{A+V} - 3 \cdot R_1 \cdot I_0^2 \quad (3)$$

onde na equação (3) tem-se:

P_{HF} - Perdas por Histerese e Foucault [W];

$$P_{HF} = P_{HF1} + P_{HF2} \quad (4)$$

P_0 - Perdas com rotor livre (a vazio) [W];

P_{A+V} - Perdas por atrito e ventilação [W];

R_1 - Resistência do circuito do estator por fase, na temperatura do ensaio [Ω].

I_0 - Corrente com rotor livre (a vazio) [A].

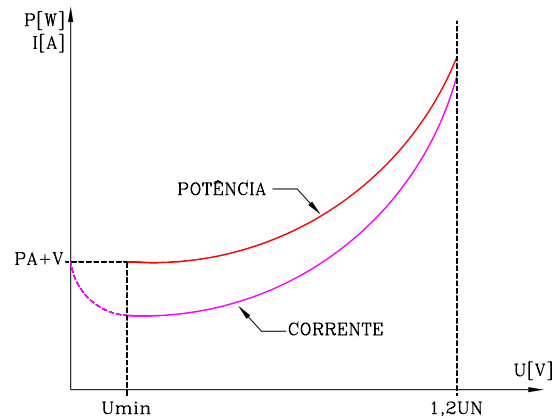


Fig. 3 - Gráfico para obtenção das perdas por atrito e ventilação a partir do ensaio a vazio

3.2 - Método da Velocidade Síncrona

A metodologia deste ensaio para a determinação das perdas por histerese e Foucault no estator de uma máquina de indução consiste, conforme mostra a Figura 4, em acoplá-lo, mecanicamente, à uma máquina motriz (por exemplo, um motor de corrente contínua - MCC, ou a um motor síncrono - MS).

O conjunto é posto a girar, com as duas máquinas energizadas, e no caso de se utilizar o MMC vai-se variando a velocidade da máquina motriz (MCC), até atingir a velocidade síncrona do motor de indução, medindo-se as grandezas elétricas entregues a este último.

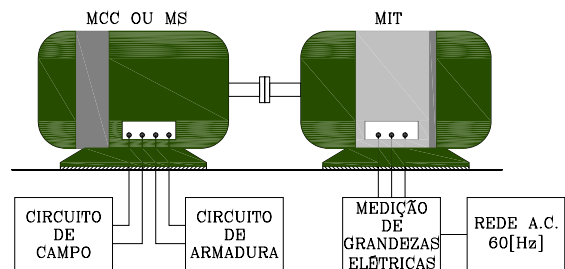


Fig. 4 - Arranjo para ensaio com o método da velocidade síncrona

Quando a rotor estiver na velocidade síncrona, pode-se observar:

- A tensão induzida no rotor é efetivamente nula, e conseqüentemente a corrente e as perdas eletromagnéticas ai existentes também o são;

- Não há produção de torque no rotor da máquina de indução, pois as perdas por atrito e ventilação da mesma estão sendo supridas pela máquina motriz (MCC);

- A potência fornecida ao motor de indução corresponde portanto às perdas existentes nestas condições, que são as perdas por histerese e Foucault, as perdas Joule nos enrolamentos do estator, e as perdas suplementares causadas pela corrente do estator;

- Caso a máquina motriz seja um motor síncrono a velocidade no eixo do conjunto (MIT e MS) teoricamente já seria a síncrona, porém observa-se, neste caso, algumas oscilações de potência durante o ensaio.

As perdas por histerese e Foucault do estator (P_{HF1}), objetivo do ensaio em questão, podem ser determinadas a partir da equação (5).

$$P_{HF1} = P_E - 3 \cdot R_1 \cdot I^2 \quad (5)$$

onde na equação (5) tem-se:

P_E - Potência total medida nesta condição

I - Corrente medida nesta condição

Observou-se durante a realização do ensaio, que o ponto desejado (correspondente à velocidade síncrona), é bastante instável, dificultando as leituras. Optou-se portanto em variar a velocidade da máquina motriz, de forma que a máquina de indução se comportasse inicialmente como motor, passando pelo ponto desejado (velocidade síncrona) e chegando finalmente a funcionar como gerador. Durante este intervalo de tempo (escolhido como 5[seg]), registrou-se, via sistema de aquisição de dados todas as grandezas elétricas (P_E , I , fator de potência (FP) e potência reativa), que permitiram a execução do cálculo das perdas.

O valor desejado de P_E para a equação (5), é aquele onde a corrente I (Figura 8) for a mínima.

4 - RESULTADOS DE ENSAIO

4.1 - Método do Ensaio a Vazio

A máquina em teste possui os dados de placa apresentados a seguir:

Potência:	5 [CV]
Tensão Nominal:	220/380 [V]
Corrente Nominal:	16,5/9,6 [A]
Regime:	S1
Fator de Serviço:	1,0
Categoria:	N
Grau de Proteção:	IP54
Isolação:	Classe B
Fabricante:	X
Resistência:	$R_1 = 1,23[\Omega]$

Esta máquina de indução foi submetida ao ensaio a vazio, tendo-se obtido os resultados apresentados na Figura 5 a seguir.

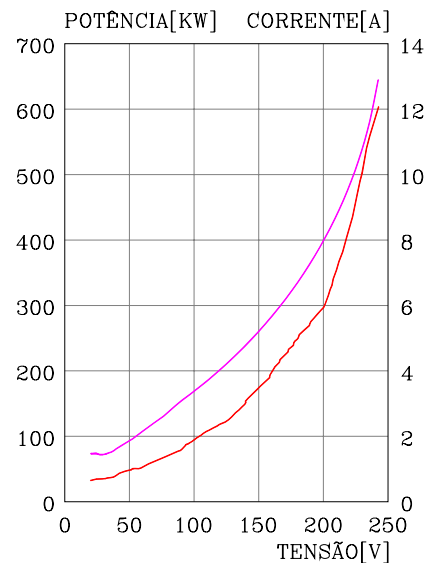


Fig. 5 - Curvas de corrente e potência em função da tensão (ensaio a vazio)

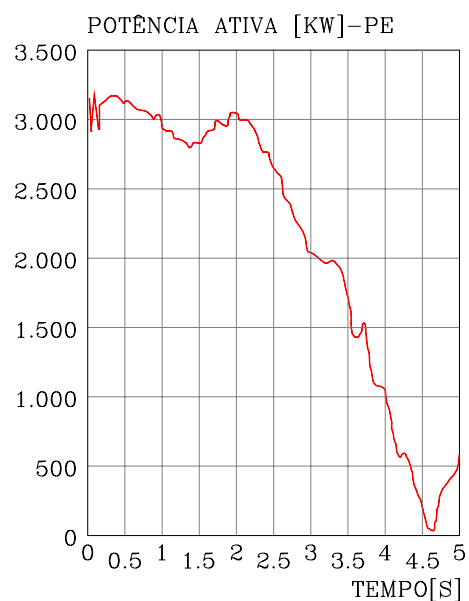


Fig. 6 - Gráfico do módulo da potência ativa em função do tempo.

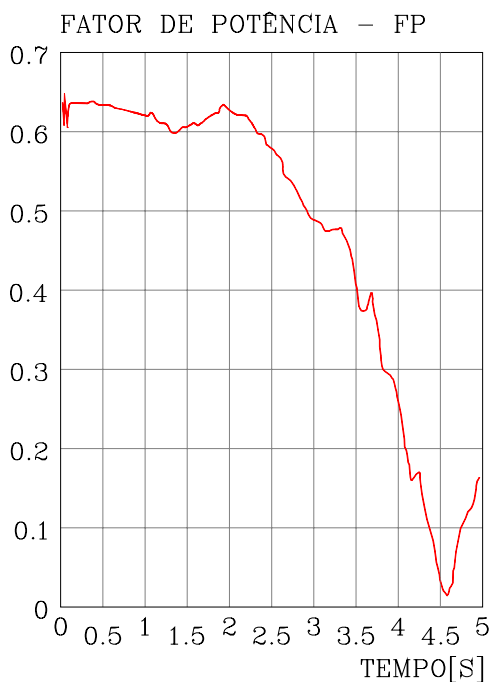


Fig. 7 - Gráfico do módulo do fator de potência em função do tempo.

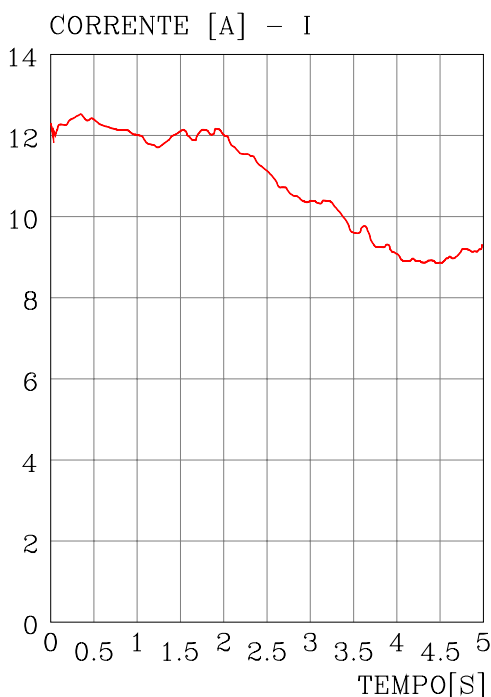


Fig. 8 - Gráfico da corrente em função do tempo

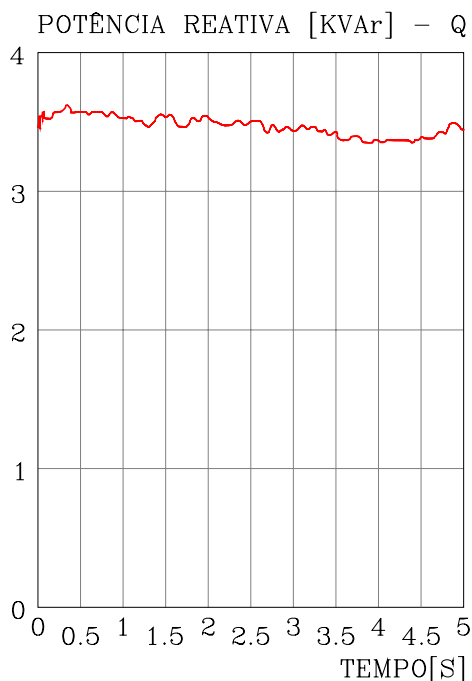


Fig. 9 - Gráfico da potência reativa em função do tempo

O valor da potência correspondente à tensão zero (perda por atrito e ventilação), obtido por extrapolação do gráfico inferior da Figura 5, é de 32,95 [W]. Ainda na Figura 5 as perdas (curva inferior) e corrente (curva superior) a vazio para a tensão nominal de 220[V] são, respectivamente, de 381 [W] e 5,27[A] (9,13 [A] de linha).

Desta forma, o valor das perdas por Histerese e Foucault através da equação (3) é de:

$$P_{HF} = 381 - 32,95 - 3 \cdot 1,23 \cdot 5,27^2$$

$$P_{HF} = 245,57 \text{ [W]}$$

4.2 - Método da Velocidade Síncrona

Os valores relativos a PE, FP, I e Q foram plotados conforme Figuras 6, 7, 8 e 9, a seguir. Para melhor apresentação nos gráficos, a potência ativa e o fator de potência foram tomados em módulo, visto que, durante a operação da máquina como gerador, estas grandezas sofrem uma inversão de sinal em relação a situação como motor.

O valor de potência desejado, correspondente às perdas por Histerese e Foucault, ocorre simultaneamente com o valor mínimo de corrente 5,17 [A] (8,97 [A] de linha). Pelo gráfico da Figura 7, percebe-se que este tempo equivale a 4,55 segundos, implicando em uma potência de 154,01 [W], no gráfico da Figura 5. Logo PHF1, conforme (5) é de :

$$PHF1 = 154,01 - 3 \cdot 1,23 \cdot 5,17^2 = 55,4 \text{ [W]}$$

5 - VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DOS RESULTADOS

De forma a verificar a consistência e repetibilidade dos resultados, repetiram-se os ensaios para uma máquina de 15 [CV], que possui os dados de placa apresentados a seguir:

Potência	15 [CV]
Tensão Nominal	220/380 [V]
Corrente Nominal	42/24,3 [A]
Regime	S1
Fator de Serviço	1,0
Categoria	N
Grau de Proteção	IP54
Isolação	Classe B
Fabricante:	X
Resistência	0,29[Ω]

5.1 - Método do Ensaio a Vazio

Os resultados obtidos neste ensaio foram :

$$P_{HF} = 760 - 170,59 - 3 \cdot 0,29 \cdot 9,12^2$$

$$P_{HF} = 517,05 \text{ [W]}$$

5.2 - Método da Velocidade Síncrona

Neste caso a corrente mínima de 4,76 [A] (8,25 [A] de linha) ocorre para o tempo correspondente a 2,16 [s], implicando em uma potência de 308,5 [W]. Logo PHF1, conforme (5) é de:

$$PHF1 = 308,5 - 3 \cdot 0,29 \cdot 4,76^2 = 288,8 \text{ [W]}$$

6 - COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Comparando-se os resultados obtidos em cada método de ensaio, observa-se, em ambos os casos, uma diferença a maior no método do ensaio a vazio.

Desprezar portanto as perdas do rotor no método do ensaio a vazio, não é uma boa aproximação. Com efeito, apesar do motor trabalhar, quando a vazio, próximo de sua velocidade síncrona, as perdas no rotor não podem ser desprezadas. Esta diferença corresponde às perdas no rotor com o motor operando a vazio, que assume, para cada máquina testada, os seguintes valores:

a - Máquina de 5 [CV]

Método do ensaio a vazio:

$$P_{HF} = 245,57 \text{ [W]}$$

Método da velocidade síncrona:

$$P_{HF1S} = 55,4 \text{ [W]}$$

Perda no rotor a vazio:

$$P_{20} = P_{HF} - P_{HF1S} = 245,57 - 55,4$$

$$P_{20} = 190,17 \text{ [W]}$$

b - Máquina de 15 [CV]

Método do ensaio a vazio:

$$P_{HF} = 517,05 \text{ [W]}$$

Método da velocidade síncrona:

$$P_{HF1} = 288,8 \text{ [W]}$$

Perda no rotor a vazio:

$$P_{20} = P_{HF} - P_{HF1S} = 517,05 - 288,8$$

$$P_{20} = 228,25 \text{ [W]}$$

Deve-se atentar para o fato de que, em ambos os métodos de ensaio, associada ao valor das perdas por Histerese e Foucault, existe uma parcela correspondente às perdas suplementares, as quais com diferentes graus de ação continuam existindo nos dois métodos de ensaio.

Assim, o método da velocidade síncrona apresenta uma forma para estimar as perdas magnéticas no estator de um motor de indução com melhor precisão auxiliando, com isto, principalmente a parte de modelagem das máquinas assíncronas.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - Cogo, J.R.; Sá, J.S. e Oliveira, A.L.: Economia de Energia em Motores Elétricos - XIII SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Camburú/SC, Brasil - 01-05/10/95;
- [2] - Cogo, J.R. et all.: Relatório Técnico Final referente a Avaliação do Desempenho dos Motores Elétricos Trifásicos - Convênio EFEI/FUPAI/Eletróbrás/CEMIG/PROCEL, 1990;
- [3] - NBR-5383 - Máquinas Elétricas Gigantes - Máquinas de Indução - Determinação das Características - ABNT 1982.

ANEXO 1

RESULTADOS DOS ENSAIOS PARA UM MOTOR DE 7,5 [CV] DE UM FABRICANTE Y

1 - Método do Ensaio a Vazio

O motor em análise apresenta as seguintes características:

Potência	7,5 [CV]
Tensão nominal	220 [V]
Corrente nominal	22 [A]
Regime	S1
Fator de serviço	1,15
Grau de proteção	IP54
Isolação	classe B
Fabricação	Y
Resistência R_1	0,678 [Ω]

A Figura 1 ilustra a potência e a corrente a vazio em função da tensão.

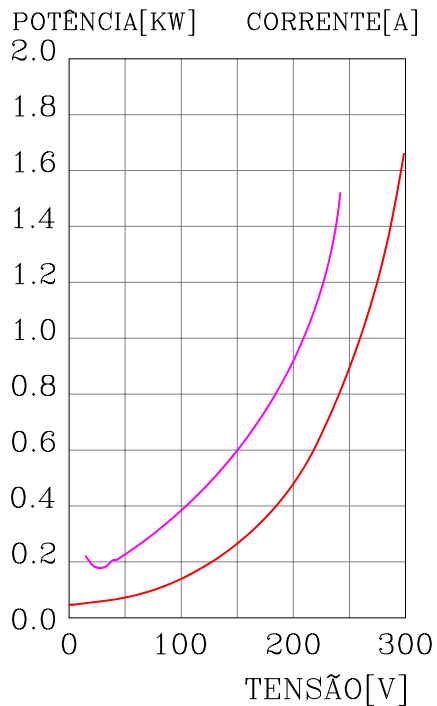


Fig. 1 - Curvas de corrente e potência em função da tensão (ensaio a vazio)

O valor da potência correspondente à tensão zero (perda por atrito e ventilação), obtido por extrapolação da curva inferior da Figura 1, é de 39,25 [W], e o valor das perdas em 220 [V] a vazio 630,4 [W] (curva inferior da Figura 1) e a corrente (curva superior da Figura 1) nesta condição é de $I_0 = 6,67$ [A] (ou seja 11,55 [A] de linha).

Desta forma o valor das perdas por Histerese e Foucault é de.

$$P_{HF} = 630,4 - 39,25 - 30,678 \cdot 6,67^2$$

$$P_{HF} = 500,66 \text{ [W]}$$

2 - Método da Velocidade Síncrona

Os valores obtidos são mostrados nas Figuras 2, 3, 4, e 5 a seguir:

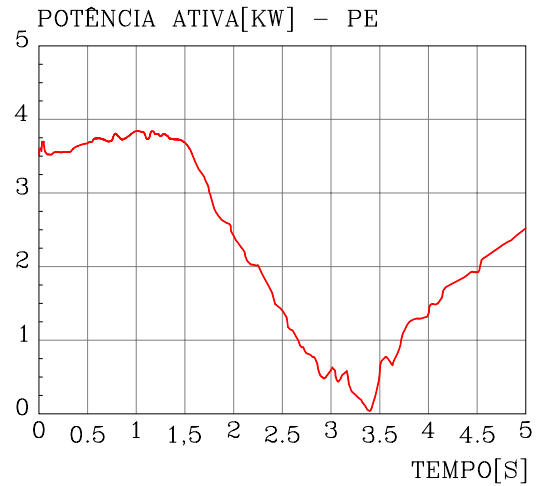


Fig. 2 - Gráfico do módulo da potência ativa em função do tempo.

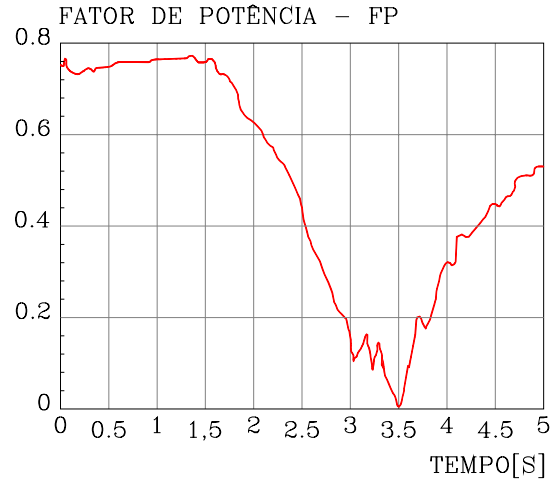


Fig. 3 - Gráfico do módulo do fator de potência em função do tempo.

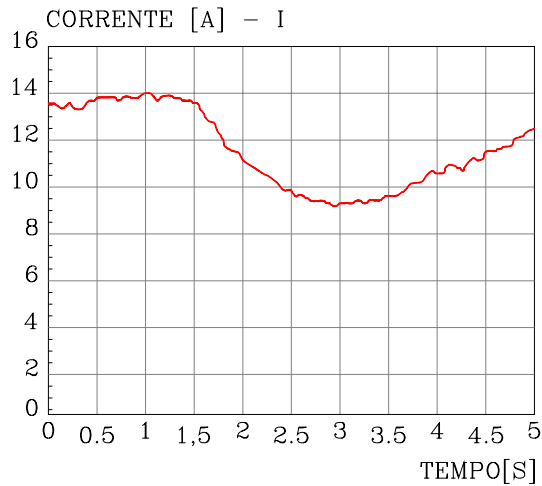


Fig. 4 - Gráfico da corrente em função do tempo

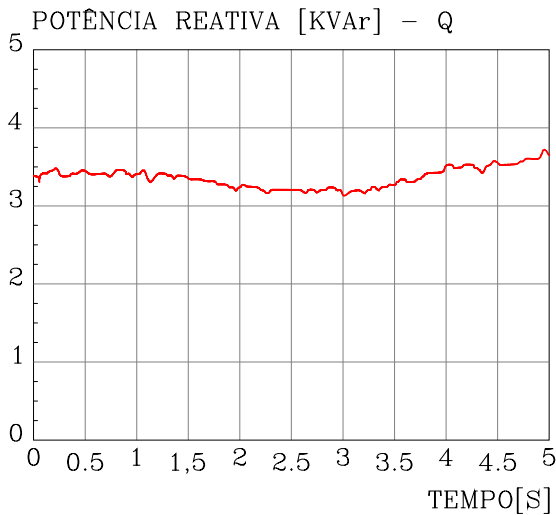


Fig. 5 - Gráfico da potência reativa em função do tempo

O valor de potência desejado, correspondente às perdas por histerese e Foucault no estator, ocorre simultaneamente com o valor mínimo de corrente. Pelo gráfico da Figura 4, percebe-se que este tempo equivale a 3 segundos, implicando em:

$$P_E = 396,3 \text{ [W]} - \text{Figura 2}$$

$$I = 5,17 \text{ [A]} - \text{Figura 3 (ou } 8,958 \text{ [A] de linha)}$$

Logo com base na equação 5 tem-se:

$$PHF1 = 396,3 - 3 \cdot 0,678 \cdot 5,17^2$$

$$PHF1 = 341,9 \text{ [W]}$$