

Universidade Federal do Rio de Janeiro

DETERMINAÇÃO DE PERDAS E RENDIMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO ATRAVÉS DO ESTUDO DA NORMA IEC 60034-2

Diogo Guedes Werneck

2011



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

DETERMINAÇÃO DE PERDAS E RENDIMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ATRAVÉS DO ESTUDO DA NORMA IEC 60034-2

Diogo Guedes Werneck

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientador: Prof. Antonio Carlos Ferreira

Rio de Janeiro
Setembro 2011

DETERMINAÇÃO DE PERDAS E RENDIMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO ATRAVÉS DO ESTUDO DA NORMA IEC 60034-2

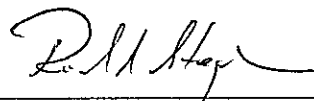
Diogo Guedes Werneck

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO
ELETRICISTA

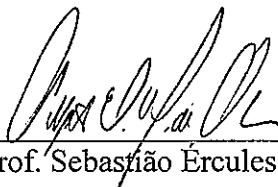
Examinado por:



Prof. Antonio Carlos Ferreira, Ph.D.



Prof. Richard Magdalena Stephan, Dr.-Ing.



Prof. Sebastião Êrcules Melo de Oliveira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2011

Werneck, Diogo Guedes

Determinação de perdas e rendimento do motor de indução trifásico através do estudo da norma IEC 60034-2 / Diogo

Guedes Werneck. –

Rio de Janeiro: UFRJ/Escola Politécnica, 2011.

VIII, 39 p. : il.; 29,7 cm

Orientador: Antonio Carlos Ferreira

Projeto de Graduação – UFRJ / Escola Politécnica / Curso de Engenharia Elétrica, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 30

1. Motor de indução. 2. Rendimento. 3. Norma IEC 6034-2.
I. Ferreira, Antonio Carlos. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Elétrica. III. Título.

À minha mãe Nazaré, ao meu pai Edson, ao meu irmão Daniel, à minha futura esposa Valéria e ao meu grande avô Nelson Werneck (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho durante os momentos mais difíceis desta longa jornada, fazendo com que eu pudesse superar com muita fé todas as dificuldades encontradas.

À minha mãe, que com suas orações sempre esteve ao meu lado depositando toda força para que eu pudesse vencer mais esta etapa da vida.

Ao meu pai, pelo apoio durante os anos de faculdade morando longe de casa, e por toda orientação que me foi dada.

Ao meu irmão, por me motivar e incentivar para que eu seguisse em frente.

À minha namorada, agora noiva e em breve esposa Valéria, por estar sempre ao meu lado orientando meu caminho.

Aos engenheiros Luiz Fernando Bassani e Ronaldo Dutra que possibilitaram o acesso a diversas referências utilizadas no trabalho, e a todos os funcionários da Frank Mohn do Brasil.

Aos engenheiros Hjelmeland Frode, Bjørndal Wollert e John Werner Netland da Frank Mohn Flatøy AS na Noruega, que forneceram materiais e estiveram sempre prontos a responder meus questionamentos.

Ao Pe. John Doyle, que me auxiliou na tradução do resumo escrito em inglês.

Aos professores, em especial ao Antonio Carlos Ferreira, meu orientador.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Elétrica que enfrentaram todos os desafios comigo nesta caminhada.

E por fim, a todos os meus familiares, amigos e principalmente aos meus avós.

“Quando o medo bater à porta de sua mente,
deixe que a fé em Deus e em todas as coisas
boas a abra”.

(Rita Andrioli)

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Determinação de Perdas e Rendimento do Motor de Indução Trifásico Através do
Estudo da Norma IEC 60034-2

Diogo Guedes Werneck

Setembro de 2011

Orientador: Prof. Antonio Carlos Ferreira

Curso: Engenharia Elétrica

Este trabalho analisa as recentes alterações em procedimentos para determinação de perdas e rendimento em máquinas elétricas rotativas, apresentados em normas internacionais, identificando seu impacto nos dados da máquina. O estudo foi desenvolvido com base na norma IEC 60034-2 e suas alterações mais atuais, referentes a ensaios de motor de indução usado em bombas aplicadas à indústria offshore, com dados de ensaio repassados pela empresa Frank Mohn AS para um motor do fabricante LOHER. Métodos utilizados para calcular as perdas e o rendimento contemplando as metodologias antiga e nova da norma IEC estudada, junto à proposta de atualização do procedimento de ensaio para motores utilizados nas bombas elétricas da empresa Frank Mohn AS, são objetivos deste trabalho.

Palavras – chave: Motor de indução, Rendimento do motor, Norma IEC 60034-2

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI / UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Electrician Engineer.

Determining Losses And Efficiency Of Three Phase Induction Motor Through The
Study Of IEC 60034-2 Standard

Diogo Guedes Werneck

September / 2011

Advisor: Antonio Carlos Ferreira

Course: Electrical Engineering

The purpose of this work is to analyze recent modification in methods to determine the losses and efficiency in rotating electrical machines, using international standards, by identifying their impact on the machine's output. Using study norm IEC 60034-2 and its more recent updates referring to tests on induction motors used in pumps in the offshore industry, with tests results given by the Frank Mohn AS Company for the motor made by LOHER. Methods used to calculate losses and efficiency considering the old and new methodologies of the IEC norm studied, along with the proposal to update the test method for motors used in electric pumps of the Frank Mohn AS Company, are the object of this work.

Key Words: Induction Motor, Efficiency, IEC 60034-2 Standard

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS	2
LISTA DE SÍMBOLOS	3
1 INTRODUÇÃO	4
2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS EDIÇÕES DA NORMA IEC 60034-2, DE 1972 E 2007	7
2.1 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO ATRAVÉS DA NORMA IEC 60034-2 (1972)	13
2.2 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO ATRAVÉS DA NORMA IEC 60034-2-1 (2007)	15
3 APLICAÇÃO EM CASO TESTE	17
3.1 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO APLICANDO A NORMA IEC 60034-2 (1972)	17
3.1.1 Determinação do rendimento pelo método de medição direta	17
3.1.2 Determinação do rendimento pelo método de medição indireta	18
3.2 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO APLICANDO A NORMA IEC 60034-2-1 (2007)	22
3.2.1 Determinação do rendimento pelo método de medição direta	22
3.2.2 Determinação do rendimento pelo método de medição indireta	23
4 CONCLUSÃO	29
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31
ANEXO I	32
ANEXO II	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço das perdas na máquina de indução	9
Figura 2 - Gráfico para determinação da perda adicional	11
Figura 3 - Gráfico para determinação das perdas mecânicas (atrito/ventilação).....	19
Figura 4 – Corrente x Tensão (ensaio sem carga)	33
Figura 5 – Rendimento x Conjugado (ensaio com carga)	35
Figura 6 – Fator de potência x Conjugado (ensaio com carga).....	35
Figura 7 – Corrente e escorregamento x Conjugado (ensaio com carga).....	36
Figura 8 - Arranjo típico do sistema motor/bomba	37
Figura 9 - Esquema Motor/Bomba de Captação	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre os rendimentos de três motores	12
Tabela 2 - Comparação entre o rendimento calculado de acordo com as normas IEC (1972 e 2007)	28
Tabela 3 – Esboço da planilha desenvolvida para gerar os cálculos do rendimento (ensaio sem carga).....	32
Tabela 4 – Esboço da planilha desenvolvida para gerar os cálculos do rendimento (ensaio com carga).....	34

LISTA DE SÍMBOLOS

f	frequência nominal, Hz
I	corrente de linha, A
n	velocidade de operação, rad/s
p	número de par de polos
P_0	potência de entrada do motor sem carga, W
P_{el}	potência de entrada, W
P_{mec}	potência de saída, W
P_{fe}	perda no ferro, W
P_{fw}	perda por atrito e ventilação, W
P_k	perda magnética no núcleo, W
P_{LL}	perda adicional, W
P_{Lr}	perda residual, W
P_r	perda ôhmica no enrolamento do rotor, W
P_s	perda ôhmica no enrolamento do estator, W
P_T	perda total, W
R_s	resistência do enrolamento do estator, Ω
s	escorregamento, valor por unidade da velocidade síncrona
U	tensão terminal, V
U_N	tensão terminal nominal, V
η	rendimento

1 INTRODUÇÃO

A partir das tarefas desenvolvidas e da vivência como estagiário na empresa Frank Mohn do Brasil, do grupo Frank Mohn AS Noruega, viu-se que era necessária uma atualização no procedimento da empresa baseado na norma IEC 60034-2 (1972), para a determinação do rendimento dos motores elétricos utilizados em suas bombas de captação de água.

As normas devem, portanto, garantir que os métodos de ensaio e informações sobre o desempenho energético sejam confiáveis, tornando-se essenciais às medidas políticas e econômicas destinadas ao aumento da eficiência energética das máquinas elétricas, incluindo a adoção de novas tecnologias.

A metodologia utilizada na elaboração deste projeto de graduação é o estudo da norma relacionada com a determinação do rendimento e das perdas do motor de indução. Novos métodos para calcular o rendimento são abordados no contexto atual com os quais se desejam chegar à redução das perdas elétricas.

A norma aplicada ao trabalho é da Comissão Eletrotécnica Internacional (do inglês IEC), principal organização mundial que prepara e publica Normas Internacionais relacionadas às tecnologias das áreas elétrica e eletrônica. O trabalho discorre sobre a norma identificada como IEC 60034-2-1 (2007) que substitui e cancela a anterior IEC 60034-2 (1972) e suas emendas 1 (1995) e 2 (1996), sendo amplamente utilizada por diversos fabricantes e usuários de máquinas elétricas.

Diante das modificações nas normas, é necessário aplicá-las a um caso teste para verificar o impacto sobre os valores de rendimento que o fabricante atribuirá ao seu motor. Para isso a empresa Frank Mohn AS, uma das principais fabricantes e fornecedoras de Bombas Industriais para o mercado de Petróleo & Gás no mundo,

colabora com este trabalho fornecendo os dados de ensaio do motor de indução trifásico utilizado no acionamento da Bomba Elétrica Submersa de sua fabricação.

A principal modificação na norma IEC 60034-2-1 (2007) é na forma de obtenção das perdas adicionais. A versão mais antiga da norma estimava as perdas adicionais em 0,5% da potência nominal de entrada, enquanto que a norma mais atual apresenta diversos métodos para calcular essas perdas.

Para mostrar como a modificação da norma afeta a Frank Mohn, é importante associar os dados de placa de um equipamento à norma utilizada através do desenvolvimento de um sistema de planilhas para o cálculo do rendimento utilizando a versão mais atual da norma. Estas planilhas poderão ser utilizadas pela empresa para obtenção do rendimento e identificação das perdas nos motores de indução que acionam as Bombas de Captação. Essas bombas são amplamente empregadas para diversos fins, como, por exemplo, sistema de elevação da água do mar para processos de resfriamento, captação de água para sistemas de injeção de processos ou outras aplicações para plataformas offshore, navios e instalações terminais. Desta forma é necessário reescrever o procedimento da empresa para se adequar ao novo padrão IEC 60034-2-1 (2007).

Neste capítulo, é apresentada uma introdução do trabalho desenvolvido, identificando o problema em questão, a importância das normas em geral, e como o trabalho está organizado.

O Capítulo 2 apresentará as mudanças da norma relacionadas ao trabalho, o porquê da utilização da norma para determinação do rendimento e como os cálculos são realizados considerando a norma antiga e nova.

Em seguida, serão mostrados os resultados do rendimento encontrado através da aplicação das normas. Os dados dos ensaios do motor foram realizados por engenheiros colaboradores deste trabalho na Noruega.

O Capítulo 4 conclui o trabalho com as considerações finais sobre a importância do uso das normas para determinação do rendimento das máquinas elétricas, mostrando o impacto no rendimento dos motores de indução considerando a forma da determinação das perdas de carga adicional.

2 ANÁLISE COMPARATIVA DAS EDIÇÕES DA NORMA IEC 60034-2, DE 1972 E 2007

A Norma IEC 60034-2-1 (2007) estudada neste trabalho é um padrão para Determinação das Perdas e Rendimento de Máquinas Elétricas Rotativas, excluindo Máquinas para Veículos de Tração. Esta norma é de aplicação internacional, embora existam diferentes padrões para determinação do rendimento de máquinas, como por exemplo, a IEEE 112 (2004) e a IEC 61972 (2002).

O objetivo desta norma é estabelecer métodos para determinação do rendimento e as perdas em máquinas CC, máquinas síncronas e máquinas de indução.

A Comissão Eletrotécnica Internacional introduziu a nova norma IEC 60034-2-1 (2007) cancelando e substituindo a anterior, IEC 60034-2 (1972). A IEC 60034-2-1 (2007) conhecida também como EN 60034-2-1 em nível CENELEC (Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica), que entrou em vigor em Setembro de 2007, introduz novas regras relativas aos métodos de ensaio a ser utilizado para determinação das perdas e eficiência. Os valores do rendimento resultantes diferem daqueles obtidos com base na norma anterior, IEC 60034-2 (1972).

Esta norma surgiu por causa da grande diferença nos resultados do rendimento obtidos dependendo da norma utilizada pelos fabricantes, onde houve a necessidade de unificar os critérios para determinação do rendimento.

A principal mudança na norma IEC 60034-2-1 (2007) é com relação à obtenção das perdas adicionais. Enquanto que na norma mais antiga as perdas adicionais eram estimadas em 0,5% da potência nominal absorvida, a norma mais atual apresenta diversos métodos para calcular essas perdas.

Este trabalho aplica a norma aos motores de indução, com o rendimento definido como a razão entre a potência de saída (mecânica) P_{mec} e a potência de entrada (elétrica) P_{el} , podendo ser medido ou determinado de forma direta ou indireta.

De acordo com a IEC 60034-2-1 (2007) o rendimento determinado a partir da medição direta envolve o cálculo da potência de entrada elétrica em função da tensão e das correntes fornecidas, e a potência mecânica de saída determinada em função da velocidade de rotação e do conjugado no eixo.

$$\eta(\%) = \frac{P_{mec}}{P_{el}} \times 100 \quad (1)$$

A partir da medição indireta o rendimento de acordo com a norma IEC 60034-2-1 (2007) é calculado considerando todas as perdas do motor.

$$\eta(\%) = \frac{P_{el} - P_T}{P_{el}} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

$$P_T = P_{fw} + P_{fe} + P_s + P_r + P_{LL} \quad (3)$$

P_T é a soma de todas as perdas do motor de indução.

As perdas do motor de indução levadas em consideração para o cálculo do rendimento no método da medição indireta, podem ser divididas como a seguir:

1- Perdas por atrito e ventilação (P_{fw}): São as perdas causadas pela fricção e todas as perdas aerodinâmicas devido ao atrito nas partes móveis da máquina, incluindo a energia absorvida pelos ventiladores acoplados ao eixo.

2- Perdas ôhmicas nos enrolamentos (P_s e P_r): No caso de uma máquina de indução são as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor.

3- Perdas no ferro (P_{fe}): Perdas devido às correntes parasitas e histerese.

4- Perdas adicionais (P_{LL}): Perdas causadas pela corrente de carga no ferro e em outras peças de metal com exceção dos enrolamentos condutores.

A figura 1 mostra um esquema representativo das perdas descritas para o motor de indução.

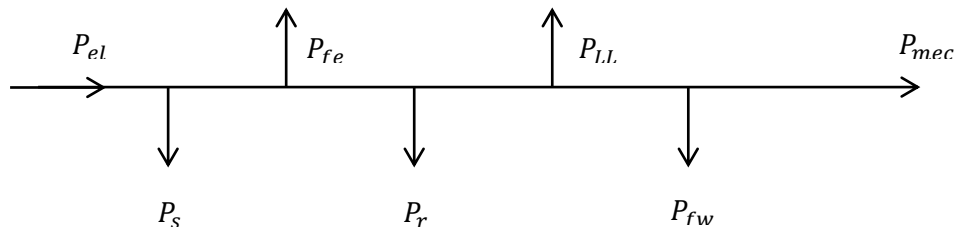


Figura 1 - Balanço das perdas na máquina de indução

As três primeiras perdas podem ser determinadas a partir da potência de entrada, tensão, corrente, velocidade de rotação e do conjugado do motor. Já a perda adicional (P_{LL}) apresenta certa dificuldade para ser calculada. A norma IEC 60034-2-1 (2007) especifica diferentes métodos para o cálculo dessa perda envolvendo níveis de incerteza

baixo, médio ou alto. Essa incerteza representa a precisão com que o rendimento pode ser calculado.

De acordo com a IEC 60034-2-1 (2007) a perda adicional (P_{LL}) pode ser determinada das seguintes formas:

1- A partir da perda residual (P_{Lr}): A perda residual deve ser determinada para cada ponto de carga de acordo com a equação (4). Este método possui uma incerteza baixa e com ele consegue-se verificar as perdas para melhorar o rendimento do motor.

$$P_{Lr} = P_{el} - P_{mec} - P_s - P_r - P_{fe} - P_{fw} \quad (4)$$

2- A partir do valor atribuído: O valor da perda adicional (P_{LL}) pode ser determinado como uma porcentagem da potência de entrada P_{el} utilizando a figura 2. A incerteza deste método varia de média a alta. Para diferentes valores da potência mecânica nominal do motor (P_{mec}) a perda adicional é calculada de acordo com as seguintes equações:

$$\text{Para } P_{mec} \leq 1 \text{ kW: } P_{LL} = P_{el} \times 0,025 \quad (5)$$

$$\text{Para } 1 \text{ kW} \leq P_{mec} \leq 10000 \text{ kW: } P_{LL} = P_{el} \times \left[0,025 - 0,005 \times \log_{10} \left(\frac{P_{mec}}{1 \text{ kW}} \right) \right] \quad (6)$$

$$\text{Para } P_{mec} \geq 10000 \text{ kW: } P_{LL} = P_{el} \times 0,005 \quad (7)$$

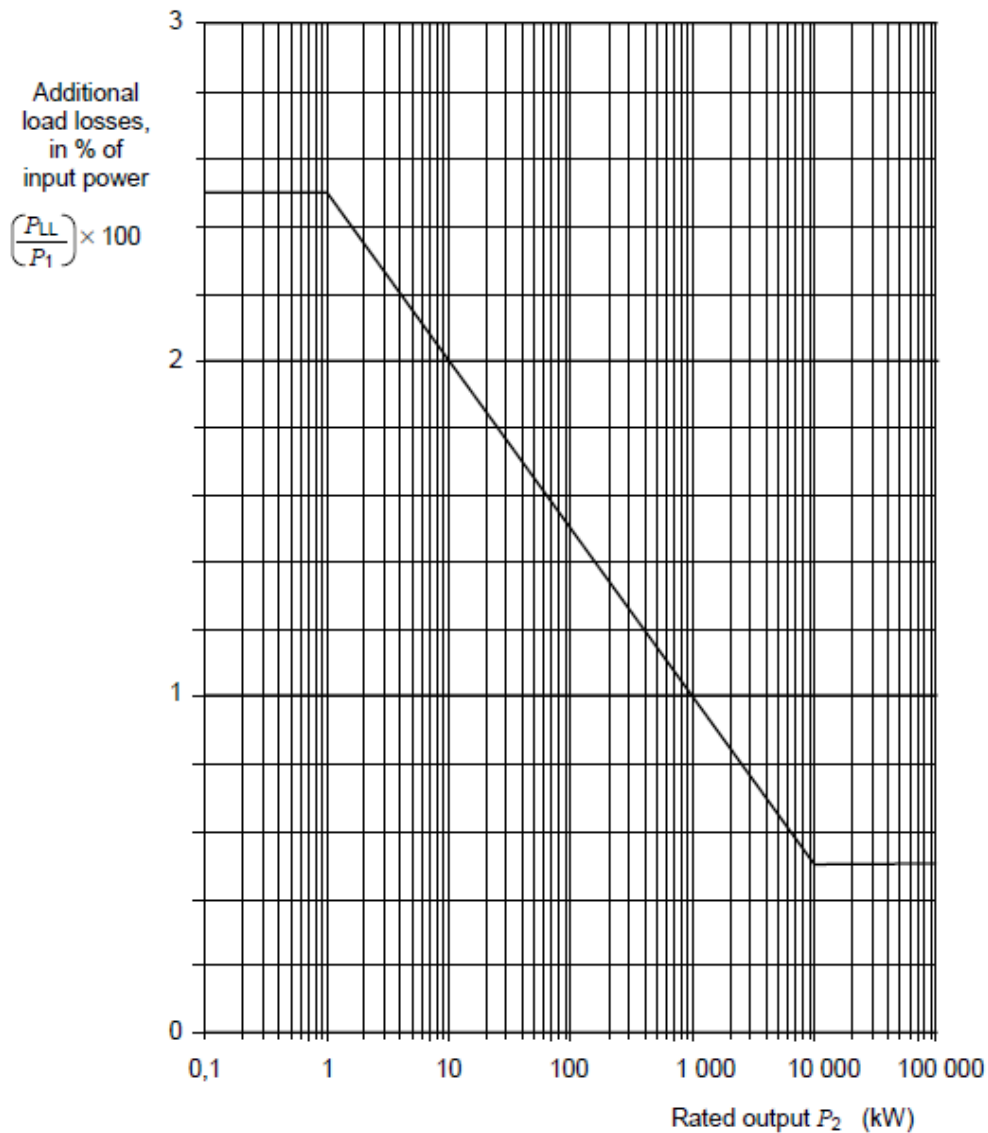


Figura 2 - Gráfico para determinação da perda adicional

Nota-se uma pequena melhoria em relação ao procedimento da versão da norma antiga, que considerava $P_{LL} = 0,5\% \times P_{el}$.

3- A partir dos ensaios com rotor removido e rotação inversa: São dois ensaios feitos separadamente. Com o rotor removido é possível identificar as perdas de carga adicional na frequência fundamental; com o motor girando na velocidade síncrona e contrária ao campo magnético (rotação inversa) encontram-se as perdas adicionais para

elevadas frequências. Devido ao método possuir alto nível de incerteza ele raramente é utilizado para a determinação da perda de carga adicional.

4- A partir do ensaio com ligação estrela: A determinação da perda adicional por este método de incerteza média é adequado para motores entre 1 e 150 kW. O método necessita que o enrolamento do estator seja conectado em estrela (Y).

O presente trabalho utilizou o método do valor atribuído para determinação das perdas de carga adicionais (P_{LL}).

Para exemplificar a diferença do rendimento encontrado considerando as normas antiga e nova, a tabela 1 (ABB, 2009) mostra valores para três diferentes potências de motores de indução.

Tabela 1 - Comparação entre os rendimentos de três motores

Potência de Saída Nominal	IEC 60034-2: 1972	IEC 60034-2-1: 2007
7,5 kW, motor de 2 polos	88,4%	87,9%
11 kW, motor de 4 polos	90,9%	90,3%
160 kW, motor de 4 polos	96,0%	95,4%

Para os valores encontrados na tabela 1, o fabricante ABB (2009) apresenta os valores do rendimento de acordo com o método indireto e as perdas adicionais determinadas pelo método da perda residual, pois é um método com baixa incerteza.

Uma análise comparativa entre valores de rendimento fornecidos por diferentes fabricantes de motores só pode ser feita se o mesmo método for utilizado.

As seções 2.1 e 2.2 a seguir apresentarão como é determinado o rendimento de forma mais aprofundada.

2.1 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO ATRAVÉS DA NORMA IEC 60034-2 (1972)

O rendimento calculado através da norma IEC 60034-2 (1972) difere da norma mais recente quando se utiliza o método de medição indireta. De acordo com a norma (IEC 60034-2 1972) a perda adicional é calculada a partir de 0,5% da potência nominal absorvida. Desta forma, os valores do rendimento apresentam baixo nível de precisão.

Quando se deseja determinar o valor do rendimento a partir das perdas do motor, estas devem ser consideradas através do método de medição indireta. De acordo com a IEC (1972), as perdas totais podem ser divididas conforme a seguinte equação:

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL} \quad (8)$$

Onde:

$$P_k = P_{fw} + P_{fe} \quad (9)$$

$$P_k = P_{el} - (3 \times R_s \times I^2) \quad (10)$$

1- Perdas magnéticas (P_k): São as perdas no ferro e perdas por atrito/ventilação podendo ser determinadas de três maneiras, ensaio sem carga com tensão nominal, ensaio com máquina calibrada e por último, ensaio sem carga com tensão variável e frequência nominal. Para o cálculo das perdas constantes, este trabalho usará o ensaio sem carga com tensão variável e frequência nominal.

2- Perdas ôhmicas nos enrolamentos (P_s e P_r): São as perdas quando a máquina está operando com carga acoplada ao seu eixo. Essas perdas são divididas no

enrolamento primário (estator) e no enrolamento secundário (rotor). Esta perda pode ser determinada pelo ensaio com carga, através de valores calculados ou pelo ensaio em carga com tensão reduzida. O trabalho utiliza o ensaio com carga para determinação dessa perda.

$$P_s = 3 \times I^2 \times R_s \quad (11)$$

$$P_r = P_{g1} \times s \quad (12)$$

$$P_{g1} = P_{el} - P_s - P_{fe} \quad (13)$$

$$s = 1 - \frac{p n}{2 \times \pi \times f} \quad (14)$$

3- Perdas adicionais (P_{LL}): A IEC 60034-2 (1972) trata desta perda como sendo 0,5% da potência de entrada do motor operando em 50, 75 e 100% da carga nominal.

$$P_{LL} = 0,5\% \times P_{el} \quad (15)$$

Com os valores das perdas calculados é possível determinar o rendimento pela equação (2).

2.2 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO ATRAVÉS DA NORMA IEC 60034-2-1 (2007)

Na norma mais recente (IEC 60034-2-1, 2007), o rendimento é calculado com 25, 50, 75, 100 e 160% da carga (em referência ao conjugado nominal) através do método de medição direta de acordo com a equação (1).

Já o cálculo do rendimento através da medida indireta envolve a determinação da perda total, conforme a equação (2).

As perdas podem ser somadas conforme a seguinte equação:

$$P_T = P_k + P_s + P_r + P_{LL} = P_{fw} + P_{fe} + P_s + P_r + P_{LL} \quad (16)$$

Onde:

P_k , perdas magnéticas;

P_s e P_r , perdas ôhmicas nos enrolamentos do estator e rotor;

P_{LL} , perda adicional.

1- As perdas magnéticas são as perdas por atrito/ventilação (perdas mecânicas) somadas às perdas no ferro, dadas pelo ensaio sem carga conforme a equação (9).

As perdas por atrito e ventilação são determinadas a partir do ensaio do motor sem carga (em vazio). A potência elétrica absorvida, menos as perdas $R \times I^2$ no enrolamento primário, é plotada versus o quadrado da tensão. Este, em baixos valores de saturação, dará uma linha reta que pode ser extrapolada ao zero de tensão para dar a soma das perdas mecânicas. Os cálculos e os gráficos serão mostrados no Capítulo 3.

As perdas no ferro P_{fe} são determinadas conforme a seguinte equação:

$$P_{fe} = P_k - P_{fw} \quad (17)$$

2- As perdas ôhmicas nos enrolamentos do estator e rotor são calculadas a partir do ensaio do motor com carga de acordo com as equações (11), (12), (13) e (14).

3- As perdas adicionais podem ser determinadas por um dos quatro métodos citados no início do Capítulo 2. Com os dados de ensaio analisados, o valor das perdas adicionais P_{LL} , em carga nominal, pode ser determinado como uma porcentagem da potência de entrada P_{el} usando a curva da figura 2 e as equações (5), (6) e (7).

A perda adicional calculada a partir da norma mais atual apresenta valores diferentes da norma antiga, pois esta considera a P_{LL} dependendo da potência de saída do motor.

3 APLICAÇÃO EM CASO TESTE

Neste capítulo, serão apresentados os resultados dos ensaios realizados e os cálculos do rendimento do motor de indução utilizando as normas antiga e nova nas seções 3.1 e 3.2, respectivamente. Será apresentada uma tabela para mostrar a diferença entre os valores do rendimento encontrados.

A folha de dados do motor foi fornecida pela empresa para que fosse possível realizar os cálculos do rendimento. Trata-se de um motor especial do fabricante LOHER (Siemens Company) de 4 polos, 900 kW de potência nominal de saída, tensão nominal de 6600 V, conectado em estrela (Y), frequência de 50 Hz e velocidade 1477 rpm. A corrente e o conjugado nominal são iguais a 105 A e 5822 Nm, respectivamente.

Como não havia a possibilidade de obter o motor para determinar os parâmetros no Brasil, o ensaio do motor utilizado no acionamento da Bomba Elétrica Submersa, da Frank Mohn AS, foi realizado por engenheiros e técnicos na Noruega e os valores mostrados no Anexo.

3.1 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO APLICANDO A NORMA IEC 60034-2 (1972)

Os cálculos serão apresentados em duas seções a seguir mostrando a diferença entre os métodos de medição direta e indireta.

3.1.1 Determinação do rendimento pelo método de medição direta

O rendimento deve ser estabelecido para diferentes pontos de carga em 50, 75 e 100% do conjugado nominal do motor de acordo com a IEC 60034-2 (1972).

(i) 50% da carga:

$$\eta = \frac{451}{502} \times 100 = 90,1\% \quad (18)$$

(ii) 75% da carga:

$$\eta = \frac{670}{726} \times 100 = 92,3\% \quad (19)$$

(iii) 100% da carga:

$$\eta = \frac{904}{973} \times 100 = 93,0\% \quad (20)$$

3.1.2 Determinação do rendimento pelo método de medição indireta

De acordo com a norma (IEC 60034-2, 1972) as perdas são calculadas separadamente e depois somadas compondo a perda total do motor.

1- Perdas magnéticas: As perdas magnéticas são calculadas através do ensaio do motor sem carga, e é igual a soma das perdas mecânicas (atrito/ventilação) e perdas no ferro como na equação (10).

$$P_k = P_{el} - (3 \times R \times I^2) = 42 \text{ kW} - \left(\frac{3 \times 0,426 \times 31,3^2}{1000} \right) = 40,7 \text{ kW} \quad (21)$$

As perdas mecânicas (P_{fw}) são obtidas da figura (3) pela interseção da reta com o eixo das perdas, em $\left(\frac{U}{U_N}\right)^2 = 0$.

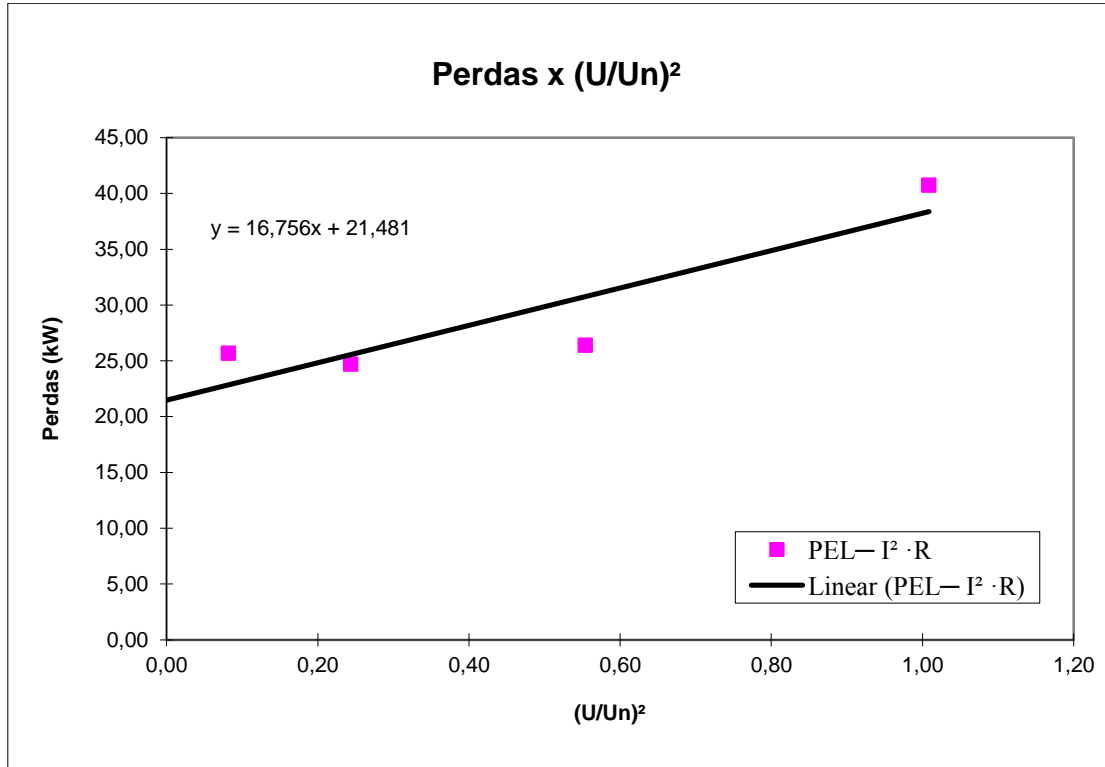


Figura 3 - Gráfico para determinação das perdas mecânicas (atrito/ventilação)

$$P_{fw} = 21,5 \text{ kW} \quad (22)$$

As perdas no ferro são calculadas a partir da equação (17).

$$P_{fe} = 40,7 - 21,5 = 19,2 \text{ kW} \quad (23)$$

2- Perdas ôhmicas nos enrolamentos: As perdas ôhmicas são as perdas nos enrolamentos do estator e do rotor, calculadas a partir do ensaio do motor para três valores de carga através das equações (11), (12) e (13).

(i) 50% da carga:

$$P_s = 3 \times 60^2 \times 0,4954 = 5,35 \text{ kW} \quad (24)$$

$$P_r = (502 - 5,35 - 19,2) \times 0,006 = 2,86 \text{ kW} \quad (25)$$

(ii) 75% da carga:

$$P_s = 3 \times 80^2 \times 0,4954 = 9,51 \text{ kW} \quad (26)$$

$$P_r = (726 - 9,51 - 19,2) \times 0,01 = 6,97 \text{ kW} \quad (27)$$

(iii) 100% da carga:

$$P_s = 3 \times 104^2 \times 0,4954 = 16,07 \text{ kW} \quad (28)$$

$$P_r = (973 - 16,07 - 19,2) \times 0,012 = 11,25 \text{ kW} \quad (29)$$

3- Perdas adicionais: As perdas adicionais são calculadas de acordo com a norma (IEC 60034-2, 1972), atribuindo a esta 0,5% da potência de entrada.

(i) 50% da carga:

$$P_{LL} = 0,005 \times 502 = 2,51 \text{ kW} \quad (30)$$

(ii) 75% da carga:

$$P_{LL} = 0,005 \times 726 = 3,63 \text{ kW} \quad (31)$$

(iii) 100% da carga:

$$P_{LL} = 0,005 \times 973 = 4,87 \text{ kW} \quad (32)$$

A perda total será dada para cada ponto de carga pela equação (16).

(i) 50% da carga:

$$P_T = 21,5 + 19,2 + 5,35 + 2,86 + 2,51 = 51,42 \text{ kW} \quad (33)$$

(ii) 75% da carga:

$$P_T = 21,5 + 19,2 + 9,51 + 6,97 + 3,63 = 60,81 \text{ kW} \quad (34)$$

(iii) 100% da carga:

$$P_T = 21,5 + 19,2 + 16,07 + 11,25 + 4,87 = 72,89 \text{ kW} \quad (35)$$

4- Rendimento: o cálculo do rendimento é realizado para cada ponto de carga aplicando a equação (2).

(i) 50% da carga:

$$\eta = \frac{502 - 51,42}{502} \times 100 = 89,76\% \quad (36)$$

(ii) 75% da carga:

$$\eta = \frac{726 - 60,81}{726} \times 100 = 91,62\% \quad (37)$$

(iii) 100% da carga:

$$\eta = \frac{973 - 72,89}{973} \times 100 = 92,51\% \quad (38)$$

3.2 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO APLICANDO A NORMA IEC 60034-2-1 (2007)

Os cálculos e os resultados do rendimento de acordo com a norma IEC 60034-2-1 (2007) serão apresentados a partir da utilização dos dois métodos de medição, direta e indireta.

3.2.1 Determinação do rendimento pelo método de medição direta

O rendimento deve ser estabelecido para diferentes pontos de carga em 25, 50, 75, 100 e 160% do conjugado nominal do motor de acordo com a IEC 60034-2-1 (2007).

Utilizando a equação (1), o valor do rendimento para o motor de indução apresentado é:

(i) 25% da carga:

$$\eta = \frac{227}{264} \times 100 = 85,98\% \quad (39)$$

(ii) 50% da carga:

$$\eta = \frac{451}{502} \times 100 = 89,84\% \quad (40)$$

(iii) 75% da carga:

$$\eta = \frac{670}{726} \times 100 = 92,29\% \quad (41)$$

(iv) 100% da carga:

$$\eta = \frac{904}{973} \times 100 = 92,91\% \quad (42)$$

(v) 160% da carga:

$$\eta = \frac{1468}{1593} \times 100 = 92,15\% \quad (43)$$

3.2.2 Determinação do rendimento pelo método de medição indireta

O rendimento pelo método de medição indireta é calculado pela equação (2) e as perdas totais de acordo com a equação (3).

1- Perdas magnéticas: Essas perdas são determinadas da mesma forma como na seção 3.1.2.

$$P_k = P_{el} - (3 \times R \times I^2) = 42 \text{ kW} - \left(\frac{3 \times 0,426 \times 31,3^2}{1000} \right) = 40,7 \text{ kW} \quad (44)$$

As perdas mecânicas são obtidas a partir da figura (3).

$$P_{fw} = 21,5 \text{ kW} \quad (45)$$

As perdas no ferro são calculadas a partir da equação (17).

$$P_{fe} = 40,7 - 21,5 = 19,2 \text{ kW} \quad (46)$$

2- Perdas ôhmicas nos enrolamentos do estator e rotor: As perdas também são determinadas como na seção 3.1.2 através das equações (11), (12) e (13).

(i) 25% da carga:

$$P_s = 3 \times 42^2 \times 0,4954 = 2,62 \text{ kW} \quad (47)$$

$$P_r = (264 - 2,62 - 19,2) \times 0,00333 = 0,81 \text{ kW} \quad (48)$$

(ii) 50% da carga:

$$P_s = 3 \times 60^2 \times 0,4954 = 5,35 \text{ kW} \quad (49)$$

$$P_r = (502 - 5,35 - 19,2) \times 0,006 = 2,86 \text{ kW} \quad (50)$$

(iii) 75% da carga:

$$P_s = 3 \times 80^2 \times 0,4954 = 9,51 \text{ kW} \quad (51)$$

$$P_r = (726 - 9,51 - 19,2) \times 0,01 = 6,97 \text{ kW} \quad (52)$$

(iv) 100% da carga:

$$P_s = 3 \times 104^2 \times 0,4954 = 16,07 \text{ kW} \quad (53)$$

$$P_r = (973 - 16,07 - 19,2) \times 0,012 = 11,25 \text{ kW} \quad (54)$$

(v) 160% da carga:

$$P_s = 3 \times 173^2 \times 0,4954 = 44,48 \text{ kW} \quad (55)$$

$$P_r = (1593 - 44,48 - 19,2) \times 0,022 = 33,64 \text{ kW} \quad (56)$$

3- Perdas adicionais: A norma IEC 60034-2-1 (2007) define que as perdas adicionais devem ser calculadas utilizando-se um dos métodos descritos no capítulo 2. Com os dados obtidos para elaboração deste trabalho foi empregado o método do valor atribuído de acordo com a figura 2. Por se tratar de um motor com potência de saída nominal de 900 kW a equação (6) fornece o valor da perda adicional P_{LL} para $1 \text{ kW} \leq P_{mec} \leq 10000 \text{ kW}$.

(i) 25% da carga:

$$P_{LL} = 264 \times [0,025 - 0,005 \times \log 227] = 3,49 \text{ kW} \quad (57)$$

(ii) 50% da carga:

$$P_{LL} = 502 \times [0,025 - 0,005 \times \log 451] = 5,89 \text{ kW} \quad (58)$$

(iii) 75% da carga:

$$P_{LL} = 726 \times [0,025 - 0,005 \times \log 670] = 7,89 \text{ kW} \quad (59)$$

(iv) 100% da carga:

$$P_{LL} = 973 \times [0,025 - 0,005 \times \log 904] = 9,94 \text{ kW} \quad (60)$$

(v) 160% da carga:

$$P_{LL} = 1593 \times [0,025 - 0,005 \times \log 1468] = 14,60 \text{ kW} \quad (61)$$

4- Perdas Totais: A perda total é o somatório das perdas calculadas nos itens anteriores (1), (2) e (3) para cada ponto de carga aplicando a equação (16).

(i) 25% da carga:

$$P_T = 40,7 + 2,62 + 0,81 + 3,49 = 47,62 \text{ kW} \quad (62)$$

(ii) 50% da carga:

$$P_T = 40,7 + 5,35 + 2,86 + 5,89 = 54,8 \text{ kW} \quad (63)$$

(iii) 75% da carga:

$$P_T = 40,7 + 9,51 + 6,97 + 7,89 = 65,07 \text{ kW} \quad (64)$$

(iv) 100% da carga:

$$P_T = 40,7 + 16,07 + 11,25 + 9,94 = 77,96 \text{ kW} \quad (65)$$

(v) 160% da carga:

$$P_T = 40,7 + 44,48 + 33,64 + 14,60 = 133,42 \text{ kW} \quad (66)$$

4- Rendimento: o cálculo do rendimento é realizado para cada ponto de carga aplicando a equação (2).

(i) 25% da carga:

$$\eta = \frac{264 - 47,62}{264} \times 100 = 81,96\% \quad (67)$$

(ii) 50% da carga:

$$\eta = \frac{502 - 54,8}{502} \times 100 = 89,08\% \quad (68)$$

(iii) 75% da carga:

$$\eta = \frac{726 - 65,07}{726} \times 100 = 91,04\% \quad (69)$$

(iv) 100% da carga:

$$\eta = \frac{973 - 77,96}{973} \times 100 = 91,99\% \quad (70)$$

(v) 160% da carga:

$$\eta = \frac{1593 - 133,42}{1593} \times 100 = 91,62\% \quad (71)$$

A tabela 2 mostra os valores do rendimento calculados a partir das normas estudadas. É importante realçar que na norma antiga apenas três pontos de carga eram analisados, enquanto que na norma mais atual este número passou para cinco pontos.

Outra observação que deve ser feita é com relação aos valores do rendimento. Considerando o método de medição indireta dado pela norma IEC (2007), o rendimento apresenta uma pequena diferença no valor para baixo, ou seja, como as perdas de carga adicional são levadas em conta de maneira mais precisa o rendimento também é obtido mais próximo do real.

Tabela 2 - Comparação entre o rendimento calculado de acordo com as normas IEC (1972 e 2007)

CÁLCULO DO RENDIMENTO (%)						
Norma utilizada	Método de medição	Condição de carga (% da carga nominal)				
		25	50	75	100	160
IEC 60034-2 (1972)	Direta		90,10	92,30	93,00	
	Indireta		89,76	91,62	92,51	
IEC 60034-2-1 (2007)	Direta	85,98	89,84	92,29	92,91	92,15
	Indireta	81,96	89,08	91,04	91,99	91,62
Diferença percentual entre as normas	Direta		0,26	0,01	0,09	
	Indireta		0,68	0,58	0,52	

4 CONCLUSÃO

Apresentou-se a “determinação do rendimento do motor elétrico” baseado nas versões antiga e nova da norma IEC 60034-2 (1972 e 2007) como um fator importante da qualidade de transformação da energia elétrica em mecânica nos motores de indução.

Destacou-se que as atualizações nos diversos padrões e normas para ensaio, construção e operação dos motores elétricos são indispensáveis à medida que novas tecnologias são descobertas, pois, desta forma, é possível reduzir o consumo de energia elétrica melhorando a qualidade de vida no mundo.

O trabalho utilizou a norma IEC 60034-2 (1972) e sua atualização mais recente, IEC 60034-2-1 (2007), para determinação do rendimento de motores de indução trifásicos através dos métodos de medição direta e indireta. Em cada método estudado, analisaram-se os diferentes ensaios necessários para obter o rendimento do motor e os métodos para obtenção das perdas adicionais.

Os cálculos foram desenvolvidos para a determinação do rendimento de um Motor de Indução Trifásico Gaiola de 900 kW através dos métodos direto e indireto, que necessitam de medições extremamente precisas dos parâmetros elétricos e mecânicos. Os dados do motor foram fornecidos em cooperação com a empresa Frank Mohn AS na Noruega.

A medição direta, através do cálculo da potência de entrada e saída, e a medição indireta, pelo somatório das perdas, foram propostas a fim de obter uma comparação entre os métodos para cálculo do rendimento.

O principal ponto do trabalho foi verificar que a norma mais atual é usada para obter as perdas adicionais, enquanto que na norma mais antiga as perdas adicionais eram estimadas em 0,5% da potência nominal absorvida (potência elétrica de entrada).

A IEC 60034-2-1 (2007) apresenta três métodos para calcular as perdas adicionais, mas apenas o método da tolerância atribuída foi usado neste trabalho.

De acordo com a SEEEM (Standards for Efficiency of Electric Motors Systems), os motores elétricos utilizados na indústria são responsáveis por aproximadamente 40% da energia consumida no mundo. Os motores acionam bombas, ventiladores, compressores e inúmeros sistemas de tração mecânica. A qualidade do rendimento dessas máquinas varia, principalmente porque os procedimentos de ensaios e as normas não são padronizados no mundo todo. A necessidade de se unificar os critérios e padrões para que a determinação do rendimento em máquinas fosse feita de forma mais precisa levou o IEC a criar essa norma mais atual.

Como conclusão, é importante ressaltar que a documentação do equipamento (motor/gerador) deve indicar o método empregado pelos fabricantes para determinação do rendimento.

Finalizando, seria de grande importância que trabalhos futuros pudessem desenvolver os métodos para o cálculo das perdas adicionais não abordados neste trabalho.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. **Technical note IEC 60034-2-1**: standard on efficiency measurement methods for low voltage AC motors. Zurique, Suíça, 2009.

FRANK MOHN FLATOY AS. **Functional Description of Main Systems**: electric submersible pump caveerne application. Noruega, 2010.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 34-2**: Rotating electrical machines – part 2. Geneva, Suíça, 1972.

_____. **IEC 34-2**: Rotating electrical machines – part 2. Amendment 1. Geneva, Suíça, 1995.

_____. **IEC 34-2**: Rotating electrical machines – part 2. Amendment 2. Geneva, Suíça, 1996.

_____. **IEC 34-2**: Rotating electrical machines – part 2. First supplement to publication 34-2 (1972). Geneva, Suíça, 1974.

_____. **IEC 60034-2-1**: Rotating electrical machines – part 2-1. Geneva, Suíça, 2007.

_____. **IEC 60034-1**: Rotating electrical machines – part 1. Rating and performance. Geneva, Suíça, 2004.

_____. **IEC 61972**: Method for determining losses and efficiency of three-phase cage induction motors. Geneva, Suíça, 2002.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERS. **IEEE 112**: Test procedure for polyphase induction motors and generators. New York, EUA, 2004.

LOHER. **Data Sheet**: ZUMA-315RA-04M. Holanda, 2010.

4E ELECTRIC MOTOR SYSTEMS EMSA. Disponível em: <<http://motorsystems.org/task-g>>. Acesso em: 27 ago. 2011.

STANDARDS FOR ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC MOTOR SYSTEMS. Disponível em: <<http://www.seeem.org/background.php>>. Acesso em: 29 ago. 2011.

ANEXO I

No anexo, são apresentados os esboços das planilhas desenvolvidas no software Excel da Microsoft. O programa auxiliou nos cálculos dos rendimentos baseados nas normas abordadas no trabalho.

A tabela 3 contém os dados do ensaio sem carga, utilizados para calcular as perdas constantes, perdas por atrito e ventilação e conseqüentemente as perdas no ferro.

Tabela 3 – Esboço da planilha desenvolvida para gerar os cálculos do rendimento (ensaio sem carga)

U_N	6600	V		
U (V)	$(U/U_N)^2$	I (A)	P_{EL} (kW)	$P_{EL} - I^2 \cdot R$
6628	1,01	31,3	42	40,75
4912	0,55	21,6	27	26,40
3257	0,24	15	25	24,71
1887	0,08	15,6	26	25,69
Resist. do enrol. (estator)		0,4260 Ω		
	P_0	=	42,0 kW	100%
	P_{MEC}	=	21,5 kW	51%
	P_{CU}	=	1,3 kW	3%
	P_{Fe}	=	19,2 kW	46%

A figura 4, apenas de caráter informativo, apresenta o valor da corrente elétrica em função da tensão no ensaio sem carga.

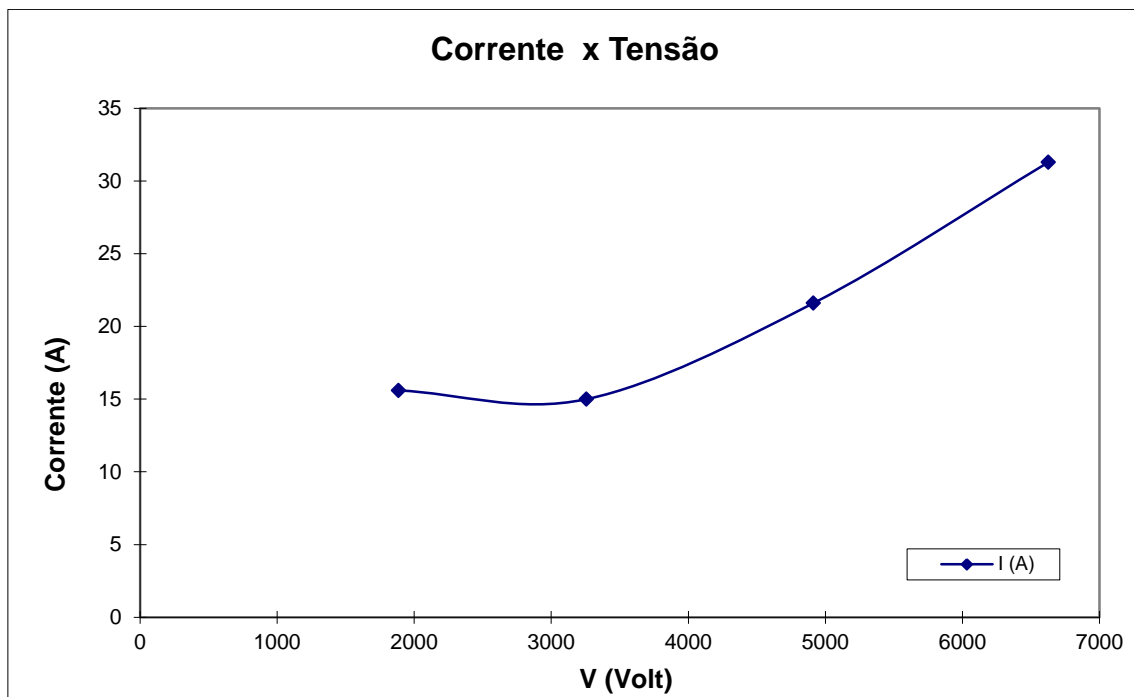


Figura 4 – Corrente x Tensão (ensaio sem carga)

Tabela 4 – Esboço da planilha desenvolvida para gerar os cálculos do rendimento (ensaio com carga)

Bomba	201080						
Motor	3400402						
P_nom	900 kW						
U_nom	6600 V						
I_nom	105 A						
T_nom	5822 Nm						
	495,4 mΩ	resistência do enrolamento em carga					
Ensaio com carga							
Conjugado (Nm)	T/Tn	P₂ (kW)	P₁ (kW)	P₂/P_n	I (A)	I/I_n	FP_{dado}*
9556	1,64	1468	1593	1,63	173	1,648	
5833	1,00	904	973	1,00	104	0,990	0,820
4313	0,74	670	726	0,74	80	0,762	0,800
2896	0,50	451	502	0,50	60	0,571	0,720
1454	0,25	227	264	0,25	42	0,400	
* dado pelo fabricante do motor							
s	FP_{medido}						
2,200 %	0,805						
1,200 %	0,820						
1,000 %	0,795						
0,600 %	0,732						
0,333 %	0,554						
			P_{LL} (kW) IEC 1972	P_T (kW)	η (%) (direto) IEC 1972	η (%) (indireto) IEC 1972	
			7,34	126,21	92,20	92,08	
			4,52	72,59	93,00	92,54	
			3,35	60,58	92,30	91,66	
			2,26	51,22	90,10	89,80	
			1,14	45,31	86,10	82,84	
P_k (kW)	P_s (kW)	P_r (kW)					
40,75	44,48	33,64					
40,75	16,07	11,25					
40,75	9,51	6,97					
40,75	5,35	2,86					
40,75	2,62	0,81					
			P_{LL} (kW) IEC 2007	P_T (kW) IEC 2007	η (%) (direto) IEC 2007	η (%) (indireto) IEC 2007	
			14,60	133,47	92,15	91,62	
			9,94	78,02	92,91	91,98	
			7,89	65,12	92,29	91,03	
			5,89	54,85	89,84	89,07	
			3,49	47,67	85,98	81,94	

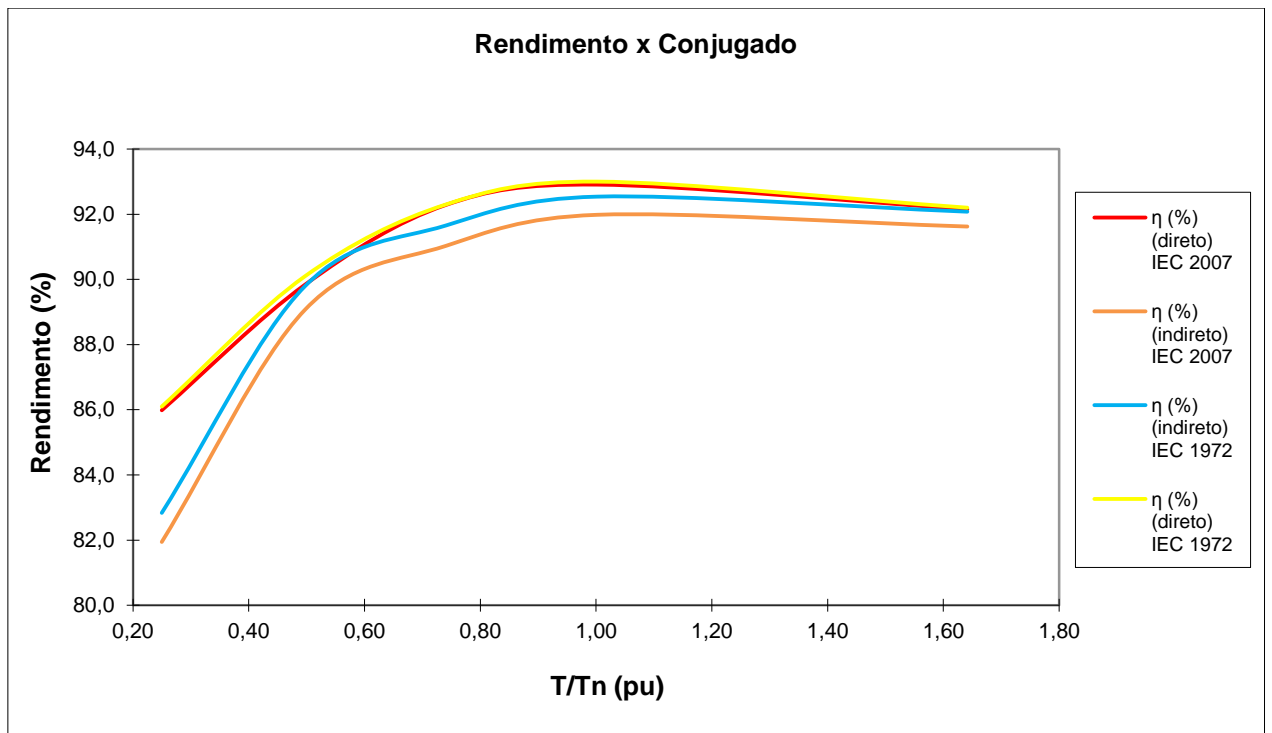


Figura 5 – Rendimento x Conjugado (ensaio com carga)

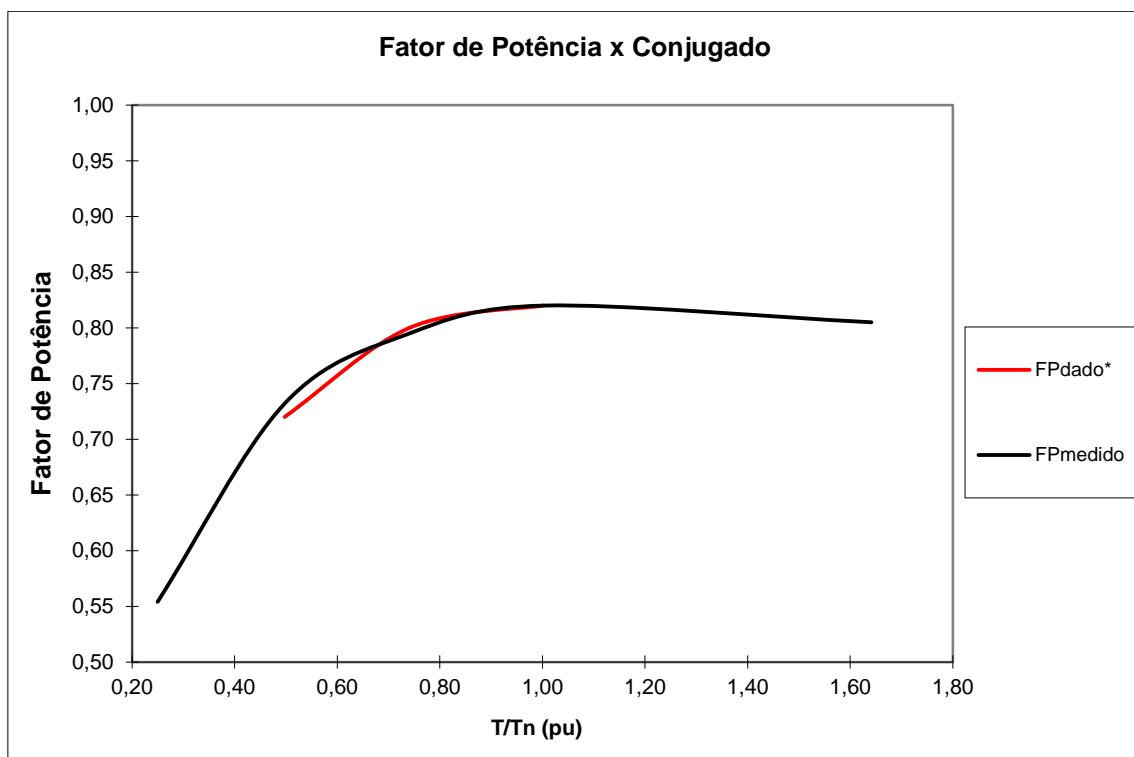


Figura 6 – Fator de potência x Conjugado (ensaio com carga)

* FP da folha de dados do motor ensaiado (LOHER, 2010)

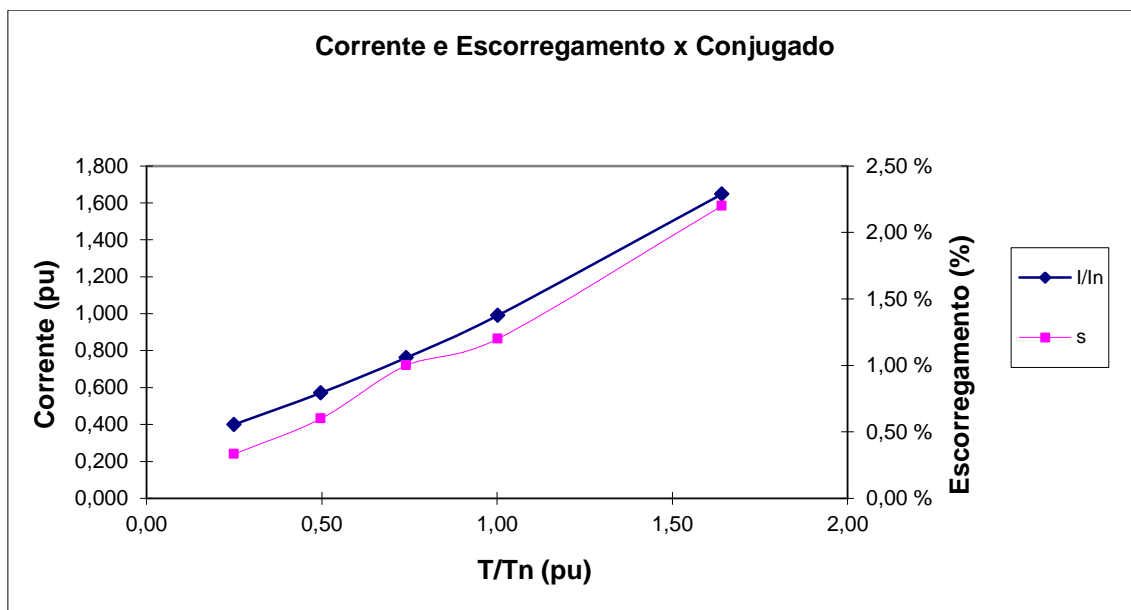


Figura 7 – Corrente e escorregamento x Conjugado (ensaio com carga)

A tabela 4 fornece os dados do ensaio com carga para determinação do rendimento através das normas antiga e nova, utilizando os métodos de medição direta e indireta e a determinação da perda adicional pelo método do valor atribuído.

A figura 5 mostra a comparação dos valores do rendimento calculados pelas normas IEC (1972 e 2007) através dos métodos direto e indireto de medição.

As figuras 6 e 7 também são mostradas apenas para caráter informativo. A figura 6 apresenta a comparação entre o fator de potência dado na folha de dados do motor e o fator de potência medido durante o ensaio de carga. A figura 7 mostra como a corrente e o escorregamento cresce à medida que o conjugado aumenta.

ANEXO II

Este anexo apresenta a descrição geral do sistema da Bomba de Captação SE

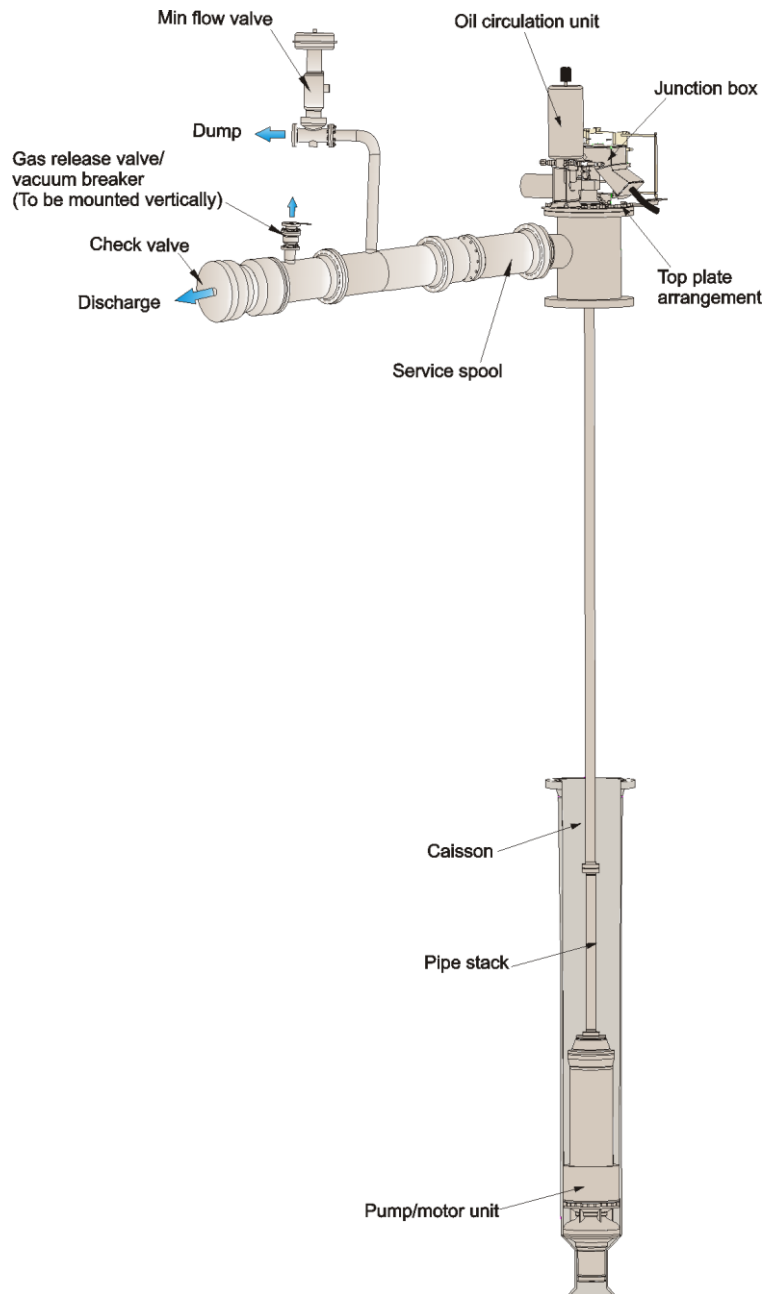


Figura 8 - Arranjo típico do sistema motor/bomba

Como mostrado na figura 8, a Bomba Elétrica Submersa é composta por quatro partes principais:

- Unidade motor/bomba, *Pump/Motor Unit*
- Conjunto de tubulação com sistema integrado de transmissão de energia elétrica, *pipe stack*
- Caixa de junção elétrica, *junction box*
- Unidade de circulação de óleo refrigerador, *oil circulation unit*

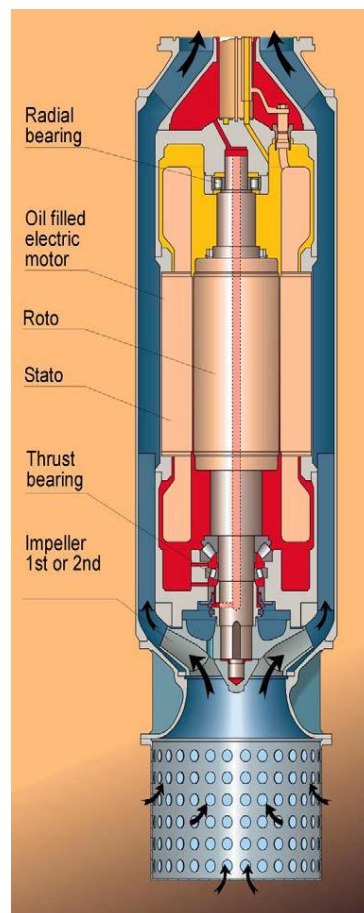


Figura 9 - Esquema Motor/Bomba de Captação

A bomba centrífuga de dois estágios é acionada eletricamente e possui sucção na extremidade inferior do conjunto moto/bomba.

O sistema integrado de transmissão de energia elétrica é um recurso exclusivo para as bombas elétricas submersas. Os condutores elétricos de cobre são ocultos para

permitir o retorno do óleo de refrigeração de sistema e são montados dentro de um tubo protetor (tubulação de óleo) por meio de um sistema de isolamento.

As seções da tubulação são fixadas através de flanges para compor o comprimento necessário da bomba.

A unidade de circulação de óleo fornece um monitoramento da condição da unidade moto/bomba submersa. A temperatura, pressão, pureza do óleo, controle de vazamento nas vedações são dados de entrada necessários para acompanhamento da unidade moto/bomba. Além disso, a circulação forçada proporciona uma lubrificação, refrigeração e isolamento do motor elétrico submerso.