



**Universidade do Porto – Faculdade de
Engenharia**

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores



Universidade Regional de Blumenau

Departamento de Engenharia Eléctrica
Engenharia Eléctrica Industrial

**Influência do Projecto e do Fabrico nas Perdas
Suplementares de Motores de Indução Trifásicos.
Análise de Métodos de Ensaio.**

Ivo Ricardo de Melo Seco

Blumenau – SC - Brasil

2009



**Universidade do Porto – Faculdade de
Engenharia**

Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de
Computadores



Universidade Regional de Blumenau

Departamento de Engenharia Eléctrica
Engenharia Eléctrica Industrial

**Influência do Projecto e do Fabrico nas Perdas
Suplementares de Motores de Indução Trifásicos.
Análise de Métodos de Ensaio.**

Ivo Ricardo de Melo Seco

Dissertação submetida à Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto
como requisito parcial para a
obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica.

Blumenau – SC - Brasil

2009

**Influência do Projecto e do Fabrico nas Perdas Suplementares
de Motores de Indução Trifásicos. Análise de Métodos de
Ensaio.**

Dissertação de Mestrado

Por:

Ivo Ricardo de Melo Seco

Dissertação submetida à Faculdade de
Engenharia da Universidade do Porto
como requisito parcial para a
obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Electrotécnica.


Prof. Doutor Adriano Péres

Presidente:

Prof. Doutor Sebastião Lauro Nau

Vogal: 


Prof. Doutor Sérgio Vidal Garcia Oliveira

Vogal:

Prof. Doutor Sérgio Henrique López Cabral

Orientador: 

Blumenau, 10 de Julho de 2009

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Engenheiro Sérgio Henrique Cabral pelo ânimo que me transmitiu sempre, pela contagiante boa disposição no trabalho e apoio durante o desenvolvimento da Dissertação. Por tornar possível a minha vinda para Santa Catarina, com o seu empenho incansável em apoiar alunos de intercâmbio de outros países.

À FURB por me ter permitido inscrever na disciplina de TCC e de Estágio Supervisionado, em intercâmbio da FEUP.

Ao Professor Doutor Engenheiro Carlos Araújo Sá por me ter falado primeiramente na possibilidade de estagiar na WEG no Brasil e apresentar a dissertação na FURB em Blumenau, e me ter entusiasmado e motivado para abraçar tamanho desafio.

À WEG por todos os recursos que disponibilizou para que pudesse ter sucesso nesta importante jornada da minha vida.

Ao Engenheiro e amigo Júlio César Moura pela transmissão incansável de conhecimentos, na sua ânsia de ensinar e ajudar, integrando facilmente os estagiários da WEG. Pela paciência e dedicação que demonstrou nos assuntos relacionados com a Dissertação e apoio incondicional no Estágio Supervisionado.

À minha família, Henrique Seco, Dulce Seco, Sandra Seco e André Magalhães, por me terem permitido chegar até aqui e fazerem de mim o que sou hoje.

Aos meus amigos Hugo Carvalhosa, Marco Geraldês, Rui Moreira, João Monteiro e Luís Moreira por nunca me terem deixado desistir.

À minha namorada Helena Carreira pelo apoio e ajuda demonstrados durante o trabalho.

Resumo da Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Electrotécnica.

Influência do Projecto e do Fabrico nas Perdas Suplementares de Motores de Indução Trifásicos. Análise de Métodos de Ensaio.

Ivo Ricardo de Melo Seco

Julho/2009

Orientador: Prof. Doutor Sérgio Henrique Cabral

Área de Concentração: Eletrónica de Potência

Palavras-chave: perdas suplementares; motores de indução trifásicos; projecto; fabrico; ensaios.

Número de páginas: 69

RESUMO: Este trabalho diz respeito ao estudo da influência do projecto e do fabrico na redução das perdas suplementares em máquinas de indução trifásicas. É realizada uma revisão da teoria sobre a origem, causa e efeitos das perdas suplementares. Nesta revisão relembra-se a opinião de vários autores conceituados integrando-a na corrente de pensamento do autor desta dissertação. Nestes capítulos são descritas técnicas realizáveis que permitem reduzir as perdas suplementares através de alterações de projecto e também de fabrico. É feita também uma análise aos métodos de ensaio que permitem determinar as perdas suplementares em motores de indução trifásicos, e realizada uma discussão mais detalhada sobre os dois métodos mais em foco actualmente: O método entrada-saída da IEEE 112-B comparativamente ao método da IEC 60034-2-1 - Eh-star. Pelo meio realça-se a importância de atitudes preventivas perante este tipo de perdas, através de demonstrações gráficas do peso destas na eficiência dos MIT recorrendo a uma base de dados recolhida na WEG Equipamentos Eléctricos SA.

Abstract of the Dissertation presented to Engineer Faculty of Oporto University as a partial fulfillment of the Requirements for the Master degree in Electrotechnical Engineering

Design and Manufacturing Influence of Stray Losses in Induction Motors. Test Methods Analysis.

Ivo Ricardo de Melo Seco

July/2009

Advisor: Prof. Doutor Sérgio Henrique Cabral

Area of Concentration: Power Electronics

Keywords: stray load losses, three-phase induction motors, design, manufacturing, test methods.

Number of pages: 69

ABSTRACT: This work focus design and manufacturing influence of stray losses reduction in induction machines. A theoretical revision about the origin, cause and effects of supplementary losses are carried out. In this one, it's remembered the opinion of several conceptualized researchers integrating it in the author current thoughts. In this chapters, are descript realizable techniques witch permit stray losses reduction by designing and manufacturing alterations. An analysis of test methods it's also done allowing the determination of stray losses in induction motors accomplished of a more detailed analysis about the in focus test methods – IEEE 112-B and IEC 60034-2-1- Eh-Star- is done. The author emphasis the importance of tacking preventive attitudes before this type of losses, through the demonstration of graphical weight of them in the total losses and the motors absorbed power, appealing to a motors database provided by WEG Equipamentos Elétricos SA.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES:

Figura 1 – Gráfico das perdas suplementares em função do quadrado do binário.....	7
Figura 2 – Gráfico do valor atribuído às perdas suplementares para um motor de indução.....	9
Figura 3 – Gráfico da representação das componentes das P_{sup}	18
Figura 4 – Gráfico de variação P_{sup} com a potência (cv) do MIT.....	31
Figura 5 – Gráfico da Variação das P_{sup} (NBR 5383) com a potência (cv) do MIT.....	34
Figura 6 – Gráfico da Variação das P_{sup} (NBR 5383) com a potência (cv) do MIT.....	36
Figura 7 – Gráfico de P_{sup} / P_{totais} de um MIT de P_n de 1 cv.....	37
Figura 8 – Gráfico de P_{sup} / P_{totais} de um MIT de P_n de 270 cv.....	38
Figura 9 – Gráfico da Diferença de valores de P_{sup} em motores semelhantes da carcaça 132.....	39
Figura 10 – Gráfico da diferença de valores de P_{sup} em motores semelhantes da carcaça 160.....	39
Figura 11 – Gráfico da Diferença de valores de P_{sup} em motores semelhantes da carcaça 180.....	40
Figura 12 – Gráfico da variação das P_{sup} entre P_n 200 cv e 275 cv.....	41
Figura 13 – Circuito eléctrico para o ensaio eh-star.....	38
Figura 14 – Circuito simplificado após a mudança do interruptor S para a posição.....	56
Figura 15 - Máquinas virtuais simulando a máquina sob teste eh-star.	58

LISTA DE TABELAS:

Tabela 1 – Classificação das componentes das P _{sup} . Segundo (Schwarz, 1964).....	16
Tabela 2 – Amostra de motores ensaiados na WEG usados no estudo realizado nesta dissertação	30
Tabela 3 – Relação entre tensão e corrente de fase e de linha.....	60
Tabela 4 – Exemplo de dois motores 12 kW 4p 400V 50Hz, um Y e outro Δ	61

ABREVIATURAS:

f.m.m	Força magneto motriz
MIT	Motor de Indução Trifásico
Min	Minimização

LISTA DE SÍMBOLOS:

I_0	Corrente em vazio	A
I_1	Corrente no estator	A
I_t	Corrente de teste	A
P_{ad}	Perdas adicionais	W
P_{af}	Perdas de alta-frequência	W
P_{abs}	Potência absorvida	W
$P_{atrito+vent.}$	Perdas por atrito e ventilação	W
P_{conv}	Perdas convencionais	W
P_e	Perdas eléctricas	W
$P_{entrada}$	Potência de entrada	W
P_{fe}	Perdas no ferro	W
P_h	Perdas harmónicas	W
P_m	Perdas mecânicas	W
P_{saf}	Perdas suplementares de alta-frequência	W
$P_{saída}$	Potência de saída	W
P_{sup}	Perdas suplementares	W
P_{totais}	Perdas totais	W
$P_{útil}$	Potência útil	W
P_{veio}	Perdas no veio	W
RI^2	Perdas eléctricas	W
H	Rendimento	
P_{sfn}	Perdas suplementares à frequência nominal	W
R_{eh}	Resistência Eh-star	Ω
P_{joule}	Perdas eléctricas	W
ΔT_{Max}	Variação de temperatura	$^{\circ}C$

I_p	Corrente de partida	A
I_n	Corrente nominal	A
P_n	Potência nominal	W
P_{perdas}	Potência de perdas	W
$P_{restantes}$	Perdas restantes	W
T	Binário electromagnético	N.m
A	Deslizamento	
P_{el_rotor}	Perdas eléctricas no rotor	W
$P_{el_estator}$	Perdas eléctricas no estator	W
I_u	Corrente na fase U	W
I_w	Corrente na fase W	W
I_v	Corrente na fase V	W
U_{uv}	Tensão entre as fases U e V	V
U_{vw}	Tensão entre as fases V e W	V
U_{wu}	Tensão entre as fases W e U	V
s	Deslizamento	
I_+	Corrente de sequência positiva	A
I	Corrente de sequência negativa	A
T_s	Binário das Perdas suplementares	N.m
Z_f	Impedância de fase	Ω
P_δ	Potência no entreferro	W
P_{supc}	Perdas suplementares corrigidas	W

SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO.....	1
2	INTRODUÇÃO.....	2
3	OBJECTIVOS.....	5
4	DESENVOLVIMENTO.....	5
4.1	Perdas Suplementares.....	5
4.1.1	Introdução.....	5
4.1.2	Normas internacionais para a determinação das perdas suplementares – IEC e IEEE.....	6
4.1.3	Controvérsia Normativa.....	10
4.1.4	Definição, origem, causa, efeito.....	12
4.1.5	Conclusões.....	20
4.2	Ensaio para determinação de perdas suplementares em máquinas eléctricas rotativas.....	21
4.2.1	Método de entrada-saída.....	21
4.2.2	Método de “pump-back”.....	22
4.2.3	Método do dinamómetro diferencial.....	23
4.2.4	Método do diferencial mecânico.....	23
4.2.5	Método de “back-to-back”.....	24
4.2.6	Método do circuito AC/DC.....	24
4.2.7	Método do calorímetro.....	25
4.2.8	Método da rotação reversa.....	25
4.2.9	Método Eh-Star.....	26
4.2.10	Conclusões.....	27
4.3	Influência do projecto na redução das perdas suplementares.....	28
4.3.1	Conclusões.....	46
4.4	Influência do fabrico na redução das perdas suplementares.....	47
4.4.1	Conclusões.....	49
4.5	Método de ensaio em foco actualmente da IEEE e IEC para determinação das perdas suplementares.....	50
4.5.1	Método de entrada-saída.....	50
4.5.1.1	Introdução.....	50
4.5.1.2	Determinação das P_{sup}.....	50
4.5.1.3	Requerimentos para a realização do ensaio.....	51
4.5.1.4	Procedimentos de Ensaio.....	51
4.5.1.5	Rotina de cálculo.....	53
4.5.2	Método Eh-Star.....	55
4.5.2.1	Introdução.....	55
4.5.2.2	Alimentação Desequilibrada.....	56
4.5.2.3	Determinação da resistência R_{eh}.....	59

4.5.2.4 Determinação das Perdas Suplementares	59
4.5.2.5 Requerimentos para o Ensaio	60
4.5.2.6 Procedimentos de ensaio	62
4.5.2.7 Rotina de Cálculo	63
4.5.2.8 Conclusões.....	63
4.6 Estudo das perdas suplementares com o PGC	50
4.6.1 Estudo do material utilizado na carcaça do motor: Ferro ou Alumínio	63
4.6.2 Estudo do material utilizado nas lâminas do rotor e estator com influência nas P_{sup}	63
4.6.3. Estudo da ΔP_{sup} com a Δ carga e da Δ rpm do MIT de 0 a 100% com resultados do PG.....	63
4.6.4 Estudo do efeito pelicular, efeito de proximidade e perdas Joule nos enrolamentos	63
4.6.5 Estudo das P_{sup} com a variação da condutividade nas barras do rotor	63
4.6.6 Estudo das P_{sup} com a variação do entreferro	63
4.6.7 Estudo das P_{sup} com a inclinação das barras do rotor	63
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	70

1. APRESENTAÇÃO

Esta dissertação expõe e discute os últimos desenvolvimentos relacionados à influência do projecto e do fabrico nas perdas suplementares de motores de indução trifásicos, mostrando também as iniciativas dos principais fabricantes mundiais, bem como o seu impacto na realização das normas internacionais. Pretende rever a origem, a causa e o efeito das P_{sup} , servindo de ponto de partida para estudos futuros. Devido à oportunidade de estágio de conclusão de curso proporcionado pela Weg Equipamentos Eléctricos, esta dissertação tem por detrás uma visão significativamente industrial, por influência natural de quem passou os últimos 4 meses num parque fabril de motores eléctricos. Possibilita assim mostrar a visão industrial das P_{sup} ao mundo académico, partilhando resultados para que possam ser usados como base de comparação a futuros estudos académicos.

2. INTRODUÇÃO

No passado, a energia eléctrica era produzida, transportada e distribuída sem que houvessem normas ou legislação que impusessem determinado limite de perdas, e consequente eficiência energética. Os consumidores utilizavam a energia eléctrica indiscriminadamente, sem muita preocupação com o racionamento da mesma. Os objectivos dos produtores passavam por igualar a produção à carga, tendo em conta a minimização dos custos. Os sistemas de produção e transporte eram pouco eficientes.

De facto a partir da primeira grande crise do petróleo, em 1973, surgiu o início de um movimento de consciencialização da importância de aumentar a eficiência de todo o sistema de produção e transporte de energia eléctrica e de redução das perdas, sendo cada vez mais comuns nos dias de hoje significativos investimentos na melhoria de equipamentos utilizados nos âmbitos industrial e doméstico para melhoria da eficiência energética.

Recentemente tem-se assistido a um crescente aumento do uso da capacidade do sistema de transmissão de energia eléctrica, uma vez que o consumo tem crescido mais do que a própria expansão da rede. Juntamente com os preços altos e crescentes da electricidade, do aquecimento global e do esgotamento a médio prazo das reservas de combustíveis fósseis, faz da eficiência energética um tema actual e diário.

De entre os sectores que apresentam maior consumo de energia eléctrica destaca-se o sector industrial, com uma participação de cerca de 45% do consumo total de electricidade a nível global. As responsáveis por este percentual elevado são as máquinas eléctricas, nomeadamente os motores, associados a determinada eficiência ou, em alguns casos, por falta dela. O rendimento ou eficiência (η) de um motor é calculado pela seguinte fórmula:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} * 100 \%$$

Em que,

P_{out} = energia mecânica na ponta do veio do motor

P_{in} = energia eléctrica absorvida pelo motor

Geralmente o rendimento é expresso em percentagem. Pode acrescentar-se que a energia mecânica na ponta do veio do motor corresponde à energia eléctrica absorvida pelo motor subtraído da potência de perdas ocorridas no próprio motor durante o processo de conversão de energia eléctrica em energia mecânica. Estas perdas são geralmente separadas e classificadas em 5 classes:

- 1) Perdas mecânicas por atrito e ventilação;
- 2) Perdas eléctricas nos enrolamentos estatóricos (Joule);
- 3) Perdas eléctricas nos enrolamentos rotóricos (Joule);
- 4) Perdas magnéticas por histerese e correntes de Foucault;
- 5) Perdas suplementares.

As perdas por atrito e ventilação são determinadas através do ensaio em vazio. As perdas Joule nos enrolamentos são determinadas no ensaio em carga. As perdas magnéticas podem ser obtidas no ensaio do motor em vazio. Relativamente às perdas suplementares são as únicas que não têm um método de determinação padrão, universal, que lhes atribua um valor exacto e rigoroso. Todas as restantes têm os seus valores perfeitamente identificáveis e causas bem conhecidas bem como métodos de cálculo universais e ensaios estipulados em normas. As P_{sup} podem determinar-se por aproximação através de diferentes métodos que foram sendo propostos ao longo dos anos, por investigadores de toda a parte do mundo, em pesquisas que tiveram início em

meados do século XX. O facto de não haver um método de cálculo padronizado e universal para estas perdas leva a que o rendimento das máquinas de indução seja determinado de forma diferente em várias partes do mundo, verificando-se que, a mesma máquina poderá ter rendimentos diferentes calculados consoante o país para onde for vendida. Este é um assunto que tem provocado muita polémica entre investigadores e fabricantes, teses de mestrado e doutoramento têm sido feitas, bem como artigos, sobre este tema, mas continua sem haver um método de cálculo aceite mundialmente. A controvérsia tem o foco principal entre os organismos internacionais que estipulam as normas, como a IEC e a IEEE, não obstante também aos principais fabricantes de motores pelo mundo fora, entre eles a WEG, ABB, SIEMENS, U.S MOTORS, EMERSON, entre muitos outros.

3. OBJECTIVOS

Os objectivos desta dissertação são:

- 1) Mostrar a influência do projecto na redução das P_{sup} .
- 2) Mostrar a influência do fabrico na redução das P_{sup} .
- 3) Analisar dados relativos à variação de P_{sup} .
- 4) Analisar métodos de ensaio para determinação das P_{sup} .

4. DESENVOLVIMENTO

4.1 Perdas Suplementares

4.1.1 Introdução

Durante muito tempo as P_{sup} permaneceram desconhecidas. Estas perdas foram as últimas a serem descobertas, e são designadas por alguns investigadores como a 5ª

perda, nome que se refere à ordenação pela qual as perdas foram descobertas nas máquinas eléctricas, antecedidas pelas perdas mecânicas, eléctricas e magnéticas (Nailen, 1987). A descoberta destas deveu-se à crescente exigência por parte dos clientes, que começaram a pressionar os fabricantes com o intuito de conhecer mais precisamente o rendimento das máquinas adquiridas. Os clientes não estão interessados nas P_{sup} mas sim nas P_{totais} da máquina, uma vez que é essa a potência inútil que estão a pagar (Glew, 1998). Os estudos realizados pelos fabricantes revelaram uma energia de perdas que não se identificava com nenhuma das conhecidas até então, e que não constava nas normas internacionais para a determinação da eficiência. Apesar de existirem relatórios sobre a existência das P_{sup} que datam de 1913, a dificuldade em quantificar estas perdas levaram à promoção de um acordo entre os fabricantes de motores, de não as levarem em conta na determinação da eficiência (Nailen, 1987).

Sabe-se que no ano de 1932, um engenheiro terá expressado a sua preocupação de que um dia, nos anos vindouros, iria tornar-se necessária a determinação dessas novas perdas. A sua empresa terá requerido um relatório sobre as suas afirmações, que veio apenas a ser apresentado em 1939, cerca de 7 anos depois. O relatório apresentava um teste directo de medição das perdas suplementares. No entanto não foi aceite na Europa e foi poucas vezes utilizado nos Estados Unidos (Nailen, 1987).

Em 1934 tinha surgido um artigo que expunha as principais fontes das perdas adicionais, e frisava também a necessidade do desenvolvimento de uma técnica de medição para as mesmas (Nailen, 1987).

Está claro nos dias de hoje que as perdas suplementares ocorrem em todo o tipo de máquinas eléctricas de corrente alternada e acarretam uma redução no rendimento, consequência de um maior aquecimento quando do funcionamento em carga, para além de inerente perda de binário.

Nos capítulos seguintes apresenta-se opiniões de investigadores sobre a definição, origem, causa e efeito das perdas suplementares.

4.1.2 Normas internacionais para a determinação das perdas suplementares – IEC e IEEE

A IEC (International Electrotechnical Commission) atribuía às perdas suplementares um valor de 0,5% da potência absorvida pela máquina de indução no seu processo de conversão de energia eléctrica em energia mecânica.

No entanto, a experiência dos fabricantes indica que este resultado é demasiado pequeno para definir o valor real das perdas suplementares. Este facto permitia aos fabricantes de motores europeus atribuir uma eficiência mais elevada às suas máquinas do que os fabricantes de motores americanos.

Este “método” tem os seus dias contados, uma vez que já não aparece como opção na nova norma de determinação de P_{sup} e respectiva eficiência energética de motores de indução trifásicos, IEC 60034-2-1.

Esta nova norma apresenta três métodos diferentes para determinação das P_{sup} . O primeiro é semelhante ao método da IEEE 112-B, e tem o nome de perdas residuais.

Estas perdas adicionais residuais são determinadas subtraindo da potência de entrada os seguintes termos: a Potência de saída, as perdas no enrolamento do estator do teste da resistência, as perdas no ferro, as perdas por atrito e ventilação, e as perdas nos enrolamentos rotóricos determinados pelo valor do deslizamento.

Para determinar o valor destas perdas para todos os pontos é feita uma regressão linear expressando as perdas em função do quadrado do binário, ilustrado na figura 1.

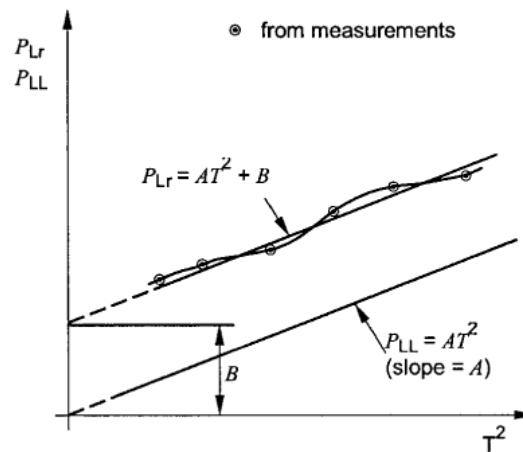


Figura 1 – Gráfico das perdas suplementares em função do quadrado do binário (Iec, 2007).

Assim, após a obtenção da expressão que modeliza as P_{sup} despreza-se o coeficiente linear B , uma vez que as P_{sup} são consideradas nulas em vazio.

O método mostrado anteriormente é muito idêntico ao método utilizado pela IEEE que determina as perdas suplementares para 6 pontos de carga (25% a 150% da carga nominal). Estes pontos são obtidos pela potência absorvida da rede, subtraindo a potência útil, as perdas Joule no estator e rotor, as perdas mecânicas e as perdas no ferro, determinadas para cada ponto de medição. De seguida e tal como no método da IEC 60034-2-1 faz-se a extrapolação dos pontos restantes através de uma regressão linear através da relação quadrática do binário. Este é o método padrão utilizado no continente americano, tanto na América do Norte como em alguns países da América do Sul, como no Brasil que apesar de usar a norma NBR-5383, apresenta um valor calculado muito semelhante nas perdas suplementares.

Ainda um método apresentado pela IEC 60034-2-1 é o teste com o rotor removido e o teste com rotação reversa. Estes testes determinam as perdas à frequência nominal e às altas frequências. Este método está também pautado na norma IEEE 112-E.

Para além dos métodos anteriores existe ainda um método de valor assumido. Este método consiste na atribuição de um valor fixo para as perdas suplementares que é obtido em função do valor da potência de saída do motor, ilustrado na figura 2.

O novo método proposto pela IEC como método principal para cálculo das P_{sup} para posterior determinação da eficiência foi o método Eh-star. No entanto e como descrito nos capítulos seguintes, este método ainda é tema de alguma discussão e pouca aceitação.

É no entanto o único método de medição directa de P_{sup} que existe actualmente. Este método determina apenas as P_{sup} na máquina, tornando possível separá-las das P_h e eliminar os erros de medição de todas as restantes perdas que os outros métodos estão susceptíveis.

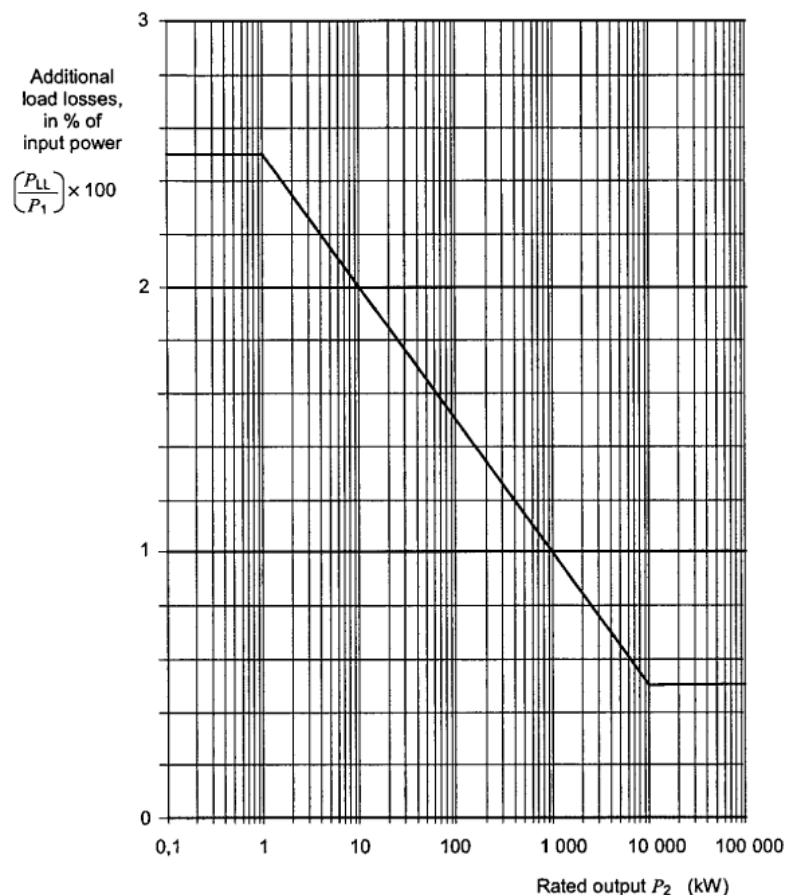


Figura 2 – Gráfico do valor atribuído às perdas suplementares para um motor de indução (IEC, 2007).

4.1.3 Controvérsia Normativa

Desde o princípio da normalização eléctrica que existe alguma controvérsia e interpretações diferentes relativamente à eficiência energética no motor de indução.

Os países europeus foram habituados a seguir a norma IEC 60034-2, datada de 1972, para a determinação das P_{sup} e posterior uso do resultado no cálculo do rendimento de uma máquina de indução. Esta norma pressupõe que as perdas suplementares correspondem a 0,5% da potência absorvida pela máquina. Nos Estados Unidos, por sua vez, o método usado é referente à norma IEEE 112-B, que é o método directo de entrada-saída para a determinação de rendimento, determinando indirectamente as P_{sup} . Numa tentativa de padronizar as normas internacionais de

determinação das perdas suplementares, no princípio do século XXI teve origem um movimento levado a cabo pela IEC e IEEE tendo como objectivo a padronização de um único método mundial de determinação das perdas suplementares. Este entendimento entre os principais organismos responsáveis pelas normas eléctricas internacionais permitiria tornar o cálculo do rendimento de um motor de indução igual em qualquer país do mundo.

Segundo Machado et al (Machado, 2008), os europeus rejeitaram a adopção do procedimento de cálculo da IEEE 112-B, proposto inicialmente para uma padronização. Ao que parece as P_{sup} determinadas pelo método IEC 60034-2, que utiliza um valor fixo de 0,5% da potência absorvida para quantificar estas perdas, subdimensiona-as, permitindo aos europeus declarar nas chapas de características dos seus motores um rendimento mais elevado do que nos países que adoptam a IEEE 112-B. Assim, quando os europeus se preparavam para aceitar o método da IEEE 112-B, surgiram com uma nova proposta de um método chamado Eh-star. Este método foi desenvolvido nos anos 60 por investigadores alemães (Jordan, 1967; Machado, 2008). Esta decisão apanhou de surpresa os fabricantes americanos de motores eléctricos, uma vez que este método não tinha sido muito explorado até à data da proposta europeia. Era um método praticamente desconhecido para a indústria. Em 2004 foi incluído na proposta de revisão da norma IEC 60034-2, como um terceiro método de ensaio para a determinação das perdas suplementares para máquinas de indução trifásicas. Passou a ser pretensão dos fabricantes europeus que o método Eh-star se tornasse no principal método de ensaio para a determinação das perdas suplementares.

Finalmente, em Setembro de 2007 o método Eh-star aparece pautado na nova norma da IEC 60034-2-1 como um dos métodos possíveis para determinação das P_{sup} . Porém, contra as pretensões iniciais, não conseguiram torná-lo no principal método de

ensaio para o cálculo da eficiência da máquina de indução, uma vez que está normalizado que o método utilizado na determinação da eficiência de uma máquina, seja de incerteza baixa. Assim, o grau de incerteza do Eh-star na IEC 600-34-2-1 aparece como média. Esta decisão foi tomada pela IEC tendo em conta a oposição dos demais fabricantes mundiais de motores eléctricos, assim como o relativo desconhecimento deste novo método proposto.

A teoria de que os fabricantes europeus apresentaram o método Eh-star para ganhar tempo e não aceitar de imediato o método da IEEE 112-B não está ainda muito clara. (*Machado, 2008*) De facto começam agora a surgir resultados de estudos sobre o método de ensaio Eh-star que surpreendem por dois motivos. O primeiro é que os valores de P_{sup} são algumas vezes mais elevados quando determinados pelo método Eh-star do que pelo método IEEE 112-B. A segunda é que a incerteza neste método parece ser inferior à incerteza do método da IEEE 112-B, contrariamente ao estipulado pela IEC 60034-2-1.

Esta baixa incerteza disponibilizada pelo método Eh-star tem permitido uma observação mais exacta na influência de alterações de projecto na redução das P_{sup} .

Também a IEC, tendo em vista a promulgação de uma nova norma no futuro, promoveu um estudo em 2008 designado de projecto “ROUND ROBIN” com uma duração estimada de 3 anos, que visa a promoção do conhecimento aprofundado do método Eh-star. Este estudo conta com a colaboração dos laboratórios dos principais fabricantes mundiais de motores de indução, que se disponibilizaram a estudar as diferenças dos valores das P_{sup} com este novo método Eh-star e o da IEEE 112-B. Este estudo tem uma duração longa uma vez que os ensaios são realizados com os mesmos motores, tendo estes de mudar de instalações de empresa em empresa. Curiosamente, surgiu a novidade de que nestes ensaios o valor das perdas suplementares é quase

sempre superior quando se utiliza o método Eh-star na determinação das perdas suplementares. Isto acarreta um decréscimo do rendimento nas máquinas dos fabricantes europeus superior ao que seria obtido se tivessem aceitado o método da IEEE 112-B em 2004.

4.1.4 Definição, Origem, Causa e Efeito

As P_{sup} ocorrem em toda a máquina eléctrica de corrente alternada, e vão desde: perdas nos enrolamentos do rotor, nos enrolamentos estatóricos, no material ferromagnético que constitui o núcleo da máquina, nas ranhuras do rotor através de alterações de permeabilidades dos materiais que desvia o fluxo magnético do seu percurso natural, perdas devido à área das ranhuras, perdas devido às imperfeições das lâminas do núcleo, perdas no entreferro, estendendo-se ao invólucro externo da máquina, à carcaça e à caixa de terminais.

Em seguida são apresentadas opiniões de investigadores sobre a definição de perdas suplementares.

Segundo Alger et al (Alger, 1959), as P_{sup} são definidas como o excedente das P_{totais} que ocorrem no motor funcionando com uma determinada corrente de carga, sobre a soma das perdas calculáveis P_{el} para aquela corrente de carga, as P_{fe} , e as $P_{\text{atrito+vent}}$. Ainda Alger et al (Alger, 1959), defende que as P_{sup} em carga têm origem em forças magnetomotrizes causadas pela corrente de carga do motor, e com a divergência de parte do fluxo magnético por caminhos de fuga, fluxos de fuga, que cria pulsação de fluxos e perdas por correntes de Foucault nas lâminas, condutores e partes metálicas adjacentes da máquina. Defende que não são facilmente mensuráveis e que variam bastante de máquina para máquina como resultado de variações no processo de fabrico. Tal facto pressupõe portanto que se desenvolvam equações para as P_{sup} , que as

dimensionem correctamente para que estas, possam indicar com precisão, alguma alteração no projecto. A classificação das componentes de P_{sup} (Alger, 1959) é efectuada da seguinte forma:

- Perdas por correntes de Foucault no cobre do estator, e que são devidas ao fluxo de fugas das ranhuras. Estas perdas variam com o quadrado da frequência, e são retratadas como efeito pelicular. Este fluxo de fugas é também responsável por parte das perdas nas lâminas do material ferromagnético.
- Perdas nas extremidades da máquina, devidas ao fluxo de fugas nas extremidades. As correntes de Foucault entram nas lâminas tomando uma direcção axial, penetrando o flange e outras partes metálicas da máquina. É possível desenvolver uma expressão satisfatória de que as P_{sup} nas extremidades da máquina são iguais à porção de kVA da reactância de fuga de extremidade que entram axialmente nas lâminas do estator.
- Perdas de alta-frequência, na superfície do rotor e estator, devido ao fluxo zig-zag que provoca correntes de Foucault na superfície das lâminas e que é normalmente denominado de perdas superficiais. Parte deste fluxo passa pela ranhura do rotor induzindo corrente nos enrolamentos, causando mais P_{sup} .
- Perdas devidas à pulsação de alta-frequência nos dentes e perdas RI^2 devido também ao fluxo zig-zag. Esta componente aumenta com o aumento da relação entre as ranhuras do rotor e do estator.
- Perdas devidas aos harmónicos de 6ª ordem – perdas RI^2 - devido a correntes induzidas pelo fluxo de fugas da cinta do estator.
- Perdas extras no ferro devidas à inclinação das ranhuras do rotor, devido ao fluxo de inclinação de ranhura.

Baseado nos pressupostos anteriores, Schwarz et al (Schwarz, 1964) divide as P_{sup} em dois grupos principais: P_{sup} em carga e P_{sup} em vazio: as P_{sup} em carga são devidas em parte ao fluxo de fugas, isto é, têm origem na distribuição das correntes pela máquina produzindo um degrau de f.m.m. no entreferro, sendo que outra parte é causada pelos efeitos secundários da auto-indutância dos enrolamentos. As P_{sup} em vazio, devido às variações do fluxo principal, estão relacionadas com as irregularidades do fluxo de excitação principal devido às alterações de permeância da máquina.

A dificuldade de compreensão das P_{sup} advém da natureza complicada dos fluxos de fuga numa máquina de indução. Embora estes produzam efeitos primários determinantes, não poderão ser considerados isoladamente, ignorando o fluxo principal de saturação, por exemplo (Schwarz, 1964).

Qualquer perda associada a fluxos de fuga, isto é, qualquer fluxo que não faça a ligação do condutor primário com o secundário e portanto não produza trabalho útil, é empiricamente associado a uma P_{sup} , isto é, uma perda que não está associada com a transferência primária de energia da máquina (Schwarz, 1964).

Na página seguinte apresenta-se uma tabela com a classificação detalhada de P_{sup} apresentada por Schwarz (1964), tendo-se baseado nos trabalhos anteriores de Alger e Jordan (1959).

Ainda segundo Jimoh (1999), a origem das P_{sup} está no efeito de saturação dos materiais magnéticos, nos harmônicos de espaço, no fluxo de dispersão e isolamento imperfeito nas barras do rotor. Os efeitos nocivos destas perdas são o aquecimento adicional, a perda de binário e efeitos de aceleração e frenagem, que juntos contribuem negativamente para uma queda do rendimento da máquina de indução.

Tabela 1 - Classificação das componentes das Perdas Suplementares segundo Schwarz (1964).

	Componente	Origem	Tipo e localização
P _{sup} em vazio - variação do fluxo principal	Perdas de superfície	Variações de permeância (harmônicos de fluxo)	Perdas no núcleo do rotor e estator
	Perdas por pulsação nos dentes	Variações de permeância devido à posição relativa dos dentes	Perdas no núcleo do rotor e estator
	Perdas por pulsação nos dentes, barras do rotor, circulação de correntes	Variações de permeância devido à posição relativa dos dentes	Perdas I ² R no rotor
P _{sup} em carga - fluxo de fugas	Perdas de superfície	Fluxo de fugas no entreferro	Perdas no núcleo do rotor e estator
	Perdas por pulsação nos dentes	Fluxo de fugas no entreferro	Perdas no núcleo do rotor e estator
	Perdas por pulsação nos dentes, barras do rotor, circulação de correntes	Fluxo de fugas no entreferro	Perdas I ² R no rotor
	Harmônicos no estator, barras do rotor, circulação de correntes	Fluxo de fugas no entreferro	Perdas I ² R no rotor
	Correntes de Foucault nas ranhuras do estator	Fluxo de fugas nas ranhuras	Perdas I ² R no estator
	Correntes de Foucault nas ranhuras do rotor	Fluxo de fugas nas ranhuras	Perdas anormais I ² R no rotor só com elevado deslizamento
	Perdas excedentes no estator por correntes de Foucault	Fluxo de fugas excedente	Perdas no núcleo do estator
	Perdas excedentes no rotor por correntes de Foucault	Fluxo de fugas excedente	Perdas anormais no núcleo do rotor só com elevado deslizamento

As P_{sup} podem ser separadas em duas parcelas, as de frequência fundamental e as de alta frequência. As de frequência fundamental são devidas às correntes induzidas nos condutores do estator devido ao fluxo disperso na ranhura do estator, bem como noutras partes metálicas como partes terminais da máquina, extremidade do pacote e cabeça de bobina. As de altas frequências são perdas induzidas no rotor causadas por harmónicos de força magnetomotriz (fmm) produzidos pela corrente de carga do estator, podendo também ser provocada por harmónicos de fmm pela corrente no rotor (Jimoh, 1985).

As P_{sup} são directamente proporcionais ao quadrado da inclinação das ranhuras do rotor (Jimoh, 1985).

As P_{sup} podem ser então divididas em 5 componentes as quais são classificadas em percentagem à frente: (Nishizawa, 1987) e como se pode observar na figura 3.

- Perdas por fluxo de fugas = 3 %
- Perdas de alta-frequência = 10%
- Perdas por pulsação = 17%
- Perdas por correntes transversais = 30%
- Perdas de superfície = 40%

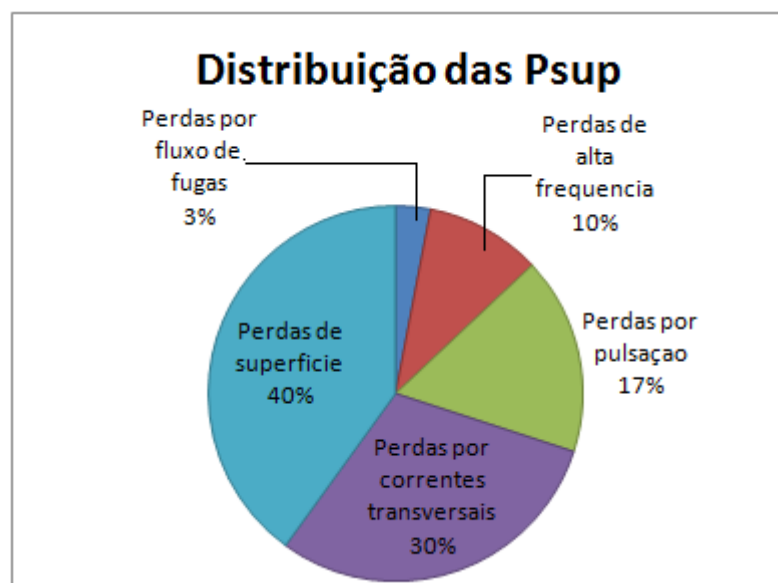


Figura 3 – Gráfico da representação das componentes das P_{sup} (Nishizawa, 1987)

O valor das P_{sup} em vazio é independente do tamanho do motor e dependem do número de ranhuras do rotor, da combinação das ranhuras do estator e do rotor, e da abertura das ranhuras do estator.

As P_{sup} são entendidas como o acréscimo das P_{af} quando se estabelece carga no motor (Machado, 2008). São devidas às variações na distribuição de fluxo e pelas correntes de Foucault. Acrescenta ainda que estas perdas são independentes do fluxo principal. Afirma ainda que as P_{sup} têm origem na variação da permeabilidade magnética e em harmónicos de faixa de fase.

As fontes de P_{sup} são a pulsação na superfície e extremidade dos dentes, a pulsação de fluxo no núcleo, a pulsação de fluxo nos dentes, o fluxo de fugas por pulsação devido às ranhuras nas lâminas e as fugas por pulsação devido ao fluxo principal (Nailen, 1987). Assume-se que são estas condições, associadas a descontinuidades nas componentes de campo magnético como os dentes do rotor, ranhuras do estator e o campo magnético rotativo estático, que produzem perdas nas lâminas do estator e do rotor que não são levadas em conta pela histerese nem pelas correntes de Foucault entre as lâminas de aço. Mais do que serem dependentes da tensão, essas perdas são dependentes da corrente. Quanto mais elevada é a corrente que circula nos enrolamentos, mais elevadas serão as P_{sup} . A componente mais elevada de P_{sup} é a de fluxo de fugas. É perceptível durante os ensaios que as P_{sup} variam com a corrente e com a carga. Este fluxo de fugas deve-se ao facto de que as linhas de campo magnético não corresponderem a círculos concêntricos em volta dos condutores, essas linhas ultrapassam fronteiras, preenchendo espaços vizinhos (Nailen, 1987). Apesar da maior concentração estar nos caminhos convencionais, algum desse fluxo interage com outros condutores nas proximidades e produz perdas noutros locais.

As P_{sup} têm dois efeitos nocivos: produzem calor adicional na máquina e podem reduzir o binário produzido pelo motor (Glew, 1998). O nível de P_{sup} varia muito e pode ser devido ao projecto pobre ou falta de controlo e supervisão. O calor elevado produzido pela máquina pode levar à necessidade de melhorar a ventilação ou reduzir as perdas já conhecidas como meio de compensação para manter o motor dentro dos limites de temperatura admitidos pelo isolamento.

As P_{sup} são a consequência de uma máquina prática. São devidas à não linearidade dos materiais que compõem as lâminas. E apesar da simetria circular do motor, os eventos que ocorrem dentro do núcleo são muito complexos (Glew, 1998).

(Glew, 1998) Acredita que há confusão nos termos que são usados no estudo das P_{sup} e pensa que quem os define mais claramente é Schwarz. Acha que é tempo de definir e de padronizar o vocabulário usado e incluí-lo no IEV (International Electrotechnical Vocabulary).

A presença de P_{sup} em proporção significativa num motor de indução operado normalmente provoca calor adicional, perda de binário, aceleração e desaceleração, redução da eficiência e *derating* da máquina (Jimoh, 1999).

Excepto para os binários parasitas, todos os efeitos mencionados acima são essencialmente devido ao calor adicional provocado pelas P_{sup} . Estes efeitos tornam-se mais pronunciados sob condições de variação do binário, reinicializações frequentes da máquina, magnitude, fase e tensões desequilibradas e alta inércia de carga (Jimoh, 1999).

Outras consequências das P_{sup} passam por afectar as condições de operação da máquina, limitando o seu desempenho e operação segura, acelera o envelhecimento dos isolantes, e não permite à máquina mover tanta carga (Jimoh, 1999).

P_{sup} é a resultante das perdas electromagnéticas totais no motor menos as perdas que definimos e designamos como perdas convencionais. São quase de certeza causadas por forças magneto motrizes, permeância e harmónicos de saturação no entreferro. Ocorrem sobretudo em máquinas grandes quando a corrente e/ou o fluxo saem fora do seu caminho convencional (Glew, 1999). Ainda Glew relata que não houve muito progresso no espaço de 75 anos. A partir do resultado de testes em 25 motores de 15 kW, declarou que as P_{sup} têm um alcance de 0,7% a 4,8% da potência de entrada. A significância das leituras é de 1,96% com um desvio padrão de 1,0%, valores típicos das máquinas fabricadas nos dias de hoje (Glew, 1999).

4.1.5 Conclusão:

Ao longo dos anos a definição de P_{sup} não evoluiu muito. O seu conhecimento evoluiu lentamente ao longo de décadas, e ainda hoje permanecem algumas dúvidas sobre o tema. A notação utilizada para as caracterizar difere de autor para autor. Exemplo disso é o trabalho de (Schwarz, 1964) que reúne o consenso de ideias de vários autores e unifica o vocabulário utilizado.

4.2 Ensaio para determinação de perdas suplementares em máquinas eléctricas rotativas.

Desde as primeiras investigações e tentativas de se modelizar as P_{sup} têm sido desenvolvidos métodos para a sua determinação. Entre estes, alguns têm carácter geral, e outros, específicos para um determinado tipo de motor. Existem ensaios característicos para máquinas de indução, síncronas e corrente contínua. Em seguida apresentam-se os vários métodos utilizados e propostos por investigadores ao longo dos anos.

4.2.1 Método de entrada-saída

Utiliza-se um motor acoplado a um dinamómetro, aplicando-se tensão nominal aos terminais do motor. Mede-se a potência absorvida da rede, a frequência angular e o binário no veio do motor. O binário do motor dividido pela frequência angular corresponde à potência útil do motor. Subtraindo a potência útil da potência absorvida da rede, obtêm-se as perdas totais. Com o valor das perdas totais e com o valor individual de todas as outras perdas determinadas anteriormente, é possível obter o valor das perdas suplementares através de uma simples subtracção (método indirecto). As perdas magnéticas e mecânicas são determinadas no ensaio em vazio sendo que as perdas eléctricas são determinadas no ensaio em carga, uma vez que é necessária circulação de corrente nos enrolamentos, $R\bar{I}^2$.

Este método apresenta incerteza baixa nas normas IEEE e IEC. No entanto e segundo a experiência dos fabricantes e ensaios realizados recentemente, mostram que, quando comparado ao Eh-star, apresenta uma incerteza elevada, e não permite muita precisão em estudos de alteração de elementos de projecto para redução das P_{sup} .

O facto de partir de pressupostos que incluem resultados de vários ensaios diferentes não contribuem para um desfecho de incerteza favorável. Mais ainda, se o ensaio for realizado por pessoas diferentes é provável que o resultado se altere.

Este método, sendo um dos principais métodos de ensaio utilizado actualmente para a quantificação das P_{sup} para determinação do rendimento de um motor de indução, tem sido estudado em comparação com o novo método proposto pela IEC, Eh-star. Num projecto levado a cabo pela IEC denominado “Round Robin”, tem como um dos objectivos a revisão das tolerâncias de rendimento, bem como esclarecer questões relacionadas com incertezas de medição obtidas nos resultados de ensaio da IEC60034-

1-2. Estas experiências são realizadas em laboratórios dos principais fabricantes mundiais de motores de indução, entre eles a WEG, que partilharão resultados entre si dos mesmos motores analisados.

Estes métodos são abordados com mais detalhe nas secções seguintes.

4.2.2 Método “pump-back”

Este método é similar ao método de entrada-saída, contudo a medição da potência útil é feita a partir de uma máquina idêntica acoplada ao eixo do motor em estudo, e usada como gerador.

O problema da imprecisão do método de entrada-saída pode ser transposto para este método, apresentando ainda o inconveniente da necessidade de se ter duas máquinas idênticas, sendo as perdas suplementares determinadas para as duas máquinas. Outra realidade com que nos deparamos neste método é a de que dificilmente duas máquinas apresentam na prática as mesmas P_{sup} .

4.2.3 Método do dinamómetro diferencial

Este método é uma forma modificada do método pump-back, mas ao invés de se utilizar um gerador, é utilizado um dinamómetro, operando em duas situações distintas. Opera como carga, ou como fonte primária para impulsionar o motor em teste. Na primeira situação, o motor em teste impulsiona o dinamómetro. Numa situação posterior, trocam de função, passando o motor a funcionar como gerador.

4.2.4 Método do diferencial mecânico

Este método consiste na ligação de duas máquinas idênticas acopladas ao eixo principal por um diferencial mecânico e ligadas a uma fonte de alimentação comum, de modo a que girem em sentidos opostos. A gaiola virtual permanece estacionária

enquanto as máquinas mantiverem a mesma velocidade de rotação. Aplicando uma força de rotação à gaiola, uma das máquinas acelera, passando a funcionar como gerador, ficando a outra a funcionar como motor. Modificando a velocidade de rotação da gaiola virtual, é possível variar a carga. Sabendo o valor total da potência de entrada no sistema, bem como as demais perdas já conhecidas, basta fazer uma subtração para se obter o valor das perdas suplementares. Estas perdas suplementares dizem respeito às duas máquinas. Para determinar apenas de uma das máquinas basta dividir o valor por dois, uma vez que se tratam de máquinas idênticas.

Este método apresenta uma desvantagem óbvia que é o facto de ser difícil arranjar duas máquinas idênticas para que seja possível realizar o ensaio. Outro aspecto negativo e realista é que dificilmente duas máquinas idênticas têm o mesmo valor para as perdas suplementares.

4.2.5 Método “back-to-back”

Para a realização deste ensaio são necessárias duas máquinas de indução, não necessariamente iguais, acopladas a um dinamómetro fixo a uma chapa estacionária. Os estatores estão assim ligados um ao outro e livres de girarem sobre o próprio eixo. Uma das máquinas opera como gerador e a outra como motor. As suas velocidades são então ajustadas até que as suas carcaças não tenham tendência a girar. Isto significa que nesse momento os binários das duas máquinas são iguais.

4.2.6 Método do circuito AC/DC

Este método consiste em três métodos separados: um teste com o rotor removido, e dois testes de curto-circuito (Dc ou síncrono, AC ou assíncrono).

No teste com o rotor removido retira-se o rotor do motor, colocam-se as tampas e aplica-se uma tensão nos terminais do estator de modo a que a corrente de linha seja a corrente de teste: $I_t = \sqrt{I_1^2 - I_0^2}$. Do valor da potência absorvida subtraem-se as perdas Joule do estator, resultando assim as P_{sup} de frequência nominal.

No teste de curto-circuito DC faz-se passar uma corrente contínua aos terminais do estator, enquanto o rotor é posto a rodar à velocidade síncrona. Esta corrente deve corresponder ao valor de pico da corrente alternada. O aumento na potência mecânica requerida para girar o rotor nestas circunstâncias, corresponde às perdas adicionais de frequência nominal e de alta frequência.

O teste de curto-circuito AC equipara-se ao teste do rotor bloqueado. A potência líquida de entrada corresponde às perdas na frequência nominal do rotor.

As perdas suplementares totais da máquina de indução assumem-se como sendo o somatório destas três componentes obtidas nos testes acima descritos.

4.2.7 Método do calorímetro

Utiliza o gás de arrefecimento forçado através de passagens específicas para avaliar a distribuição da densidade de perdas através da medição dos gradientes de temperatura na máquina, sob várias condições de carga.

As perdas suplementares são calculadas pelos resultados da distribuição da densidade de perdas.

4.2.8 Método da rotação reversa

Com o teste de rotor removido é possível determinar as P_{sup} de frequência nominal. Este teste é idêntico ao teste em 4.2.6, com a diferença de que é efectuado para seis pontos de carga (25% a 150%).

No teste de rotação reversa, com uma máquina auxiliar acelera-se o motor em teste até à rotação síncrona, e alimenta-se o motor de modo a que a força electromotriz produzida seja contrária ao sentido de rotação do motor. Utilizando os mesmos seis pontos de corrente de teste com o rotor removido, é feita a leitura da potência absorvida (P_a) e do binário. Através deste é possível determinar a potência na ponta do eixo do motor (P_{eixo}). Conhecendo-se também as perdas mecânicas (P_m), as perdas suplementares de alta frequência em cada ponto serão:

$$P_{Saf} = (P_{eixo} - P_m) - (P_a - P_{Sfn} - P_{j1})$$

As perdas suplementares totais do motor serão dadas por:

$$P_{sup} = P_{Sfn} + P_{Saf}$$

4.2.9 Método Eh-star

Baseado na alimentação monofásica de uma máquina de indução trifásica com ligação de fases em estrela (daí o nome star) e com uma resistência R_{eh} ligada entre dois terminais da máquina. Isto equivale a ligar a máquina a uma rede de alimentação trifásica desequilibrada.

O motor não precisa ser ligado a nenhum dinamómetro ou máquina auxiliar durante o ensaio. A tensão é desequilibrada através da inserção da resistência R_{eh} introduzida no circuito através da mudança de posição de um interruptor colocado entre duas das fases de alimentação da máquina. Surge então uma tensão de alimentação

assimétrica que pode ser decomposta por três sistemas simétricos: sequência positiva, sequência negativa e sequência homopolar (zero).

Como será explicado nos capítulos seguintes, a máquina de indução funciona como duas máquinas de indução equivalentes, acopladas ao mesmo eixo. Como a máquina não se encontra em carga, o binário produzido pela máquina irá apenas suprir as perdas por atrito e ventilação e as perdas suplementares.

O valor da corrente da sequência positiva não deverá ultrapassar o valor de 30% da sequência negativa e, caso aconteça, deverá ajustar-se a resistência R_{ch} e refazer-se todos os pontos do ensaio. Para determinar as P_{sup} determina-se a potência no entreferro considerando as duas máquinas. Esta potência é obtida subtraindo as P_{Joule} do estator e as P_{fe} da potência total de entrada. A potência no entreferro apresenta duas parcelas: uma referente às P_{Joule} no rotor, e outra referente às perdas suplementares e mecânicas. Desta última obtêm-se as P_{sup} .

Este é um método que tem sido alvo de vários estudos presentemente, visto ser intenção dos principais fabricantes de motores europeus torná-lo no principal método de ensaio para a determinação das perdas suplementares em máquinas de indução da IEC.

Apresenta algumas vantagens em relação aos anteriores devido ao facto de não ser necessário a utilização de duas máquinas e de o ensaio ser feito em vazio, diminuindo as perdas durante o ensaio. Além disso, é o único método capaz de medir as P_{sup} directamente.

No entanto apresenta algumas desvantagens para os fabricantes, que necessitam de adaptar os seus laboratórios, uma vez que utilizam aparelhagem e procedimentos totalmente diferentes do método entrada-saída geralmente utilizado na determinação das perdas suplementares para cálculo do rendimento/eficiência de uma máquina de indução.

4.2.10 Conclusões

Exceptuando os métodos entrada-saída e o método Eh-star, os restantes métodos de ensaio referidos nas normas IEEE e IEC para a determinação das P_{sup} e cálculo da eficiência de uma máquina de indução estão ultrapassados e na realidade não representam o valor real das P_{sup} existentes.

Em 1960 Schwarz concluiu que a magnitude das P_{sup} era maior do que 1% da potência de entrada e que o teste de rotação reversa não apresentava valores precisos (Schwarz, 1964). A sua conclusão difere de uma de 1959 do AIEE Committee que afirma que a precisão do teste de rotação reversa é válida para a medição das P_{sup} , mas que uma vez que as condições de fluxo durante o teste são diferentes, o teste tem alguns erros inerentes (Glew, 1999).

O ensaio de rotação reversa é baseado na suposição fundamental de que toda a P_{sup} de alta frequência é suprida pela potência mecânica. Visto que uma proporção da P_{sup} harmónica é suprida pelo estator, há um erro no ensaio de rotação reversa e o valor diferente das perdas derivam disso. Assim, a P_{sup} obtida dos ensaios deve ser ajustada pela adição da quantidade da $2^* \square (P_n / (n+1))$ onde n assume valores: $n = 1 \pm 6K$ (Chalmers B.J., 1963).

Há necessidade de se determinar experimentalmente as P_{sup} , uma vez que o cálculo não fornece uma boa orientação. Tal importância passa pela necessidade de se medir a influência de algumas alterações a nível de projecto, que o cálculo por si só não consegue suprir.

O método Eh-star apresenta resultados com incerteza baixa e tem sido utilizado na medição de P_{sup} em estudos para alteração do projecto do motor com o objectivo de reduzir as P_{sup} .

Visto ser um assunto actual e de extrema importância na globalização e padronização da forma de determinação do rendimento de uma máquina de indução, um capítulo desta dissertação incide na análise detalhada destes dois métodos, Eh-star, e método entrada-saída.

4.3 Influência do Projecto na redução das perdas suplementares

O projecto de uma máquina de indução deve ser feito, geralmente, tendo em conta a Min (custo) para determinadas condições de desempenho. Uma das parcelas das P_{totais} são as P_{sup} que estão presentes em maior ou menor percentagem. Quando a percentagem de $P_{\text{sup}}/P_{\text{totais}}$ é significativa, a eficiência da máquina será afectada negativamente, como se verá mais à frente neste capítulo.

Este é, por tal facto, um assunto que tem merecido a atenção de investigadores e fabricantes de motores, que unem esforços na tentativa de Min (P_{sup}) através de alterações no projecto de motores eléctricos.

Como introdução ao capítulo da influência do projecto nas P_{sup} realizaram-se vários estudos recorrendo a uma base de dados construída para esse fim, e apresentá-los nesta dissertação juntamente com a opinião de vários investigadores recolhida de diversos artigos.

Com acesso aos resultados de 151 ensaios experimentais realizados na WEG, construiu-se uma base de dados com motores de uma faixa de potência de 0,25 cv a 270

cv. Todos os motores que fazem parte do banco de dados são motores de 4 pólos e todos os ensaios foram realizados à frequência industrial de 50 Hz.

Os métodos usados para o apuramento das P_{sup} foram o método NBR 5383 e o método IEC 60034-2. Sendo o método NBR 5383 baseado no IEEE 112-B, método em que a IEC se apoiou para a revisão do IEC 60034-2, acompanhado do facto de os ensaios terem sido realizados no Brasil e de todos os resultados estarem disponíveis segundo esta norma, o método da NBR foi escolhido para estudo estatístico.

Homogeneizou-se ao máximo a amostra escolhendo motores que diferissem pouco nas características construtivas. Torna-se complicado reunir motores iguais e/ou muitas vezes semelhantes. Outro problema que afecta este estudo é o facto de existirem erros associados às medições. Como será visto posteriormente, nunca se obtém o mesmo valor para as P_{sup} quando se repete um ensaio com o mesmo motor. O método para determinação de P_{sup} utilizado é susceptível de erros em todo o seu procedimento, conforme analisado no capítulo dos ensaios. Depende da pessoa que realiza o ensaio e do cuidado e precauções com que este é realizado. Estes erros são difíceis de quantificar.

Os 151 motores analisados foram separados tendo em conta a potência e a carcaça. A tabela 2 mostra as características dos motores utilizados.

Tabela 2 – Amostra de motores ensaiados na WEG usados no estudo realizado nesta dissertação

Carcaça (em mm do chão ao eixo)	Potência (cv)	Nº motores
63	0,25	1
71	0,33	1
71	0,5	2
80	0,5	1
80	0,75	1
80	1	1

90	1,5	2
90	2	5
90	3	1
100	3	3
100	4	2
112	5,5	6
112	7,5	3
132	7,5	5
132	10	4
132	12,5	1
160	12,5	3
160	15	5
160	20	7
180	20	1
180	25	2
180	30	3
180	40	2
200	40	3
225	50	3
225	60	2
250	75	5
250	100	3
280	100	2
280	125	3
280	150	6
315	150	7
315	175	8
315	180	3
315	200	6
315	220	12
315	240	1
315	250	13
355	250	1
315	270	6
355	270	2

Alguns destes motores foram projectados para funcionar com tensões diferentes. A tensão destes motores varia numa banda de 200 V e 690 V. Para que os resultados não fossem influenciados pela alteração da razão do número de espiras por conta de manter o seu fluxo constante, foram feitos 2 estudos diferentes: um que envolveu todos os motores, e outro que envolveu apenas os motores com a tensão numa banda de 380 V a 440 V. A diferença das P_{sup} de um motor dentro desta banda de tensão com os mesmos aspectos construtivos, a mesma potência e carcaça conduz a um erro menor.

A primeira fase do estudo consistiu em analisar a variação das P_{sup} com a potência do MIT. É possível observar a evolução das P_{sup} no gráfico mostrado em baixo, em que:

$f_{1_1^{o}amostra}$ = Regressão linear que aproxima as P_{sup} em função da potência (cv)

$f_{2_1^{o}amostra}$ = Regressão de 2ª ordem que aproxima as P_{sup} em função da potência (cv)

$Y_{1_amostra1}$ = Valor das P_{sup} no ponto x (IEC)

$Y_{2_amostra1}$ = Valor das P_{sup} no ponto x (NBR)

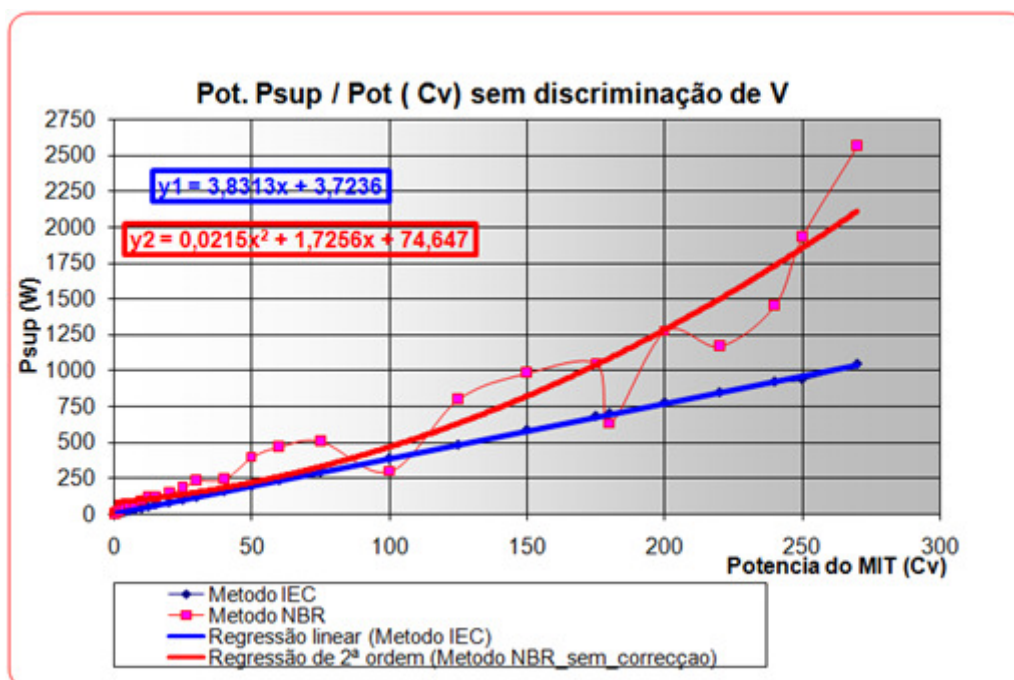


Figura 4 – Gráfico da ΔP_{sup} com a potência (cv) do MIT.

Para a construção do gráfico da figura 4, foram utilizados todos os motores da amostra recolhida, tendo sido feito uma média aritmética das P_{sup} para as classes de potência de que se dispôs de mais do que um motor ensaiado.

Foram analisados duas séries de valores, uma para as P_{sup} determinadas pelo método da IEC 60034-2 ($0,005 * P_{abs}$) e outra pelo método da NBR 5383.

Posteriormente foi feita uma regressão linear para os valores das P_{sup} determinadas pelo procedimento da IEC 60034-2 e uma regressão de 2ª ordem para as P_{sup} , dados os respectivos comportamentos, determinadas pelo método NBR 5383, de modo a obter-se uma função de aproximação $f_1(x)$ e $f_2(x)$ no gráfico da figura 4.

Como se pode observar, os valores das P_{sup} em função da potência do MIT podem ser representadas por uma recta quando são determinadas pelo método IEC 60034-2 e aproximadas por um polinómio de 2º grau quando determinadas pelo método NBR 5383. As equações para as regressões Y_1 e Y_2 mostram-se no gráfico da figura 4. Em ambos os casos as P_{sup} crescem com o aumento da Potência do motor, embora haja uma tendência de aumentarem em maior proporção para potências a partir dos 100 cv. Outro aspecto que se observa no gráfico da figura 4 é que os valores das P_{sup} para MIT dos 0,25 cv até 75 cv apresentam valores semelhantes nos dois métodos de cálculo utilizados, começando a divergir a partir dos 75 cv e a afastarem-se significativamente a partir dos 100 cv.

Hoje sabe-se que o método IEC 60034-1 que atribui às P_{sup} o valor de 0,5% da P_{abs} é um método desactualizado e que subdimensionava o valor destas, permitindo aos fabricantes europeus classificar os seus motores e declarar na chapa de características um rendimento superior ao declarado pelos fabricantes americanos de motores que se regem pelas normas da IEEE ou NBR (Glew, 1998; Glew, 1999; Renier, 1999; Machado, 2008).

Para reduzir o erro desta primeira estimativa, escolheu-se então uma gama de tensões no intervalo de 380V a 400V, e utilizando-se os resultados dos ensaios das P_{sup} para a mesma banda de potência igual à anterior, projectou-se um segundo gráfico (representado na figura 5), semelhante ao gráfico da figura 4, com uma amostra mais reduzida mas com tensões de funcionamento semelhantes. Isto porque as P_{sup} dependem

da corrente, e quanto maior for esta corrente, maior serão as P_{sup} (Nailen, 1987). Este processo foi apenas realizado com os valores das P_{sup} obtidos através do procedimento de ensaio da NBR 5383, um dos métodos de utilização mais comum nos laboratórios dos fabricantes (método indirecto de separação de perdas) (Renier, 1999).

Com a 2ª amostra de motores, construiu-se então uma nova função das P_{sup} em ordem à potência (cv), $Y_{4_amostra2} = f_{4_2^a amostra}$ em que:

$f_{4_2^a amostra} =$ Regressão de 2ª ordem que aproxima as P_{sup} em função da potência (cv)

$f_{3_1^a amostra} =$ Regressão de 2ª ordem que aproxima as P_{sup} em função da potência (cv)

$Y_{4_amostra2} =$ Valor das P_{sup} no ponto x (NBR)

$Y_{3_amostra1} =$ Valor das P_{sup} no ponto x (NBR)

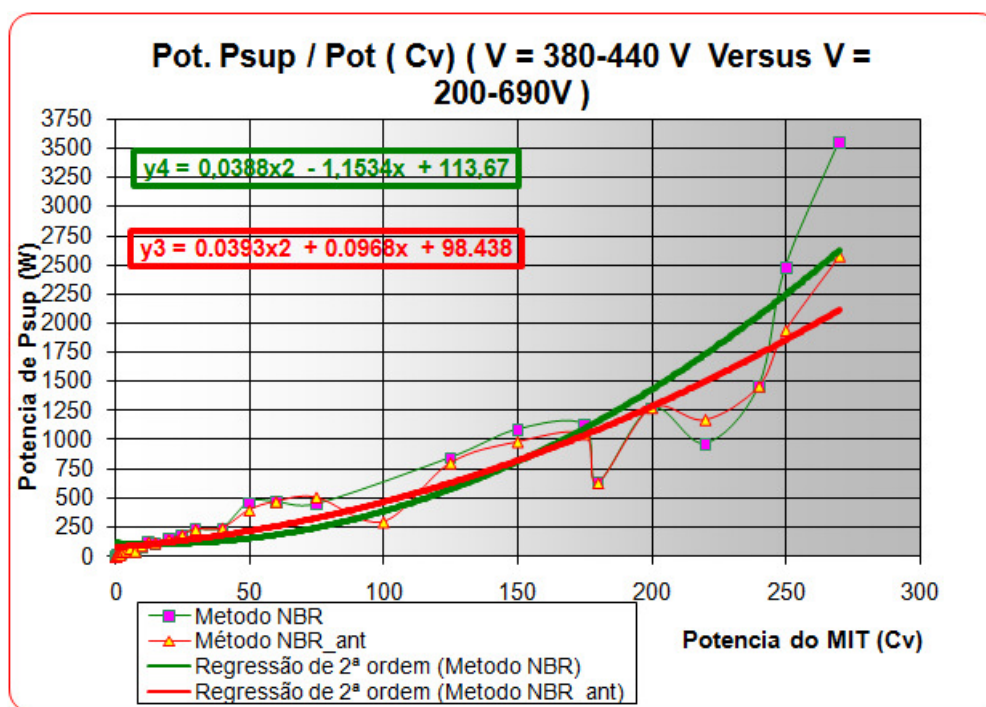


Figura 5 - Gráfico da Variação das P_{sup} (NBR 5383) com a potência (cv) do MIT.

A linha a vermelho no gráfico da figura 5 mostra a evolução das P_{sup} com os dados referentes à 1ª amostra e a linha de tendência a verde avalia as P_{sup} em função da

P_n do MIT para uma gama de motores pertencentes à 2ª amostra, projectados para uma tensão nominal entre 380 V a 440 V. Observando o gráfico da figura 5 verifica-se uma tendência das duas curvas para quase se sobreporem dos 0,25 cv aos 175 cv, exceptuando para valores de P_n acima de 175 cv em que se começa a perceber uma distanciação entre as duas curvas. Esta diferença fez com que a curva de regressão de 2º grau da 2ª amostra apresentasse um declive superior ao da curva da 1ª amostra. O facto de a amostra ser algo reduzida pode ter contribuído para estes desvios (efeito da média).

Um ponto interessante e de não menos importância refere-se à validade destes ensaios e ao respectivo erro. Devido ao procedimento de ensaio da NBR 5383 para a determinação das P_{sup} ser um procedimento de ensaio constituído por vários sub-procedimentos, que englobam uma série de testes no motor (conforme apresentado no capítulo 4.5, estes valores de P_{sup} estão sujeitos a alguns erros significativos. Como prova disso temos o facto evidente de o valor de P_{sup} para um motor de P_n 0,25 cv apresentar um valor de P_{sup} negativo de -1,69 W. Sendo este um método de separação de perdas através da realização de vários ensaios, e tendo as P_{sup} um valor reduzido para motores com P_n de valor reduzido, a subtracção da P_{abs} pelas restantes Perdas (mecânicas, eléctricas e magnéticas) deu um valor negativo. Isto implica um erro de medição da potência útil por defeito e/ou erros por excesso cometidos na medição das restantes perdas. Assim, para a projecção do gráfico 1 e 2, foi corrigido o valor de P_{sup} do MIT de 0,25 cv de -1,69 W para 0 W.

Outra das curiosidades era saber a evolução de P_{sup}/P_n em função da P_n do motor. O gráfico da figura 6 a seguir mostra essa evolução, com uma curva de tendência polinomial de cor verde. Observa-se que para motores de potência mais reduzida a percentagem de P_{sup}/P_n atinge valores mais elevados do que para os restantes valores de P_n , situando-se entre um valor mínimo de 0,5 % e máximo de 2,25%.

Um artigo que faz estudos semelhantes é o artigo (Almeida, 2001), mas com a diferença em que os estudos são feitos em relação à P_{entrada} e não à P_n . Como se poderá ver à frente, quando analisamos as $P_{\text{sup}}/P_{\text{totais}}$ verificamos a situação oposta, isto é, a percentagem de $P_{\text{sup}}/P_{\text{totais}}$ é mais elevada para motores maiores.

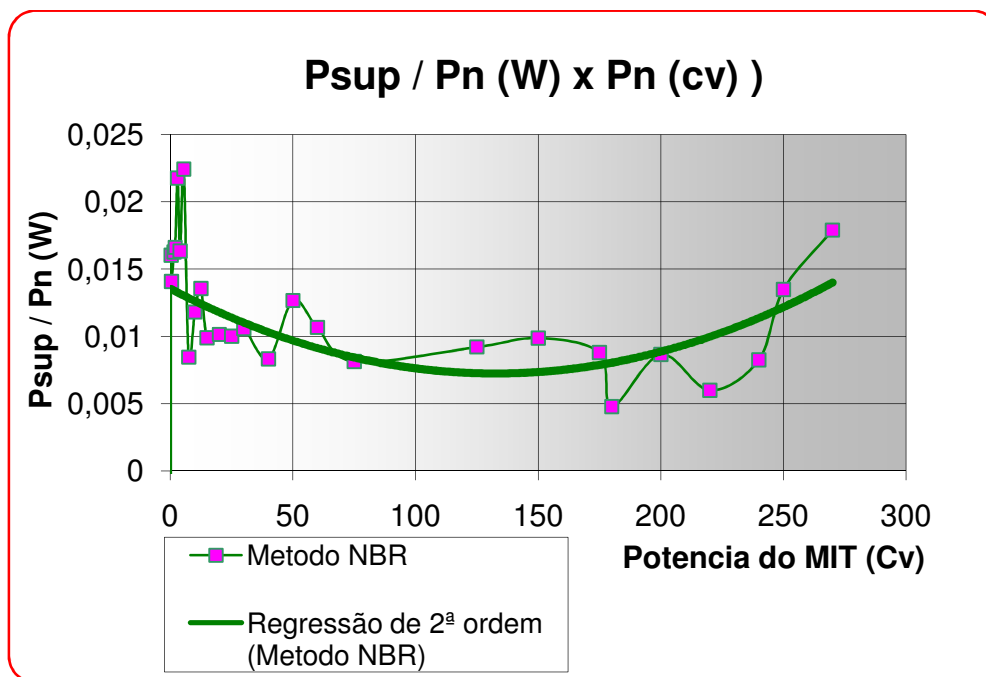


Figura 6 - Gráfico da Variação das P_{sup} (NBR 5383) com a potência (cv) do MIT.

Como é perceptível pelas análises gráficas efectuadas, apesar de as P_{sup} apresentarem um peso maior nas P_{totais} para máquinas mais pequenas, é nas máquinas grandes em que esta potência de P_{sup} é mais elevada. Assim, para motores de P_n reduzida, as P_{sup} apresentam valores relativamente reduzidos. Daí resulta o facto de, para P_n baixa, o projectista geralmente dispensar o choque térmico do rotor, consoante a exigência do rendimento pretendido para a máquina.

A utilização do choque térmico tem como finalidade reduzir as P_{sup} e consequentemente reduzir a elevação de temperatura no enrolamento do motor, bem como reduzir todos os outros efeitos nocivos das P_{sup} já referidos nesta dissertação. Isto é conseguido à custa da melhoria do isolamento das correntes inter-barras que fluem

através do material ferromagnético do rotor, através da redução da rebarba na superfície das lâminas de aço, por efeito do choque térmico.

Quando ensaiamos um motor com choque térmico e obtemos os valores das P_{sup} pelo método da separação de perdas, obtemos um valor mais reduzido, uma vez que o choque térmico vai reduzir as P_{sup} . Já se for usado o método IEC 60034-2 para determinar as P_{sup} de um motor com choque térmico, o valor que as P_{sup} apresentam não se irá alterar, uma vez que é uma percentagem fixa da P_{abs} . No entanto, vai reflectir-se no rendimento da máquina, através da redução da temperatura interna que faz descer outras perdas que designamos por convencionais, obtendo-se na mesma um acréscimo no rendimento pelo ensaio e respectivos cálculos em ambos os métodos.

Para além do incremento de custo e de potência que o projecto de uma máquina grande representa, como as P_{sup} são mais acentuadas a partir de uma certa P_n , é habitual os projectistas terem mais cuidado nos projectos de motores de P_n a partir de um determinado valor. É comum o projectista ter mais atenção com as perdas Joule, que geralmente são as mais elevadas, e influenciam directamente na temperatura interna da máquina, no entanto é necessário ter cuidado, porque à medida que a potência do MIT aumenta, não só aumentam as P_{sup} como também aumenta a percentagem de P_{sup} nas P_{totais} . Assim, à medida que cresce a P_n do MIT, rapidamente as P_{sup} passam a ter um papel fundamental no projecto do motor para a maximização da sua eficiência energética.

A percentagem das P_{sup} face às P_{totais} de um MIT com P_n de 1 cv, calculados a partir da amostra de motores recolhida para estudo, é em média 6%, contra 23% de P_{sup} / P_{totais} num motor com P_n de 270 cv. Tal facto está representado em seguida nas figuras 7 e 8.

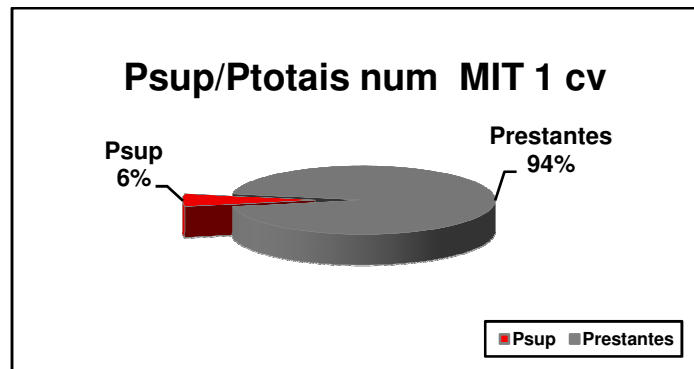


Figura 7 - Gráfico de P_{sup}/P_{totais} de um MIT de P_n de 1 cv.

Para que esta fatia de P_{sup}/P_{totais} aumente, a percentagem de outras perdas em relação às perdas totais do MIT terá obrigatoriamente que diminuir.

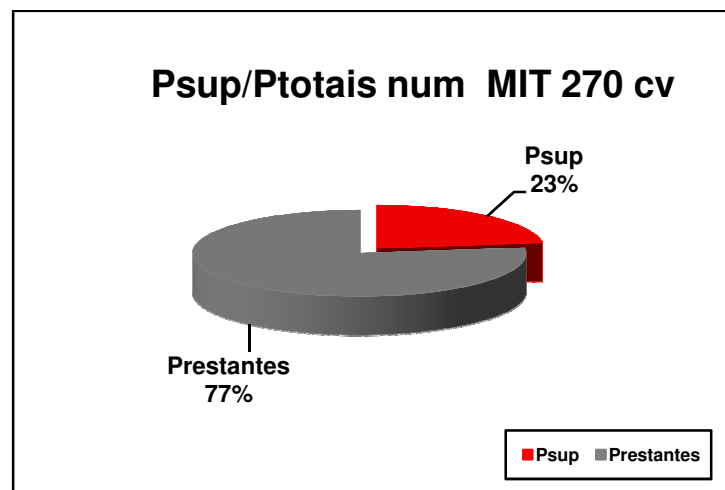


Figura 8 - Gráfico de P_{sup}/P_{totais} de um MIT de P_n de 270 cv.

Uma justificação óbvia para esta diminuição está nas P_{Joule}/P_{totais} que diminuem com a P_n do MIT devido ao obrigatório aumento da secção dos enrolamentos com o aumento da P_n do motor e conseqüente redução da percentagem das P_{el} .

Dos resultados dos ensaios para a determinação das P_{sup} obtêm-se valores quase sempre diferentes, isto é, com uma incerteza relativa elevada. Seja para o mesmo motor em que se repetem os ensaios, seja para motores semelhantes, a inevitabilidade parece repetir-se. Para as várias bandas de P_n dos motores considerados na amostra recolhida

para a realização deste capítulo da dissertação, apresenta-se aqui graficamente como é provável que, para motores iguais ou muito semelhantes, se obtenha valores tão diferentes de P_{sup} .

Um das características construtivas dos motores são as dimensões da sua carcaça. A distância do chão à ponta do eixo é uma dimensão conhecida e é um dos modos de na indústria se referirem ao tamanho do motor. Assim, esta foi uma característica utilizada para o estudo que se apresenta a seguir. Os motores foram divididos por carcaça para apresentar os resultados para motores de características construtivas semelhantes. Como exemplo escolheu-se 3 carcaças diferentes, 132 mm, 160 mm e 180 mm, e nos gráficos 5, 6 e 7 apresentam-se, respectivamente, os resultados dos ensaios para determinação das P_{sup} .

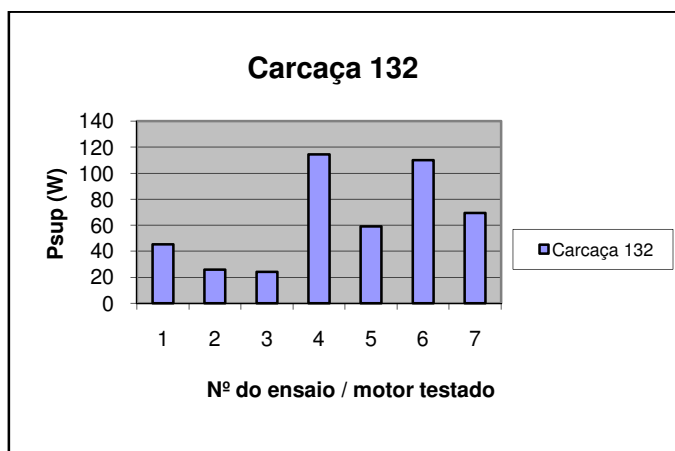


Figura 9 – Gráfico da Diferença de valores de P_{sup} em motores semelhantes da carcaça 132.

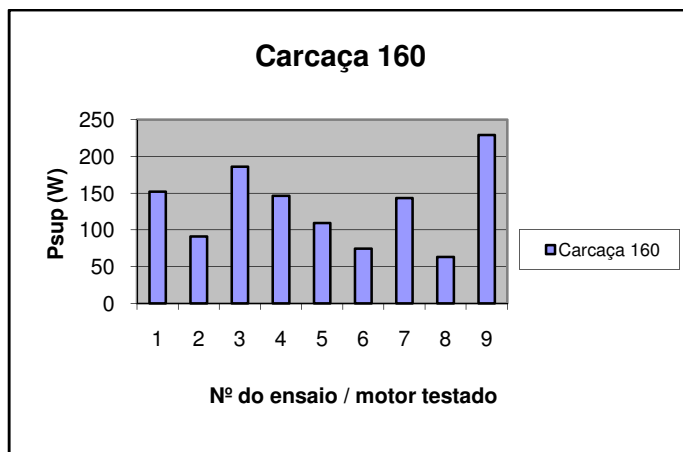


Figura 10 - Gráfico da diferença de valores de P_{sup} em motores semelhantes da carcaça 160.

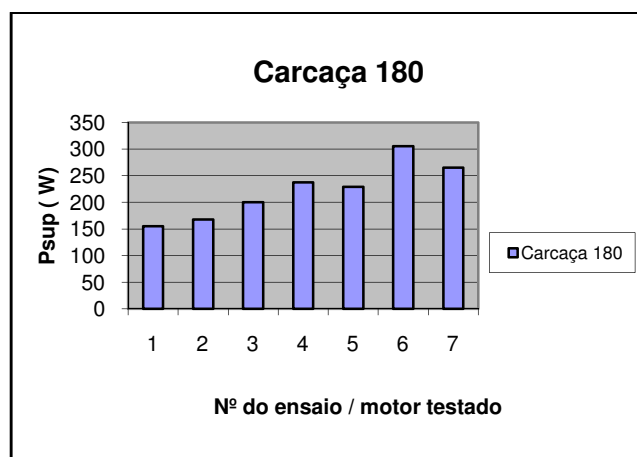


Figura 11 - Gráfico da Diferença de valores de P_{sup} em motores semelhantes da carcaça 180

Embora a preocupação do projectista esteja sempre presente durante a fase do projecto e cálculo eléctrico do motor no que diz respeito a todo o tipo de perdas e no seu valor total, existe de facto uma banda de P_n no MIT em que se torna necessário um cuidado especial no que diz respeito às perdas suplementares.

Torna-se difícil na indústria ter acesso a resultados de motores pequenos, uma vez que a P_{totais} destes são de tal modo reduzidas, que raramente o projectista solicita à fábrica ensaios destes motores. Geralmente só motores grandes são ensaiados, devido à

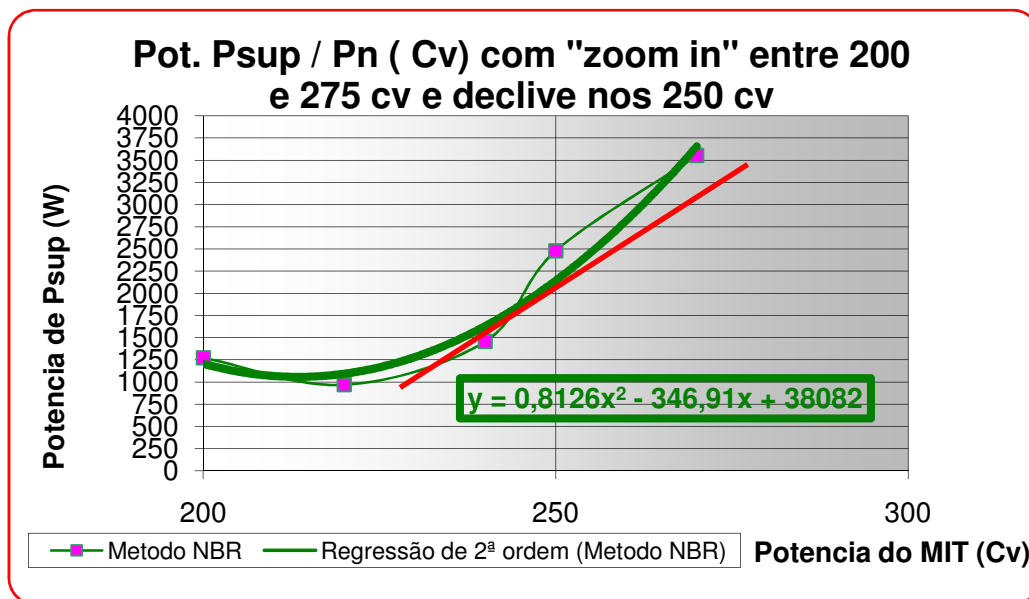


Figura 12 – Gráfico da variação das P_{sup} entre P_n 200 cv e 275 cv.

sua elevada P_{perdas} . É observável no gráfico da figura 12 como as P_{sup} crescem rapidamente a partir de determinada P_n do MIT e é justificável então a redução deste tipo de perdas a partir de propostas de alteração a nível de projecto. Tais alterações apresentam-se aqui descritas em seguida.

É mencionado em (Alger, 1959) que é necessário desenvolver fórmulas que dimensionem correctamente as P_{sup} de modo a poder-se promover correctamente a alterações de projecto.

Em seguida apresenta-se uma série de opiniões de autores conceituados.

Técnicas encontradas para redução das P_{sup} resultam sempre em outras insuficiências de projecto. O desafio é o desenvolvimento de um método que reduza as P_{sup} sem criar nada novo nem ampliar problemas técnicos ou económicos existentes (Jimoh, 1985).

A configuração dos dentes, ranhuras, entreferro e enrolamentos influenciam o fluxo de dispersão, principalmente o fluxo zig-zag que é responsável pelas perdas de alta frequência (Machado, 2008).

O fluxo de fugas zig-zag tem esta denominação por passar para a frente e para trás do entreferro, entre o estator e o rotor, ligando os condutores dos dois (Nailen, 1987).

O aumento do cobre nos enrolamentos e respectiva secção aumenta as P_{sup} através das correntes de Foucault, enquanto diminui as P_{el} . Foi estudada a ideia de que deveria haver uma profundidade óptima no condutor para qual as P_{totais} são mínimas (Jimoh, 1985).

Ainda relativamente aos enrolamentos foi estudado um arranjo especial para diminuir as P_{sup} (Nailen, 1987), tendo-se obtido bons resultados especialmente para motores de 2 pólos. O mais comum é intercalar os enrolamentos, em que uma ou mais bobinas no fim de um grupo por fase seja intercalada com as bobinas correspondentes no grupo de bobinas adjacentes. Isto tem o efeito de diminuir a transição brusca entre o caminho de fluxo nos respectivos grupos, diminuindo as P_{sup} e incrementando a eficiência do motor até 1%.

A utilização de um enrolamento helicoidal saliente produz menos dispersão nas partes finais do núcleo do que um enrolamento convencional do mesmo tamanho (Jimoh, 1985). Usar uma camada dupla de enrolamentos com contribuição baixa em harmónicos, reduz a variação de fluxo a alta-frequência nos dentes do motor, promovendo a diminuição das correntes inter-barras. Uma redução forte nas P_{sup} pode corresponder a um aumento de eficiência significativa (Boglietti, 2003).

Geralmente as P_{el} adicionais não são consideradas como sendo uma componente severa das P_{sup} . Tal facto é válido para máquinas que estão pouco tempo em serviço e numa máquina bem projectada. No entanto as P_{el} adicionais assumem relevância quando a máquina tem eficiência mais baixa e uma ventilação pobre. Estas perdas nos enrolamentos do estator devidas às componentes harmónicas de corrente induzida pelo

campo não sinusoidal no entreferro têm recebido pouca atenção. Assume-se que as P_{sup} são reduzidas no enrolamento do estator em máquinas pequenas e que são insignificantes em máquinas grandes (Jimoh, 1985).

Quanto maior o entreferro, mais baixas ficam algumas componentes das P_{sup} . O preço a pagar é o aumento da corrente de magnetização e as P_{el} associadas nos enrolamentos.

O entreferro maior diminui P_{sup} porque ele promove mais liberdade para o fluxo disperso para suavizar as ondulações. Foi relatada uma diminuição de 56% nas P_{sup} quando o entreferro foi aumentado em 55%. Aumentar o entreferro não é a solução ideal, porque quanto maior o entreferro, menor a permeância de entreferro, e assim, menor o factor de potência. (Jimoh, 1985).

As ligações da máquina têm alguma influência: uma ligação em triângulo apresenta P_{sup} mais elevadas do que uma ligação equivalente em estrela. Infelizmente o projectista nem sempre pode escolher (Nailen, 1987).

As perdas por pulsação nos dentes variam com a forma de abertura nas ranhuras, aumentando quando as ranhuras no estator ou no rotor são alargadas. Em máquinas grandes ranhuras rotóricas tornam-se impraticáveis, e estatóricas ainda mais (Nailen, 1987).

As perdas devido ao fluxo de cabeça de bobina dependem da estrutura dos enrolamentos do estator e do rotor. O fluxo de perdas aumenta com a proximidade da cabeça de bobina a estruturas magnéticas, tais como, deflectores, parafusos (Nailen, 1987).

Os níveis de fluxo axial na superfície do estator são mais reduzidos fazendo o rotor mais curto que o estator (Jimoh, 1985).

Aparafusando uma placa de cobre sobre o estator, entre este e a carcaça, permite que as correntes que circulariam pela carcaça do motor circulem por uma placa de baixa resistência reduzindo as P_{sup} (Jimoh, 1985).

O nível de P_{sup} varia muito e pode ser devido a um projecto pobre. O calor elevado pode levar à necessidade de melhorar a ventilação ou reduzir as perdas já conhecidas como meio de compensação para manter o motor dentro dos limites de temperatura permitidos pelo isolamento (Glew, 1998).

O efeito das fontes de harmónicos depende da perícia do projectista e do detalhe do projecto actual. É sempre um compromisso que envolver vários pesos como o custo, bem como a possibilidade de realizar o projecto dentro de fronteiras admissíveis (Glew, 1998).

Os harmónicos produzidos durante o funcionamento da máquina, tais como os de força magneto motriz, são produzidos pelo estilo, tipo de ligação e geometria dos enrolamentos do estator. A frequência e ordem destes harmónicos são controladas pelo número de ranhuras e pelo passo do enrolamento. Os Harmónicos de permeância, produzidos e controlados inteiramente pelo número de ranhuras do rotor e do estator. Os harmónicos de saturação, estão presentes quando as lâminas do núcleo são operados com níveis de fluxo no limiar da zona de saturação, a evitar (Glew, 1998).

Como meio de redução das harmónicas há quem sugira o uso de cunhas magnéticas nas ranhuras e grandes entreferros (Jimoh, 1985). As ondulações na distribuição do fluxo do entreferro são causadas por não uniformidades no entreferro devido às aberturas das ranhuras do estator. Ondulações de fluxo constituem os harmónicos que são responsáveis principalmente pelas perdas em carga. Quanto menor o entreferro e quanto mais larga a abertura das ranhuras, maiores são a pulsação da força magneto motriz e as perdas em carga. Assim, altas P_{sup} ocorrem em máquinas onde por

motivos de produção a maior abertura das ranhuras é usada para permitir a inserção dos enrolamentos. Isto pode ser melhorado se, após feita a inserção do enrolamento, as ranhuras forem fechadas com cunhas magnéticas – são comumente feitas de materiais magnéticos de baixa permeabilidade e alta resistividade. Além disso ajudam na:

- Redução do ruído electromagnético devido à diminuição da largura equivalente da ranhura do estator.
- Na redução da corrente de excitação devido à diminuição do entreferro.
- Diminuição da corrente de partida devido ao aumento da reactância de dispersão do estator.

No entanto o aumento da reactância diminui o binário de partida e o factor de potência. Não há sim sem senão. A cunha magnética resulta num envelhecimento mais rápido da máquina e de alto custo de produção. O envelhecimento caracteriza-se por uma deterioração mais rápida das propriedades magnéticas e mecânicas dos materiais (Jimoh, 1985).

A cunha de ferrite elve na máquina de indução aumenta o rendimento na carga nominal em pelo menos 4% (Jimoh, 1985).

Com a variação da resistência das barras da gaiola de esquilo é possível controlar as $P_{\text{sup}} RI^2$ que dependem da impedância do enrolamento bem como dos parâmetros do fluxo (Jimoh, 1985). Esta variação de resistência nas barras do rotor pode ser conseguida através do efeito pelicular, variação da resistência com a frequência em corrente alternada.

Uma possibilidade de reduzir as P_{sup} e as P_{fe} é pela escolha do material ferromagnético das lâminas que constituem o estator e o rotor. Há diversos tipos de materiais disponíveis no mercado com diversos valores de perdas watt/kg de ferro. A escolha do material da lâmina a ser utilizado está relacionada com o rendimento, e/ou

temperatura que se deseja no projecto eléctrico. Geralmente utilizam-se as chapas com menores perdas nos motores de alta eficiência e as chapas com maiores perdas nos motores standard, uma vez que a redução de perdas através da mudança de chapa é inversamente proporcional ao custo do material.

Tem sido estudado o comportamento das P_{sup} perante a não inclinação das ranhuras do rotor. Uma solução para a eliminação de grande parte das P_{sup} passa pela não inclinação das barras do rotor. O facto de o rotor não ter as ranhuras inclinadas aumentará o ruído e provocará quedas de binário no arranque do motor. No entanto estes efeitos indesejáveis podem ser reduzidos pela aplicação de conjuntos de ranhuras combinadas (Rathna, 2008).

4.3.1 Conclusões:

As P_{sup} são geralmente negligenciadas nos motores de baixa potência, uma vez que, apesar de apresentarem uma percentagem de $P_{\text{sup}}/P_{\text{totais}}$ elevada, as suas P_{totais} poderão representar um valor reduzido e nem sempre justificam investimentos na sua redução.

Em motores de potências mais elevadas, estas perdas assumem maior relevância, por se tratar de altos consumos de potência. Nestas máquinas, o valor de $P_{\text{sup}}/P_{\text{totais}}$ pode atingir 25%.

Relativamente à medição de P_{sup} verifica-se que raramente se obtém o mesmo resultado com a repetição de um ensaio.

Existe a necessidade de estabelecer métodos que determinem correctamente as P_{sup} para que se possam validar alterações de projecto na redução destas.

De todas as alterações de projecto propostas em cima por vários investigadores, nem todas são aplicáveis na prática devido ao seu alto custo ou dificuldade de fabrico.

Geralmente quando se altera o projecto de uma máquina de indução com vista na redução de uma componente das P_{sup} , acabamos por obter um aumento noutra componente. No entanto existem técnicas que podem e deverão ser usadas na fase de projecto como o isolamento das ranhuras que reduzem a circulação de correntes inter-barras, ou recorrer a enrolamentos com passo que reduza as P_{sup} , como a camada mista.

Outras alterações, como aumentar o entreferro, necessitam de ser estudadas uma vez que podem trazer mais malefícios do que benefícios para o rendimento do motor.

A utilização de material ferromagnético com baixas P_{fe} , é uma alternativa para a redução das P_{sup} , reduzindo também as P_{fe} , tendo associado o seu respectivo incremento no custo. Portanto é uma boa opção para incrementar a eficiência de uma máquina de indução.

Estudos recentes têm sido realizados fazendo o rotor com as barras sem inclinação, tentando suprir a falta de inclinação através de combinações de ranhuras diferentes.

Na secção seguinte é analisado a influência do fabrico nas P_{sup} .

4.4 Influência do Fabrico (processo) na redução das perdas suplementares

O projecto de um motor de indução com baixo custo, elevado desempenho e sua produção em massa representa um desafio extremamente complexo quando os efeitos variáveis das imperfeições industriais são levados em conta (Glew, 1998).

Entre esses estão as imperfeições industriais resultantes do pobre isolamento entre as barras do rotor e o ferro das lâminas (Jimoh, 1985) (Glew, 1998).

Durante pelo menos meio século, vários métodos foram propostos para reduzir a corrente inter-barras, através do isolamento da gaiola do núcleo. Tratamentos químicos e processos metalúrgicos foram tentados, quer para isolar as barras ou a superfície das ranhuras das lâminas. A maioria destes procedimentos foi considerada ineficaz ou demasiado caro. Um dos problemas passa por o alumínio das barras do rotor ter de resistir a temperaturas muito elevadas durante o tratamento. Outro problema é a inevitável expansão entre barras e ranhuras enquanto a máquina aquece e arrefece em funcionamento (Nailen, 1987).

O fluxo devido à inclinação das barras é um elemento significativo nas P_{sup} . Há ocorrência de fuga de corrente das barras para as lâminas, uma vez que a corrente percorre o caminho mais curto de um anel para o outro (Nailen, 1987).

A tensão induzida provoca circulação de correntes entre as barras através do aço das lâminas. Estas correntes podem ser neutralizadas fazendo a face efectiva do dente do rotor aproximadamente igual ao espaçamento (passo) dos dentes do estator, usando ranhuras fechadas no rotor e segmentando o rotor em duas ou três secções por meio de furos (anéis comuns em curto circuito, sendo que cada secção teria uma inclinação de um passo de dente do estator) (Jimoh, 1985).

Para melhorar a eficiência da máquina e características de funcionamento, foi provado que aplicar técnicas simultâneas de isolamento das ranhuras do rotor e de não usinagem das superfícies do rotor é muito eficaz. Tais condições, quando aplicadas, melhoram o binário de arranque e o rendimento. Com choque térmico melhoram ainda mais (Nishizawa, 1987).

Usinar a superfície do rotor normalmente remove alumínio. Mas o facto de se usinar, mesmo quando feito com extremo cuidado, desgasta sempre as extremidades de lâminas adjacentes na superfície do rotor, permitindo a circulação de correntes de

Foucault. Sendo assim, tratamentos da extremidade do rotor têm sido feitos para remover a condutividade inter-laminar. Uma delas é o tratamento por chama. O rotor é sujeito a uma chama de gás que desgasta a rebarba de alumínio proveniente da usinagem. É típica uma redução na ordem dos 20 a 25% de P_{sup} . O choque térmico é também usado, com o objectivo de quebrar as ligações na extremidade das lâminas, através do aquecimento extremo e rápido. Amolar as lâminas também é utilizado (Nailen, 1987).

O efeito pelicular nos condutores pode ser mantido baixo através de uma torcedura e transposição dos condutores (Jimoh, 1985).

As P_{sup} sofrem ainda influência do corte das chapas, o tipo de montagem dos pacotes, a pressão do empacotamento, o tratamento térmico dos pacotes de chapas e na variação dos parâmetros e qualidade de injeção do alumínio [6].

4.4.1 Conclusões

As P_{sup} sofrem uma redução com a aplicação do choque térmico ao rotor.

O tratamento das lâminas do núcleo ferro magnético com silício permite um isolamento superficial das correntes inter-barras.

O facto de não se usinar a superfície das lâminas do núcleo do rotor contribui para a diminuição das P_{sup} por correntes de Foucault.

A pressão de empacotamento do pacote de lâminas é de extrema importância uma vez que altera directamente a resistência inter-laminar e pode ser responsável pelo aumento das correntes de Foucault caso o empacotamento seja feito com uma pressão demasiado elevada.

Outra possibilidade de cortar a chapa magnética é o corte a laser. Esta possibilidade tem sido estudada recentemente. É de salientar que no corte a laser a

rebarba diminui, diminuindo portanto perdas por correntes de Foucault, no entanto o corte nas ranhuras, regra geral não fica tão perfeito, a menos que se tenha um sistema a laser muito preciso.

4.5 - Métodos de ensaio em foco actualmente da IEEE e IEC para determinação das perdas suplementares.

4.5.1 Método Entrada-Saída

4.5.1.1 – Introdução

Todos os dados necessários para a determinação das P_{sup} pelo método de entrada-saída estão legislados na norma IEEE 112-B para determinação da eficiência de uma máquina de indução são obtidos tanto com a máquina a operar como gerador, como com a máquina a operar como motor, dependendo da região de operação para o qual a eficiência for requerida (IEEE, 2004).

As perdas totais, $P_{in} - P_{out}$, são separadas em vários termos, sendo que as P_{sup} são definidas como sendo a diferença entre as P_{totais} e o $\sum P_{restantes}$ (perdas convencionais - eléctricas, magnéticas e mecânicas) possíveis de determinar com exactidão através de ensaios normalizados e respectivo cálculo. Estas P_{totais} podem ter erros uma vez que são obtidas através de ensaios em que se utiliza instrumentação com respectiva calibração e erros associados. Os valores obtidos para os pontos ensaiados são visualizados num gráfico em função do quadrado do binário e é feita então uma regressão linear com o objectivo de obter o valor da P_{sup} para todos os valores de carga e diminuir erros aleatórios de medições durante os ensaios.

4.5.1.2 Determinação das P_{sup} :

Estas perdas são calculadas para 6 pontos de carga como sendo a diferença entre a potência aparente total e o somatório das perdas eléctricas no estator $(I^2R)_{\text{est}}$ à temperatura de teste, das perdas no núcleo, das perdas por atrito e ventilação, e das perdas eléctricas no rotor $(I^2R)_{\text{rot}}$ correspondentes ao valor do deslizamento medido.

A extracção das P_{sup} é então realizada por método indirecto. São extrapoladas para todos os pontos por uma regressão linear que representa a expressão das P_{sup} em função do quadrado do binário:

$$P_{\text{sup}} = A.T^2 + B$$

Em que “ P_{sup} ” representa as perdas adicionais em função do binário, “ T ” é o binário em N.m, “ A ” é o deslizamento e “ B ” é a intercepção do valor das “ P_{sup} ” quando o binário é zero.

A curva das P_{sup} é então corrigida movendo a curva de modo a que passe na origem mantendo o declive original. O resultado desta correcção determina o valor correcto das P_{sup} para cada ponto de carga.

4.5.1.3 Requerimentos para a realização do ensaio

O ensaio para a determinação da eficiência da máquina, que torna possível a determinação das P_{sup} é constituído por uma série de ensaios. Estes ensaios devem ser realizados por uma determinada ordem, embora não seja obrigatório realizarem-se imediatamente a seguir uns dos outros. Cada sub-ensaio tem os seus requisitos e procedimento, e por isso, são analisados aqui separadamente no item seguinte.

4.5.1.4 Procedimentos de ensaio

- É necessário medir a resistência dos enrolamentos à temperatura ambiente, bem como realizar um ensaio à temperatura de teste tal como aparece no item 5.8.3.1 da norma IEEE 112 B.
- Efectua-se um teste em carga ao motor, acoplado a um dinamómetro, mantendo a temperatura do estator dentro de uma $\Delta 10$ °C da temperatura mais quente obtida no teste anterior. Para cada ponto de carga obtém-se o valor da potência na ponta do eixo a partir dos valores de teste de velocidade e binário, através da relação:

$$P = \frac{n_t \times T}{K_2}$$

Em que,

P é a Potência no eixo, em Watt.

n_t é a velocidade medida ou calculada através da medição do deslizamento em rpm.

K_2 é 9,549 para o binário em N.m.

T é o binário em N.m.

$$T = T_t \pm T_D$$

Em que,

T_t é o binário medido na máquina em Watt.

T_D é a correcção do dinamómetro normalizado no item 5.6.1.2 da IEEE 112-B.

- É necessário realizar um teste em vazio, rodando a máquina à tensão e frequência nominais sem conectar nenhuma carga ao veio do motor. Quando a

separação das perdas em vazio estiver concluída, lê-se a temperatura, tensão, corrente e potência de entrada à frequência nominal para os valores de tensão desde 125% da tensão nominal até ao ponto em que um pouco menos de tensão aumente ainda mais a corrente.

- Deixa-se estabilizar as P_{mec} por atrito nos anéis seguindo o procedimento do item 5.5.1 de IEEE 112-B
- A corrente de teste em vazio, I_0 , é a média das correntes nas fases.

4.5.1.5 Rotina de cálculo

- A potência medida à entrada do motor representa as P_{totais} do motor em vazio e consistem nas P_{el} no estator, P_{atrito} , P_{vent} e P_{fe} :
 - As P_{atrito} e P_{vent} podem ser determinadas por uma regressão linear usando 2 ou 3 pontos da curva potência por tensão ao quadrado. Subtraem-se as P_{el} do estator das P_{totais} (potência de entrada) em cada ponto da tensão de teste e faz-se um gráfico da potência em função da tensão, prolongando a curva até a tensão ser igual a 0. A intercepção com o ponto zero de tensão corresponde ao valor de das P_{atrito} e P_{vent} .
 - As P_{fe} para cada valor teste de tensão é obtido subtraindo o valor das P_{atrito} e P_{vent} da $P_{entrada}$ menos as P_{el} do estator.
 - As P_{el} no estator são calculadas pela expressão:

$$P_{el} = 1.5 \times I^2 \times R$$

Em que:

I é a corrente medida na linha, em Ampere.

R é a resistência medida entre dois terminais quaisquer entre duas fases, corrigida como manda a norma IEEE 112-B item 5.2.1.

- As P_{el} no rotor são determinadas pelas seguintes expressões para o motor e para o gerador:

- Para funcionamento como motor:

$$R \times I_{rotor}^2 = (P_{entrada} - R \times I_{estator}^2 - P_{fe}) \times s$$

- Para funcionamento como gerador:

$$R \times I_{rotor}^2 = (P_{entrada} + R \times I_{estator}^2 - P_{fe}) \times s$$

- As P_{sup} são calculadas para 6 pontos de carga pela expressão abaixo, como sendo a diferença entre a potência aparente total e o somatório das perdas P_{el} do estator, P_{fe} , P_{atrito} , P_{vent} e P_{el_rotor} correspondentes ao valor do deslizamento medido:

$$P_{sup} = P_{aparente_Total} - \sum (P_{el_estator} + P_{fe} + P_{atrito} + P_{vent} + P_{el_rotor})$$

A extracção das P_{sup} é então realizada por método indirecto. São extrapoladas para todos os pontos por uma regressão linear que representa a expressão das P_{sup} em função do quadrado do binário:

$$P_{sup} = A T^2 + B$$

Em que,

P_{sup} representa as perdas suplementares em função do binário

“T” é o binário em N.m.

“A” é o deslizamento

“B” é a intercepção do valor das “ P_{sup} ” quando o binário é zero.

A curva das P_{sup} é então corrigida movendo a curva de modo a que passe na origem mantendo o declive original. O resultado desta correcção determina o valor correcto das P_{sup} para cada ponto de carga.

4.5.2 Método Eh-star

4.5.2.1 Introdução

O prefixo do nome deste método tem origem do alemão Einphasig mit Hilfswiderstand, que em português significa monofásico com resistência auxiliar. O sufixo *star* deve-se ao facto da obrigatoriedade de os enrolamentos do estator serem ligados em estrela durante o ensaio.

O método de ensaio eh-star foi desenvolvido em 1967 pelos alemães Jordan, Richter e Röder (Jimoh, 1999) e pode ser aplicado a motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo para a determinação das P_{sup} .

Durante o ensaio, não há necessidade de acoplar a máquina de indução a um dinamómetro ou máquina auxiliar, ao contrário do que acontece noutros métodos. O motor é submetido a uma tensão trifásica desequilibrada, resultante da ligação de uma resistência R_{eh} entre dois terminais do motor e o desligamento de uma das fases da rede, após a mudança do interruptor 'S' da posição 1 para 2, conforme figura 13 (IEC, 2007) :

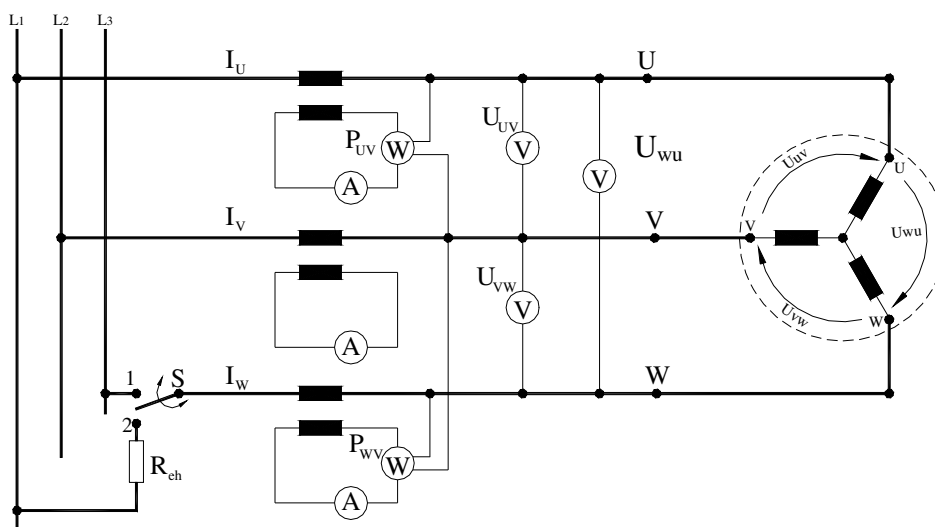


Figura 13 – Circuito eléctrico para o ensaio eh-star

O binário electromagnético resultante da alimentação assimétrica pode ser determinado considerando a máquina alimentada por duas fontes simétricas, uma no sentido da rotação (sequência positiva) e outra no sentido contrário (sequência negativa), ou seja, analisando as componentes simétricas.

O binário electromagnético varia fortemente com a corrente no estator, e a sequência negativa faz o papel da carga na ponta do eixo, ou seja, apesar da máquina estar a funcionar em vazio, o binário electromagnético produzido pela sequência positiva deve vencer mais do que a força de atrito e de ventilação (Jordan, 1967) .

4.5.2.2 Alimentação desequilibrada

Após a mudança do interruptor ‘S’ da posição 1 para 2, é possível redesenhar-se o circuito como é mostrado na figura 14:

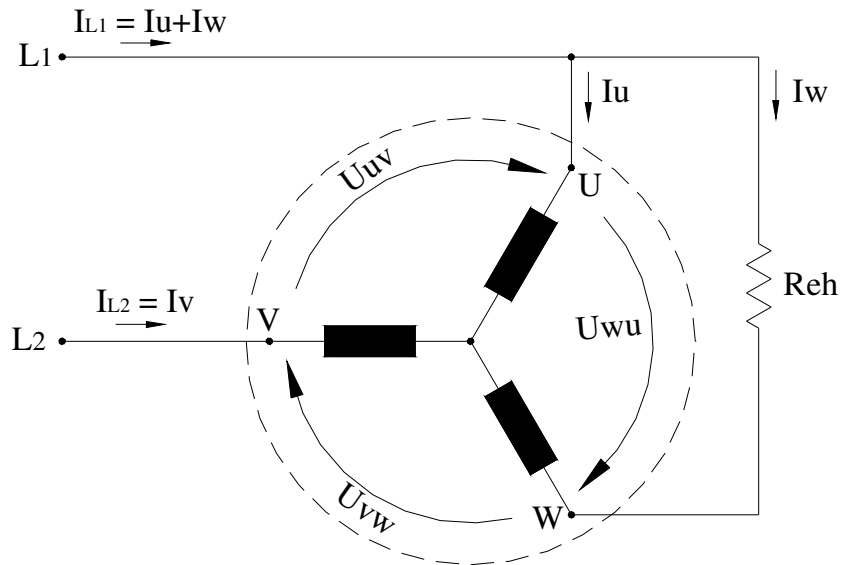


Figura 14 – Circuito simplificado após a mudança do interruptor S da posição 1 para a posição 2.

A máquina encontra-se agora ligada a duas fases do sistema de alimentação trifásico, o que equivale a ligá-la a uma fonte monofásica. Nesta situação, surgem nos terminais três tensões desequilibradas, que correspondem à alimentação trifásica assimétrica, a qual, pela regra das componentes simétricas, pode ser decomposta em três sistemas simétricos: sequência positiva, sequência negativa e sequência homopolar, em que:

- A corrente de sequência positiva impõe ao motor um binário com deslizamento próximo de zero (vazio), uma vez que não há carga aplicada na ponta do veio.
- A corrente da sequência negativa produz um binário de deslizamento próximo de dois (região de freio na curva binário x frequência angular), simulando assim condições de carga mesmo com o motor em vazio.

- A corrente da sequência homopolar não existe, uma vez que o motor está ligado em estrela e com o neutro em aberto, conforme indicado no item 6.4.5.5 da IEC 60034-2-1(IEC, 2007).

A máquina de indução alimentada assimetricamente, pode então ser considerada para efeitos de estudo como duas máquinas de indução equivalentes, acopladas ao mesmo veio, em que uma é alimentada pela componente directa (sequência positiva), operando com deslizamento “s” e a outra alimentada pela componente inversa (sequência negativa) operando com um deslizamento “2-s” (Jordan, 1967). Na figura 15 estão representadas duas máquinas virtuais como nº 1 e nº 2, respectivamente. A máquina alimentada pela componente directa (nº 1) representa a máquina em teste, enquanto que a alimentada pela componente inversa (nº 2) representa a carga aplicada na ponta do veio.

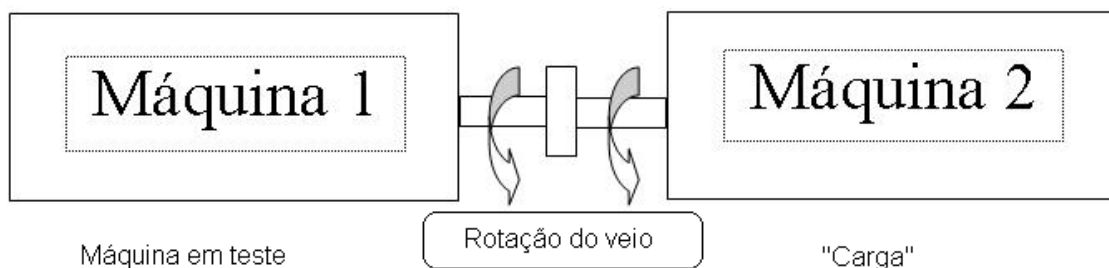


Figura 15 – Máquinas virtuais simulando a máquina sob teste eh-star.

Considerando $T_{(+)}$ o binário da máquina nº 1, alimentada pelo sistema de sequência positiva (U-V-W), e $T_{(-)}$ o binário da máquina nº 2, alimentada pelo sistema de sequência negativa (U-W-V), o binário eletromagnético resultante será $T_{(+)} - T_{(-)}$. Como o motor está a funcionar em vazio, este binário suprirá apenas o binário resultante devido ao atrito e ventilação T_{AV} e o binário das perdas suplementares T_S , ou seja, $T_{(+)} - T_{(-)} = T_{AV} + T_S$ [7].

Assim, semelhante ao que acontece no ensaio de rotação reversa da norma IEEE 112-E (IEEE, 2004), a carga será simulada com a componente inversa, porém com a

vantagem de neste caso não ser necessário acoplar o motor a um outro que o faça rodar no sentido contrário ao campo.

No método eh-star a corrente de sequência positiva não é considerada para o cálculo das P_{sup} e por isto não deve ser superior a 30% da corrente de sequência negativa. Este é inclusive um critério de aceitação do ensaio. Se não for cumprido em qualquer um dos seis pontos testados deve aumentar-se o valor da resistência R_{eh} e repetir todos os pontos.

Este percentual não é justificado na norma IEC nem em qualquer outro artigo sobre o método eh-star (Jordan, 1967). Supõe-se que se baseie no facto das P_{sup} variarem com o quadrado da carga, a qual é simulada pela corrente de sequência negativa. Como a corrente de sequência positiva também produz P_{sup} , as quais não são consideradas, limitar um percentual máximo de 30% desta corrente em relação à de sequência negativa limitará a participação dela nas perdas suplementares a apenas 9% do total ($0,30^2 = 0,09$) (Machado, 2008).

4.5.2.3 Determinação da resistência R_{eh}

O valor de R_{eh} é estimado inicialmente como sendo 20% da impedância de fase do motor (Z_f), que corresponde à relação entre a tensão (U_{Nf}) e a corrente de fase (I_{Nf}).

$$Z_f = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}}$$

$$R_{eh} = 0,2 \cdot Z_f$$

Na prática, R_{eh} deve ser tal que atenda o requisito da corrente de sequência positiva ser inferior a 30% da corrente de sequência negativa, ou seja, $I_+ / I_- < 0,3$, visto que é esta última quem representa a carga.

4.5.2.4 Determinação das perdas suplementares

Para se obtêr as P_{sup} , determina-se a potência no entreferro (P_{δ}) considerando simultaneamente as duas máquinas (sequência positiva e negativa), isto é, calcula-se $P_{\delta p}$ e $P_{\delta n}$. Para cada máquina observa-se uma alimentação trifásica equilibrada, porém dependente da alimentação trifásica original (tensões e correntes desequilibradas). Considerando positivo o sentido de rotação do rotor, tem-se:

$$P_{\delta} = P_{\delta p} - P_{\delta n}$$

Obtém-se $P_{\delta p}$ e $P_{\delta n}$ subtraindo as perdas Joule no estator (P_{j1p} e P_{j1n}) e as perdas no ferro (P_{fep} e P_{fen}) da potência total de entrada (P_{inp} e P_{inn}). Assim:

$$P_{\delta p} = P_{inp} - P_{j1p} - P_{fep} \qquad P_{\delta n} = P_{inn} - P_{j1n} - P_{fen}$$

A potência no entreferro apresenta duas parcelas: uma referente às perdas Joule no rotor (P_{j2}) (proporcional ao deslizamento) e outra referente às perdas suplementares e mecânicas (proporcional ao complemento do deslizamento). Desta última tira-se P_{sup} :

$$s.P_{\delta} = P_{j2}$$

$$(1-s).P_{\delta} = P_{sup} + P_{mec} \quad \rightarrow \quad P_{sup} = (1-s).P_{\delta} - P_{mec}$$

4.5.2.5 Requerimentos para o ensaio

- Os enrolamentos do estator devem ser ligados em estrela, sendo que os dados nominais por fase do motor devem ser referidos a esta ligação conforme a tabela 3.

Tabela 4 – Relação entre tensão e corrente de fase e de linha.

Se for ligação Y	Se for ligação Δ
$U_{Nf} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} ; I_{Nf} = I_N$	$U_{Nf} = U_N ; I_{Nf} = \frac{I_N}{\sqrt{3}}$

- Com uma frequência nominal fixa, deverá ser possível variar a tensão da rede desde 25% da tensão nominal até um valor capaz de atingir uma corrente de 150% da corrente nominal de fase do motor na ligação estrela.
- A forma de onda da fonte de tensão deve apresentar um HVF (harmonic voltage factor) menor ou igual a 0,015, conforme definido na norma IEC 60034-1.

$$HVF = \sqrt{\sum_{k=2}^{13} \frac{u_k^2}{k}} \leq 0,015$$

U_k : valor rms da tensão da harmónica por unidade da tensão nominal (k : 2,...,13)

- As perdas no ferro (P_{fe}), as perdas mecânicas (P_{mec}) (atrito e ventilação), a corrente em vazio (I_0) e a resistência de ligação estrela (Y) do estator a 20 °C ($R_{vw,20}$) devem ser pré-determinadas de acordo com o teste em vazio padrão.
- Determina-se então a corrente nominal de teste (I_{tN}) através da seguinte relação:

$$I_{tN} = \sqrt{I_{Nf}^2 - I_{0f}^2}$$

A tabela 4 apresenta exemplos da determinação da resistência R_{eh} e da corrente de teste, considerando dois motores 12 kW, 4 pólos, 400 V, 50 Hz, $I_N = 24$ A, $I_0 = 13$ A, um com ligação estrela (Y) e outro com ligação triângulo (Δ).

Tabela 4 – Exemplo de dois motores 12 kW 4p 400V 50Hz, um Y e outro Δ .

Ligação Y	Ligação Δ
$U_{Nf} = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231$ V	$U_{Nf} = U_N = 400$ V

$I_{Nf} = I_N = 24 \text{ A}$	$I_{Nf} = \frac{I_N}{\sqrt{3}} = \frac{24}{\sqrt{3}} = 13,8 \text{ A}$
$I_{0f} = I_0 = 13 \text{ A}$	$I_{0f} = \frac{I_0}{\sqrt{3}} = \frac{13}{\sqrt{3}} = 7,5 \text{ A}$
$Z_f = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} = \frac{231}{24} = 9,625 \ \Omega$	$Z_f = \frac{U_{Nf}}{I_{Nf}} = \frac{400}{13,8} = 28,9 \ \Omega$
$R_{eh} = 0,2 \cdot 9,625 = 1,925 \ \Omega$	$R_{eh} = 0,2 \cdot 28,9 = 5,78 \ \Omega$
$I_{tN} = \sqrt{I_{Nf}^2 - I_{0f}^2} = \sqrt{24^2 - 13^2} = 20,17 \text{ A}$	$I_{tN} = \sqrt{I_{Nf}^2 - I_{0f}^2} = \sqrt{13,8^2 - 7,5^2} = 11,58 \text{ A}$

4.5.2.6 Procedimento de ensaio

- Antes da execução do ensaio eh-star, deverá ser realizado o ensaio em vazio padrão, para determinação da corrente I_0 , P_{mec} e P_{fe}
- Monta-se o circuito da figura 12 e mede-se a resistência do estator a frio entre os terminais V e W, convertendo-a para o valor à temperatura de 20 °C ($R_{vw,20}$).
- Liga-se o motor e coloca-se em funcionamento durante 20 minutos sob tensão nominal, com o interruptor S na posição 1, para estabilizar as perdas em vazio (o ideal seria realizar o teste logo após o ensaio em vazio, pois neste momento as perdas já estão estabilizadas). Mede-se novamente a resistência entre os terminais V e W, que será a resistência inicial do ensaio eh-star ($R_{vw,ini}$).
- O motor é ligado novamente em vazio com uma tensão entre 25% e 40% da tensão nominal.
- Após a aceleração do motor, o interruptor “S” é comutado da posição 1 para 2 e a resistência R_{eh} fica ligada entre as fases U e W. O motor fica assim a funcionar com tensões desequilibradas. (Figura 12).

- Varia-se a tensão de alimentação U_{uv} , ajustando a corrente na fase V (I_v) em percentagem da corrente de fase nominal, em seis pontos entre 150% e 75% de I_{NF} . Inicia-se com a maior corrente, terminando com a menor, para limitar a variação de temperatura, sugerindo-se 150%, 138%, 125%, 113%, 100% e 75% (Binder, 2005).
- Para cada ponto mede-se I_u , I_v , I_w , U_{uv} , U_{vw} , U_{wu} , P_{in} e a rotação. Esta deverá ficar próxima da rotação nominal. A norma IEC limita a variação do deslizamento como o dobro do nominal.
- O motor é desligado e mede-se novamente a resistência do estator entre as fases V e W, que será a resistência final do ensaio eh-star ($R_{vw, fim}$).

4.5.2.7 Rotina de cálculo

Após as medições, os dados obtidos durante o ensaio deverão ser processados numa rotina de cálculo. Recorrendo ao desenvolvimento de um programa para leitura automática dos parâmetros medidos e execução da rotina de cálculo, a WEG conseguiu melhorar a qualidade dos resultados nos ensaios com o teste eh-star.

A sequência de cálculos para determinação das P_{sup} está acessível no anexo B da norma IEC 60034-2-1(IEC, 2007).

As P_{sup} determinadas para os seis pontos são colocadas num gráfico $(I_- / I_{iN})^2$, onde I_- é a corrente de sequência negativa de cada ponto e I_{iN} é a corrente de teste nominal dada em (3.2.5.2), fixa para todos os pontos. Com uma regressão linear obtém-se a equação $P_{sup} = A \cdot (I_- / I_{iN})^2 + B$. Como as P_{sup} por definição são nulas em vazio, despreza-se o parâmetro “ b ” obtendo-se $P_{supc} = A \cdot (I_- / I_{iN})^2$ (P_{sup} corrigidas). Assim,

para $(I_- / I_{tN})^2 = 1$, ou seja, $I_- = I_{tN}$, o parâmetro “a” corresponde ao valor das P_{sup} em regime nominal.

4.5.2.8 Conclusões

O facto de as P_{sup} serem determinadas de método diferente em várias regiões do globo e sua respectiva eficiência, levam a problemas na competição e quem sabe alguma confusão por parte de fabricantes e clientes (Aoulkadi, 2006).

Os resultados dos ensaios das P_{sup} mostraram que certas variáveis têm de ser medidas com extremo cuidado pois afectam fortemente os resultados das P_{sup} : potência eléctrica absorvida, o binário e a corrente de carga no estator (Boglietti, 2003).

O método Eh-star apresenta-se como uma forma fácil e rápida para determinação das P_{sup} de um motor de indução trifásico, visto que não necessita de acoplar o motor em teste a um dinamómetro ou máquina auxiliar. Este método apresenta uma boa conceituação teórica. É um método que apresenta boa repetibilidade nos resultados das P_{sup} para o mesmo motor (Aoulkadi, 2006; Machado, 2008).

No entanto não é aplicável para motores ligados em triângulo. Existe também a necessidade de reajustar R_{ch} para que o ensaio atenda ao critério $I_+/I < 30\%$ em todos os pontos, sendo necessário repetir o teste até que este critério seja atendido. Por vezes existe dificuldade em encontrar uma resistência com o valor necessário (Machado, 2008).

Os autores (Boglietti, 2003) sugerem que para uma avaliação correcta da eficiência de um motor, a temperatura real do ferro e a correspondente temperatura correcta das perdas no ferro devem ser levadas em conta.

Devido às constantes melhorias na precisão dos métodos de medição, os métodos directos de medição de P_{sup} deveriam ser abandonados assim que possível em detrimento do método IEEE 112-B (Renier, 1999).

O método da IEEE 112-B precisa de equipamentos super acurados para medição da potência de entrada e de saída (Aoukadi, 2006; Bradley, 2006). É um teste que leva tempo a ser executado. É também possível obter P_{sup} negativas com este método, devido ao falso pressuposto de que as P_{fe} são independentes da carga (Aoukadi, 2006).

São necessários melhores instrumentos de medição e melhor procedimento para melhorar o método 112-B. A mais provável fonte de erro é a incorrecta medição da resistência do enrolamento em cada ponto de carga. Isto poderá introduzir uma curvatura no gráfico das P_{sup} em função do quadrado do binário. A consequência desta curvatura é atribuir valores mais baixos às P_{sup} do que os valores reais (Bradley, 2006).

Para motores com eficiência até 95% devem usar-se métodos de medição indirectos para a determinação da eficiência, para motores com eficiência superior a 95% devem usar-se métodos directos, pressupondo um método directo para determinação das P_{sup} , como o método Eh-star (Aoukadi, 2006).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como já visto no capítulo 2, a partir da primeira grande crise do petróleo, em 1973, surgiu o início de um movimento de consciencialização da importância de aumentar a eficiência de todo o sistema de produção e transporte de energia eléctrica e de redução de perdas, sendo cada vez mais comum nos dias de hoje grandes investimentos na melhoria de equipamentos utilizados a nível industrial e doméstico para melhoria da eficiência energética.

Recentemente temos assistido a um crescente aumento do uso da capacidade do sistema de transmissão de energia eléctrica, uma vez que o consumo tem crescido mais do que a própria rede. Juntamente com os preços altos e crescentes da electricidade, do aquecimento global e do esgotamento a médio prazo das reservas de combustíveis fósseis, faz da eficiência energética um tema actual e diário.

Com o objectivo de clarificar a determinação da eficiência das máquinas de indução surge assim a necessidade do estudo da “5ª perda, o resíduo da ignorância”.

Ao longo dos anos a definição de P_{sup} não evoluiu muito. O seu conhecimento evolui lentamente ao longo de décadas, e ainda hoje permanecem algumas dúvidas sobre o tema. A notação utilizada para as caracterizar difere de autor para autor. Exemplo disso é o trabalho de Schwarz que reúne o consenso de ideias de vários autores e unifica o vocabulário utilizado. A obra de Schwarz, de 1964, é ainda nos dias de hoje uma obra de referência na definição e classificação das P_{sup} , bem como uma das preferidas do autor desta dissertação sobre o assunto.

Aliado ao facto do cálculo não fornecer uma boa orientação do valor das P_{sup} , surge então a necessidade de se determinarem experimentalmente estas perdas.

Começam a ser feitos trabalhos sobre métodos de ensaio para determinação de P_{sup} . Alguns desses métodos foram apresentados no 4.2.

O facto de as P_{sup} serem determinadas de método diferente em várias regiões do globo e sua respectiva eficiência, levam a problemas na competição e quem sabe alguma confusão por parte de fabricantes e clientes.

Os resultados dos ensaios das P_{sup} mostraram que certas variáveis têm de ser medidas com extremo cuidado pois afectam fortemente os resultados das P_{sup} : potência eléctrica absorvida, o binário e a corrente de carga no estator (Boglietti, 2003).

O método da IEEE 112-B precisa de equipamentos super acurados para medição da potência de entrada e de saída. É um teste que leva tempo a ser executado. Em diversos laboratórios este é ainda assim o teste padrão e está totalmente automatizado, permitindo reduzir o tempo total do ensaio. É também possível obter P_{sup} negativas com este método, devido ao falso pressuposto de que as P_{fe} são independentes da carga (Aoukadi, 2006).

Para motores com eficiência até 95% devem usar-se métodos de medição indirectos para a determinação da eficiência, para motores com eficiência superior a 95% devem usar-se métodos directos, pressupondo um método directo para determinação das P_{sup} , como o método Eh-star (Aoukadi, 2006).

O método de rotação reversa não apresenta valores precisos. Este método é baseado na suposição fundamental de que toda a P_{sup} de alta frequência é suprida pela potência mecânica. Visto que uma proporção da P_{sup} harmónica é suprida pelo estator, há um erro no ensaio de rotação reversa e o valor diferente das perdas derivam disso.

O teste de rotação reversa é um bom exemplo de um método ultrapassado pelo método Eh-star, este último em foco presentemente, e exposto no 4.5. O método Eh-star apresenta resultados com incerteza baixa e tem sido utilizado na medição de P_{sup} em projectos de alteração do design do motor com o objectivo de reduzir as P_{sup} . É uma forma fácil e rápida para determinação das P_{sup} de um motor de indução trifásico, visto que não necessita de acoplar o motor em teste a um dinamómetro ou máquina auxiliar. Apresenta uma boa conceituação teórica, bem como boa repetibilidade nos resultados das P_{sup} para o mesmo motor.

As propostas de alterações de projecto em ordem a reduzir as P_{sup} vão surgindo com a necessidade de se melhorar cada vez mais a eficiência das máquinas de indução.

É de salientar a importância dos métodos de ensaio para se medir a influência de algumas alterações a nível de projecto, que o cálculo por si só não consegue suprir.

A este nível as P_{sup} são geralmente negligenciadas nos motores de baixa potência, uma vez que, apesar de apresentarem uma percentagem de P_{sup}/P_{totais} elevada, as suas P_{totais} são reduzidas e nem sempre representam custos elevados para os clientes, proporcional ao número de horas de utilização das suas máquinas.

Em motores de potências mais elevadas, estas perdas assumem maior relevância, por se tratar de altos consumos de potência.

De todas as alterações de projecto propostas por muitos investigadores, nem todas são aplicáveis na prática devido ao seu alto custo ou dificuldade de fabrico.

Geralmente quando se altera o projecto de uma máquina de indução com vista na redução de uma componente das P_{sup} , acabamos por aumentar outra componente. No entanto existem técnicas que podem e devem ser usadas na fase de projecto como a opção pelo isolamento das ranhuras que reduzem a circulação de correntes inter-barras, ou recorrer a enrolamentos com passo que reduza as P_{sup} , como a camada mista.

Outras alterações, como aumentar o entreferro, necessitam de ser estudadas uma vez que podem trazer mais malefícios do que benefícios para o rendimento do motor.

A utilização de material ferromagnético com baixas P_{fe} , é uma boa alternativa para a redução das P_{sup} , reduzindo também as P_{fe} , reflectindo-se também num incremento do custo final da máquina. Apresenta-se como uma boa opção para aumentar a eficiência de uma máquina de indução.

A realização de estudos recentes do rotor com as barras sem inclinação, tentando suprir o efeito da inclinação através de combinações de ranhuras diferentes é um assunto actual e importante, dada a percentagem elevada de correntes inter-barras nas P_{sup} .

A influência do fabrico nas P_{sup} constituiu um capítulo importante na redução destas perdas. Elas sofrem uma redução com a aplicação do choque térmico ao rotor, e com o tratamento das lâminas do núcleo ferro magnético com silício, que permite um isolamento superficial das correntes inter-barras.

Um facto muito importante é a de não se usar a superfície das lâminas do núcleo do rotor contribui significativamente para a diminuição das P_{sup} por correntes de Foucault.

A pressão de empacotamento do pacote de lâminas é de extrema importância uma vez que altera directamente a resistência inter-laminar e poderá ser responsável pelo aumento das correntes de Foucault caso o empacotamento seja feito com uma pressão demasiado elevada. O corte da chapa magnética a laser constitui uma actualidade e tem como objectivo evitar a rebarba nas lâminas, diminuindo assim parte das perdas por correntes de Foucault. No entanto o corte nas ranhuras, regra geral não fica tão perfeito, dependendo da precisão do sistema a laser que se utiliza, podendo levar ao aumento da componente de P_{sup} por pulsasão de fluxos nas ranhuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alger, P. L. A., G.; John Davies, E. . Stray-Load Losses in Polyphase Induction Machines. June. 1959.

Almeida, A. T. F., F. T. E.; Busch, J. F.; . Comparative Analysis of IEEE 112-B and IEC-34-2 Efficiency Testing Standards using Stray Load Losses in Low Voltage Three-Phase, Cage Induction Motors. IEEE. 2001.

Aoulkadi, M. Evaluation of different Measurement Methods to Determine Stray Load Losses in Induction Machines. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. 2006.

Binder, A. A., M.;. Guideline Eh-star-Circuit for Stray Loss measurement. Darmstadt University of Technology, Germany, March. 2005.

Boglietti, A. C., A.; Lazzari, M.; Pastorelli, M.; . International Standards for the Induction Motor Efficiency Evaluation: A critical analysis of the stray-load Loss Determination. IEEE. 2003.

Bradley, K. J. A.-P., J. . Evaluation of Stray Load Loss in Induction Motors With a Comparison of Input-Output and Calorimetric Methods. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, v.21, n.3, September. 2006.

Chalmers B.J., B. S., A.C. Williamson, B. Sc. Perdas suplementares em motores de indução de gaiola de esquilo. Validade do método de rotação reversa. . Proceedings IEE, v.110, nº 10, Outubro. 1963.

Glew, C. N. STRAY LOAD LOSSES IN INDUCTION MOTORS: A CHALLENGE TO ACADEMIA. Power Engineering Journal, February. 1998.

Glew, N. STRAY LOSSES IN INDUCTION MOTORS – IF ONLY I KNEW WHERE TO START! , Alstom electrical Machines, Ltd. 1999.

IEC. Standard Methods for Determining Losses and Efficiency from Tests - (Excluding Machines for Traction Vehicles). [Norma IEC]. 2007.

IEEE. Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. [Norma IEEE], New York. 2004.

Jimoh, A. A. THERMAL EFFECTS OF STRAY LOAD LOSSES IN INDUCTION MACHINES. Department of Electrical Engineering / University of Durban. 1999.

Jimoh, A. A. F., R. D. & Poloujadoff, M.;. Stray Losses in Induction Machines. IEEE, v.PAS-104, n.6, June. 1985.

Jordan, H. R., E.; Roder, G.; . A Simple Method to Measure Additional Losses in Induction Machines. Journal ETZ-A v.88, n.23, Darmstadt University of Technology - Germany. 1967.

Machado, A.C.; “Determinação das Perdas Suplementares em Motores de Indução Trifásicos pelo Método Eh-Star”, Dissertação de Mestrado, Florianópolis, 2008.

Nailen, R., L.; . Stray load loss: What’s it all about? It’s the “fifth loss”- accounting for 15% to 20% - present in all motors. ABI/INFORM Global v.50, n.8, August. 1987.

Nishizawa, H. I., K.; Hibino, S.; Ishibashi, F.;. STUDY ON RELIABLE REDUCTION OF STRAY LOAD LOSSES IN THREE-PHASE INDUCTION MOTOR FOR MASS PRODUCTION. . IEEE - Transactions on Energy Conversion, v.EC-2, n.3, Toshiba Corporation - Mie - Japan - September. 1987.

Rathna, K. S. S., C.;. Design and Analysis of Asymmetrical Rotor for Induction Motors. International Conference on Electrical Machines. 2008.

Renier, B. H., K.;. Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, v.14, n.3, September. 1999.

Schwarz, K. K. Survey of basic stray losses in squirrel-cage induction motors. The institute of Electrical Engineers – Power, v.111, n.9, SEPTEMBER. 1964.