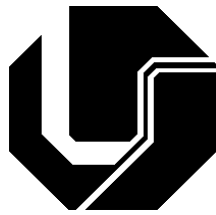


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DO MOTOR DE
INDUÇÃO TRIFÁSICO DE ALTO RENDIMENTO E LINHA
PADRÃO EM CONDIÇÕES DE ALIMENTAÇÃO IDEAL E NÃO
IDEAL**

VICTOR DE PAULA E SILVA

Uberlândia

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DO MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO DE ALTO RENDIMENTO E LINHA PADRÃO EM CONDIÇÕES
DE ALIMENTAÇÃO IDEAL E NÃO IDEAL

Dissertação apresentada por Victor de Paula e Silva ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca examinadora:

Décio Bispo, Dr. (Orientador) – UFU

José Tarcísio de Resende, Dr. – UFV

Sérgio Ferreira de Paula Silva, Dr. – UFU

Luciano Coutinho Gomes, Dr. – UFU

ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DO MOTOR DE INDUÇÃO
TRIFÁSICO DE ALTO RENDIMENTO E LINHA PADRÃO EM CONDIÇÕES
DE ALIMENTAÇÃO IDEAL E NÃO IDEAL

VICTOR DE PAULA E SILVA

Dissertação apresentada por Victor de Paula e Silva ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Décio Bispo, Dr.
(Orientador) - UFU

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

S586a Silva, Victor de Paula e, 1984-
2012 Análise comparativa do desempenho do motor de indução trifásico de alto rendimento e linha padrão em condições de alimentação ideal e não ideal / Victor de Paula e Silva - 2012. 199 f. : il.

Orientador: Décio Bispo.

Dissertação (mestrado) ó Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia elétrica - Teses. 2. Motores elétricos de indução - Teses. 3. Energia elétrica - Controle de qualidade - Teses. I. Bispo, Décio. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.3



HOMENAGEM

Posso dizer que sou privilegiado por ter trabalhado junto com Décio Bispo, que me transmitiu conhecimentos e lições de vida, para que me tornasse uma pessoa cada vez melhor. O “patrão”, como costumava chamá-lo em tom de brincadeira, figurou como um pai e além de tudo, um grande amigo. Na universidade, não foi professor apenas dentro de sala, era educador com muita ética e comprometimento, formando profissionais capazes e corretos. Nunca vi tamanha vontade de viver e gozar dos momentos em nenhuma outra pessoa. Um exemplo de esforço, integridade, humildade e superação. Em vida, trabalhou até seus últimos momentos para que seus discípulos pudessem alcançar seus objetivos e além de tudo, se honrarem de terem sido alunos, colegas de trabalho e amigos deste que foi muito mais do que um Doutor em Engenharia. Não me esquecerei do discurso sério e sincero, das cobranças, elogios e momentos de satisfação que tivemos e, principalmente, do tipo de homem que Décio Bispo foi. A palavra “discípulo” resume a gratidão e naturalidade do tipo de profissional que desejo ser, me lembrando sempre das sábias palavras que Bispo dizia.

Victor de Paula e Silva

“Décio Bispo foi meu professor, orientador e mais que isso, um amigo, um segundo pai. Através dos seus ensinamentos pude crescer como estudante, profissional e pessoa. Sempre dedicado e competente no que fazia Bispo, trabalhou muito até seus últimos instantes. Espero que de todos os frutos por ele deixados, possamos guardar principalmente seu exemplo de dedicação e trabalho constantes.

Sei que ele tinha muito orgulho de todos seus orientados do LEFE (Laboratório de Eficiência Energética) e acredito que onde quer que ele esteja continuará a se orgulhar do nosso sucesso e dos frutos por ele deixados, pois ele faz parte do sucesso de cada um.

Eu só tenho a agradecer ao professor Bispo por tudo que fez por mim e dedicar a ele todos os frutos colhidos e os que ainda estão por vir. Acredito que agora ele está mais perto de Deus, que é o lugar onde ele merece estar. Obrigada por tudo.”

Alin do Amaral Martins



“Deixo nessas poucas palavras o eterno agradecimento ao Prof. Décio Bispo pela presença intensa em nossas vidas. Somente quem esteve presente em sua rotina soube perceber a pessoa companheira, esforçada e dedicada que foi o orientador Décio. Uma pessoa que tivemos o privilégio de conhecer e da qual podemos nos orgulhar de termos trabalhado juntos; um professor para a vida, de quem poderemos levar para sempre grandes lições de esforço e perseverança. Obrigado!”

Marcos Vinícius Silva

“É com uma eterna gratidão que me expresso em relação ao, mais que orientador, amigo Décio Bispo. Concedendo a todos seus “meninos” muito mais que seu impecável apoio profissional, foi com ele que aprendemos o significado da palavra luta. O sentimento de saudade nunca deixará de existir, assim como suas profundas lições. Agradeço imensamente por ter tido a honra de conhecê-lo: Muito obrigado!”

Afonso Bernardino de Almeida Junior

“Doutor, professor, orientador, motivador, sempre participativo e envolvido com o ensino e evolução de cada aluno. Professor por legítima vocação, orientador por talento em motivar e direcionar seus alunos para sempre buscarem o aprimoramento e o aprendizado. Envolvia-se com suas causas e acolheu seus alunos sempre mostrando que se importava com cada um de nós. Deixou-nos belos exemplos a serem seguidos de caráter, ensinamentos e de como fazer diferença na vida das pessoas. Décio Bispo tem minha imensa admiração e eterna gratidão por tudo que fez por mim. Muito obrigada querido professor!”

Ciciane Chiovatto



DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Arlene e José, ao meu irmão, Jefferson e à Décio Bispo.



AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Décio Bispo (*em memória*), mais do que um orientador, um grande amigo desde os tempos de minha graduação, que me abriu as portas para o desenvolvimento científico, com grandes conselhos que servem para a vida toda.

Ao professor Sérgio Ferreira de Paula Silva, pela amizade, e pela ajuda com relação aos conhecimentos sobre qualidade da energia, dicas para melhoria do trabalho, além de possibilitar e participar da realização dos ensaios em laboratório.

Aos colegas de pós graduação, Afonso Bernardino, Alin Martins, Ciciane Chiovatto, Marcos Vinícius e Elise Saraiva, hoje grandes amigos, por toda a ajuda que contribuiu para a elaboração deste trabalho, e por todos os (muitos) momentos de descontração.

Aos meus amigos, que me incentivaram em fazer o mestrado, que estiveram do meu lado durante os momentos de felicidade, como também os de tristeza, em particular à Bárbara e à Lícia, eternos amores.

Aos velhos amigos, aos novos, e àqueles que um dia fizeram parte da minha vida e por alguma razão já não fazem mais.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia Elétrica, pelas pequenas ações, mas que somadas foram de grande valia.

À Eletrobrás e PROCEL, pelo incentivo na concepção do Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Uberlândia.

À CAPES pelo apoio financeiro a mim prestado.



RESUMO

Os motores de indução trifásicos são máquinas bastante difundidas na indústria, tendo um papel importante no consumo de energia do país. Dadas as condições atuais das redes de distribuição quanto à qualidade da energia, considera-se importante o estudo da eficiência destas máquinas quando da alimentação composta de harmônicos e desequilíbrios de tensão. Para tanto, foi feito um levantamento das perdas e rendimento de motores de indução considerando uma alimentação ideal, sem problemas de qualidade de energia, através de testes em laboratório e posteriormente simulações computacionais. Em seguida, embasado no modelo adotado, simulações computacionais foram realizadas para estudo do comportamento das perdas e rendimento referentes a uma alimentação não ideal, contendo em um primeiro momento harmônicos e, posteriormente, desequilíbrios.

O estudo foi feito comparando os motores de linha padrão com os de alto rendimento, uma vez que os primeiros ainda representam a maioria dentro do setor industrial.

Os resultados irão mostrar que a performance dos motores devido aos indicadores de qualidade de energia considerados é mais afetada à medida que há redução do carregamento mecânico exigido. Ainda, poderá ser observado um melhor comportamento do motor de alto rendimento à estes indicadores, mais enfatizado para carregamentos superiores a 50%.

Palavras chave: Motor de indução trifásico, eficiência energética, qualidade de energia, perdas, harmônicos, desequilíbrios de tensão, modelagem no domínio da frequência.



ABSTRACT

The three phase induction motors are very widespread machines in industry, with a major role in the energy consumption in Brazil. Given the current conditions of distribution networks about power quality, it is important to study the efficiency of these machines when fed with harmonics and voltage unbalances. For this purpose, a research of the losses and efficiency considering an ideal network was made, without any power quality problems, through laboratory tests followed by computer simulations. Then, based on the adopted model, computer simulations were performed to study the losses and efficiency behavior related to a non-ideal network, containing in a first moment harmonics and then unbalances.

The study was made comparing the standard motors with the high-efficiency, since the first represents the majority in the industrial segment.

The results will show that the motors performance caused by the considered quality power indicators is mostly affected when the mechanical load is dropping down. Still, it could be observed that the high efficiency induction motor behavior against these indicators is better, more emphasized for loads up to 50%.

Keywords: Three phase induction motor, energy efficiency, power quality, losses, harmonics, voltage unbalances, frequency domain modeling.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- C – conjugado de saída medido durante o ensaio “A”, em [N.m];
- C' – valor do conjugado corrigido para cada ponto de carga, em [N.m];
- $C_e(1)$ – conjugado eletromagnético para a frequência fundamental, em [N.m];
- $C_e(h)$ – conjugado eletromagnético para a h-ésima frequência harmônica, em [N.m];
- $C_{e_{deseq}}$ – conjugado eletromagnético com desequilíbrios de tensão;
- DIT – distorção individual de tensão;
- DTT – distorção total de tensão;
- ΔV – maior desvio das tensões de linha medidas em relação à tensão de linha média, em [V];
- \dot{E}_M^+ – tensão de sequência positiva no ramo magnetizante;
- f_R – frequência das tensões e correntes induzidas no rotor, em [p.u.];
- $f_S(1)$ – frequência da componente fundamental das tensões no estator, em [Hz];
- $f_S(h)$ – frequência das componentes harmônicas das tensões no estator, em [Hz];
- h – ordem do harmônico (não divisível por três, no caso de motores trifásicos);
- \dot{I}_S^+ – corrente de sequência positiva do estator;
- \dot{I}_R^+ – corrente de sequência positiva do rotor;
- \dot{I}_S – corrente total absorvida (RMS) pelo motor, em [A];
- I_0 – valor médio por fase da corrente à vazio do motor medida, em [A];
- I_f – corrente que percorre o enrolamento de 1 (uma) fase do motor, em [A];
- M_{max} – conjugado máximo;
- N – número de pares de valores das duas variáveis consideradas para as perdas suplementares (X_i, Y_i);
- n – velocidade, em [rpm];
- P – número de polos do motor de indução;
- P_0 – potência total de entrada durante o ensaio à vazio, em [W];
- P_1 – potência de entrada requerida para acionar o motor quando acoplado ao dinamômetro sem fornecer carga resistente (Ensaio “A”), em [W];
- P_{ent} – potência de entrada no ponto de carga, em [W];
- P_{otmec} – potência mecânica de saída, em [W];
- R – resistência do enrolamento de 1 (uma) fase do motor, em [Ω];
- R'_{RN} – valor nominal da resistência do enrolamento do rotor, em [Ω];

- R_s – resistência do enrolamento, corrigida para uma temperatura desejada, t_s , em $[\Omega]$;
- R_t – resistência do enrolamento obtida no ensaio de medição desta, à temperatura de medição t_t , em $[\Omega]$;
- $R_{\theta_{ensaio}}$ – resistência média de cada bobina do enrolamento do estator que foi medida à frio, corrigida para a temperatura medida durante o ensaio à vazio, em $[\Omega]$;
- s – escorregamento em [p.u.] no ponto de carga;
- S_s – escorregamento corrigido para a temperatura especificada, t_s , em [p.u.];
- S_t – escorregamento determinado na temperatura do enrolamento do estator, t_t , em [p.u.];
- n_R – velocidade do rotor, em [rpm];
- s^- – escorregamento para a sequência negativa, em [p.u.];
- s_1 – escorregamento, em [p.u.], durante o ensaio “A”;
- s_k – escorregamento para conjugado máximo, em [p.u.];
- T – conjugado, em [N.m];
- t_s – temperatura desejada para correção da resistência e escorregamento, em $^{\circ}\text{C}$;
- t_t – temperatura do enrolamento durante o ensaio da medição da resistência do mesmo, em $^{\circ}\text{C}$;
- u_h – valor por unidade do harmônico de tensão (referido à tensão nominal U_N);
- \dot{V}_S – tensão RMS aplicada ao enrolamento do estator, em [V];
- V^- – módulo da tensão de sequência negativa calculada pelo método das componentes simétricas, em [V];
- V^+ – módulo da tensão de sequência positiva obtida pelo método das componentes simétricas, em [V];
- \dot{V}_S^+ – tensão de sequência positiva aplicada no estator do motor;
- V_{AB} – módulo da tensão de linha entre as fases A e B, em [V];
- V_{BC} – módulo da tensão de linha entre as fases B e C, em [V];
- V_{CA} – módulo da tensão de linha entre as fases C e A, em [V];
- $V_{médio}$ – tensão de linha média, obtida pela média aritmética das medições das três tensões de linha da rede em questão, em [V];
- $W_{I^2R_{est}}$ – perdas Joule no estator no ponto de carga, em [W];
- $W_{I^2R_{rot}}$ – perdas Joule no rotor, em [W];
- W_{I^2R} – perdas Joule, em [W];
- W_0 – perdas Joule no enrolamento do estator durante o ensaio à vazio, em [W];
- W_1 – perda I^2R no estator, durante o ensaio “A”, em [W];

W_{mec} – perdas mecânicas, obtidas da linearização das curvas das perdas à vazio, em [W];

W_{nuc} – perdas no núcleo magnético, em [W];

W_{sup} – perdas suplementares, em [W];

W_{vaz} – as perdas à vazio (perdas no núcleo e perdas mecânicas), em [W];

W_{vazio} – perdas à vazio referentes à tensão nominal medidas durante o ensaio à vazio, em [W];

ω_R – velocidade do rotor, em [rpm];

ω_S^- – velocidade angular do campo magnético girante produzido pelas correntes de sequência negativa, em [rpm];

$\omega_S(1)$ – velocidade angular síncrona para a frequência fundamental, em [rpm];

$\omega_S(h)$ – velocidade angular em função da ordem harmônica, em [rpm];

ω_S^+ – velocidade angular do campo magnético girante produzido pelas correntes de sequência positiva, em [rpm];

X'_{RNp^-} – reatância de dispersão do rotor para sequência negativa, em [Ω];

X'_{RNp} – valor nominal da reatância do rotor, em [Ω];

X'_{RNp^+} – reatância de dispersão do rotor para sequência positiva, em [Ω];

$X_M(1)$ – reatância de magnetização para a frequência fundamental, [Ω];

$X_M(h)$ – reatância de magnetização em uma dada frequência harmônica, em [Ω];

X – quadrado do conjugado no ponto de carga;

Y – perda suplementar no ponto de carga, W_{sup} , em [W];

\dot{Z}_M – impedância do ramo magnetizante, em [Ω];

\dot{Z}_R – impedância do enrolamento do rotor, em [Ω];

\dot{Z}_S – impedância do enrolamento do estator, em [Ω];

\dot{Z}_{eq} – impedância equivalente por fase, em [Ω];

\dot{Z}_{eq}^+ – impedância equivalente do motor para sequência positiva;

\dot{Z}_S^+ – impedância de sequência positiva do estator;

\dot{Z}_R^+ – impedância de sequência positiva do rotor.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Percentual de cada fonte de energia consumida no país.	23
Figura 1.2 – Representatividade dos setores da economia no consumo de energia elétrica. ...	24
Figura 1.3 – Participação dos setores da indústria no consumo de energia elétrica.	24
Figura 1.4 – Percentual do uso final de energia.	25
Figura 1.5 – Participação do uso final em cada fonte de energia.	26
Figura 1.6 – Participação dos usos finais no consumo total de energia elétrica no país.	26
Figura 3.1 – Fator de desequilíbrio de tensão calculado em função do desequilíbrio imposto analiticamente.	45
Figura 3.2 – Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Uberlândia. ..	47
Figura 3.3 – Motores e dinamômetro utilizados.	48
Figura 3.4 – Curva de elevação de temperatura do motor da linha padrão.	51
Figura 3.5 – Curva de elevação de temperatura do motor de alto rendimento.	51
Figura 3.6 – Fonte programável HP6834A.	53
Figura 3.7 – Analisador de energia elétrica RMS MARH-21.	53
Figura 3.8 – Sistema supervisório.	54
Figura 3.9 – Motores de 1,5 cv sem carga acoplada ao eixo.	54
Figura 3.10 – Garras para medição da tensão.	54
Figura 3.11 – Obtenção das correntes de linha.	55
Figura 3.12 – Ensaio para separação das perdas à vazio do motor da linha padrão – tensão e corrente.	57
Figura 3.13 – Ensaio para separação das perdas à vazio do motor da linha padrão – detalhe da tensão e corrente.	58
Figura 3.14 – Ensaio para separação das perdas à vazio do motor de alto rendimento – tensão e corrente.	60
Figura 3.15 – Ensaio para separação das perdas à vazio do motor de alto rendimento – detalhe da tensão e corrente.	60
Figura 3.16 – Perdas à vazio para o motor da linha padrão.	62
Figura 3.17 – Perdas à vazio para o motor de alto rendimento.	63
Figura 3.18 – Potência ativa e corrente durante o ensaio com carga para o motor da linha padrão.	68
Figura 3.19 – Velocidade e temperatura média do enrolamento do estator do motor da linha padrão durante o ensaio com carga.	68
Figura 3.20 – Potência ativa e corrente durante o ensaio com carga para o motor de alto rendimento.	69
Figura 3.21 – Velocidade e temperatura média do enrolamento do estator do motor de alto rendimento durante o ensaio com carga.	69
Figura 3.22 – Perdas suplementares utilizando-se os 6 pontos do ensaio com carga.	77
Figura 3.23 – Curvas das perdas suplementares sem os pontos fora da tendência.	78
Figura 3.24 – Perdas suplementares corrigidas em função do quadrado do conjugado de carga.	79

Figura 3.25 – Potência de entrada dos motores em função do carregamento.	85
Figura 3.26 – Perdas Joule no estator dos motores em função do carregamento.	85
Figura 3.27 – Perdas Joule no rotor dos motores em função do carregamento.	85
Figura 3.28 – Perdas mecânicas em ambos os motores em função do carregamento.	86
Figura 3.29 – Perdas no núcleo magnético nos motores em função do carregamento.	86
Figura 3.30 – Perdas suplementares nos motores em função do carregamento.	87
Figura 3.31 – Perda aparente total dos motores em função do carregamento.	87
Figura 3.32 – Potência mecânica nos motores em função do conjugado.	87
Figura 3.33 – Comparativo dos rendimentos dos motores em função da carga.	89
Figura 3.34 – Aproximação da curva de rendimento usando polinômio cúbico.	89
Figura 4.1 – Circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico.	95
Figura 4.2 – Balanço energético de um motor de indução.	101
Figura 4.3 – Corrente de entrada dos motores.	105
Figura 4.4 – Tensões nos ramos magnetizantes e ramos dos rotores.	105
Figura 4.5 – Correntes de rotor dos motores.	106
Figura 4.6 – Perdas Joule no estator dos motores.	107
Figura 4.7 – Perdas Joule no rotor dos motores.	108
Figura 4.8 – Perdas no núcleo magnético, mecânicas e suplementares.	108
Figura 4.9 – Perdas totais nos motores.	109
Figura 4.10 – Potência ativa de entrada.	109
Figura 4.11 – Potência mecânica desenvolvida.	110
Figura 4.12 – Conjugado mecânico desenvolvido.	110
Figura 4.13 – Escorregamento.	111
Figura 4.14 – Rendimento.	112
Figura 4.15 – Potência reativa de entrada.	112
Figura 4.16 – Potência aparente de entrada.	112
Figura 4.17 – Fator de potência dos motores.	113
Figura 5.1 – Circuito equivalente para a h-ésima componente harmônica.	123
Figura 5.2 – Comparação de métodos de estimativa de variação de resistência e reatância de dispersão em função da ordem harmônica.	126
Figura 5.3 – Variação das perdas joule no estator para 10% de 5º harmônico.	134
Figura 5.4 – Variação das perdas joule no rotor para 10% de 5º harmônico.	134
Figura 5.5 – Variação das perdas no núcleo magnético para 10% de 5º harmônico.	134
Figura 5.6 – Variação das perdas totais nos motores para 10% de 5º harmônico.	135
Figura 5.7 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 10% de 5º harmônico.	135
Figura 5.8 – Variação do rendimento para 10% de 5º harmônico.	135
Figura 5.9 – Variação do conjugado eletromagnético desenvolvido para 10% de 5º harmônico.	135
Figura 5.10 – Variação do fator de potência para 10% de 5º harmônico.	136
Figura 5.11 – Variação das perdas joule no estator para 20% de 5º harmônico.	138
Figura 5.12 – Variação das perdas joule no rotor para 20% de 5º harmônico.	139
Figura 5.13 – Variação das perdas no núcleo magnético para 20% de 5º harmônico.	139
Figura 5.14 – Variação das perdas totais para 20% de 5º harmônico.	139

Figura 5.15 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 20% de 5º harmônico. ...	139
Figura 5.16 – Variação do rendimento para 20% de 5º harmônico.....	140
Figura 5.17 – Variação do conjugado eletromagnético desenvolvido para 20% de 5º harmônico.	140
Figura 5.18 – Variação do fator de potência para 20% de 5º harmônico.	140
Figura 5.19 – Variação das perdas joule no estator para 10% de 7º harmônico.....	142
Figura 5.20 – Variação das perdas joule no rotor para 10% de 7º harmônico.	143
Figura 5.21 – Variação das perdas no núcleo magnético para 10% de 7º harmônico.....	143
Figura 5.22 – Variação das perdas totais para 10% de 7º harmônico.....	143
Figura 5.23 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 10% de 7º harmônico. ...	143
Figura 5.24 – Variação do rendimento para 10% de 7º harmônico.....	144
Figura 5.25 – Variação do conjugado eletromagnético para 10% de 7º harmônico.....	144
Figura 5.26 – Variação do fator de potência para 10% de 7º harmônico.	144
Figura 5.27 – Variação das perdas joule no estator para 20% de 7º harmônico.....	146
Figura 5.28 – Variação das perdas joule no rotor para 20% de 7º harmônico.	146
Figura 5.29 – Variação das perdas no núcleo magnético para 20% de 7º harmônico.....	147
Figura 5.30 – Variação das perdas totais para 20% de 7º harmônico.....	147
Figura 5.31 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 20% de 7º harmônico. ...	147
Figura 5.32 – Variação do rendimento para 20% de 7º harmônico.....	147
Figura 5.33 – Variação do conjugado eletromagnético para 20% de 7º harmônico.....	148
Figura 5.34 – Variação do fator de potência para 20% de 7º harmônico.	148
Figura 5.35 – Variação das perdas joule no estator para 10% de 11º harmônico.....	150
Figura 5.36 – Variação das perdas joule no rotor para 10% de 11º harmônico.	150
Figura 5.37 – Variação das perdas no núcleo magnético para 10% de 11º harmônico.....	150
Figura 5.38 – Variação das perdas totais para 10% de 11º harmônico.....	151
Figura 5.39 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 10% de 11º harmônico. .	151
Figura 5.40 – Variação do rendimento para 10% de 11º harmônico.....	151
Figura 5.41 – Variação do conjugado eletromagnético para 10% de 11º harmônico.....	151
Figura 5.42 – Variação do fator de potência para 10% de 11º harmônico.	152
Figura 5.43 – Variação das perdas joule no estator para 20% de 11º harmônico.....	153
Figura 5.44 – Variação das perdas joule no rotor para 20% de 11º harmônico.	154
Figura 5.45 – Variação das perdas no núcleo magnético para 20% de 11º harmônico.....	154
Figura 5.46 – Variação das perdas totais para 20% de 11º harmônico.....	154
Figura 5.47 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 20% de 11º harmônico. .	154
Figura 5.48 – Variação do rendimento para 20% de 11º harmônico.....	155
Figura 5.49 – Variação do conjugado eletromagnético desenvolvido para 20% de 11º harmônico.	155
Figura 5.50 – Variação do fator de potência para 20% de 11º harmônico.	155
Figura 5.51 – Variação das perdas joule no estator para 10% de 13º harmônico.....	157
Figura 5.52 – Variação das perdas joule no rotor para 10% de 13º harmônico.	157
Figura 5.53 – Variação das perdas no núcleo magnético para 10% de 13º harmônico.....	157
Figura 5.54 – Variação das perdas totais para 10% de 13º harmônico.....	158
Figura 5.55 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 10% de 13º harmônico. .	158

Figura 5.56 – Variação do rendimento para 10% de 13º harmônico.....	158
Figura 5.57 – Variação do conjugado eletromagnético para 10% de 13º harmônico.....	158
Figura 5.58 – Variação do fator de potência para 10% de 13º harmônico.	159
Figura 5.59 – Variação das perdas joule no estator para 20% de 13º harmônico.....	160
Figura 5.60 – Variação das perdas joule no rotor para 20% de 13º harmônico.	161
Figura 5.61 – Variação das perdas no núcleo magnético para 20% de 13º harmônico.....	161
Figura 5.62 – Variação das perdas totais para 20% de 13º harmônico.....	161
Figura 5.63 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 20% de 13º harmônico. .	161
Figura 5.64 – Variação do rendimento para 20% de 13º harmônico.....	162
Figura 5.65 – Variação do conjugado eletromagnético para 20% de 13º harmônico.....	162
Figura 5.66 – Variação do fator de potência para 20% de 13º harmônico.	162
Figura 6.1 – Circuito equivalente para sequência positiva.....	166
Figura 6.2 – Circuito equivalente para sequência negativa.	166
Figura 6.3 – Fluxo de potência de motores de indução alimentados com tensões desequilibradas.	174
Figura 6.4 – Variação das perdas joule no estator dos motores para 2% de desequilíbrio.....	176
Figura 6.5 – Variação das perdas joule no rotor dos motores para 2% de desequilíbrio.	176
Figura 6.6 – Variação das perdas no núcleo magnético dos motores para 2% de desequilíbrio.	176
Figura 6.7 – Variação das perdas totais dos motores para 2% de desequilíbrio.....	177
Figura 6.8 – Variação da potência ativa de entrada dos motores para 2% de desequilíbrio. .	177
Figura 6.9 – Variação do rendimento dos motores para 2% de desequilíbrio.....	177
Figura 6.10 – Variação do conjugado eletromagnético dos motores para 2% de desequilíbrio.	177
Figura 6.11 – Variação do fator de potência dos motores para 2% de desequilíbrio.	178
Figura 6.12 – Variação das perdas joule no estator dos motores para 3% de desequilíbrio...	180
Figura 6.13 – Variação das perdas joule no rotor dos motores para 3% de desequilíbrio.	180
Figura 6.14 – Variação das perdas no núcleo magnético dos motores para 3% de desequilíbrio.	180
Figura 6.15 – Variação das perdas totais dos motores para 3% de desequilíbrio.....	180
Figura 6.16 – Variação da potência ativa de entrada dos motores para 3% de desequilíbrio.	181
Figura 6.17 – Variação do rendimento dos motores para 3% de desequilíbrio.....	181
Figura 6.18 – Variação do conjugado eletromagnético dos motores para 3% de desequilíbrio.	181
Figura 6.19 – Variação do fator de potência dos motores para 3% de desequilíbrio.	181
Figura 6.20 – Variação das perdas joule no estator dos motores para 5% de desequilíbrio...	183
Figura 6.21 – Variação das perdas joule no rotor dos motores para 5% de desequilíbrio.	183
Figura 6.22 – Variação das perdas no núcleo magnético dos motores para 5% de desequilíbrio.	184
Figura 6.23 – Variação das perdas totais dos motores para 5% de desequilíbrio.....	184
Figura 6.24 – Variação da potência ativa de entrada dos motores para 5% de desequilíbrio.	184
Figura 6.25 – Variação do rendimento dos motores para 5% de desequilíbrio.....	184



Figura 6.26 – Variação do conjugado eletromagnético dos motores para 5% de desequilíbrio.	185
Figura 6.27 – Variação do fator de potência dos motores para 5% de desequilíbrio.	185

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Percentual de uso final em relação à cada setor da economia.	27
Tabela 1.2 – Participação dos motores elétricos no consumo de cada setor da economia.	27
Tabela 3.1 – Temperatura de referência em função da classe de isolamento.	46
Tabela 3.2 – Dados de placa dos motores de indução.	48
Tabela 3.3 – Ensaio de medição de resistência.	49
Tabela 3.4 – Determinação das temperaturas de operação com carga nominal em regime permanente.	51
Tabela 3.5 – Resultados do ensaio à vazio.	55
Tabela 3.6 – Perdas à vazio.	56
Tabela 3.7 – Separação das perdas mecânicas das perdas no núcleo para o motor da linha padrão.	59
Tabela 3.8 – Separação das perdas mecânicas das perdas no núcleo para o motor de alto rendimento.	61
Tabela 3.9 – Perdas mecânicas e perdas no núcleo magnético.	64
Tabela 3.10 – Correção do conjugado do dinamômetro.	67
Tabela 3.11 – Resultados do ensaio com carga para os motores da linha padrão e de alto rendimento.	71
Tabela 3.12 – Perdas Joule no estator durante o ensaio com carga.	73
Tabela 3.13 – Perdas Joule no rotor durante o ensaio com carga.	74
Tabela 3.14 – Perdas suplementares em função do ponto de carga dos motores.	75
Tabela 3.15 – Perdas suplementares e coeficientes calculados para os 6 pontos do ensaio com carga.	77
Tabela 3.16 – Correção das perdas suplementares para os motores.	78
Tabela 3.17 – Perdas suplementares corrigidas.	80
Tabela 3.18 – Perdas I^2R no estator corrigidas.	81
Tabela 3.19 – Perdas I^2R no rotor corrigidas.	82
Tabela 3.20 – Correção da potência mecânica e balanço energético dos motores.	84
Tabela 3.21 – Rendimento referente à temperatura do ensaio de elevação de temperatura.	88
Tabela 3.22 – Distribuição das perdas para carga nominal.	90
Tabela 4.1 – Dados dos motores e determinação dos parâmetros do circuito equivalente. ...	102
Tabela 4.2 – Parâmetros do circuito equivalente do motor da linha padrão e de alto rendimento.	103
Tabela 4.3 – Simulação do motor da linha padrão com alimentação ideal.	104
Tabela 4.4 – Simulação do motor de alto rendimento com alimentação ideal.	104
Tabela 4.5 – Comparação da potência de entrada, perda Joule no estator e rotor.	114
Tabela 4.6 – Comparação das perdas no núcleo, aparente total e potência mecânica.	115
Tabela 5.1 – Relação entre ordem harmônica e sequência de fases.	121
Tabela 5.2 – Sinal para escorregamento em função da ordem harmônica.	123
Tabela 5.3 – Variação da performance do motor da linha padrão para 10% de 5° harmônico.	133



Tabela 5.4 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 10% de 5° harmônico.	133
Tabela 5.5 – Variação da performance do motor da linha padrão para 20% de 5° harmônico.	137
Tabela 5.6 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 20% de 5° harmônico.	138
Tabela 5.7 – Variação da performance do motor da linha padrão para 10% de 7° harmônico.	141
Tabela 5.8 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 10% de 7° harmônico.	142
Tabela 5.9 – Variação da performance do motor da linha padrão para 20% de 7° harmônico.	145
Tabela 5.10 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 20% de 7° harmônico.	146
Tabela 5.11 – Variação da performance do motor da linha padrão para 10% de 11° harmônico.	149
Tabela 5.12 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 10% de 11° harmônico.	149
Tabela 5.13 – Variação da performance do motor da linha padrão para 20% de 11° harmônico.	152
Tabela 5.14 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 20% de 11° harmônico.	153
Tabela 5.15 – Variação da performance do motor da linha padrão para 10% de 13° harmônico.	156
Tabela 5.16 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 10% de 13° harmônico.	156
Tabela 5.17 – Variação da performance do motor da linha padrão para 20% de 13° harmônico.	159
Tabela 5.18 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 20% de 13° harmônico.	160
Tabela 6.1 – Variação da performance do motor da linha padrão para 2% de desequilíbrio.	175
Tabela 6.2 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 2% de desequilíbrio.	175
Tabela 6.3 – Variação da performance do motor da linha padrão para 3% de desequilíbrio.	179
Tabela 6.4 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 3% de desequilíbrio.	179
Tabela 6.5 – Variação da performance do motor da linha padrão para 5% de desequilíbrio.	182
Tabela 6.6 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 5% de desequilíbrio.	183



SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA	22
1.2 O USO DA ENERGIA.....	23
1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO.....	27
1.4 O ESTADO DA ARTE	28
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	29
 CAPÍTULO 2 – MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO.....	 32
2.1 INTRODUÇÃO	33
2.2 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO	33
2.3 MÉTODO 1 – MEDIÇÃO DIRETA DA POTÊNCIA DE SAÍDA E DA POTÊNCIA DE ENTRADA ...	34
2.4 MÉTODO 2 – ENSAIO DINAMOMÉTRICO COM MEDIÇÃO INDIRETA DAS PERDAS SUPLEMENTARES E MEDIÇÃO DIRETA DAS PERDAS NO ESTATOR (I^2R), NO ROTOR (I^2R), NO NÚCLEO E POR ATRITO E VENTILAÇÃO	34
2.4.1 VARIAÇÃO DO MÉTODO 2	36
2.5 MÉTODO 3 – MOTORES DUPLICADOS COM SEGREGAÇÃO DE PERDAS E MEDIÇÃO INDIRETA DA PERDA SUPLEMENTAR	36
2.6 MÉTODO 4 – MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA EM CARGA COM SEGREGAÇÃO DE PERDAS E MEDIÇÃO DIRETA DA PERDA SUPLEMENTAR.....	37
2.7 MÉTODO 5 – MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA EM CARGA COM SEGREGAÇÃO DE PERDAS E VALOR ASSUMIDO DAS PERDAS SUPLEMENTARES	38
2.8 MÉTODO 6 – CIRCUITO EQUIVALENTE COM A MEDIÇÃO DIRETA DAS PERDAS SUPLEMENTARES	38
2.9 MÉTODO 7 – CIRCUITO EQUIVALENTE COM VALOR ASSUMIDO DAS PERDAS SUPLEMENTARES	39
2.10 MÉTODO 8 – CIRCUITO EQUIVALENTE CALIBRADO POR UM PONTO DE CARGA DO MÉTODO 3	39
2.11 MÉTODO 9 – CIRCUITO EQUIVALENTE CALIBRADO POR UM PONTO DE CARGA DO MÉTODO 4	40
2.12 MÉTODO 10 – CIRCUITO EQUIVALENTE CALIBRADO POR UM PONTO DE CARGA DO MÉTODO 5	40
2.13 CONSIDERAÇÕES FINAIS	40



CAPÍTULO 3 – DETERMINAÇÃO DAS PERDAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ALIMENTADOS COM TENSÃO SENOIDAL ... 42

3.1 INTRODUÇÃO	43
3.2 CONDIÇÕES DOS ENSAIOS	44
3.3 AMBIENTE DOS ENSAIOS	47
3.4 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS	48
3.4.1 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR	49
3.4.2 ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA	49
3.4.3 ENSAIO À VAZIO.....	52
3.4.3.1 PERDAS À VAZIO	56
3.4.3.2 SEGREGAÇÃO DAS PERDAS NO NÚCLEO E DAS PERDAS MECÂNICAS	57
3.4.3.3 PERDAS MECÂNICAS.....	62
3.4.3.4 PERDAS NO NÚCLEO.....	63
3.4.4 ENSAIO COM CARGA	64
3.4.5 PERDAS JOULE NO ESTATOR.....	72
3.4.6 PERDAS JOULE NO ROTOR	73
3.4.7 PERDAS SUPLEMENTARES	74
3.4.8 PERDAS I^2R NO ESTATOR CORRIGIDAS	81
3.4.9 PERDAS I^2R NO ROTOR CORRIGIDAS	82
3.4.10 POTÊNCIA DE SAÍDA CORRIGIDA	83
3.5 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO	88
3.6 REDUÇÃO DAS PERDAS – CONDIÇÃO NOMINAL	90
3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	91

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS 93

4.1 INTRODUÇÃO	94
4.2 DETERMINAÇÃO DO MODELO PARA ALIMENTAÇÃO IDEAL.....	94
4.2.1 O MODELO DO CIRCUITO EQUIVALENTE	95
4.2.2 RESOLUÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ALIMENTAÇÃO PURAMENTE SENOIDAL.....	97
4.3 SIMULAÇÕES	102



4.3.1 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DOS MOTORES DE INDUÇÃO EM ESTUDO.....	102
4.3.2 RESULTADOS	103
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	117

CAPÍTULO 5 DETERMINAÇÃO DO MODELO PARA ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL E SIMULAÇÕES 120

5.1 INTRODUÇÃO	121
5.2 MODELO REFERENTE A ALIMENTAÇÃO COM HARMÔNICOS.....	121
5.2.1 CORREÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE EM FUNÇÃO DA ORDEM HARMÔNICA.....	123
5.2.1.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O EFEITO SKIN.....	124
5.2.1.2 RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR	127
5.2.1.3 INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO DO ENROLAMENTO DO ESTATOR.....	127
5.2.1.4 RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR	127
5.2.1.5 INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO DO ROTOR	128
5.2.1.6 RESISTÊNCIA DE PERDAS NO NÚCLEO MAGNÉTICO	128
5.2.1.7 INDUTÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO DO MOTOR.....	128
5.2.2 RESOLUÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ALIMENTAÇÃO COM TENSÕES HARMÔNICAS	129
5.2.3 RESULTADOS	132
5.2.3.1 SIMULAÇÃO APLICANDO 10% DE 5º HARMÔNICO.....	133
5.2.3.2 SIMULAÇÃO APLICANDO 20% DE 5º HARMÔNICO.....	137
5.2.3.3 SIMULAÇÃO APLICANDO 10% DE 7º HARMÔNICO.....	141
5.2.3.4 SIMULAÇÃO APLICANDO 20% DE 7º HARMÔNICO.....	145
5.2.3.5 SIMULAÇÕES APLICANDO 10% DE 11º HARMÔNICO	149
5.2.3.6 SIMULAÇÕES APLICANDO 20% DE 11º HARMÔNICO	152
5.2.3.7 SIMULAÇÃO APLICANDO 10% DE 13º HARMÔNICO.....	156
5.2.3.8 SIMULAÇÕES APLICANDO 20% DE 13º HARMÔNICO	159
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	163

CAPÍTULO 6 – DETERMINAÇÃO DO MODELO PARA ALIMENTAÇÃO COM DESEQUILÍBRIOS E SIMULAÇÕES 164

6.1 INTRODUÇÃO	165
----------------------	-----



6.2 MODELO REFERENTE À ALIMENTAÇÃO COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS	165
6.2.1 CORREÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE EM FUNÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FASES.....	167
6.2.1.1 RESISTÊNCIA DAS BARRAS DO ROTOR	167
6.2.1.2 REATÂNCIA DE DISPERSÃO DO ROTOR	168
6.2.2 RESOLUÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ALIMENTAÇÃO CONTENDO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	169
6.2.3 RESULTADOS	174
6.2.3.1 SIMULAÇÃO APLICANDO 2% DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	175
6.2.3.2 SIMULAÇÃO APLICANDO 3% DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	178
6.2.3.3 SIMULAÇÃO APLICANDO 5% DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO	182
6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	185
CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES.....	187
CAPÍTULO 8 – BIBLIOGRAFIA.....	192



CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TEMA

O setor industrial brasileiro é responsável pelo consumo de boa parcela da energia produzida no país. Atualmente há uma maior variedade de formas de obtenção dessa energia, baseada principalmente no uso da eletricidade e bagaço da cana-de-açúcar, levando a crer que há uma busca constante por se reduzir os gastos com esse insumo.

Um padrão notado em muitas indústrias é o uso da cogeração, a qual a energia térmica é convertida em elétrica, e sendo assim, compra-se menos da concessionária, contribuindo também para a economia nos gastos operacionais.

Além da economia na aquisição da energia, seja proveniente de qualquer fonte, almeja-se a redução do consumo através de políticas e técnicas de eficiência energética, baseadas na análise de sistemas presentes em ambientes industriais. Sabendo que uma parcela expressiva do consumo de energia por parte desse setor é devido ao uso de motores elétricos, analisar a eficiência destes equipamentos se faz relevante, uma vez que melhorando o rendimento dos mesmos, o potencial de conservação de energia industrial se eleva, reduzindo a necessidade de ampliação da geração em função de determinado consumidor.

Os motores elétricos de indução, possuem um rendimento influenciável por vários fatores, sendo o superdimensionamento o mais comum. É uma condição a qual o motor que aciona a carga possui uma potência nominal demasiadamente superior à requerida. Sendo assim, há um aumento no percentual de perdas em relação ao valor nominal, acarretando em um rendimento menor. Considera-se o superdimensionamento existente quando a carga mecânica exigida é menor do que 75% da potência nominal do motor, sendo que abaixo de 50% é recomendada a troca imediata do motor por um que seja mais compatível com a carga. Complementando, o mal alinhamento do eixo do motor, bem como o reparo inadequado da máquina, alteram o comportamento do rendimento. Nos dias atuais somente é permitida a fabricação de motores de alto rendimento [1], porém ainda há em funcionamento nas indústrias nacionais um número considerável de motores da linha padrão. Nesse contexto surge a ideia de comparação dos dois tipos.

Outro fator que influencia de maneira negativa o rendimento desse tipo de máquina é a má qualidade que algumas redes de distribuição apresentam para fornecimento. Em ambientes industriais é comum a presença de harmônicos e de desequilíbrios de tensão. Os primeiros são devidos às cargas não-lineares, tais como retificadores, baseados em eletrônica de potência e que não possuem mecanismos internos que compensem as distorções na forma de onda de

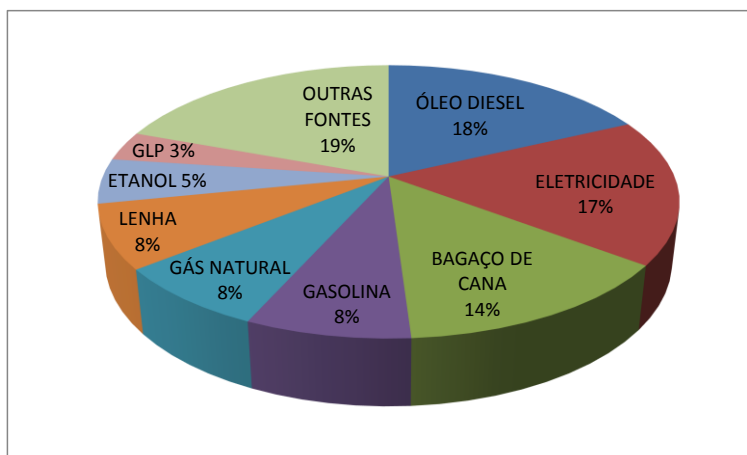
corrente, afetando a forma de onda de tensão do barramento que as alimenta. Entretanto há uma grande presença de equipamentos e dispositivos que compensem esse problema, tais como filtros harmônicos, sejam passivos ou ativos. Os desequilíbrios de tensão são provocados principalmente pela incorreta distribuição de cargas nas fases da rede de alimentação, provocando componentes de corrente de sequência negativa em MIT's.

Em motores de indução trifásicos, os problemas citados provocam alterações de performance, aumentando as perdas, reduzindo o rendimento, o fator de potência, e até mesmo a potência disponível para a carga. Portanto, é pertinente a comparação dos dois tipos de motores, quando alimentados por uma rede livre de indicadores de qualidade de energia e por outra que apresente estes problemas, a ponto de se analisar a forma com que há influência da rede nas cargas.

1.2 O USO DA ENERGIA

Este trabalho é direcionado para o estudo de motores de indução e considera-se coerente o conhecimento de alguns dados referentes à representatividade destes equipamentos no consumo de energia do país.

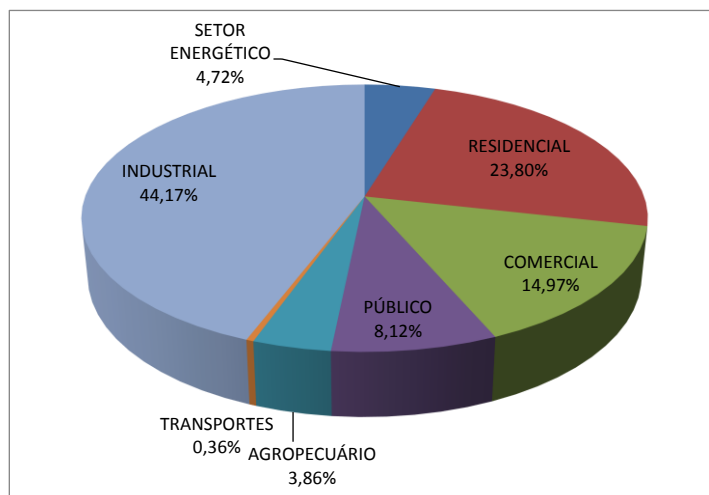
Primeiramente, é importante a explicitação da parcela de energia elétrica que é consumida em relação à toda energia do país, que representa aproximadamente 17% [2]. O uso de óleo diesel e outras fontes (óleo combustível, gás de refinaria, coque de carvão mineral e carvão vegetal, outros), ainda representam um percentual superior ao da energia elétrica, como mostra a Figura 1.1.



Fonte: Autor, com base no BEN 2011.

Figura 1.1 – Percentual de cada fonte de energia consumida no país.

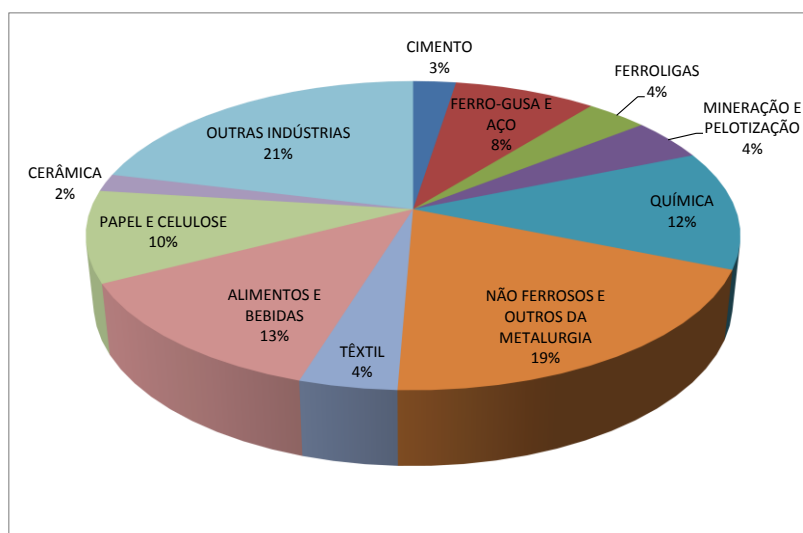
Separando a parcela de consumo de energia elétrica de cada setor da economia, com base em [2], é observado que o setor industrial assume uma grande participação, mostrada na Figura 1.2.



Fonte: Autor, com base nos dados do BEN 2011.

Figura 1.2 – Representatividade dos setores da economia no consumo de energia elétrica.

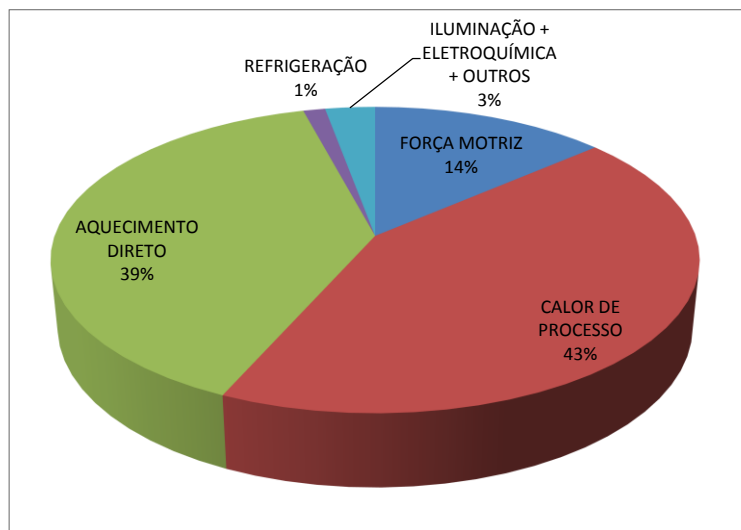
De todos os setores da indústria, o maior consumidor em um único ramo é o de indústrias de materiais não ferrosos e outros da metalurgia com 19%, seguido do setor de alimentos e bebidas, e depois indústria química. O grupo “outras indústrias” é composto por todos os tipos que não foram contemplados pelo BEN 2011. A Figura 1.3 mostra os resultados referentes à esta análise.



Fonte: Autor, com base nos dados do BEN 2011.

Figura 1.3 – Participação dos setores da indústria no consumo de energia elétrica.

Para levantamento da porcentagem de motores elétricos na indústria, faz-se uso de [3], que separa em tipos de uso final, a utilização da energia no país, mostrado na Figura 1.4. A força motriz representa um consumo de aproximadamente 14% de toda a energia produzida no país, independente da fonte.

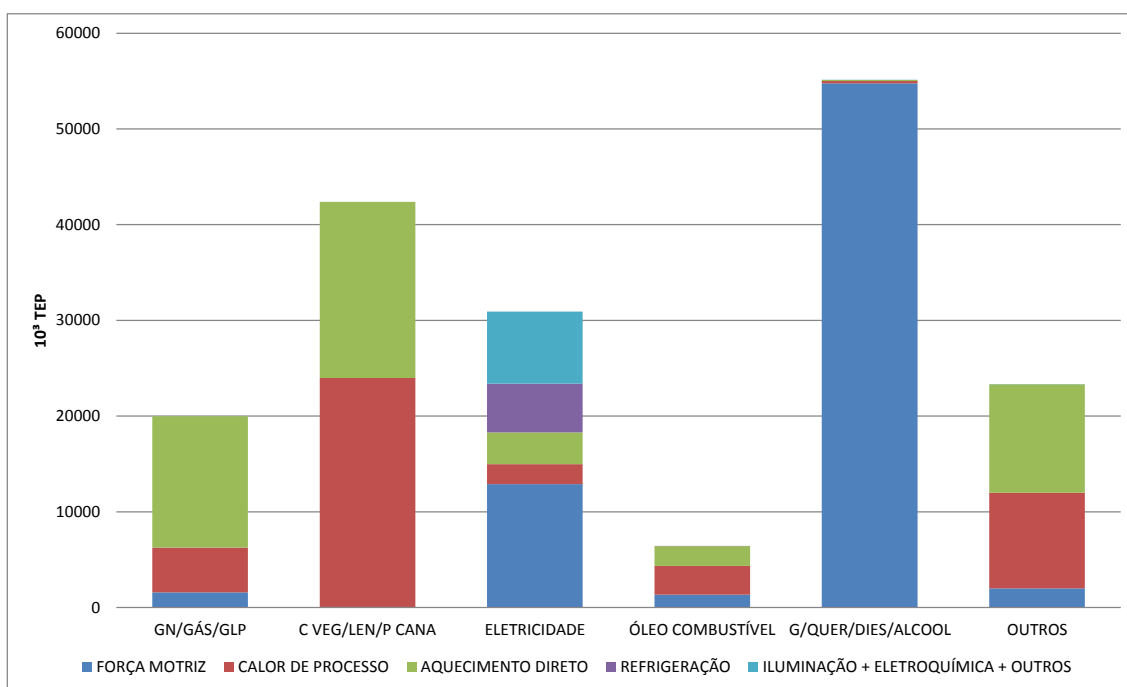


Fonte: Autor, com base nos dados do BEU 2005.

Figura 1.4 – Percentual do uso final de energia.

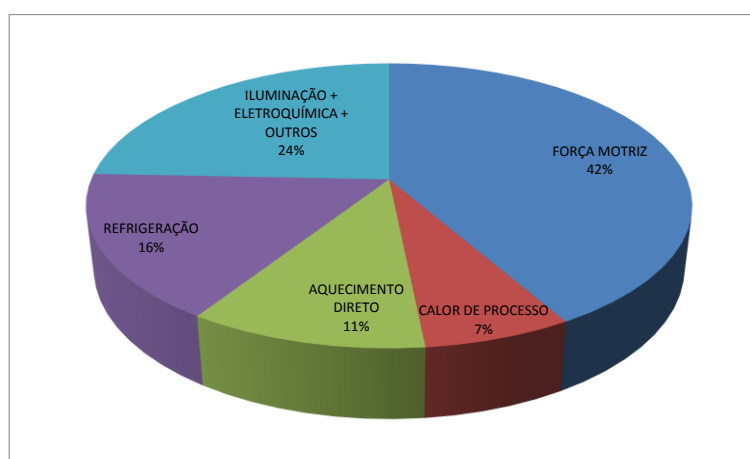
A Figura 1.5 mostra a porcentagem de cada tipo de uso final em função da fonte de energia. Nota-se que a parcela destinada a força motriz acionada por eletricidade é pouco menos da metade de todo o consumo desse tipo de energia e, é este dado que é de suma importância para o presente trabalho, sendo os motores elétricos apontados como grandes consumidores de energia. A força motriz acionada por outras fontes é referente a motores à combustão, não estando no escopo deste trabalho.

A Figura 1.6 mostra a participação dos usos finais no consumo de eletricidade no país. O consumo pelos motores elétricos pode ser melhor visto, tendo 42% de contribuição, sendo assim, o uso final com maior representatividade em relação às formas de utilização. Esse é um argumento para a validação deste estudo, uma vez que há um grande número de motores operando nas indústrias, sob diversas condições de carregamento, e em redes alimentação com problemas de qualidade de energia.



Fonte: Autor, com base nos dados do BEU 2005.

Figura 1.5 – Participação do uso final em cada fonte de energia.



Fonte: Autor, com base nos dados do BEU 2005.

Figura 1.6 – Participação dos usos finais no consumo total de energia elétrica no país.

Sabendo do percentual de força motriz acionada pela eletricidade, é interessante a segregação das parcelas relacionadas à cada setor da economia. Com base nos dados de [3] foi montada a Tabela 1.1, que apresenta os resultados. No setor industrial, os motores têm uma participação de praticamente 62% do consumo total, seguido pelo aquecimento direto, com 16%.

Tabela 1.1 – Percentual de uso final em relação à cada setor da economia.

%	Energético	Residencial	Comercial	Público	Agropecuário	Transporte	Industrial
Força Motriz	92,60	3,00	14,59	27,88	85,10	100,00	61,81
Calor de Processo	0,30	26,00	0,57	0,25	0,20	0,00	1,88
Aquecimento Direto	0,00	8,00	7,79	2,15	0,80	0,00	16,07
Refrigeração	0,00	32,00	33,30	18,00	10,00	0,00	6,14
Iluminação	6,80	24,00	41,83	49,72	3,70	0,00	3,16
Eletroquímica	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,44
Outros	0,30	7,00	1,92	2,00	0,20	0,00	0,50

Fonte: Autor, com base nos dados do BEU 2005.

Utilizando os percentuais de força motriz de cada setor da economia apresentados na Tabela 1.1, e aplicando os mesmos nos resultados apresentados em [2] também para cada setor, pode-se obter os resultados contidos na Tabela 1.2. A referência [2] apresenta os resultados em 10^3 TEP (mil toneladas equivalentes de petróleo). Para a obtenção do referido valor em GWh, dividiu-se o resultado por 0,082. Pela Tabela 1.2 fica clara a expressividade do consumo de energia elétrica por parte dos motores nas indústrias.

Tabela 1.2 – Participação dos motores elétricos no consumo de cada setor da economia.

	Motores				
	10^3 TEP	GWh	%	10^3 TEP	GWh
Setor energético	1.850,00	21.511,63	92,60	1.713,06	19.919,33
Residencial	9.327,00	108.453,49	3,00	279,78	3.253,20
Comercial	5.865,00	68.197,67	14,59	855,73	9.950,38
Público	3.183,00	37.011,63	27,88	887,29	10.317,32
Agropecuário	1.511,00	17.569,77	85,10	1.285,82	14.951,45
Transportes	143,00	1.662,79	100,00	143,00	1.662,79
Industrial	17.307,00	201.244,19	61,81	10.696,98	124.383,44
TOTAL	39.186,00	455.651,16		15.861,66	184.437,91

Fonte: Autor, com base nos dados do BEU 2005 aplicados ao BEN 2011.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO

Uma vez que as redes de distribuição apresentam distúrbios de qualidade de energia e estes, mesmo mantidos abaixo de limites máximos admissíveis influenciam as cargas que são alimentadas por esses sistemas, é relevante a análise de motores de indução sob estas condições. O foco é a observação do comportamento das perdas e curva de rendimento.

Primeiramente é feito o levantamento desses dados relacionados à condição ideal de alimentação, para que os mesmos possam ser utilizados como referência. Em seguida, far-se-á a obtenção dos mesmos dados, porém, considerando uma rede de alimentação com distúrbios de qualidade de energia. Dentre os distúrbios trabalhados, cita-se os harmônicos e desequilíbrios de tensão.

Para levantamento dos dados de referência, realizou-se ensaios em laboratório com dois motores de mesma potência, um da linha padrão e outro de alto rendimento, seguindo procedimentos contidos em norma. Através de uma modelagem matemática já bastante conhecida, simulou-se as condições ideais para comparação com os resultados provenientes dos testes.

Quanto ao estudo do comportamento das perdas e rendimento, influenciados por problemas de qualidade de energia, partiu-se da abordagem analítica do modelo matemático, adaptando-a à cada condição de alimentação. Isso foi feito pois não há uma norma vigente que regulamenta procedimentos de ensaios para obtenção de perdas provocadas por distúrbios como harmônicos e desequilíbrios. É verificado se os modelos são coerentes ou não, analisando as tendências de variação das grandezas.

Como dito, a curva de rendimento dos motores é estudada, e para tanto, os estudos foram desenvolvidos considerando vários pontos de carregamento dos motores, e não somente o ponto de operação nominal, como é de costume.

1.4 O ESTADO DA ARTE

Nesta seção é apresentada uma breve descrição das referências bibliográficas que mais influenciaram o presente estudo.

Inicialmente, as informações obtidas de [2] e [3] foram importantes para o levantamento do cenário nacional relativo ao consumo de energia. Além disso, foi possível extrair dados referentes ao consumo eletricidade nos vários setores da economia e a representatividade dos motores elétricos nessa parcela.

Em [6] são apontados procedimentos de ensaios em motores de indução trifásicos. O testes para levantamento do rendimento também são descritos, bem como cada método que pode ser aplicado para este fim. Esta referência é apropriada para a obtenção da curva de rendimento de motores quando os mesmos são ligados a uma rede de alimentação ideal.

A referência [9] apresenta uma modelagem do motor de indução trifásico, onde a mesma pode ser obtida através dos dados fornecidos nos catálogos dos fabricantes, dispensando assim, qualquer tipo de ensaio específico para determinação destas grandezas. O circuito equivalente obtido é referente ao domínio da frequência e a uma alimentação equilibrada puramente senoidal.

Em [14] é feita uma análise do comportamento de motores de indução trifásicos em carga nominal com harmônicos e em seguida, com desequilíbrios. O autor parte do circuito equivalente no domínio da frequência e o adapta para condições de alimentação com os distúrbios de qualidade de energia citados anteriormente.

As referências de [15] a [25] apresentam metodologias que objetivam a adaptação e elucidação das formas de comportamento de alguns parâmetros do circuito equivalente em função da frequência. De uma maneira geral, cada autor considera uma lei principal para variação dos parâmetros, e assim a definição de uma forma de regimento principal foi possível através da comparação de cada metodologia apresentada.

Através dos trabalhos referenciados foi possível obter metodologias para o levantamento da curva de rendimento e das perdas dos motores para a alimentação ideal, que foram inclusive utilizados como referência para outras análises. Além disso, pode-se alcançar o modelo do motor de indução no domínio da frequência, podendo-se simular a performance dos mesmos em função do tipo de alimentação imposta, apontando os aumentos de perdas que ocorrem em cada caso.

1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho foi dividido de modo que houvesse uma sequência lógica de todos os desenvolvimentos e análises realizados. Além do presente capítulo, o mesmo foi seccionado como mostrado à seguir:

CAPÍTULO 2 – MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

Esse capítulo faz um levantamento de todos os métodos normatizados para obtenção do rendimento de motores de indução trifásicos, trazendo uma breve descrição de cada um,

comparando os mesmos, apontando no final, o método que será utilizado no desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO 3 – DETERMINAÇÃO DAS PERDAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ALIMENTADOS COM TENSÃO SENOIDAL

Trata da aplicação do método selecionado no Capítulo 2, para um motor da linha padrão e outro de alto rendimento, mostrando passo a passo os testes realizados e a análise dos dados coletados. É levantada a curva de rendimento de cada motor, mostrando as respectivas perdas que ocorrem quando da alimentação com uma tensão ideal.

CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Nesta etapa, é escolhida e aplicada uma modelagem dos motores de indução testados anteriormente, para que possam ser realizadas simulações considerando uma fonte de tensão ideal. As simulações revelam dados relacionados à performance dos dois motores para verificação e comparação das perdas obtidas no capítulo anterior e assim, a conclusão se o modelo adotado é ou não aplicável a este trabalho.

CAPÍTULO 5 – DETERMINAÇÃO DO MODELO PARA ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL E SIMULAÇÕES

O Capítulo 5 tem por objetivo a obtenção das perdas que ocorrem nos motores testados quando os mesmos são alimentados com tensões que contém harmônicos. Para tanto, o modelo obtido no Capítulo 4 é adaptado para que seja coerente com as condições de alimentação impostas, e simulações computacionais são realizadas. É mostrado no capítulo gráficos com as tendências de variação das perdas em função do carregamento, comparando cada caso simulado, verificando qual promove maior mudança do comportamento dos motores.



CAPÍTULO 6 – DETERMINAÇÃO DO MODELO PARA ALIMENTAÇÃO COM DESEQUILÍBRIOS E SIMULAÇÕES

O objetivo deste item é o estudo dos motores quando os mesmos são submetidos a desequilíbrios de tensão. Novamente, o modelo obtido para alimentação ideal é adaptado para a condição imposta, realizando-se simulações. Na mesma linha do Capítulo 5, são apresentados gráficos com tendências do aumento das perdas, comparando cada caso simulado.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

Tem por objetivo a unificação e resumo das principais conclusões obtidas ao longo dessa dissertação, ressaltando as contribuições do trabalho desenvolvido.



CAPÍTULO 2 – MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO DE MOTORES DE INDUÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O rendimento de motores de indução trifásicos é talvez a característica mais preponderante no consumo de energia elétrica nesse tipo de equipamento, sendo afetado de acordo com as condições de operação do motor.

Seguindo esta linha, o presente capítulo trata do rendimento de motores de indução trifásicos, como também dos métodos indicados por norma para sua obtenção.

Inicialmente será apresentado o conceito de rendimento, seguido da citação das normas que se aplicam ao assunto. Prosseguindo, serão mostrados os métodos de obtenção do rendimento de motores de indução, contidos na norma nacional vigente. Concluindo o capítulo, haverá um breve resumo dos métodos, mostrando alguns de seus detalhes mais importantes, indicando quais se aplicam ao desenvolvimento deste trabalho. Será dada maior importância aos métodos que explicitem ao máximo a segregação das perdas que ocorrem no interior de motores de indução trifásicos, objetivo principal deste trabalho, bem como àqueles cujos procedimentos sejam de aplicação facilitada.

2.2 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO

O rendimento de um equipamento representa o valor percentual da potência de entrada que efetivamente é transformada em potência útil durante a realização de trabalho. A parcela da potência de entrada que não é transferida para a saída é denominada de perdas e, objetiva-se que o valor destas seja o menor possível, de forma que o rendimento seja o mais alto.

As seguintes equações podem ser utilizadas para seu levantamento [4] [5] [6]:

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de entrada}} \quad (2.1)$$

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Potência de entrada} - \text{Perdas}}{\text{Potência de entrada}} \quad (2.2)$$

$$\text{Rendimento} = \frac{\text{Potência de saída}}{\text{Potência de saída} + \text{Perdas}} \quad (2.3)$$

Para a determinação desta grandeza em motores de indução trifásicos, os valores de tensão e frequência da rede alimentação devem ser nominais e, para o caso da determinação

via ensaios laboratoriais, há limites para os valores das mesmas, impostos por norma [6]. Segundo [6], há 10 métodos para a determinação do rendimento de motores de indução, que serão apresentados resumidamente a seguir.

2.3 MÉTODO 1 – MEDIÇÃO DIRETA DA POTÊNCIA DE SAÍDA E DA POTÊNCIA DE ENTRADA

O rendimento é calculado pela razão entre a potência de saída e a potência de entrada, ambas medidas, após correções de temperatura e do dinamômetro [6].

A carga mecânica é aplicada ao motor através de um dinamômetro impondo no sistema 4 carregamentos abaixo de 100% igualmente espaçados e mais 2 adequadamente escolhidos, entre 100% e 150%, totalizando 6 pontos [6].

Nesse método, não há segregação de todas as perdas do motor, com exceção das perdas I^2R do estator, corrigidas de acordo com a temperatura do ensaio, levando ao ajuste da potência de entrada. Dados como escorregamento e conjugado são de suma importância para levantamento da potência mecânica que é obtida através do produto entre torque e velocidade.

2.4 MÉTODO 2 – ENSAIO DINAMOMÉTRICO COM MEDIÇÃO INDIRETA DAS PERDAS SUPLEMENTARES E MEDIÇÃO DIRETA DAS PERDAS NO ESTATOR (I^2R), NO ROTOR (I^2R), NO NÚCLEO E POR ATRITO E VENTILAÇÃO

Este método tem como objetivo a determinação do rendimento que será marcado na placa de motores de indução com potências compreendidas entre 1 cv e 250 cv [6]. Esta grandeza é obtida através da potência elétrica de entrada e do valor das perdas totais. Dentre estas, estão inclusas as perdas por efeito Joule no estator e rotor, perdas no núcleo, perdas mecânicas e perdas suplementares. Estas últimas são de um tipo bastante peculiar e de difícil determinação. Através deste método é possível a obtenção das mesmas e dos valores relacionados a cada tipo, corrigidos em função da temperatura e da inércia do dinamômetro.

Essa metodologia possui diversos passos, que devem ser minuciosamente seguidos a fim de se evitar erros de medição que podem levar a resultados insatisfatórios, principalmente na etapa de determinação das perdas suplementares, que é realizada indiretamente.

Inicialmente é aconselhável ter acesso à temperatura em tempo real dos enrolamentos do estator e da carcaça do motor. A resistência a frio dos enrolamentos também deve ser obtida para que se possa estimar a que patamar a mesma se encontrará na temperatura especificada, a qual é obtida através de um ensaio de elevação de temperatura com carga nominal. Ao término do ensaio, a resistência do estator deve ser medida, juntamente com a temperatura do mesmo e da ambiente. O tempo máximo que pode durar estas medições após o término dos ensaios é especificado em [6]. A título de exemplo, para motores de indução com potência de até 50 cv, este tempo máximo é de 30 s [6].

Deve-se realizar um ensaio com carga, semelhante ao descrito no método 1, corrigindo o valor do conjugado objetivando a compensação das perdas que ocorrem no dinamômetro.

Um ensaio à vazio deve ser executado para a determinação das perdas no núcleo e das perdas devido ao atrito e à ventilação do motor.

Para as perdas joule no estator, a resistência do enrolamento deve ser corrigida para a temperatura referente a cada ponto de carga. Analogamente, as perdas Joule no rotor são dependentes do escorregamento, e este deve ser corrigido para a mesma temperatura.

As perdas suplementares são calculadas em função do carregamento através da diferença entre a perda aparente total (diferença entre a potência de entrada e a de saída) e as perdas convencionais (perdas Joule no estator e rotor, perdas no núcleo e mecânicas). Os valores são corrigidos por regressão linear. Nesta etapa do método pode-se ter conhecimento da credibilidade dos dados obtidos, à partir da análise da curva das perdas suplementares. Atendendo-se os requisitos presentes em [6], obtém-se o valor corrigido das perdas suplementares.

Uma nova correção da resistência dos enrolamentos do estator deve ser realizada, desta vez utilizando o valor da temperatura observada ao término do ensaio de elevação de temperatura, considerando a temperatura ambiente como sendo de 25°C. O mesmo deve ser feito para o escorregamento medido.

De posse dos novos valores das perdas Joule no estator e rotor, somam-se a estas duas as perdas no núcleo, mecânicas e suplementares. A diferença entre a potência de entrada medida durante o ensaio com carga e as perdas, fornece o valor da potência mecânica corrigida. Desta forma, obtém-se o valor do rendimento para cada ponto de carga através da relação entre a potência mecânica corrigida e a potência de entrada.

2.4.1 VARIAÇÃO DO MÉTODO 2

Esta variação do método 2 é no sentido de que não se realiza a medição da temperatura do enrolamento após o ensaio de elevação de temperatura [6].

Os procedimentos são semelhantes aos citados em 2.4 , com a diferença de que a resistência do enrolamento do estator é medida nos pontos extremos dos ensaios, utilizando-se para os cálculos, o valor médio. É importante que a variação entre o maior e o menor valor das resistências não exceda o limite imposto em [6].

2.5 MÉTODO 3 – MOTORES DUPLICADOS COM SEGREGAÇÃO DE PERDAS E MEDIÇÃO INDIRETA DA PERDA SUPLEMENTAR

O método dos motores duplicados utiliza dois motores idênticos, um acoplado ao outro, de modo que um funciona como carga e tem sua frequência ajustável e o outro é alimentado com tensão e frequência nominais [6].

Como nos outros métodos citados anteriormente, é necessária a execução de um ensaio à vazio para determinação das perdas no núcleo e mecânicas.

O ensaio com carga é realizado com uma máquina operando como motor e a outra como gerador. Este terá a tensão e a frequência variadas de forma que a relação entre as duas grandezas seja a mesma dos respectivos valores nominais. Os pontos de carga do ensaio devem seguir as premissas dos métodos anteriores. Ao término desse teste, deve-se repeti-lo, porém com o fluxo de potência invertido.

A etapa de cálculos é semelhante à dos métodos já apresentados. A exceção se encontra nas perdas suplementares, que são obtidas indiretamente e o resultado encontrado é um valor combinado das duas máquinas, sendo uma parcela oriunda da perda total medida. Ainda, deve ser assumido que as perdas suplementares encontradas são função do quadrado da corrente do rotor, podendo-se assim obter a parcela referente à máquina que operou como motor, encontrando a do gerador em seguida. Deve-se encontrar a perda suplementar média comparando os valores com o fluxo de potência nos dois sentidos, corrigindo a mesma em função do quadrado da corrente do rotor.

Por fim, obtêm-se as perdas totais corrigidas e o rendimento em função do carregamento.

2.6 MÉTODO 4 – MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA EM CARGA COM SEGREGAÇÃO DE PERDAS E MEDIÇÃO DIRETA DA PERDA SUPLEMENTAR

Nesse método, deve ser realizado o ensaio de elevação de temperatura, caso esta seja a temperatura especificada para correção das perdas. Assim, pela ordem de testes, o ensaio à vazio pode ser executado após o ensaio em carga aproveitando que os motores já estão aquecidos. Se este não for o caso, o ensaio à vazio deve ser realizado, seguindo as premissas apresentadas nos métodos anteriores e em seguida, o ensaio com carga. Este também é semelhante ao apresentado nos métodos anteriores, sendo necessário medir a temperatura referente a cada ponto comparando a mesma com a especificada.

A medição das perdas suplementares à frequência fundamental é realizada através de um teste com rotor removido [6]. A corrente de linha deve ser de valor compatível com o ensaio com carga. Em [6] é informado o método de cálculo desta corrente à partir da corrente à vazio e da corrente de linha. Ainda, é necessário determinar as perdas suplementares que ocorrem a altas frequências, o que é realizado através de um ensaio de rotação reversa. Nesse procedimento, o rotor da máquina é acionado por meio externo até a velocidade síncrona e com sentido oposto ao do campo girante do estator. Em seguida procede-se à etapa de cálculo das perdas suplementares, tanto das que ocorrem na frequência fundamental, quanto das que ocorrem em altas frequências. Há a necessidade de se refinar os dados referentes às potências elétricas e mecânicas dos ensaios pelo método de regressão linear. Não menos importante, há outra componente das perdas suplementares relativa à corrente do rotor que deve ser determinada para completar os cálculos, também dependente do ponto de carga do motor, sendo proporcional ao quadrado da relação entre a corrente no rotor em um ponto de operação e a corrente nominal nessa parte da máquina.

As perdas I^2R no estator são determinadas em função do carregamento considerando o valor da resistência do enrolamento corrigida para a temperatura especificada. Analogamente, esse tipo de perda é determinado para o rotor corrigindo o valor do escorregamento para essa mesma temperatura.

Dos resultados do ensaio à vazio, se determinam as perdas no núcleo e as mecânicas, seguindo os procedimentos utilizados para os métodos anteriores.

Finalizando, o rendimento é determinado à partir da relação entre a potência de saída e a potência de entrada do motor [6].

2.7 MÉTODO 5 – MEDIÇÃO DA POTÊNCIA ELÉTRICA EM CARGA COM SEGREGAÇÃO DE PERDAS E VALOR ASSUMIDO DAS PERDAS SUPLEMENTARES

O procedimento adotado neste método é semelhante ao do método 4. Porém não se realiza o ensaio de medição das perdas suplementares e se assume um valor para as mesmas, que está especificado em [6] de acordo com a faixa de potência do motor em questão. O valor especificado é referente à característica nominal do motor, mas para pontos de carga fora dessa região é possível se obter a perda suplementar como sendo função do quadrado da relação entre a corrente no rotor no ponto de carga e a corrente nominal desta parte da máquina [6].

2.8 MÉTODO 6 – CIRCUITO EQUIVALENTE COM A MEDIÇÃO DIRETA DAS PERDAS SUPLEMENTARES

Este método é apropriado para os casos onde os ensaios com carga não são possíveis [5][6]. Assim, as características operacionais do motor são obtidas através da análise do circuito equivalente do mesmo. Os ensaios a serem executados devem ter seus procedimentos minuciosamente seguidos evitando a divergência dos parâmetros obtidos, principalmente da resistência e reatância do rotor.

Dentre os ensaios a serem realizados, cita-se o ensaio à vazio e o ensaio de impedância. Este último pode ser executado de 4 maneiras diferentes, dependendo das possibilidades e condições de teste.

As perdas suplementares são obtidas de forma direta, seguindo as premissas citadas no método 4 para obtenção do rendimento.

Por fim, determina-se o rendimento do motor, seguindo os formulários contidos na norma.

2.9 MÉTODO 7 – CIRCUITO EQUIVALENTE COM VALOR ASSUMIDO DAS PERDAS SUPLEMENTARES

Este método é semelhante ao anterior (método 6), se diferenciando no sentido de que assume um valor predefinido para as perdas suplementares, tabelado em [6] de acordo com a faixa de potência do motor a ser testado [6].

2.10 MÉTODO 8 – CIRCUITO EQUIVALENTE CALIBRADO POR UM PONTO DE CARGA DO MÉTODO 3

O método 8 é baseado nos métodos 6 e 7 no quesito “obtenção do circuito equivalente”, podendo-se aplicar o dados do desempenho e a temperatura no estator referentes a um ponto de carga a fim de se obter a característica do rendimento do motor [6]. Sendo assim, utiliza-se um formulário específico presente em [6], assumindo um valor para a relação entre a resistência do rotor e o escorregamento.

Ao se calcular a potência de entrada, deve-se comparar este valor com o obtido durante o ensaio, ponto a ponto. A relação entre a resistência do rotor e o escorregamento precisa ser ajustada, bem como a reatância de magnetização, repetindo os cálculos até que os valores encontrados para a corrente e potência de entrada sejam próximos dos medidos em 1%. O produto da resistência total do rotor em função do escorregamento pelo valor deste último provê o valor da resistência das barras do rotor não corrigida para a temperatura referente ao ponto considerado.

As perdas suplementares para cada ponto de carga são encontradas indiretamente seguindo os mesmos procedimentos adotados no método 3, porém ainda sem a etapa de ajuste destas perdas. Em seguida, corrige-se as mesmas utilizando a relação entre a corrente de carga e nominal do rotor em função do carregamento.

Finalizando, a resistência do enrolamento do estator e das barras do rotor são corrigidas para a temperatura especificada e se determina o desempenho do motor nos pontos de carga.

2.11 MÉTODO 9 – CIRCUITO EQUIVALENTE CALIBRADO POR UM PONTO DE CARGA DO MÉTODO 4

Este método para determinação do rendimento de motores de indução trifásicos é semelhante ao anterior, porém o procedimento de obtenção das perdas suplementares orienta a medição direta destas perdas, semelhante o estabelecido no método 4 [6].

2.12 MÉTODO 10 – CIRCUITO EQUIVALENTE CALIBRADO POR UM PONTO DE CARGA DO MÉTODO 5

O método 10 segue as mesmas ideias do método 8, apenas assumindo um valor para as perdas suplementares tabelado, o que é estabelecido no método 5 [6].

2.13 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cada método apresentado possui suas particularidades e para a escolha de qual será adotado, alguns pontos devem ser analisados.

O método 1 é conveniente para motores de potência fracionária, porém não faz segregação das perdas em suas diversas componentes. Dessa forma, não constitui um método conveniente para desenvolvimento dos trabalhos devido às necessidades impostas, bem como dos motores empregados.

O método 2 possui duas frentes que podem ser seguidas. Uma é considerando a temperatura especificada como sendo a final obtida no ensaio de elevação de temperatura, corrigindo as perdas joule. A outra é a variação do método, onde não se mede esta temperatura ao final do ensaio de elevação de temperatura, estimando-se a mesma ao término do teste através de medição de resistência. Aparentemente, qualquer um dos dois conjuntos de procedimentos pode ser aplicado, visto que se enquadram nos requisitos do trabalho quanto à obtenção das perdas que ocorrem em motores de indução. Ainda, [6] orienta que no caso da obtenção do rendimento que será marcado na placa do motor, o método 2 é o mais recomendado dado a minúcia dos procedimentos e resultados obtidos para as perdas.

Para desenvolvimento do método 3 são necessários dois motores idênticos, um operando como motor e outro como gerador, invertendo-se o sentido do fluxo de potência ao

se repetir os ensaios. Além disso, necessita de uma fonte de alimentação para variação do valor da tensão e frequência do gerador. Este método faz a segregação das perdas em todas suas componentes, porém é de complicada execução.

Pelo método 4 pode-se encontrar o valor de todas as perdas do motor de indução trifásico, fazendo inclusive um ensaio para a medição das perdas suplementares. Dessa forma, esta perda é determinada diretamente. Os procedimentos para determinação desta perda englobam ensaios onde a máquina em questão deve ter seu rotor retirado, podendo ser motivo de empecilho quanto à realização dos mesmos. A diferença entre este método e o método 5 é que neste último a perda suplementar tem seu valor assumido, tendo o restante dos procedimentos semelhantes.

O método 6 é apropriado para os casos onde os ensaios com carga não são possíveis. Assim, as características operacionais do motor são obtidas através da análise do circuito equivalente do mesmo, que pode ser obtido através de 4 tipos de ensaios de impedância. Destes 4 tipos, acredita-se que o 3º e o 4º tipo são mais indicados devido à aparente menor complexidade dos ensaios com rotor bloqueado. Um tipo orienta o uso de uma velocidade acima da referente ao conjugado máximo e, outro é referente a um ensaio de rotor bloqueado à frequência nominal. As perdas suplementares são obtidas diretamente, seguindo os procedimentos do método 4. O método 7 é baseado no método 6, porém assumindo um valor para as perdas suplementares.

No método 8 obtém-se um circuito equivalente seguindo os procedimentos dos métodos 6 ou 7. As perdas suplementares são obtidas indiretamente, semelhante ao método 3. O método 9 é semelhante ao método 8, porém orienta a medição direta das perdas suplementares, fazendo assim, referência ao método 4. O método 10 também referencia o método 8. Contudo assume um valor para as perdas suplementares, de acordo com o método 5.

De todos os métodos apresentados, o método 2 é o mais indicado para este trabalho, dada as condições de execução dos procedimentos, equipamentos necessários e cálculos envolvidos. O método 4 poderia também ser aplicado, porém com a necessidade de análise para viabilização dos ensaios de obtenção das perdas suplementares pelo método direto. É importante salientar que dada a natureza dos dois métodos, um sendo indireto e outro direto, para obtenção das perdas suplementares, não se consegue assegurar a equivalência entre os resultados obtidos para as perdas entre ambos os procedimentos.



CAPÍTULO 3 – DETERMINAÇÃO DAS PERDAS EM MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS ALIMENTADOS COM TENSÃO SENOIDAL

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo foca o levantamento das perdas que ocorrem em motores de indução trifásicos quando os mesmos são alimentados por um sistema trifásico, equilibrado de tensões puramente senoidais. Como esse tipo de alimentação é considerado como sendo ideal, na prática é quase impossível de se alcançar dadas as condições dos sistemas de distribuições das concessionárias. Porém, em [6] há limites para desequilíbrios e distorções harmônicas que podem estar presentes nas tensões de alimentação de motores de indução submetidos aos ensaios.

Será mostrado e aplicado um procedimento que levanta a curva de rendimento de motores de indução em função do carregamento, quando a alimentação é puramente senoidal ou a mais próxima possível dessa condição, dentro dos limites estabelecidos. É importante salientar que, apesar do método descrito objetivar a determinação do rendimento, ao longo dos passos é inevitável a segregação das perdas que ocorrem em motores de indução, principal objetivo deste trabalho.

No Capítulo 2 concluiu-se que o método 2 é o mais indicado para este estudo, dadas as condições de custo e tempo disponível para ensaio, equipamentos laboratoriais envolvidos, bem como a simplicidade de implementação dos procedimentos descritos em [6]. Em complemento, é o método indicado para levantamento de perdas e rendimento de motores de 1 a 250 cv, além de ser usado para marcação do rendimento de placa. A referência [7] indica este método para que seja utilizado tanto para motores da linha padrão quanto para os de alto rendimento.

As referências [4], [5] e [6] são normas que tratam do assunto estudado. É importante citar a semelhança entre [4] e [6], onde a segunda se baseia na primeira. Contudo, [5] é uma versão mais atualizada de [4] que contribui para a melhor compreensão de determinadas passagens de [6].

Ao final deste capítulo, a curva de rendimento dos motores empregados no estudo será obtida, assim como, principalmente, as perdas que ocorrem nos mesmos sob diferentes condições de carregamento.

3.2 CONDIÇÕES DOS ENSAIOS

A determinação das perdas e rendimento dos motores requer alguns cuidados que são imprescindíveis para a viabilização dos dados obtidos.

Primeiramente, quanto à alimentação dos motores, deve ser composta por tensões trifásicas que apresente um Fator Harmônico de Tensão (FHV) menor ou igual à 0,02, exceto os de categoria N, cujo FHV máximo é de 0,03, inclusive. O FHV é obtido através dos valores em p.u. das tensões harmônicas, de ordem 2 à 13, desconsiderando as harmônicas múltiplas de 3 no caso de motores trifásicos [3], obtido pela equação (3.1) [7].

$$FHV = \sqrt{\sum_{h=2}^K \frac{u_h^2}{h}} \quad (3.1)$$

Onde:

$K=13$.

O fator de desequilíbrio máximo presente nas tensões de alimentação que, deve ser de no máximo 0,5% [6], sendo calculado pelo método adotado pela National Electrical Manufacturers Association – NEMA, através da equação (3.2):

$$FDV\% = \frac{\Delta V}{V_{médio}} \times 100 \quad (3.2)$$

Sabe-se que o fator de desequilíbrio obtido pela equação (3.2) subestima o valor verdadeiro do desequilíbrio presente na rede. O mais correto para o cálculo é a realização do mesmo através das tensões de sequência positiva e negativa, fazendo-se uso assim, das componentes simétricas. A equação (3.3) é aplicada nesse caso:

$$FDV\% = \frac{V^-}{V^+} \times 100 \quad (3.3)$$

O inconveniente deste método é que há a necessidade de se conhecer módulo e ângulo das três tensões de linha da rede de alimentação.

Outro método proposto pelo CIGRE se mostra tão preciso quanto o método anterior, como mostra a equação (3.4).

$$FDV\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 \quad (3.4)$$

Onde:

$$\beta = \frac{|V_{AB}|^4 + |V_{BC}|^4 + |V_{CA}|^4}{(|V_{AB}|^2 + |V_{BC}|^2 + |V_{CA}|^2)^2} \quad (3.5)$$

A Figura 3.1 apresenta um gráfico com resultados obtidos de diversos métodos para cálculo do fator de desequilíbrio, utilizando-se os mesmos valores de tensão, referentes a um nível de desequilíbrio imposto. Pode-se observar a proximidade dos resultados entre o método das componentes simétricas, adotado pelo O.N.S. e o método adotado pelo CIGRE, justificando a adoção deste último visto que a medição das tensões de linha pode ser executada.

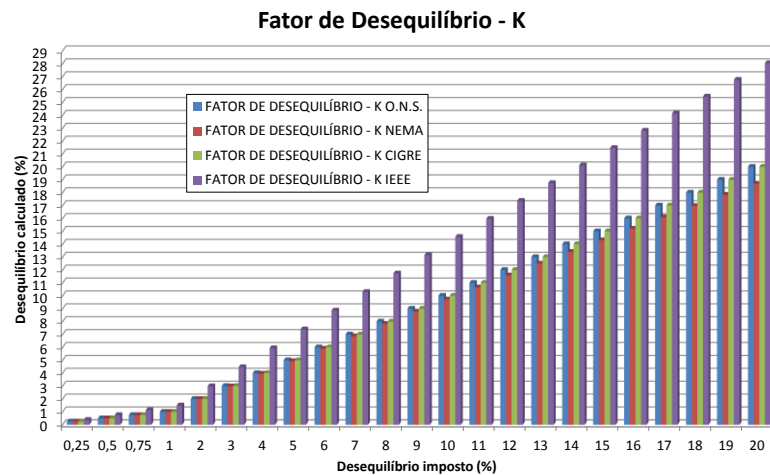


Figura 3.1 – Fator de desequilíbrio de tensão calculado em função do desequilíbrio imposto analiticamente.

Comprova-se que o fator de desequilíbrio obtido pelo método da norma NEMA subestima o verdadeiro valor desta grandeza, sendo então argumento para a adoção do método utilizado pelo CIGRE.

Com relação aos ensaios, o primeiro a ser executado, de acordo com os procedimentos descritos em [6], é o de medição das resistências dos enrolamentos do estator. Deve ser feito com o motor à frio, e tanto os valores das resistências entre fases, quanto as respectivas temperaturas devem ser medidas, bem como o valor da temperatura ambiente.

O ensaio de elevação de temperatura é realizado acionando-se o motor com carga nominal, desde a temperatura à frio, devendo ser executado até que o equilíbrio térmico seja

alcançado. Este é considerado como alcançado quando a temperatura dos enrolamentos não sofrer variação superior a 1°C , entre duas medições sucessivas, separadas de um intervalo de 30 minutos. Ao término desse teste, as resistências dos enrolamentos estatóricos dos motores devem ser medidas, bem como as respectivas temperaturas, em um intervalo de até 30 segundos, no caso de motores cuja potência seja igual ou inferior à 50 cv [6], foco deste estudo. A temperatura ambiente também deve ser medida. Podem ser utilizados sensor do tipo termopar ou do tipo PT100, instalados nas cabeças de bobinas do estator, ou nas ranhuras, fora do caminho de circulação do ar de resfriamento, objetivando evitar ao máximo uma possível interferência nos resultados. Quanto ao rotor, não há como se medir diretamente a temperatura a qual as barras condutoras se encontram. Dessa forma, assume-se o mesmo valor da temperatura do enrolamento do estator. Como uma alternativa, no caso do ensaio de elevação de temperatura não poder ser executado, a temperatura a qual as resistências do enrolamento do estator e barras do rotor serão corrigidas é adotada como a mesma da classe da isolamento do motor [6], mostrada na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Temperatura de referência em função da classe de isolamento.

Classificação Térmica da Isolação	Temperatura de Referência [$^{\circ}\text{C}$]
A	75
B	95
F	115
H	130

Para o ensaio à vazio, é necessário que o motor seja acionado sem carga mecânica no seu eixo à partir da aplicação de tensão e frequência nominais, aguardando a estabilização da potência de entrada. Essa estabilização é necessária pelo fato de alguns motores apresentarem uma variação na perda por atrito e, no caso de máquinas com mancais lubrificados com graxa, a mesma não ocorre enquanto houver lubrificante no caminho das partes móveis do rolamento e mancal. Complementando, pode ser dada como obtida quando a potência lida não variar mais do que 3% em um intervalo de 30 minutos entre duas medições consecutivas [6]. No caso desse ensaio ser executado após o ensaio de elevação de temperatura, pode ser considerado que a estabilização das perdas nos mancais foi alcançada [6].

Para a separação das perdas no núcleo das perdas mecânicas, um ensaio de variação da tensão deve ser executado, onde a mesma é reduzida desde 125% do valor nominal até o ponto onde uma redução de tensão acarreta em um aumento do valor da corrente de entrada

do motor. É interessante medir a temperatura dos enrolamentos do estator tanto para este ensaio, quanto para o ensaio à vazio, para correção do valor das resistências.

Como recomendação final quanto às temperaturas, é pertinente que se faça um ensaio de elevação de temperatura antes de cada teste, caso os mesmos não sejam executados em sequência, a fim de que obtenha estabilizações térmicas e de potência de entrada das máquinas em questão.

As perdas suplementares, segundo o método 2, são obtidas através da diferença entre a perda aparente total e as perdas convencionais provenientes do ensaio com carga, sendo assim, referentes a cada ponto de carga testado.

3.3 AMBIENTE DOS ENSAIOS

Os ensaios foram executados no Laboratório de Eficiência Energética da Faculdade de Engenharia Elétrica, situada na Universidade Federal de Uberlândia. Este laboratório conta com equipamentos de alta tecnologia, sendo fruto de um convênio firmado entre a Universidade Federal de Uberlândia e a Eletrobrás/PROCEL, visando produzir estudos na área de eficiência energética.



Figura 3.2 – Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Uberlândia.

O laboratório é composto por 4 bancadas que simulam sistemas típicos de ambientes industriais (ventilação, bombeamento, transportadoras e compressores), todas contendo dois tipos de motores, um da linha padrão e outro de alto rendimento, ambos de mesma potência.

Além dos sistemas citados, há disponível um freio eletromecânico responsável pela produção de carga em motores elétricos, que inclusive será utilizado na rotina de ensaios, viabilizando os testes com carga.

3.4 PROCEDIMENTOS DOS ENSAIOS

Para a realização dos ensaios, primeiramente é necessária a definição dos motores que serão submetidos aos experimentos, bem como seus dados de placa, apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Dados de placa dos motores de indução.

Motor da Linha Padrão				Motor de Alto Rendimento			
Potência	1,5 cv	1,1HP		Potência	1,5 cv	1,1HP	
Velocidade	3370 rpm	60 Hz		Velocidade	3390 rpm	60 Hz	
Categoria	N	Regime	S1	Categoria	N	Regime	S1
Máx. Amb.	40°C	Alt.	1000 m	Máx. Amb.	40°C	Alt.	1000 m
FS	1,15	Isolação	B	FS	1,15	Isolação	F
Ip/In	7,5	IP	55	Ip/In	7,5	IP	55
220/380 V		4,27/2,47 A		220/380 V		4,01/2,32 A	
η	78,6%	$\cos\phi$	0,86	η	83,0%	$\cos\phi$	0,87

Fonte: WEG, 2010.

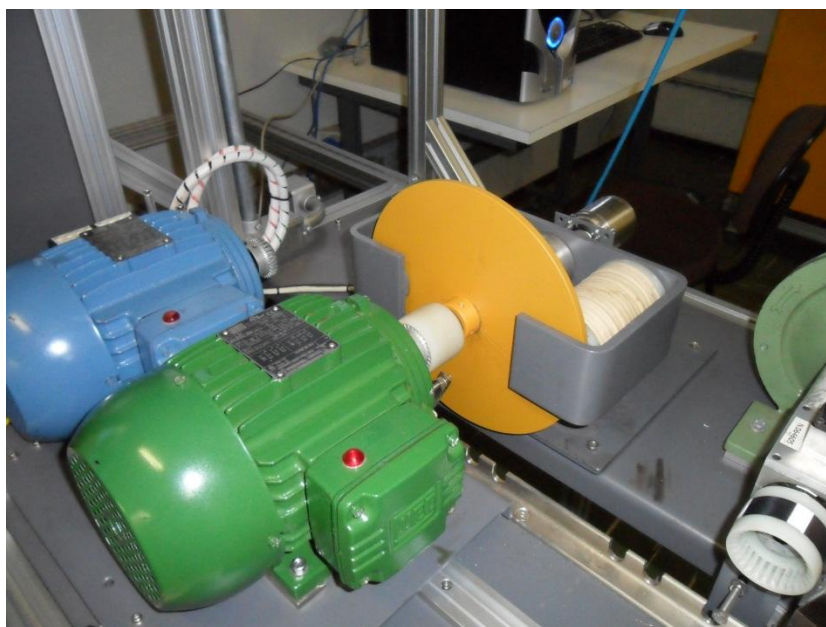


Figura 3.3 – Motores e dinamômetro utilizados.

3.4.1 MEDIÇÃO DA RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR

A resistência ôhmica do enrolamento do estator é obtida ligando-se as bobinas em delta, e, usando uma ponte de Kelvin mede-se a resistência equivalente entre duas fases do motor. Com esses três valores medidos, calcula-se a média aritmética e esta última é multiplicada pelo fator $3/2$. O resultado é o valor da resistência de cada bobina separadamente, à temperatura da realização do ensaio. A ponte de Kelvin é recomendada para medição dada sua precisão, porém, pode ser utilizada uma ponte de Wheatstone, que também produz resultados satisfatórios.

Uma ressalva acerca da temperatura deve ser feita, pois a resistência medida precisa ser corrigida para uma temperatura de referência, que pode ser a máxima admissível pela classe de isolamento ou, a própria temperatura de operação do motor sob carga nominal, depois do mesmo ter partido à frio e após um determinado tempo, ter atingido o equilíbrio térmico, obtida via ensaio de elevação de temperatura.

Assim, foram obtidos os seguintes valores para a resistência do enrolamento do estator:

Tabela 3.3 – Ensaio de medição de resistência.

Medição da Resistência do Enrolamento do Estator à Frio		
Esquema de ligação do estator	Delta	
Resistências medidas	Linha Padrão	Alto Rendimento
Fase A [Ω]	2,655	2,629
Fase B [Ω]	2,656	2,631
Fase C [Ω]	2,657	2,631
Resistência Média [Ω]	2,656	2,630
Resistência por fase [Ω]	3,984	3,946
Temperatura Ambiente [$^{\circ}\text{C}$]	26,1	26,4

3.4.2 ENSAIO DE ELEVAÇÃO DE TEMPERATURA

Este ensaio é realizado para conhecimento da máxima temperatura de funcionamento do motor em regime permanente com carga nominal, bem como para determinação da temperatura que será utilizada para correção das perdas joule no estator e no rotor, denominada de temperatura de referência.

Como citado anteriormente, o motor é acionado no dinamômetro com tensão, frequência e carga nominais, de modo que sua temperatura sofra elevação desde o valor à frio até o ponto de equilíbrio térmico. Este ponto é dado como atingido quando a temperatura do motor não sofrer variação superior a 1°C entre duas medições consecutivas separadas de 30 minutos. Para medição da temperatura dos enrolamentos são utilizados sensores PT100 localizados nas cabeças de bobina dos motores, presos com resina de impregnação. Como os motores de indução possuem dois lados que formam as cabeças de bobina, o lado onde devem ser posicionados os sensores é o da parte da frente do motor, próximo ao eixo e ponto de acoplamento com a carga. Essa informação é baseada na análise do fluxo de ar de refrigeração promovido pelo ventilador do motor, que não chega a circular pela superfície frontal da tampa do mesmo. Dessa forma, supõe-se que a maior temperatura dos enrolamentos será atingida neste ponto, ou seja, o ponto mais quente do motor poderá ser na cabeça de bobina frontal, sendo assim o local mais conveniente para instalação dos sensores de temperatura.

Esse teste foi realizado tanto para o motor da linha padrão quanto para o de alto rendimento, com os resultados apresentados na Figura 3.4, Figura 3.5 e na Tabela 3.4.

De acordo com o gráfico na Figura 3.4, a curva de elevação de temperatura do motor da linha padrão apresenta algumas divergências quanto à precisão do PT100 da fase S do estator. Porém, analisando as curvas obtidas pelos sensores da carcaça e das fases R e T, observa-se uma coerência das medições, uma vez que há uma diferença entre a temperatura da carcaça e dos enrolamentos do motor, o que era esperado e, uma grande proximidade das temperaturas obtidas para as fases R e T. Nota-se também que após um período de tempo, o sensor da fase S passa a oscilar a medição e se estabiliza em um valor também próximo das fases R e T. Foi concluído que estas diferenças não influenciariam o ensaio com carga em si, uma vez que a temperatura utilizada para cada ponto seria a média das leituras das 3 fases do motor. Este problema de variação de leitura do PT100 pode ter relação com a resistência de contato entre os pinos do sensor e a matriz de contatos que faz a ligação ao CLP da bancada. Uma variação desta resistência provoca alteração na leitura da temperatura. De toda forma, foram revistos todos os contatos dos sensores.

A Figura 3.5 mostra a curva de elevação de temperatura obtida para o motor de alto rendimento, onde pode ser notada grande precisão dos sensores de temperatura instalados.

É importante observar que no final dos dois gráficos há uma região que as temperaturas sofrem aumento. Isso ocorre por ser o intervalo de tempo referente à realização do ensaio com carga.

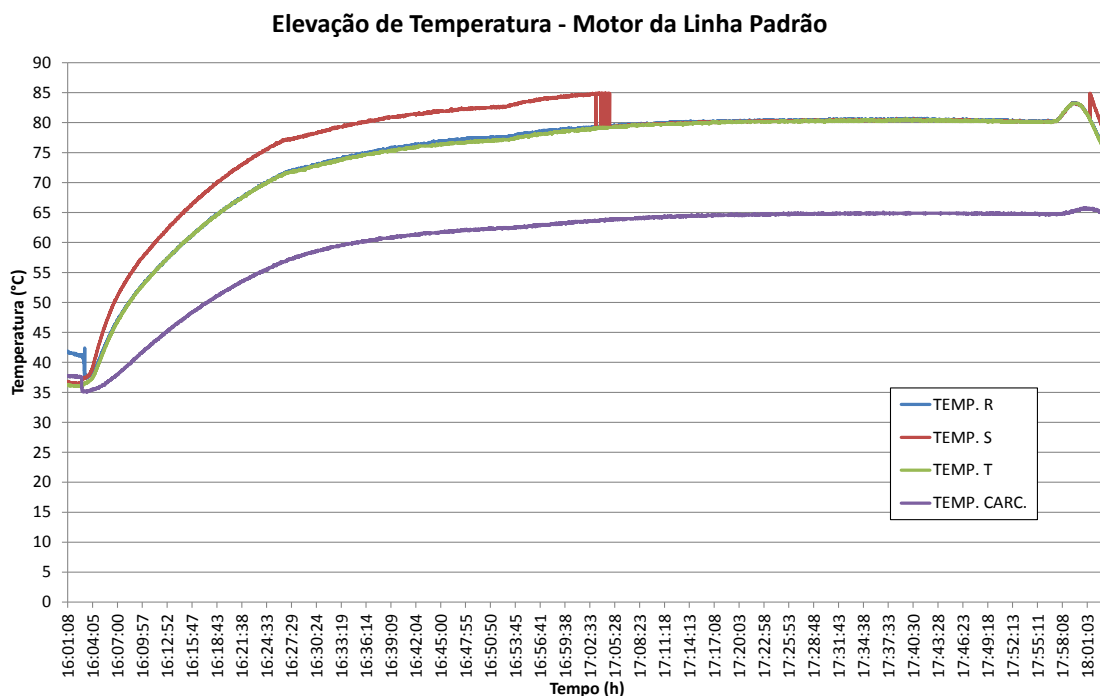


Figura 3.4 – Curva de elevação de temperatura do motor da linha padrão.

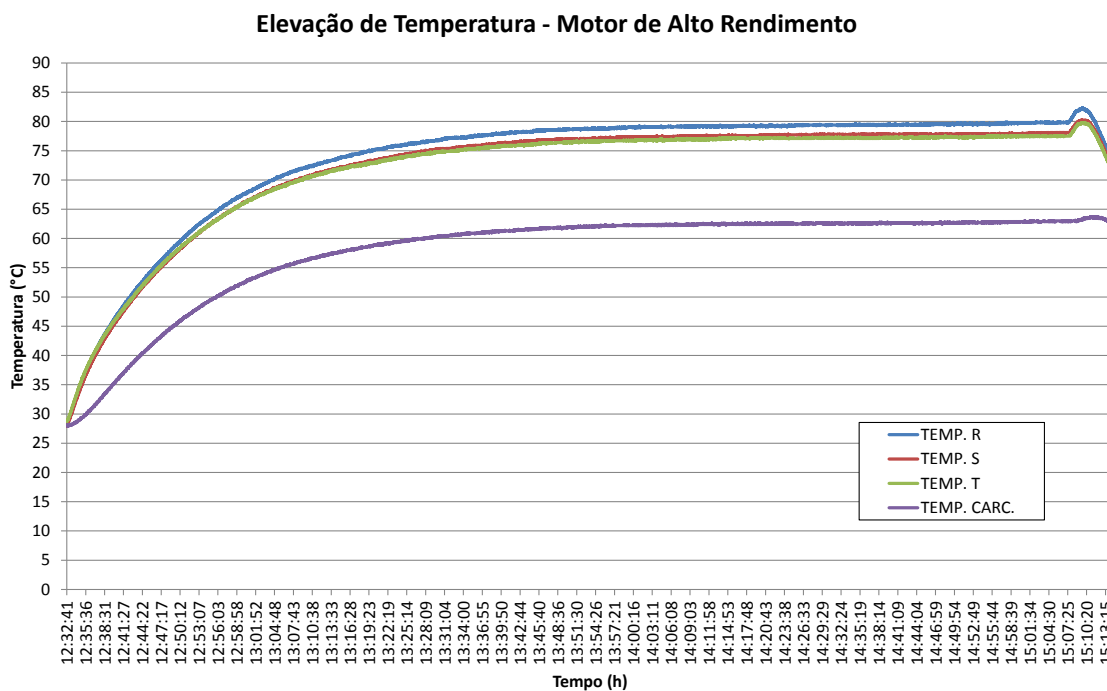


Figura 3.5 – Curva de elevação de temperatura do motor de alto rendimento.

Tabela 3.4 – Determinação das temperaturas de operação com carga nominal em regime permanente.

Ensaio de Elevação de Temperatura		
Temperaturas Medidas	Linha Padrão	Alto Rendimento
Fase A [°C]	80,300	79,900
Fase B [°C]	78,300	78,100
Fase C [°C]	80,200	77,500

Temperatura Média [°C]	80,233	78,500
Carcaça [°C]	64,800	62,900
Resistências medidas	Linha Padrão	Alto Rendimento
Fase A [Ω]	3,200	3,100
Fase B [Ω]	3,200	3,100
Fase C [Ω]	3,200	3,100
Resistência Média [Ω]	3,200	3,100
Resistência por fase [Ω]	4,800	4,650
Temperatura Ambiente [°C]	35,000	28,000

Ao final, a resistências dos enrolamentos do estator de cada motor devem ser medidas em um tempo de até 30s, no caso de motores cujas potências sejam de até 50 cv. Porém, esse tempo estipulado foi considerado curto sabendo que para a medição das resistências deveria se desconectar o motor do contator pelo qual é alimentado e ter os cabos de ligação conectados aos bornes de medição da ponte de Wheatstone utilizada. Portanto, utilizou-se um multímetro digital com o propósito apenas de se ter uma noção do valor o qual as resistências dos enrolamentos se enquadrariam, sem preocupação com precisão de medição. De toda forma, o valor medido não foi utilizado nas etapas de cálculo visto que é feita a correção da resistência medida à frio para a temperatura de referência utilizando um equacionamento. Portanto, o valor apresentado na Tabela 3.4 para a resistência à quente é para simples ilustração e noção da ordem de grandeza da mesma, além de demonstração das etapas do Método 2.

3.4.3 ENSAIO À VAZIO

O objetivo deste teste é a obtenção das perdas devido ao atrito do eixo com os mancais e à ventilação e, das perdas no núcleo magnético do estator e do rotor. O procedimento consiste na alimentação de cada motor com tensões trifásicas balanceadas e frequência nominais, sem que haja carga mecânica ligada ao eixo. Como requisito para um ensaio bem sucedido, há a necessidade do motor permanecer em operação à vazio até que o valor da potência de entrada se estabilize, como citado no item 3.2 .

Para a execução do ensaio foi utilizada uma fonte programável, de tensão senoidal, da marca Hewlett-Packard, modelo HP 6834A, de potência nominal igual a 4500 VA. A mesma foi configurada de modo que a tensão de linha fosse igual à tensão nominal dos motores para ligação delta, ou seja, 220 V e frequência de 60 Hz. Para medição das grandezas elétricas foi

utilizado um analisador de qualidade de energia da marca RMS, modelo MARH-21. O medidor foi parametrizado para que fornecesse o valor das grandezas medidas a cada intervalo de integração de 5s. Para medição das temperaturas, foi utilizado o sistema supervisão da bancada onde os motores estão instalados, uma vez que apenas as linhas de alimentação dos motores foram conectadas à fonte programável, enquanto que todo o restante dos equipamentos da bancada foram alimentados com a tensão da rede elétrica do laboratório. Assim, podem-se obter valores oriundos dos diversos sensores presentes na bancada e nos motores.



Figura 3.6 – Fonte programável HP6834A.



Figura 3.7 – Analisador de energia elétrica RMS MARH-21.



Figura 3.8 – Sistema supervisorio.



Figura 3.9 – Motores de 1,5 cv sem carga acoplada ao eixo.



Figura 3.10 – Garras para medição da tensão.



Figura 3.11 – Obtenção das correntes de linha.

Entre as grandezas que foram medidas estão as potências de cada fase e trifásica, as tensões e correntes de linha. Através do sistema supervisorio que controla a bancada obtiveram-se os valores das temperaturas dos enrolamentos dos motores, ensaiados separadamente. A Tabela 3.5 mostra os resultados obtidos.

Tabela 3.5 – Resultados do ensaio à vazio.

Ensaio à Vazio			
Medições		Linha Padrão	Alto Rendimento
Corrente [A]	Fase A	2,084	1,713
	Fase B	2,067	1,716
	Fase C	2,032	1,704
	Média	2,061	1,711
Potência [W]	Fase A	38,198	27,124
	Fase B	41,935	28,999
	Fase C	39,864	24,207
	Total	119,997	80,330
Tensão [V]	Fase AB	219,433	219,462
	Fase BC	218,856	218,972
	Fase CA	219,231	219,183
	Média	219,174	219,205
Temperaturas medidas [°C]	Fase A	42,100	38,500
	Fase B	44,100	38,200
	Fase C	42,600	40,100
Temperatura Média [°C]		42,933	38,933
Temperatura Ambiente [°C]		27,300	26,000

3.4.3.1 PERDAS À VAZIO

Pelo ensaio à vazio obtém-se todas as perdas que ocorrem nos motores sob esta condição. Durante este teste, há passagem da corrente à vazio do motor pelo enrolamento do estator, o que produz uma pequena parcela de perdas Joule. As perdas que ocorrem no núcleo da máquina somada com as perdas mecânicas é a diferença entre a potência total de entrada durante o teste e as perdas Joule no enrolamento do estator. Assim:

$$W_{vazio} = P_0 - W_0 \quad (3.6)$$

As perdas joule à vazio são obtidas por:

$$W_0 = 3R_{\theta ensaio} I_0^2 \quad (3.7)$$

É importante salientar que as perdas joule no estator devem ser referentes à temperatura deste ensaio, sendo necessária a correção da resistência do enrolamento.

Para se corrigir a resistência a uma temperatura de referência qualquer, faz-se uso da seguinte equação:

$$R_s = R_t \frac{(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (3.8)$$

Onde:

k é uma constante que depende do material constituinte do enrolamento. Para enrolamento de cobre eletrolítico com 100% de condutividade, $k = 234,5$. Para o alumínio com condutividade em volume de 62%, $k = 225$.

A Tabela 3.6 apresenta o valor da potência total de entrada durante o teste executado, das perdas por efeito Joule, assim como o valor total das perdas à vazio, para ambos os motores.

Tabela 3.6 – Perdas à vazio.

Perdas à Vazio		
	Linha Padrão	Alto Rendimento
Resistência por fase corrigida [Ω]	4,241	4,135
Potência de entrada - P_0 [W]	119,997	80,330
Perda Joule no estator - W_0 [W]	18,018	12,104
Perda à vazio - W_{vaz} [W]	101,979	68,226

3.4.3.2 SEGREGAÇÃO DAS PERDAS NO NÚCLEO E DAS PERDAS MECÂNICAS

Para separação das perdas no núcleo e mecânicas, o motor deve ser novamente ligado à vazio, aplicando nos terminais do mesmo um valor de tensão que seja de 125% do valor nominal. A tensão aplicada é reduzida gradativamente, e à cada ponto, mede-se a tensão, corrente e potência de entrada. O ensaio prossegue até que uma redução no valor da tensão leve a um aumento da corrente. Como citado anteriormente, é importante a medição das temperaturas dos enrolamentos do estator, para correção das perdas por efeito Joule referente a cada valor de tensão aplicada, segregando assim as perdas à vazio.

Na execução desse ensaio foram definidos degraus de queda de 5% de tensão em relação ao nominal. A Figura 3.12 e a Figura 3.13 mostra a curva de tensão e de corrente aplicadas no motor da linha padrão enquanto que a Tabela 3.7 apresenta os resultados deste ensaio para o mesmo motor. A Figura 3.14, Figura 3.15, e a Tabela 3.8 apresentam os resultados para o motor de alto rendimento.

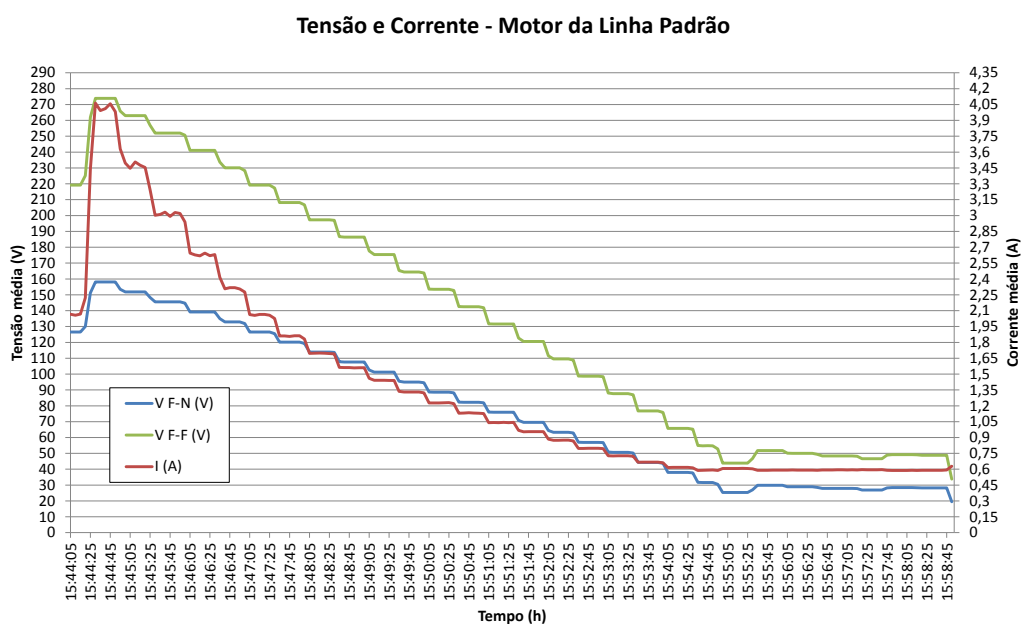


Figura 3.12 – Ensaio para separação das perdas à vazio do motor da linha padrão – tensão e corrente.

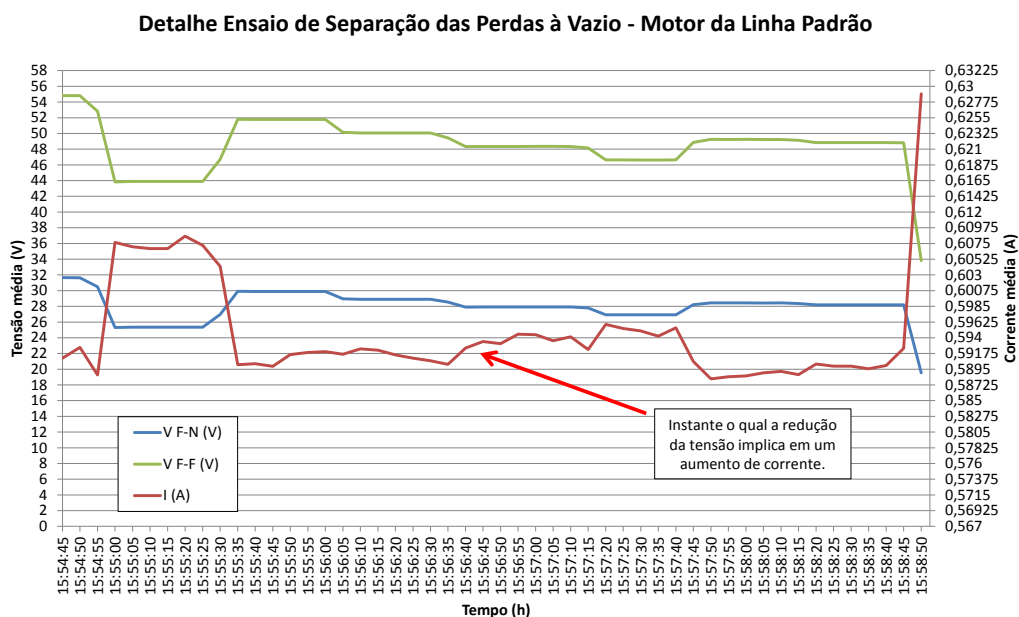


Figura 3.13 – Ensaio para separação das perdas à vazio do motor da linha padrão – detalhe da tensão e corrente.

Para cada motor, à partir do penúltimo ponto mostrado na Tabela 3.7 e na Tabela 3.8 não foi possível a realização do degrau de 5% de redução da tensão pois houve aumento da corrente. Assim, procurou-se retornar ao ponto de tensão anterior e reduzir a mesma gradativamente, até que houvesse notável aumento de corrente, buscando dessa maneira uma maior precisão do ensaio.

Tabela 3.7 – Separação das perdas mecânicas das perdas no núcleo para o motor da linha padrão.

Perdas por Atrito e Ventilação										
Linha Padrão										
Tensão de Linha [V]	Tensão de Linha ² [V ²]/100	Potência de entrada [W]	Corrente de linha [A]	Corrente de fase [A]	T _{faseA} [°C]	T _{faseB} [°C]	T _{faseC} [°C]	T _{média} [°C]	Perda I ² R no estator [W]	Perdas à vazio [W]
273,925	750,347	302,304	4,058	2,343	41,900	36,800	36,300	38,333	68,680	233,624
263,010	691,742	242,505	3,477	2,007	41,800	36,800	36,300	38,300	50,412	192,093
252,050	635,291	198,871	3,029	1,749	41,800	36,800	36,300	38,300	38,253	160,618
241,140	581,487	163,461	2,620	1,513	41,800	36,700	36,300	38,267	28,628	134,833
230,130	529,597	139,167	2,318	1,338	41,800	36,700	36,200	38,233	22,409	116,758
219,185	480,420	120,680	2,065	1,192	41,800	36,700	36,200	38,233	17,774	102,906
208,199	433,466	107,115	1,892	1,092	41,800	36,800	36,300	38,300	14,928	92,187
197,282	389,201	96,731	1,695	0,978	41,700	36,700	36,300	38,233	11,975	84,756
186,352	347,270	88,189	1,560	0,901	41,700	36,700	36,300	38,233	10,146	78,043
175,411	307,689	80,837	1,440	0,832	41,700	36,700	36,200	38,200	8,650	72,187
164,394	270,255	74,291	1,330	0,768	41,700	36,700	36,200	38,200	7,379	66,913
153,436	235,427	68,172	1,229	0,710	41,800	36,700	36,200	38,233	6,301	61,871
142,446	202,909	62,709	1,132	0,653	41,800	36,700	36,300	38,267	5,342	57,367
131,535	173,014	57,849	1,041	0,601	41,800	36,700	36,300	38,267	4,515	53,334
120,543	145,306	53,280	0,956	0,552	41,800	36,700	36,300	38,267	3,812	49,468
109,602	120,126	49,131	0,875	0,505	41,800	36,700	36,200	38,233	3,189	45,941
98,653	97,324	45,428	0,798	0,461	41,800	36,700	36,200	38,233	2,656	42,772
87,671	76,861	42,003	0,727	0,420	41,700	36,700	36,300	38,233	2,203	39,800
76,703	58,834	39,288	0,666	0,385	41,700	36,700	36,300	38,233	1,852	37,436
65,741	43,219	36,452	0,617	0,356	41,700	36,700	36,300	38,233	1,588	34,864
54,811	30,043	34,265	0,591	0,341	41,700	36,700	36,200	38,200	1,457	32,809
48,349	23,376	33,155	0,593	0,343	41,700	36,700	36,200	38,200	1,468	31,687

Tensão e Corrente - Motor de Alto Rendimento

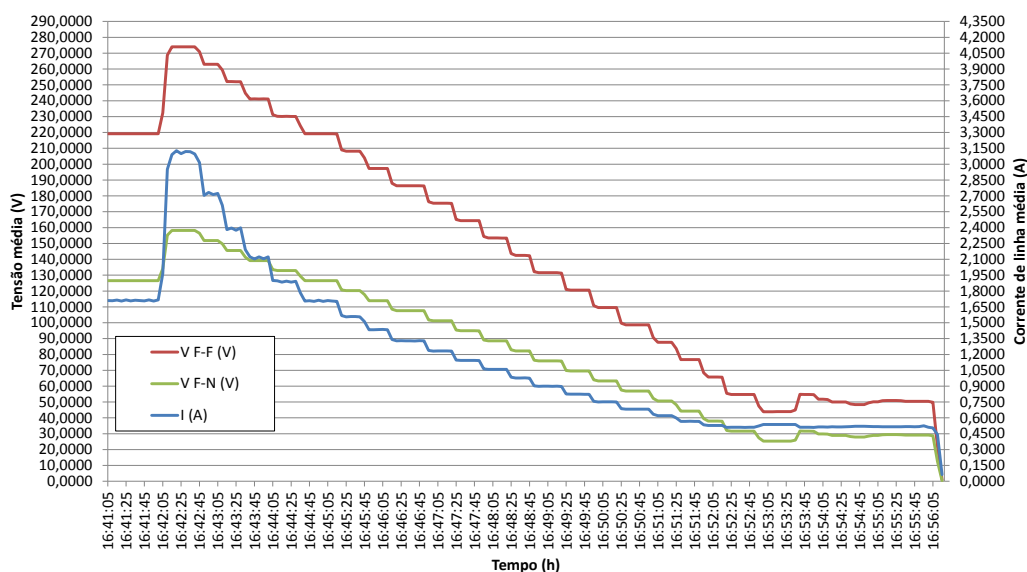


Figura 3.14 – Ensaio para separação das perdas à vazio do motor de alto rendimento – tensão e corrente.

Detalhe Ensaio de Separação das Perdas à Vazio - Motor de Alto Rendimento

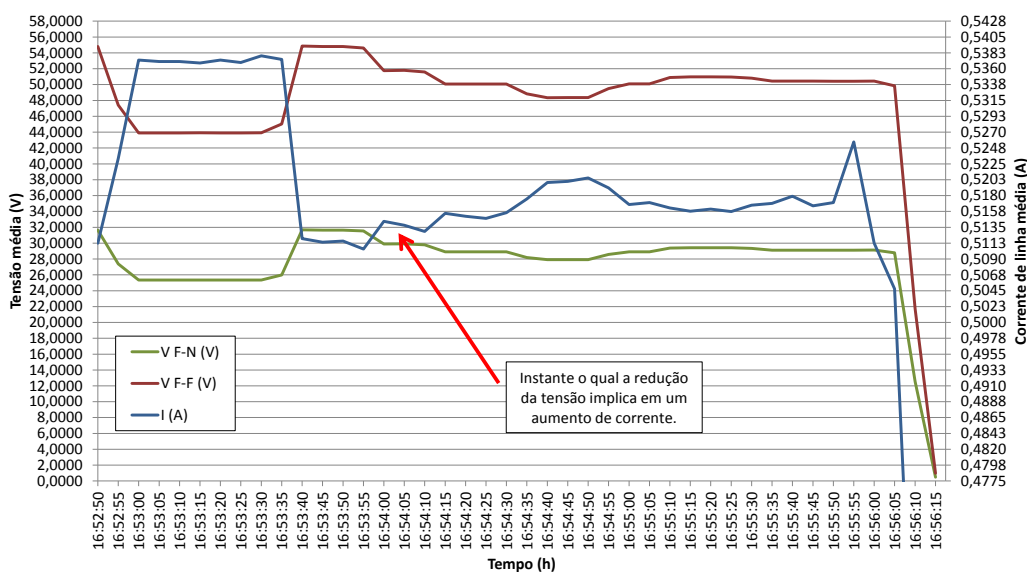


Figura 3.15 – Ensaio para separação das perdas à vazio do motor de alto rendimento – detalhe da tensão e corrente.

Tabela 3.8 – Separação das perdas mecânicas das perdas no núcleo para o motor de alto rendimento.

Perdas por Atrito e Ventilação										
Alto Rendimento										
Tensão de Linha [V]	Tensão de Linha ² [V ²]/100	Potência de entrada [W]	Corrente de linha [A]	Corrente de fase [A]	T _{faseA} [°C]	T _{faseB} [°C]	T _{faseC} [°C]	T _{média} [°C]	Perda P _R no estator [W]	Perdas à vazio [W]
273,960	750,543	188,880	3,096	1,788	38,600	38,400	40,300	39,100	39,662	149,218
263,047	691,939	153,274	2,713	1,566	38,600	38,400	40,300	39,100	30,458	122,815
252,059	635,338	125,900	2,381	1,375	38,600	38,500	40,400	39,167	23,464	102,435
241,154	581,550	105,592	2,105	1,215	38,700	38,600	40,400	39,233	18,344	87,248
230,149	529,683	90,267	1,894	1,093	38,700	38,500	40,300	39,167	14,843	75,424
219,200	480,486	79,646	1,703	0,983	38,700	38,500	40,300	39,167	11,997	67,649
208,215	433,537	72,139	1,559	0,900	38,700	38,500	40,300	39,167	10,055	62,084
197,297	389,260	66,047	1,435	0,828	38,600	38,500	40,300	39,133	8,521	57,525
186,369	347,333	61,274	1,330	0,768	38,600	38,500	40,300	39,133	7,315	53,959
175,305	307,320	56,861	1,232	0,711	38,600	38,500	40,300	39,133	6,276	50,585
164,402	270,279	52,989	1,144	0,660	38,600	38,500	40,300	39,133	5,412	47,577
153,427	235,398	49,557	1,059	0,611	38,600	38,500	40,200	39,100	4,638	44,919
142,440	202,893	46,430	0,978	0,565	38,600	38,500	40,200	39,100	3,958	42,472
131,533	173,009	43,512	0,899	0,519	38,600	38,500	40,200	39,100	3,345	40,167
120,552	145,329	40,974	0,824	0,476	38,600	38,400	40,200	39,067	2,806	38,167
109,615	120,154	38,591	0,751	0,434	38,600	38,400	40,200	39,067	2,335	36,256
98,666	97,350	36,445	0,683	0,395	38,600	38,400	40,200	39,067	1,932	34,514
87,674	76,868	34,475	0,621	0,358	38,500	38,400	40,200	39,033	1,594	32,882
76,713	58,848	32,770	0,567	0,327	38,500	38,400	40,200	39,033	1,331	31,439
65,631	43,074	31,477	0,528	0,305	38,500	38,400	40,200	39,033	1,151	30,326
54,793	30,022	30,197	0,511	0,295	38,500	38,400	40,200	39,033	1,081	29,116
51,802	26,834	30,021	0,514	0,297	38,500	38,400	40,200	39,033	1,092	28,929

3.4.3.3 PERDAS MECÂNICAS

As perdas mecânicas ocorrem devido ao atrito entre o eixo e os mancais, e também à potência requerida pelo sistema de ventilação inerente ao motor. Dos dados do ensaio anterior, os valores de potência, corrente e perda Joule no estator precisam de tratamento. Um gráfico das perdas à vazio versus o quadrado da tensão em cada ponto deve ser montado e, a curva obtida linearizada e extrapolada até o valor nulo do eixo horizontal, isto é, deve-se fazer a tensão igual a zero na equação da reta que foi obtida da linearização. O valor resultante representa as perdas mecânicas do motor em questão. Essa informação tem como base o fato das perdas no núcleo serem dependentes do quadrado da tensão, enquanto que as perdas mecânicas dependem apenas da velocidade do eixo do motor. A Figura 3.16 e Figura 3.17 apresentam os dados plotados para o motor da linha padrão e para o motor de alto rendimento, respectivamente.

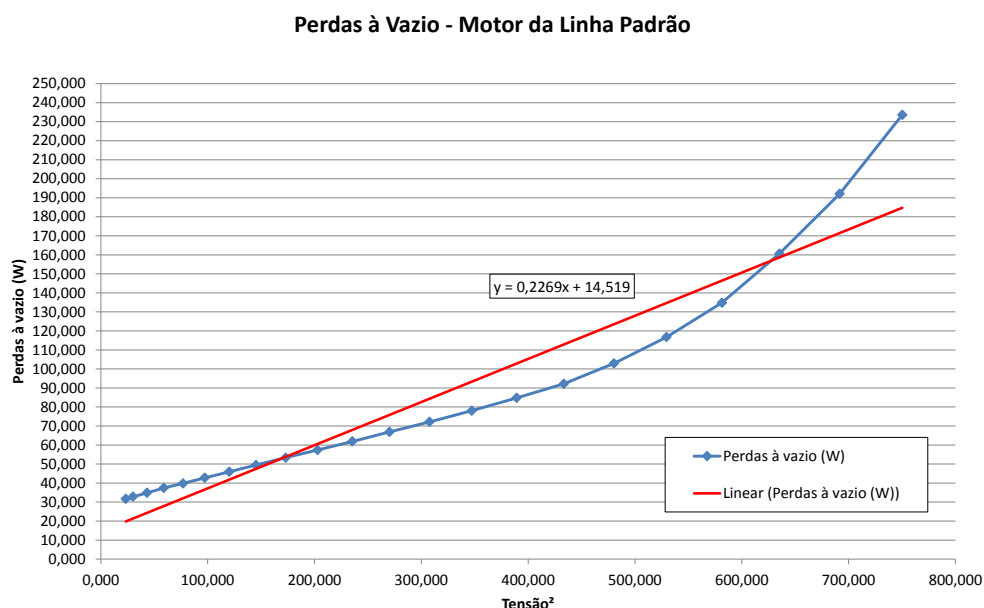


Figura 3.16 – Perdas à vazio para o motor da linha padrão.

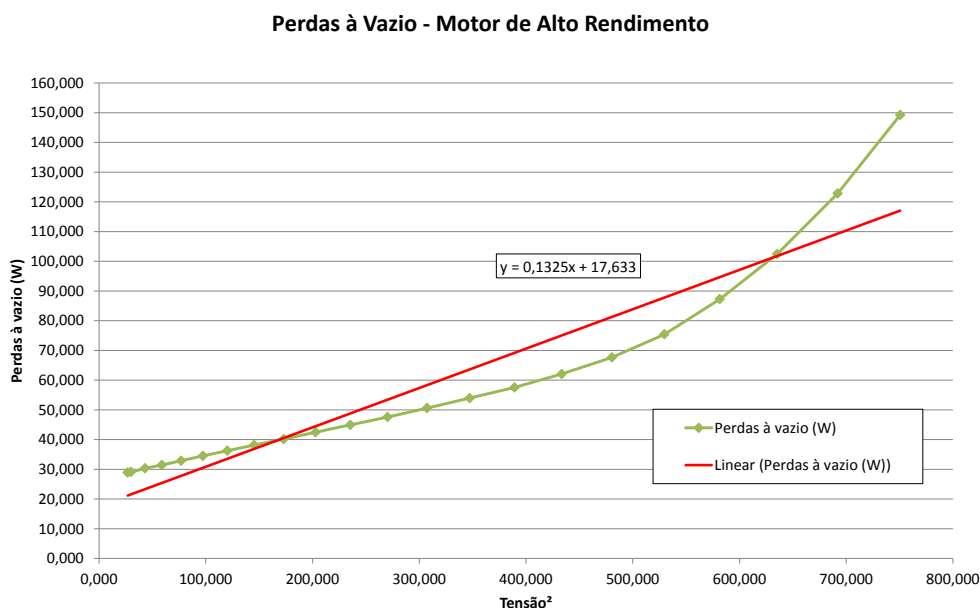


Figura 3.17 – Perdas à vazio para o motor de alto rendimento.

Analisando as duas curvas mostradas na Figura 3.16 e na Figura 3.17, os coeficientes lineares das retas obtidas correspondem, respectivamente, às perdas por atrito e ventilação do motor da linha padrão e de alto rendimento. A aproximação da curva referente aos ensaios pode ser também polinomial, de modo que há maior precisão em relação ao uso de uma reta [8]. Porém, o objetivo deste capítulo é a obtenção das perdas em motores de indução seguindo premissas em [6], cujas informações dadas acerca desta aproximação levam ao uso de uma reta ao invés de um polinômio. Sendo assim, serão utilizadas as equações mostradas na Figura 3.16 e na Figura 3.17 para computação das perdas mecânicas.

3.4.3.4 PERDAS NO NÚCLEO

De posse das perdas que ocorrem devido ao atrito e à ventilação de ambos os motores, pode-se obter as presentes no núcleo magnético, subtraindo-se as perdas mecânicas das perdas à vazio com tensão nominal, como mostra a equação (3.9).

$$W_{nuc} = W_{vazio} - W_{mec} \quad (3.9)$$

A Tabela 3.9 apresenta os resultados para as perdas no núcleo magnético dos dois motores, como também o valor das perdas mecânicas.

Tabela 3.9 – Perdas mecânicas e perdas no núcleo magnético.

Perdas Mecânicas e Perdas no Núcleo		
	Linha Padrão	Alto Rendimento
Perdas mecânicas - W_{mec} [W]	14,519	17,633
Perdas no núcleo - W_{nuc} [W]	87,460	50,593

3.4.4 ENSAIO COM CARGA

O ensaio com carga pode ser considerado como o principal teste necessário para a obtenção do rendimento dos motores, primeiro por definir os pontos de carga os quais terão as perdas, potência mecânica e consequentemente o rendimento definidos, segundo, pela precisão e atenção necessária para execução dos procedimentos, e terceiro, pelas condições as quais os motores precisam estar, objetivando sempre um ensaio bem sucedido.

Nesta etapa, o motor é acoplado ao dinamômetro, que irá fornecer carga mecânica em diversos valores percentuais da potência nominal do primeiro. É aplicada tensão e frequência nominais em 4 pontos de carga aproximadamente a 25%, 50%, 75% e 100% da potência nominal. Além desses 4 pontos, escolhe-se mais 2 pontos acima de 100% de até 150% do valor da carga nominal suportada pelo motor. É interessante que todos os pontos de carga citados sejam igualmente espaçados. Ainda como recomendação, o ensaio deve ser executado do maior ponto de carga para o menor a fim de se equalizar a temperatura do motor durante o ensaio.

Devem ser medidos os valores do conjugado de saída [N.m], a potência de entrada [kW], a corrente média de linha [A], a velocidade do motor [rpm], a temperatura média do enrolamento [°C], a temperatura ambiente [°C] e a tensão de linha média aplicada [V].

A condição primordial para a execução desse teste é a de que os motores estejam a uma temperatura que se enquadre entre 50% e 100% da temperatura de equilíbrio térmico medida no ensaio de elevação de temperatura [6]. Ainda, durante a execução não pode haver uma variação de temperatura superior a 10°C entre o ponto de maior e o de menor temperatura. Dadas estas duas informações sobre a temperatura, é imprescindível que um ensaio de elevação da mesma seja executado antes do teste com carga, para que os enrolamentos estáticos e as barras do rotor atinjam os valores de resistência ôhmica à temperatura especificada de funcionamento com carga nominal. Complementando, é interessante a realização do teste com carga em curto espaço de tempo visando minimizar as variações de temperatura que ocorrerão durante o mesmo. Além disso, como no ensaio à vazio, há necessidade de estabilização da perda nos mancais. Como o tempo de duração do

ensaio de elevação de temperatura é relativamente elevado, em torno de 2 horas, considera-se por atingida a estabilização da perda nos mancais no momento de início do teste com carga.

É recomendado que se execute um ensaio para correção do conjugado do dinamômetro, o qual é acionado pelo motor, porém sem exigir carga do mesmo [6]. Um caso que não exige esta correção é quando se utiliza um transdutor de conjugado, ou seja, um torquímetro, acoplado diretamente no eixo do motor, entre este e o dinamômetro. É importante salientar que esse teste proverá resultados que serão utilizados apenas na etapa de cálculo da potência mecânica de saída do motor e não o valor de fato do conjugado que será ajustado no dinamômetro durante o ensaio com carga. A aplicação desse procedimento se deve ao fato de que o dinamômetro por si só possui uma inércia e mesmo desligado representa uma pequena carga para os motores. Assim, se faz necessária a medição desse valor de carga para que o mesmo possa ser tratado matematicamente, fornecendo o valor do conjugado que será utilizado para os cálculos com as grandezas fornecidas pelo ensaio com carga. É conveniente que este teste seja executado como último procedimento do teste com carga, uma vez que cada motor já se encontrará em funcionamento, produzindo os conjugados pré-definidos desde o ponto de maior para o de menor carregamento, bem como aquecidos próximo da temperatura especificada.

De acordo com [6], a correção do conjugado do dinamômetro é regida por:

$$\sigma = \frac{k_2(W_A - W_B)}{n} - C \quad (3.10)$$

Sendo:

$$W_A = (P_1 - W_1 - W_{nuc})(1 - s_1) \quad (3.11)$$

$$W_B = P_0 - W_{vazio} - W_{nuc} \quad (3.12)$$

Onde:

k_2 é igual a 9,549, proveniente da conversão de rpm para rad/s;

A nomenclatura descrita anteriormente é a mesma utilizada em [6]. O que a norma denomina de “Ensaio ‘A’” é o teste onde o motor é acoplado no dinamômetro, em seguida alimentado com tensão e frequência nominais, porém sem simulação de conjugado resistente por parte do dinamômetro. O “Ensaio ‘B’” nada mais é do que o ensaio a vazio executado

anteriormente, onde os valores das perdas I^2R no estator sob esta condição e das perdas à vazio foram determinados.

O conjugado corrigido é obtido pela soma algébrica do valor calculado para σ com o valor do conjugado pré-definido. Assim, a potência mecânica em cada ponto é dada por:

$$P_{mec} = \frac{C' * n}{k} \quad (3.13)$$

Onde:

k é o fator de correção de rpm para rad/s, igual a 9,549;

Por uma questão de didática serão apresentados primeiramente os resultados para o ensaio de correção do conjugado e, posteriormente, os resultados da etapa referente ao teste com carga. A Tabela 3.10 apresenta os resultados para ambos os motores e, na mesma, I_A representa a corrente medida durante o ensaio “A”.

Como no ensaio à vazio, para medição das grandezas elétricas foi utilizado o analisador de energia elétrica RMS MARH-21 e, para as grandezas de origem mecânica, o sistema supervisor da bancada que contém o dinamômetro montado. Os testes foram realizados utilizando a fonte programável HP 6834A, visando o fornecimento de uma alimentação que estivesse dentro dos padrões requeridos por [6]. Para o motor da linha padrão, os resultados obtidos dos ensaios foram consistentes porém, para o motor de alto rendimento houve necessidade de repetir-se os testes com carga devido à inconsistências durante o processo de medição e manuseio de equipamentos. Como citado anteriormente, esta etapa requer o máximo de atenção e precisão durante sua execução e, qualquer equívoco induz a grandes desvios em relação ao resultado esperado. Porém, quando da ocasião da repetição dos testes com o motor de alto rendimento, não foi possível fazer uso da fonte programável, tendo-se assim que utilizar a própria rede de baixa tensão do laboratório. Foi constatado que o Fator Harmônico de Tensão e o fator de desequilíbrio estavam dentro dos valores máximos citados em [6], o que viabilizou o ensaio com carga no motor de alto rendimento. Ainda, foram conseguidos resultados plausíveis dos ensaios realizados, podendo os mesmos serem comparados com os do motor da linha padrão.

Tabela 3.10 – Correção do conjugado do dinamômetro.

Correção do dinamômetro			
		Linha Padrão	Alto Rendimento
P_A [W]	Fase A	52,082	38,415
	Fase B	54,715	37,521
	Fase C	53,104	46,761
	Total	159,901	122,698
I_A [A]	Fase A	2,050	1,773
	Fase B	2,033	1,650
	Fase C	2,003	1,702
	Média	2,029	1,708
Temperaturas medidas [°C]	Fase A	77,500	72,700
	Fase B	80,700	71,500
	Fase C	77,100	70,900
	Média	78,433	71,700
$I_{A \text{ fase}}$ [A]		1,171	0,986
W_1 [W]		19,694	13,511
W_h [W]		87,460	50,593
n_A [rpm]		3480,000	3482,000
s_1 [p.u.]		0,0333	0,0328
W_A [W]		50,989	56,673
P_0 [W]		119,997	80,330
W_0 [W]		18,018	12,104
W_B [W]		14,519	17,633
C [N.m]		0,500	0,500
σ [N.m]		-0,400	-0,393

Mostrado o procedimento de correção do conjugado do dinamômetro, é apresentada na Figura 3.18 a curva de potência ativa e corrente em função do tempo, para o ensaio com carga no motor da linha padrão. A Figura 3.19 ilustra o comportamento da velocidade lida do motor ao longo do ensaio, bem como a temperatura média do enrolamento do estator. A Figura 3.20 e a Figura 3.21 ilustra as mesmas grandezas referentes ao motor de alto rendimento. As medições de velocidade mostradas na Figura 3.19 e na Figura 3.21 apresentam oscilações durante o ensaio para cada ponto de carga e, pode ser notado que quanto menor o carregamento, maior é a oscilação. Dessa forma, o valor utilizado para a velocidade é a média durante o intervalo de tempo que cada motor ficou submetido à carga específica.

A Tabela 3.11 mostra os resultados para vários pontos pré-definidos de carga mecânica produzida pelo dinamômetro, apresentando os valores requeridos pela norma para esse teste, como também os valores dos conjugados corrigidos.

Na Figura 3.18, Figura 3.19, Figura 3.20 e Figura 3.21, o degrau mais à direita representa o ensaio para correção do conjugado do dinamômetro, feito com o motor acoplado ao mesmo, porém com o conjugado do dinamômetro setado em 0 N.m pelo sistema supervisor.

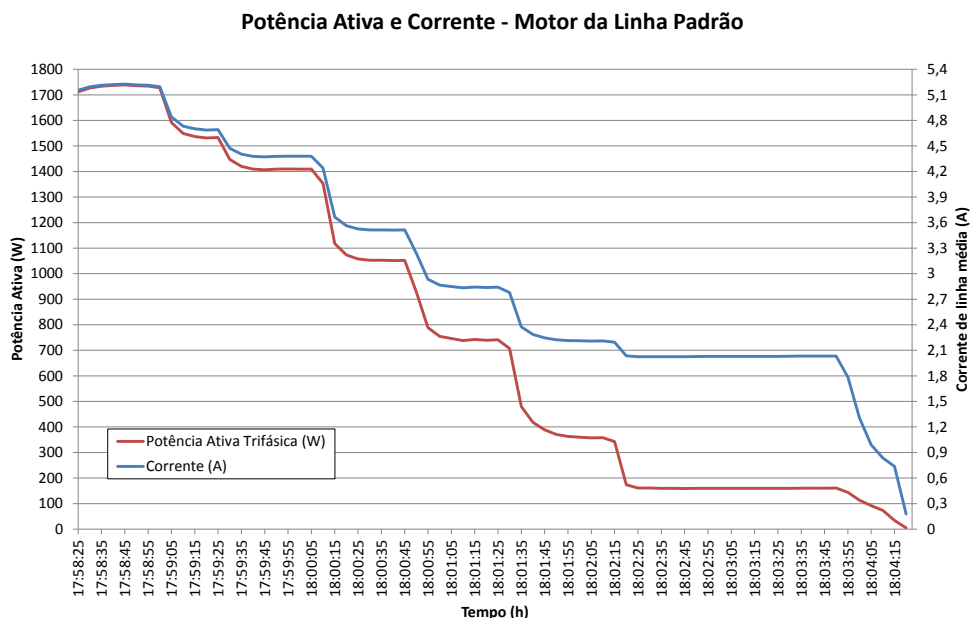


Figura 3.18 – Potência ativa e corrente durante o ensaio com carga para o motor da linha padrão.

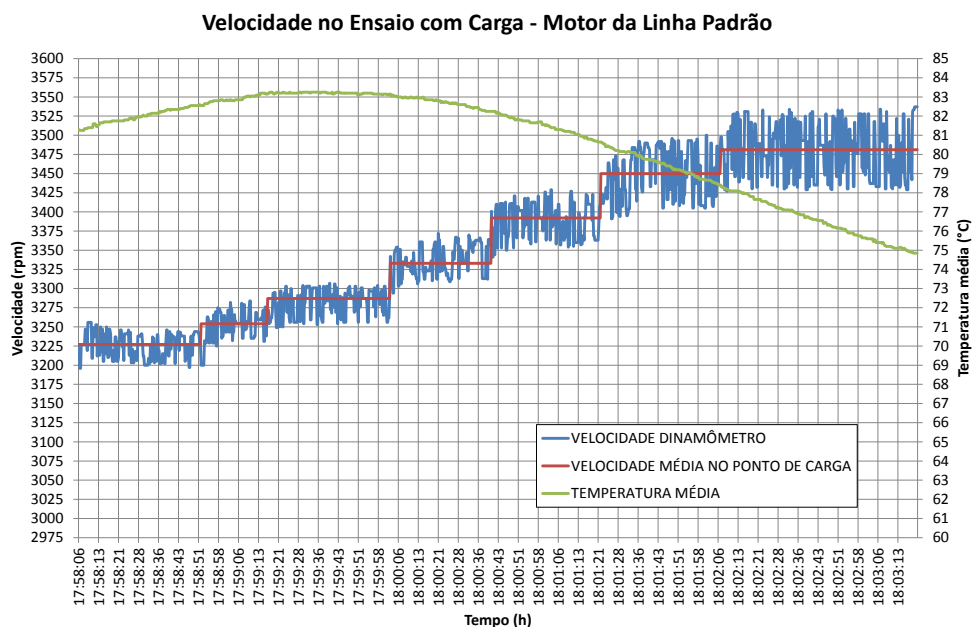


Figura 3.19 – Velocidade e temperatura média do enrolamento do estator do motor da linha padrão durante o ensaio com carga.

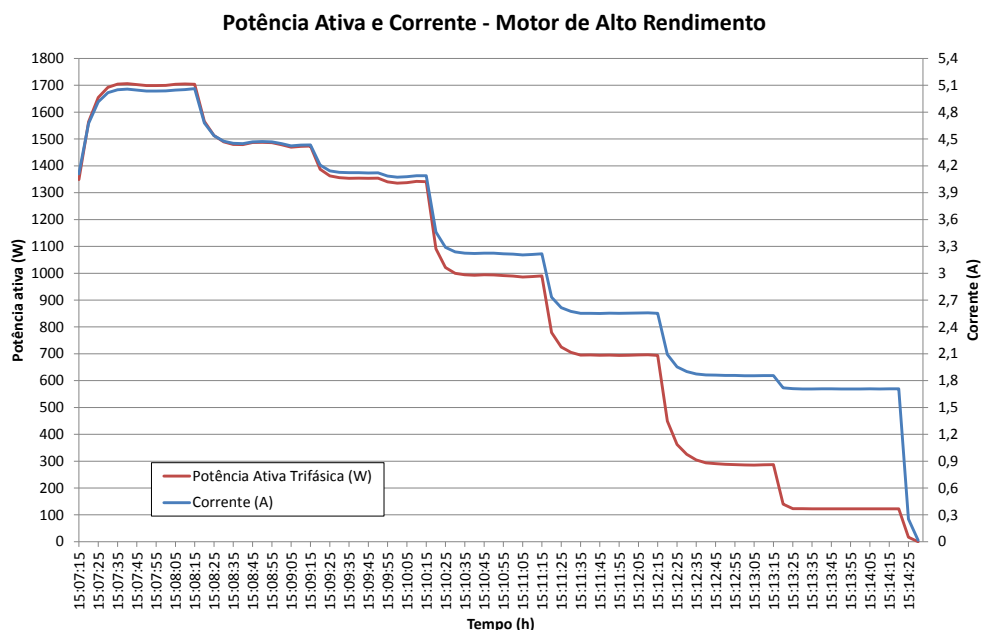


Figura 3.20 – Potência ativa e corrente durante o ensaio com carga para o motor de alto rendimento.

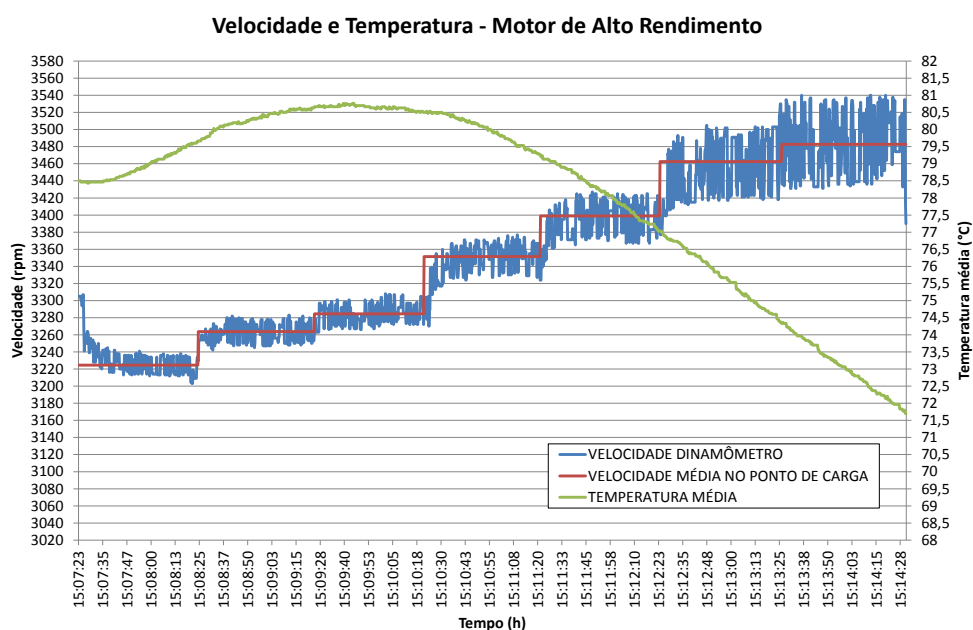


Figura 3.21 – Velocidade e temperatura média do enrolamento do estator do motor de alto rendimento durante o ensaio com carga.

Analisando a Tabela 3.11 pode-se observar que após a correção matemática do conjugado de saída do motor, tanto para o da linha padrão, quanto para o de alto rendimento, os valores são bastante aproximados. O mesmo ocorre para as medições da velocidade referente a cada ponto de carga. Dessa forma, a potência mecânica fornecida pelos motores possui grande proximidade nos seus valores calculados.

A potência de entrada se mostrou inferior no motor de alto rendimento, em comparação com o da linha padrão, o que implica em uma comprovação preliminar de que suas perdas são inferiores aos desse último quando ambos fornecem a mesma potência mecânica.

Apesar do teste em carga do motor de alto rendimento ter sido realizado com a rede de baixa tensão, nota-se pela Tabela 3.11 que os valores medidos se apresentaram próximos ao valor nominal do motor.

As temperaturas se mostraram próximas aos valores obtidos no ensaio de elevação de temperatura, atendendo a especificação de estarem entre 50% e 100% da temperatura obtida e, ainda, mais importante, de terem sofrido variações inferiores a 10°C durante o ensaio, como especificado em [6]. A variação de temperatura no motor da linha padrão ao longo do teste se mostrou inferior à do de alto rendimento, pois o ensaio com carga do primeiro foi realizado mais rapidamente do que o do segundo, como é apresentado na Figura 3.19 e Figura 3.21.

Tabela 3.11 – Resultados do ensaio com carga para os motores da linha padrão e de alto rendimento.

Teste com Carga										
Linha Padrão										
Conjugado [N.m]	Conjugado Corrigido [N.m]	Potência de entrada [W]	Corrente de linha [A]	Tensão de linha [V]	Velocidade [rpm]	T _{faseA} [°C]	T _{faseB} [°C]	T _{faseC} [°C]	T _{média} [°C]	Potência mecânica [W]
3,900	3,500	1739,232	5,226	218,883	3227,000	81,100	81,100	81,200	81,133	1182,818
3,400	3,000	1549,154	4,733	218,927	3260,000	82,300	82,400	82,500	82,400	1024,215
3,100	2,700	1406,317	4,378	218,956	3285,000	83,100	83,200	83,200	83,167	928,865
2,300	1,900	1051,540	3,512	219,003	3320,000	82,700	82,700	82,400	82,600	660,618
1,600	1,200	738,108	2,833	219,060	3380,000	81,200	81,000	80,900	81,033	424,782
0,800	0,400	370,523	2,224	219,132	3460,000	79,000	82,400	78,600	80,000	144,963
Maior diferença de temperatura						4,100	2,200	4,600	3,167	
Alto Rendimento										
Conjugado [N.m]	Conjugado Corrigido [N.m]	Potência de entrada [W]	Corrente de linha [A]	Tensão de linha [V]	Velocidade [rpm]	T _{faseA} [°C]	T _{faseB} [°C]	T _{faseC} [°C]	T _{média} [°C]	Potência mecânica [W]
3,900	3,507	1704,980	5,053	218,110	3219,000	80,700	78,600	78,100	79,133	1182,243
3,400	3,007	1473,692	4,434	218,543	3263,000	82,100	80,100	79,700	80,633	1027,547
3,100	2,707	1342,201	4,090	218,951	3284,000	81,900	80,100	79,600	80,533	930,987
2,300	1,907	987,937	3,211	219,465	3351,000	80,500	78,900	78,500	79,300	669,240
1,600	1,207	693,886	2,552	219,545	3399,000	78,100	76,800	76,300	77,067	429,659
0,800	0,407	285,164	1,855	219,936	3462,000	75,300	74,300	73,600	74,400	147,581
Maior diferença de temperatura						6,800	5,800	6,100	6,233	

Todos os testes de bancada necessários para a segregação das perdas e determinação do rendimento dos motores foram realizados e discutidos. Prossegue-se agora para a parte de cálculos das perdas em função do carregamento. Em seguida, deve-se corrigir as perdas considerando uma temperatura ambiente base de 25°C e a temperatura de referência e, após esse passo, obter o rendimento dos motores em função de seu carregamento.

3.4.5 PERDAS JOULE NO ESTATOR

As perdas devido ao efeito Joule, isto é, por aquecimento com a passagem de corrente pelo enrolamento, são dadas pela seguinte equação:

$$W_{I^2R} = 3I_f^2 R \quad (3.14)$$

Nesse momento, estas perdas são referentes a cada ponto de carga. Assim, utiliza-se a média das temperaturas das 3 fases do motor, lidas durante o ensaio descrito no item 3.4.4 deste capítulo, como temperatura de referência para correção da resistência do enrolamento do estator, como mostra a Tabela 3.12. Dessa forma, fica evidente que as perdas que ocorrem nos motores durante o teste com carga serão obtidas referentes às temperaturas referentes a cada ponto de carregamento. Para correção da resistência em função da temperatura, faz-se uso da equação (3.8). Nela, é considerado que:

t_s é a temperatura média do estator para cada ponto de carga, em °C;

R_t é a resistência do enrolamento do estator medida à frio, em Ω ;

t_t é a temperatura a qual R_t foi medida, em °C.

A diferença entre os resultados obtidos para o motor da linha padrão e para o de alto rendimento pode ser entendida como consequência direta da diferença da corrente de estator dos motores, que induz a uma variação quadrática das perdas joule calculadas para esta parte da máquina.

Tabela 3.12 – Perdas Joule no estator durante o ensaio com carga.

Perdas I^2R no Estator – Ensaio com Carga				
Linha Padrão				
Conjugado [N.m]	Temperatura no ponto [°C]	Resistência corrigida [Ω]	Corrente de fase [A]	Perda I^2R no estator [W]
3,900	81,133	4,825	3,017	131,795
3,400	82,400	4,845	2,732	108,505
3,100	83,167	4,856	2,527	93,061
2,300	82,600	4,848	2,028	59,807
1,600	81,033	4,824	1,636	38,715
0,800	80,000	4,808	1,284	23,781
Alto Rendimento				
Conjugado [N.m]	Temperatura no ponto [°C]	Resistência corrigida [Ω]	Corrente de fase [A]	Perda I^2R no estator [W]
3,900	79,133	4,743	2,917	121,082
3,400	80,633	4,766	2,560	93,699
3,100	80,533	4,764	2,362	79,711
2,300	79,300	4,745	1,854	48,919
1,600	77,067	4,712	1,473	30,684
0,800	74,400	4,671	1,071	16,071

3.4.6 PERDAS JOULE NO ROTOR

As perdas devido ao efeito Joule que ocorrem nas barras do rotor são dependentes do escorregamento, uma vez que este influencia a frequência das correntes induzidas. Apesar do cálculo de perda por efeito Joule ser realizado através da relação I^2R , no caso do rotor esta regra não se aplica, pois não se tem ao certo o valor da resistência das barras, uma vez que esta não é medida como é feito no caso do enrolamento do estator. Da mesma forma, não se mede a corrente que percorre as barras condutoras durante os ensaios executados. Por estes motivos que se calculam as perdas Joule embasado no escorregamento.

A equação a seguir demonstra o que foi citado [5][6]:

$$W_{I^2R_{rot}} = (P_{ent} - W_{I^2R_{est}} - W_{nuc})s \quad (3.15)$$

O escorregamento deve ser corrigido para a temperatura medida no ponto de carga [6]. Entretanto, o mesmo já se encontra referido à temperatura do ensaio, e assim não há necessidade de correção para uma temperatura considerada [5]. A Tabela 3.13 apresenta os resultados para estas perdas em função do carregamento dos motores.

Tabela 3.13 – Perdas Joule no rotor durante o ensaio com carga.

Perdas I ² R no Rotor						
Linha Padrão						
Conjugado [N.m]	Temperatura no ponto [°C]	Potência de entrada [W]	Perdas I ² R no estator [W]	Perdas no núcleo [W]	Escorregamento	Perda I ² R no rotor [W]
3,900	81,133	1739,232	131,795	87,460	0,1036	157,487
3,400	82,400	1549,154	108,505	87,460	0,0944	127,801
3,100	83,167	1406,317	93,061	87,460	0,0875	107,257
2,300	82,600	1051,540	59,807	87,460	0,0778	70,332
1,600	81,033	738,108	38,715	87,460	0,0611	37,396
0,800	80,000	370,523	23,781	87,460	0,0389	10,083
Alto Rendimento						
Conjugado [N.m]	Temperatura no ponto [°C]	Potência de entrada [W]	Perdas I ² R no estator [W]	Perdas no núcleo [W]	Escorregamento	Perda I ² R no rotor [W]
3,900	79,133	1704,980	121,082	50,593	0,1058	162,275
3,400	80,633	1473,692	93,699	50,593	0,0936	124,447
3,100	80,533	1342,201	79,711	50,593	0,0878	106,378
2,300	79,300	987,937	48,919	50,593	0,0692	61,449
1,600	77,067	693,886	30,684	50,593	0,0558	34,204
0,800	74,400	285,164	16,071	50,593	0,0383	8,376

Nota-se que há proximidade dos valores entre os dois tipos de motores estudados. Mesmo havendo uma grande diferença entre o valor das perdas no núcleo, ao se calcular multiplica-se por um valor bastante pequeno, dado pelo escorregamento, e como as potências de entrada e os escorregamentos para cada ponto de carga, comparando os motores, são próximos, estes preponderam no resultado.

3.4.7 PERDAS SUPLEMENTARES

Da Tabela 3.11, para cada ponto de carga aplicado obtém-se a diferença entre a potência mecânica de saída e a potência elétrica de entrada. A essa diferença dá-se o nome de *perda aparente total*, composta pelo somatório de todas as perdas incidentes no motor de indução. Inerente a ela há as perdas suplementares que são obtidas através da diferença entre a perda aparente total e o somatório das perdas convencionais. Estas últimas são as perdas Joule no estator e rotor, perdas no núcleo e mecânicas.

A Tabela 3.14 aponta os valores obtidos das perdas suplementares em função do carregamento.

Tabela 3.14 – Perdas suplementares em função do ponto de carga dos motores.

Perdas Suplementares					
Linha Padrão					
Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]	Potência de Saída [W]	Perda Aparente Total [W]	Perdas Convencionais [W]	Perdas Suplementares [W]
3,900	1739,232	1182,818	556,414	391,260	165,153
3,400	1549,154	1024,215	524,939	338,285	186,654
3,100	1406,317	928,865	477,452	302,297	175,155
2,300	1051,540	660,618	390,922	232,118	158,805
1,600	738,108	424,782	313,326	178,090	135,237
0,800	370,523	144,963	225,560	135,843	89,717
Alto Rendimento					
Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]	Potência de Saída [W]	Perda Aparente Total [W]	Perdas Convencionais [W]	Perdas Suplementares [W]
3,900	1704,980	1182,243	522,737	351,582	171,155
3,400	1473,692	1027,547	446,145	286,371	159,774
3,100	1342,201	930,987	411,214	254,314	156,900
2,300	987,937	669,240	318,698	178,594	140,103
1,600	693,886	429,659	264,227	133,113	131,114
0,800	285,164	147,581	137,583	92,672	44,910

As perdas suplementares para cada ponto de carga plotadas em um gráfico em função do quadrado dos conjugados correspondentes devem se aproximar de uma curva [6], dada por:

$$W_{sup} = AT^2 + B \quad (3.16)$$

Onde:

A é a inclinação da reta que será obtida;

B é a interseção com a linha de conjugado zero.

Analisando mais profundamente, pode-se afirmar que pelo fato das perdas suplementares serem dependentes do conjugado, quando a carga for nula, as perdas suplementares também o serão. Sendo assim, aproximam-se estas perdas pela equação:

$$W_{sup} = AT^2 \quad (3.17)$$

Onde:

A é a inclinação da reta que será obtida.

A norma indica um processo de cálculo para obtenção do coeficiente A , bem como de um coeficiente de correlação γ , utilizado para avaliar a viabilidade dos dados.

O valor A corresponde ao coeficiente angular da reta que será obtida, podendo ser determinado utilizando a seguinte equação:

$$A = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{N \sum X^2 - (\sum X)^2} \quad (3.18)$$

Para avaliar se o valor do coeficiente angular A é coerente, é calculado um coeficiente de correlação γ , através da equação:

$$\gamma = \frac{N \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{((N \sum X^2 - (\sum X)^2)(N \sum Y^2 - (\sum Y)^2))}} \quad (3.19)$$

No caso de ser encontrado um valor negativo para o coeficiente angular A ou se o coeficiente de correlação γ for menor do que 0,9, deve-se ignorar o pior ponto e recalculá-los ambos. Se um dos casos citados persistirem, os ensaios devem ser repetidos, pois os dados são insatisfatórios devido a erros na instrumentação e de leitura [6]. Assim, no caso de inviabilização dos resultados, as fontes de erros devem ser investigadas e corrigidas, e somente assim os ensaios poderão ser repetidos.

Realizando os cálculos para o coeficiente de correlação γ para ambos os motores, foi obtido um valor inferior a 0,9. Dessa forma, segundo as referências [5] e [6], pode-se desprezar o pior par de pontos. A Figura 3.22 mostra a curva das perdas suplementares obtidas sem correção e a Tabela 3.15 o cálculo dos coeficientes angular e de correlação utilizando-se os 6 pontos de ensaio.

A Figura 3.22 mostra claramente que para o motor da linha padrão, o ponto de maior carga apresentou um grande desvio em relação aos pontos anteriores, inclusive estando abaixo da linha de tendência. Dessa forma, como o coeficiente de correlação para este motor apresentou-se abaixo de 0,9, como mostra a Tabela 3.15, será desconsiderado esse ponto e serão recalculados os valores de A e γ utilizando-se os 5 pontos restantes. Para o motor de alto rendimento, ocorreu fato semelhante, apenas se diferenciando no ponto que será desconsiderado, que é o de menor carga.

A Figura 3.23 apresenta as curvas das perdas suplementares para cada motor com os pontos citados excluídos e a Tabela 3.16 os resultados para os cálculos dos coeficientes.

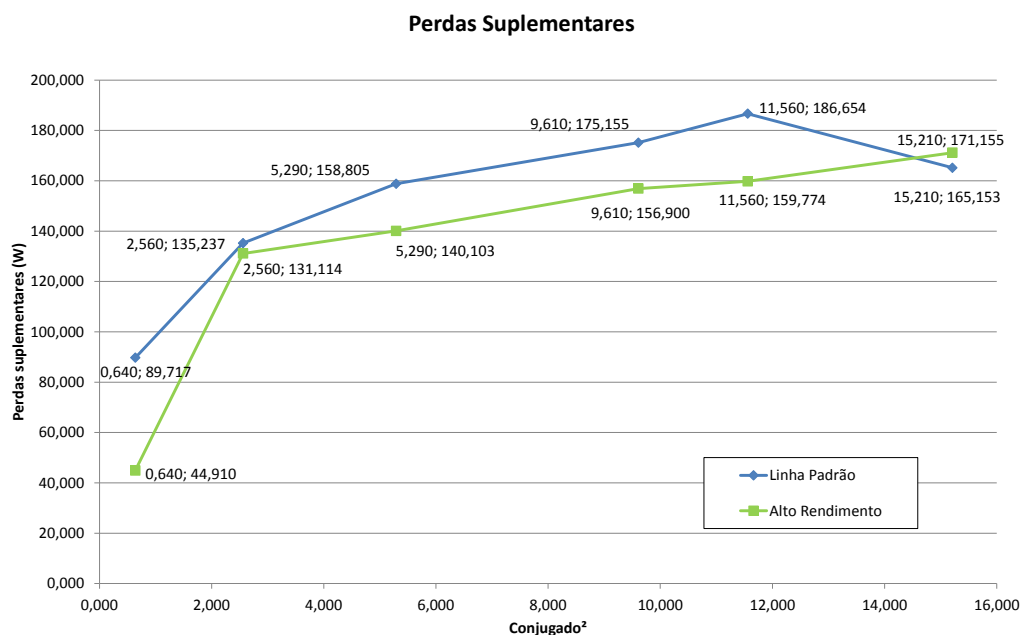


Figura 3.22 – Perdas suplementares utilizando-se os 6 pontos do ensaio com carga.

Tabela 3.15 – Perdas suplementares e coeficientes calculados para os 6 pontos do ensaio com carga.

Correção das perdas suplementares					
Linha Padrão					
Número de pares de valores	Conjugado² - X	X²	Perda suplementar - Y	X*Y	Y²
6,000	15,210	231,344	165,153	2511,983	27275,651
	11,560	133,634	186,654	2157,724	34839,832
	9,610	92,352	175,155	1683,237	30679,198
	5,290	27,984	158,805	840,077	25218,959
	2,560	6,554	135,237	346,206	18288,936
	0,640	0,410	89,717	57,419	8049,205
Somatório	44,870	492,277	910,721	7596,647	144351,780
		A	5,015		
		γ	0,803		
Alto Rendimento					
Número de pares de valores	Conjugado² - X	X²	Perda suplementar - Y	X*Y	Y²
6,000	15,210	231,344	171,155	2603,261	29293,886
	11,560	133,634	159,774	1846,986	25527,690
	9,610	92,352	156,900	1507,808	24617,587
	5,290	27,984	140,103	741,147	19628,951
	2,560	6,554	131,114	335,651	17190,827
	0,640	0,410	44,910	28,743	2016,948
Somatório	44,870	492,277	803,956	7063,596	118275,889
		A	6,708		
		γ	0,818		

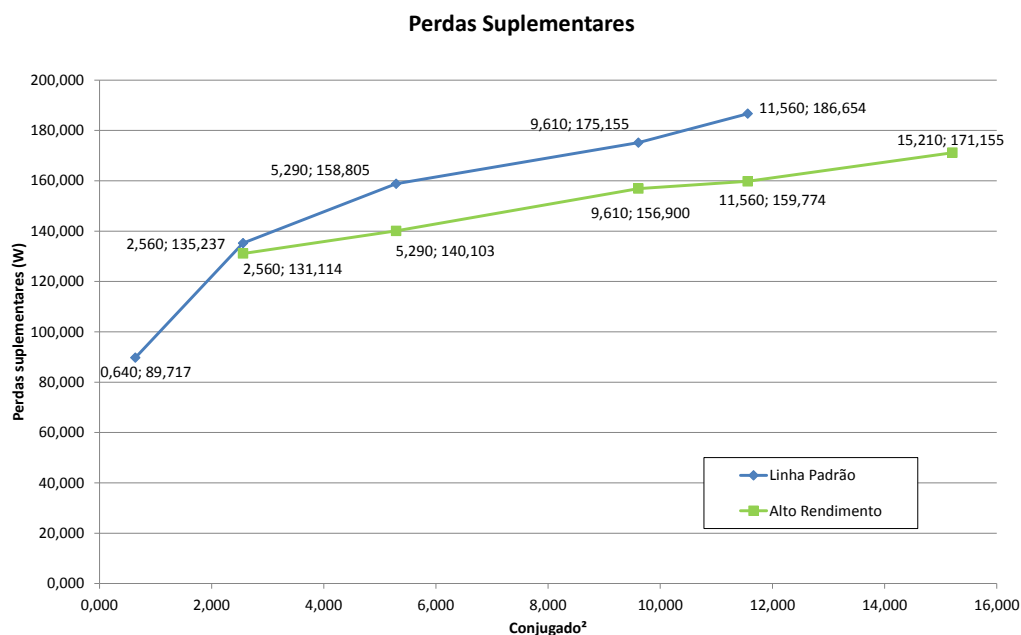


Figura 3.23 – Curvas das perdas suplementares sem os pontos fora da tendência.

Tabela 3.16 – Correção das perdas suplementares para os motores.

Correção das perdas suplementares					
Linha Padrão					
Número de pares de valores	Conjugado² - X	X²	Perda suplementar - Y	X*Y	Y²
5,000		0,000		0,000	0,000
	11,560	133,634	186,654	2157,724	34839,832
	9,610	92,352	175,155	1683,237	30679,198
	5,290	27,984	158,805	840,077	25218,959
	2,560	6,554	135,237	346,206	18288,936
	0,640	0,410	89,717	57,419	8049,205
Somatório	29,660	260,933	745,568	5084,663	117076,129
		A	7,789		
		γ	0,935		
Alto Rendimento					
Número de pares de valores	Conjugado² - X	X²	Perda suplementar - Y	X*Y	Y²
5,000	15,210	231,344	171,155	2603,261	29293,886
	11,560	133,634	159,774	1846,986	25527,690
	9,610	92,352	156,900	1507,808	24617,587
	5,290	27,984	140,103	741,147	19628,951
	2,560	6,554	131,114	335,651	17190,827
		0,000		0,000	0,000
Somatório	44,230	491,868	685,883	7034,853	116258,941
		A	3,184		
		γ	0,996		

Assim, podem-se obter para cada motor, as perdas suplementares regidas pela equação (3.17), em função do carregamento, mostradas na Tabela 3.17. A Figura 3.24 apresenta as perdas suplementares para ambos os motores em função do quadrado do conjugado de carga.

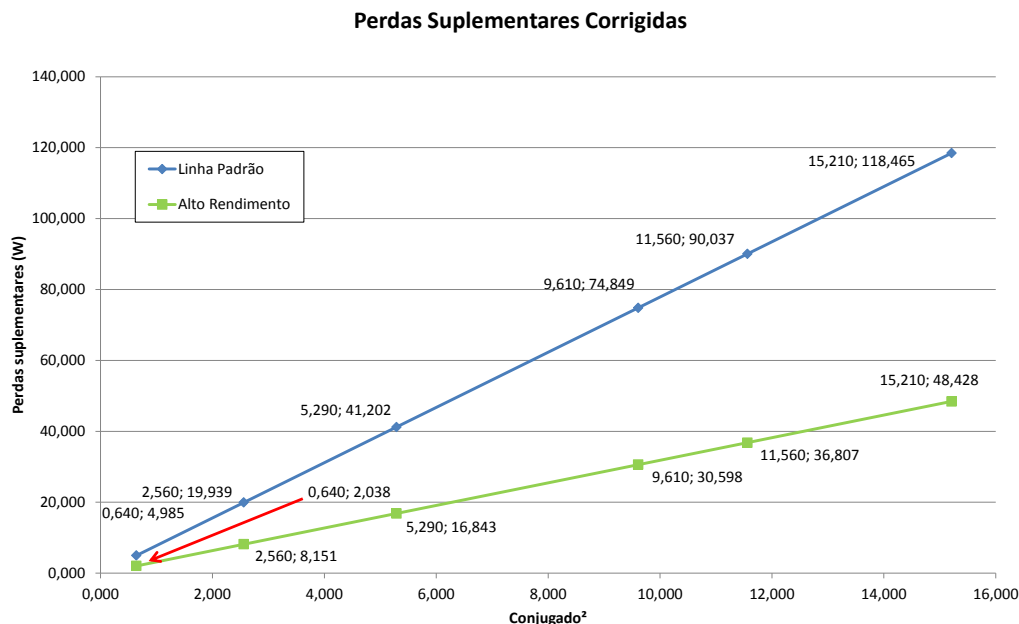


Figura 3.24 – Perdas suplementares corrigidas em função do quadrado do conjugado de carga.



Tabela 3.17 – Perdas suplementares corrigidas.

Perdas Suplementares						
Linha Padrão						
Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]	Potência de Saída [W]	Perda Aparente Total [W]	Perdas Convencionais [W]	Perdas Suplementares [W]	Perdas Suplementares Corrigidas [W]
3,900	1739,232	1182,818	556,414	391,260	165,153	118,465
3,400	1549,154	1024,215	524,939	338,285	186,654	90,037
3,100	1406,317	928,865	477,452	302,297	175,155	74,849
2,300	1051,540	660,618	390,922	232,118	158,805	41,202
1,600	738,108	424,782	313,326	178,090	135,237	19,939
0,800	370,523	144,963	225,560	135,843	89,717	4,985
Alto Rendimento						
Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]	Potência de Saída [W]	Perda Aparente Total [W]	Perdas Convencionais [W]	Perdas Suplementares [W]	Perdas Suplementares Corrigidas [W]
3,900	1704,980	1182,243	522,737	351,582	171,155	48,428
3,400	1473,692	1027,547	446,145	286,371	159,774	36,807
3,100	1342,201	930,987	411,214	254,314	156,900	30,598
2,300	987,937	669,240	318,698	178,594	140,103	16,843
1,600	693,886	429,659	264,227	133,113	131,114	8,151
0,800	285,164	147,581	137,583	92,672	44,910	2,038

3.4.8 PERDAS I^2R NO ESTATOR CORRIGIDAS

Obtidas todas as perdas dos motores em função do carregamento e da temperatura medida no ponto, devem-se corrigir as perdas joule para a temperatura especificada, considerando uma temperatura ambiente de 25°C. Como citado no item 3.4.2 deste capítulo, esta temperatura de referência é proveniente do ensaio de elevação de temperatura, após o equilíbrio térmico.

Para tanto, deve-se corrigir a resistência à frio do enrolamento de cada motor, apresentada na Tabela 3.3, utilizando a equação (3.8) e a temperatura de equilíbrio térmico para carga nominal, apresentada na Tabela 3.4.

Na equação (3.8), a temperatura t_t (temperatura a qual a resistência foi medida) é considerada como sendo 25°C e a temperatura t_s como sendo a de equilíbrio térmico do ensaio de elevação de temperatura. Faz-se uso da corrente de fase de cada motor e de cada ponto de carga para o cálculo das perdas joule corrigidas. Os resultados para ambos os motores são apresentados na Tabela 3.18.

Tabela 3.18 – Perdas I^2R no estator corrigidas.

Perdas I^2R no Estator Corrigidas			
Linha Padrão			
Temperatura de referência [°C]			80,233
Conjugado [N.m]	Resistência corrigida [Ω]	Corrente de fase [A]	Perda I^2R no estator [W]
3,900	4,832	3,017	131,977
3,400	4,832	2,732	108,220
3,100	4,832	2,527	92,593
2,300	4,832	2,028	59,612
1,600	4,832	1,636	38,781
0,800	4,832	1,284	23,900
Alto Rendimento			
Temperatura de referência [°C]			78,500
Conjugado [N.m]	Resistência corrigida [Ω]	Corrente de fase [A]	Perda I^2R no estator [W]
3,900	4,759	2,917	121,490
3,400	4,759	2,560	93,566
3,100	4,759	2,362	79,623
2,300	4,759	1,854	49,058
1,600	4,759	1,473	30,991
0,800	4,759	1,071	16,372

3.4.9 PERDAS I²R NO ROTOR CORRIGIDAS

As perdas joule no rotor também devem sofrer correção em função da temperatura especificada e da temperatura ambiente de 25°C considerada. Como citado anteriormente no item 3.4.6, as perdas joule no rotor dependem do escorregamento e, este varia em função da temperatura do motor. Assim, se deve corrigir o mesmo utilizando a seguinte equação:

$$S_s = S_t \frac{(t_s + k)}{(t_t + k)} \quad (3.20)$$

Onde:

t_t é a temperatura ambiente de 25°C usada como referência;

k é uma constante que depende do material constituinte do enrolamento. Para enrolamento de cobre eletrolítico com 100% de condutividade, $k = 234,5$. Para o alumínio com condutividade em volume de 62%, $k = 225$.

A Tabela 3.19 apresenta os valores do escorregamento referente à temperatura especificada bem como os resultados das perdas joule no rotor.

Tabela 3.19 – Perdas I²R no rotor corrigidas.

Perdas I ² R no Rotor Corrigidas			
Linha Padrão			
Temperatura de referência [°C]		80,233	
Conjugado [N.m]	Escorregamento	Escorregamento corrigido	Perda I ² R no rotor [W]
3,900	0,1036	0,1265	192,258
3,400	0,0944	0,1153	156,070
3,100	0,0875	0,1068	131,004
2,300	0,0778	0,0950	85,890
1,600	0,0611	0,0746	45,653
0,800	0,0389	0,0475	12,305
Alto Rendimento			
Temperatura de referência [°C]		78,500	
Conjugado [N.m]	Escorregamento	Escorregamento corrigido	Perda I ² R no rotor [W]
3,900	0,1058	0,1285	196,949
3,400	0,0936	0,1136	151,093
3,100	0,0878	0,1066	129,152
2,300	0,0692	0,0840	74,588
1,600	0,0558	0,0678	41,503
0,800	0,0383	0,0465	10,154

3.4.10 POTÊNCIA DE SAÍDA CORRIGIDA

Ao se corrigir as perdas joule do estator e do rotor para a temperatura especificada, e mantendo-se a potência de entrada lida do ensaio com carga para cada ponto, conclui-se que haverá uma pequena alteração da potência mecânica dos motores. Isso ocorre devido ao fato das temperaturas de ensaio e especificada serem diferentes. A nova potência mecânica é obtida por:

$$P_{mec} = P_{ent} - W_{nuc} - W_{mec} - W_{I^2R_{est}} - W_{I^2R_{rot}} - W_{sup} \quad (3.21)$$

Onde:

P_{mec} é a potência mecânica corrigida em cada ponto de carga, em W;

P_{ent} é a potência de entrada medida no ensaio com carga para cada ponto, em W;

W_{nuc} são as perdas no núcleo magnético, em W;

W_{mec} são as perdas mecânicas, em W;

$W_{I^2R_{est}}$ são as perdas joule no estator corrigidas para a temperatura especificada (item 3.4.8), em W;

$W_{I^2R_{rot}}$ são as perdas joule no rotor corrigidas para a temperatura especificada (item 3.4.9), em W;

W_{sup} são as perdas suplementares corrigidas (item 3.4.7), em W.

A Tabela 3.20 apresenta os valores das potências citadas anteriormente, bem como o resultado encontrado para a potência mecânica relativa a cada ponto de carga dos motores.

Tabela 3.20 – Correção da potência mecânica e balanço energético dos motores.

Balanço Energético								
Linha Padrão								
Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]	Perda Joule Estator [W]	Perda Joule Rotor [W]	Perdas no Núcleo [W]	Perdas Mecânicas [W]	Perdas Suplementares [W]	Perda Aparente Total [W]	Potência mecânica [W]
3,900	1739,232	131,977	192,258	87,460	14,519	118,465	544,678	1194,554
3,400	1549,154	108,220	156,070	87,460	14,519	90,037	456,305	1092,850
3,100	1406,317	92,593	131,004	87,460	14,519	74,849	400,424	1005,893
2,300	1051,540	59,612	85,890	87,460	14,519	41,202	288,682	762,858
1,600	738,108	38,781	45,653	87,460	14,519	19,939	206,351	531,757
0,800	370,523	23,900	12,305	87,460	14,519	4,985	143,168	227,355
Alto Rendimento								
Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]	Perda Joule Estator [W]	Perda Joule Rotor [W]	Perdas no Núcleo [W]	Perdas Mecânicas [W]	Perdas Suplementares [W]	Perda Aparente Total [W]	Potência mecânica [W]
3,900	1704,980	121,490	196,949	50,593	17,633	48,428	435,093	1269,887
3,400	1473,692	93,566	151,093	50,593	17,633	36,807	349,692	1124,000
3,100	1342,201	79,623	129,152	50,593	17,633	30,598	307,599	1034,602
2,300	987,937	49,058	74,588	50,593	17,633	16,843	208,715	779,223
1,600	693,886	30,991	41,503	50,593	17,633	8,151	148,870	545,015
0,800	285,164	16,372	10,154	50,593	17,633	2,038	96,790	188,375

A Figura 3.25 ilustra a potência de entrada em função do carregamento, comparando os dois tipos de motores estudados. Nota-se que esta grandeza para o motor de alto rendimento é menor, porém apresenta praticamente a mesma tendência de crescimento se comparada à do motor da linha padrão.

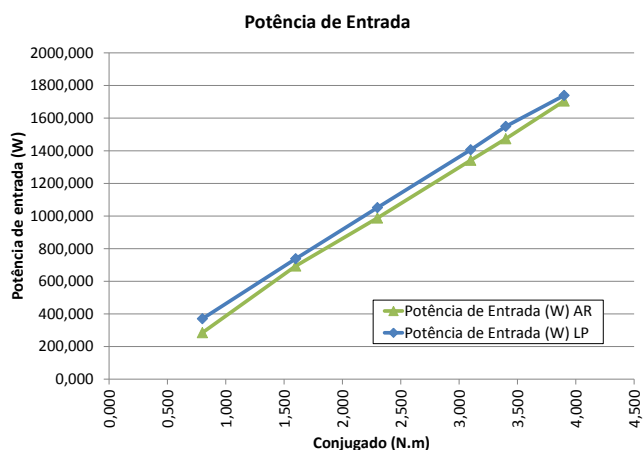


Figura 3.25 – Potência de entrada dos motores em função do carregamento.

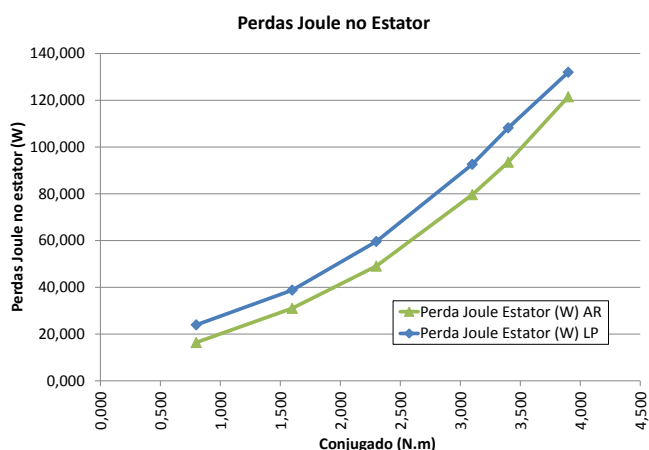


Figura 3.26 – Perdas Joule no estator dos motores em função do carregamento.

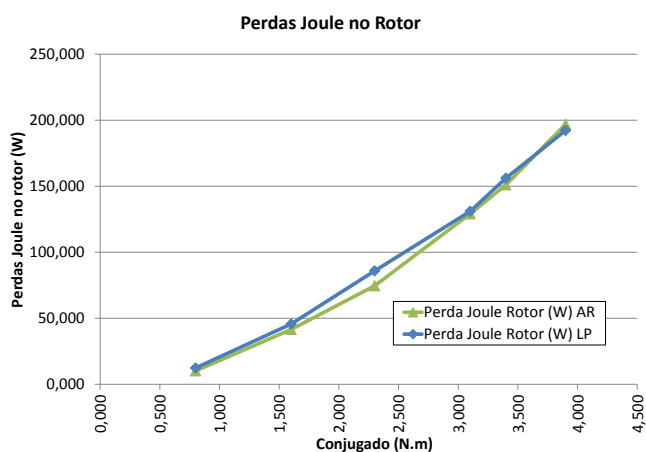


Figura 3.27 – Perdas Joule no rotor dos motores em função do carregamento.

As perdas mecânicas, mostradas na Figura 3.28, são consideradas constantes independentemente do carregamento dos motores, o mesmo ocorrendo para as perdas no núcleo magnético, mostradas na Figura 3.29. O motor de alto rendimento apresentou as primeiras superiores às do motor da linha padrão, porém a discrepância não é elevada.

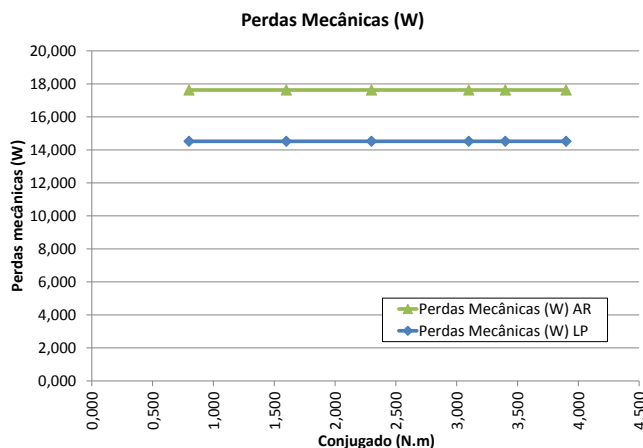


Figura 3.28 – Perdas mecânicas em ambos os motores em função do carregamento.

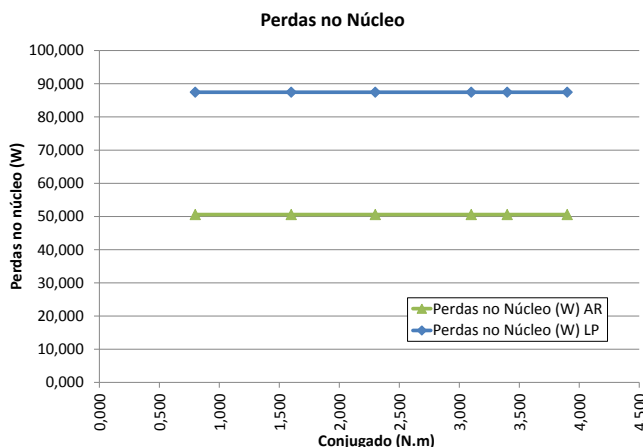


Figura 3.29 – Perdas no núcleo magnético nos motores em função do carregamento.

A Figura 3.30 mostra as perdas suplementares para os dois motores, em função da carga. Dada a aproximação quadrática em relação ao conjugado, é notável o maior aumento destas perdas no motor da linha padrão do que no de alto rendimento.

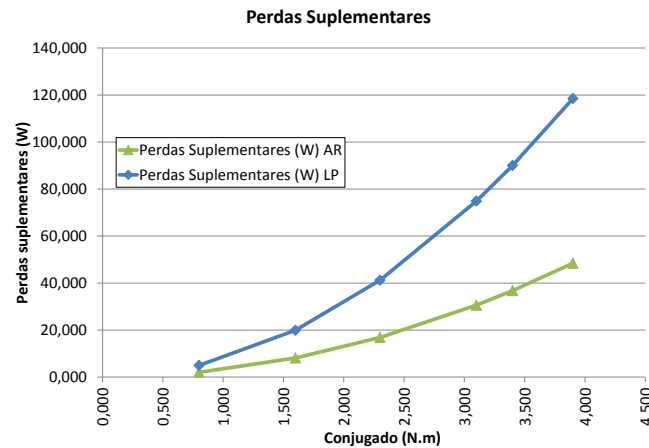


Figura 3.30 – Perdas suplementares nos motores em função do carregamento.

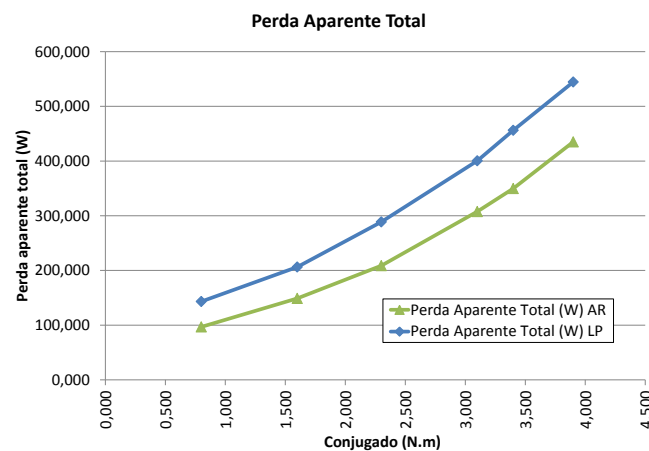


Figura 3.31 – Perda aparente total dos motores em função do carregamento.

A Figura 3.32 ilustra a potência mecânica para ambos os motores e, analisando os gráficos anteriores, é evidente o comportamento do motor de alto rendimento frente ao da linha padrão, tendo menores perdas, com exceção das perdas mecânicas, fornecendo praticamente a mesma potência mecânica.

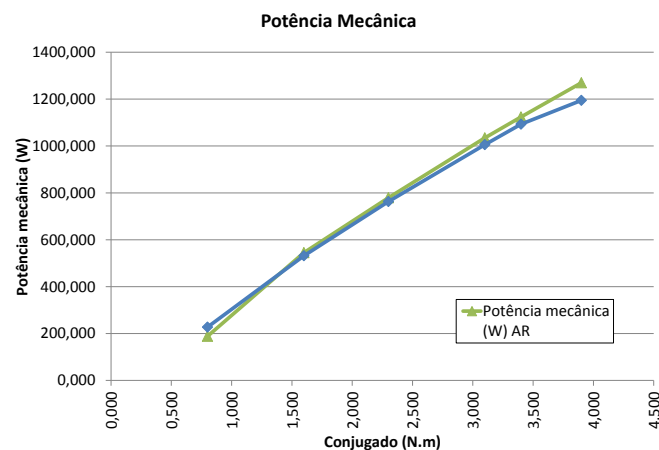


Figura 3.32 – Potência mecânica nos motores em função do conjugado.

3.5 DETERMINAÇÃO DO RENDIMENTO

Fazendo uso da equação (2.2) pode-se determinar o rendimento dos motores para cada condição de carga aplicada.

Considerando-se a temperatura do ensaio de elevação de temperatura, que é a especificada, obtêm-se os resultados mostrados na Tabela 3.21 e na Figura 3.33.

Tabela 3.21 – Rendimento referente à temperatura do ensaio de elevação de temperatura.

Rendimento				
Linha Padrão				
Carga (% do nominal)	Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]	Potência mecânica [W]	Rendimento [%]
125,806	3,900	1739,232	1194,554	68,683
109,677	3,400	1549,154	1092,850	70,545
100,000	3,100	1406,317	1005,893	71,527
74,194	2,300	1051,540	762,858	72,547
51,613	1,600	738,108	531,757	72,043
25,806	0,800	370,523	227,355	61,361
Alto Rendimento				
Carga (% do nominal)	Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]	Potência mecânica [W]	Rendimento [%]
125,806	3,900	1704,980	1269,887	74,481
109,677	3,400	1473,692	1124,000	76,271
100,000	3,100	1342,201	1034,602	77,083
74,194	2,300	987,937	779,223	78,874
51,613	1,600	693,886	545,015	78,545
25,806	0,800	285,164	188,375	66,058

Pode-se aproximar as curvas de rendimento obtidas por polinômios cúbicos a fim de se suavizar a tendência e estimar o rendimento para outros pontos senão os ensaiados [6]. Considerando ainda que o rendimento para carregamento nulo também é nulo, a curva pode ser estimada para uma larga escala de pontos, mostrada na Figura 3.34.

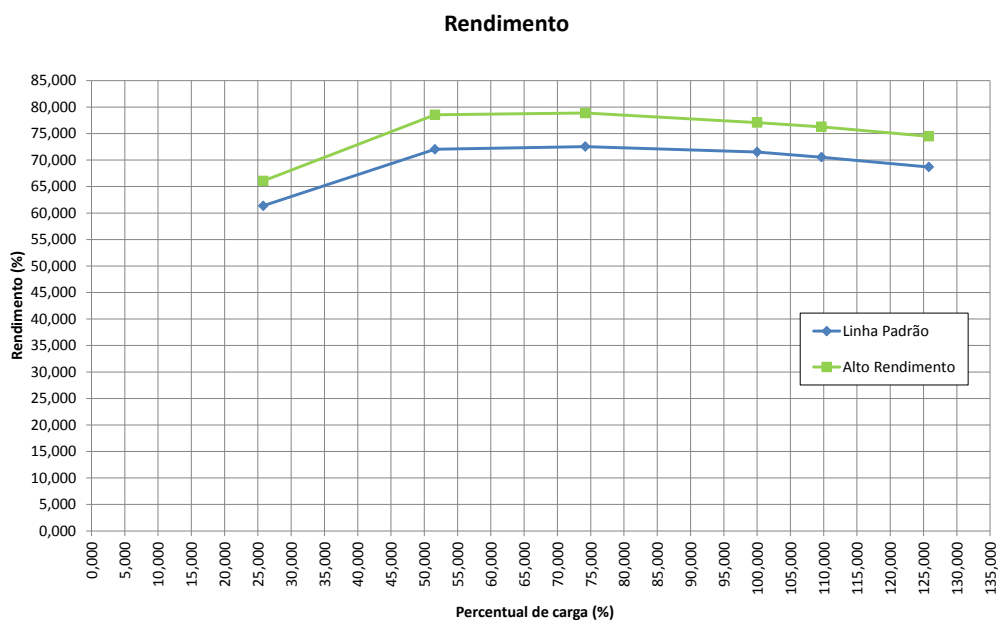


Figura 3.33 – Comparativo dos rendimentos dos motores em função da carga.

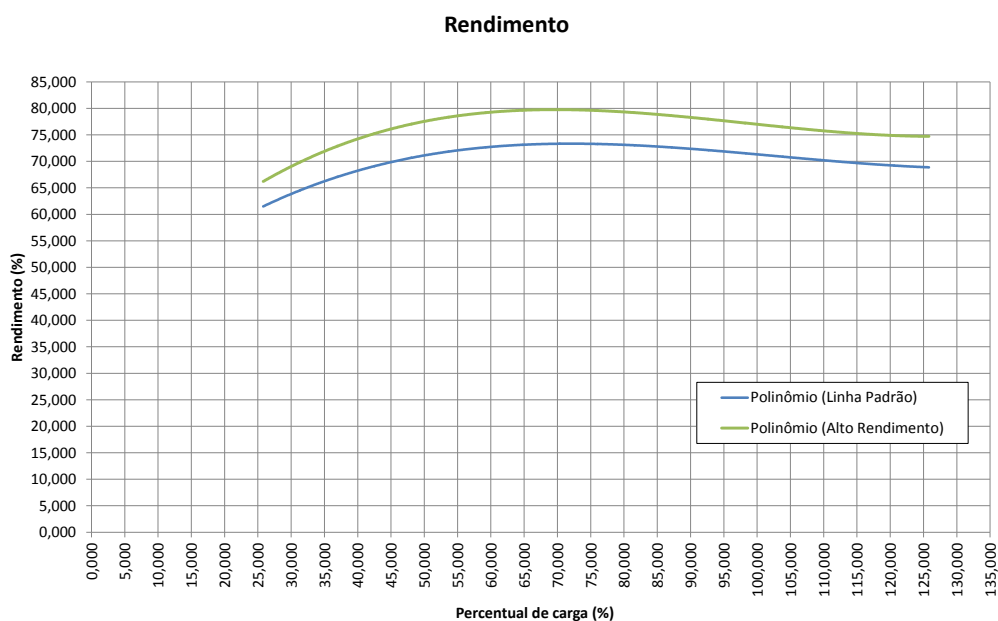


Figura 3.34 – Aproximação da curva de rendimento usando polinômio cúbico.

3.6 REDUÇÃO DAS PERDAS – CONDIÇÃO NOMINAL

Aplicando o método 2, além do rendimento, pode-se também obter o valor das perdas dos motores submetidos ao estudo para cada ponto de carga testado. É considerado como principal, o ponto de carga nominal dos motores, uma vez que este valor é marcado na placa dos mesmos, definindo parâmetros de projeto, tamanho do pacote magnético, seção transversal de fios, barras de alumínio, etc. Dessa forma, é interessante fazer um levantamento das perdas sob esta condição, objetivando equiparar os dois tipos de motores estudados.

A Tabela 3.22 apresenta os valores das perdas para a condição nominal dos motores, separando-as por regiões das máquinas, comparando a redução observada no motor de alto rendimento em relação ao da linha padrão. Ainda, os valores mostrados são referentes à temperatura especificada, obtida pelo ensaio de elevação de temperatura, e à temperatura ambiente de 25°C.

Tabela 3.22 – Distribuição das perdas para carga nominal.

Distribuição das perdas - Carga Nominal						
Perdas	Linha Padrão		Alto Rendimento		Redução	
	Watts	% da perda total	Watts	% da perda total	Watts	% da perda na parte citada
No núcleo	87,460	21,842	50,593	16,448	36,867	42,153
Mecânicas	14,519	3,626	17,633	5,732	-3,114	-21,448
Efeito Joule no Estator	92,593	23,124	79,623	25,885	12,969	14,007
Efeito Joule no Rotor	131,004	32,716	129,152	41,987	1,852	1,414
Suplementares	74,849	18,692	30,598	9,947	44,251	59,120
Total	400,424	100,000	307,599	100,000	92,825	23,182

Com exceção das perdas mecânicas, todas as outras são menores no motor de alto rendimento em relação ao da linha padrão. O valor das perdas mecânicas é proveniente de uma linearização das perdas à vazio em função do quadrado da tensão aplicada no motor, sendo assim, passível de divergências. Acredita-se que se for utilizada para aproximação gráfica um método baseado em interpolação polinomial, provavelmente o resultado será semelhante entre os motores, ou ainda, as perdas mecânicas no motor de alto rendimento poderão ser menores.

É importante apontar a grande redução das perdas no ferro bem como das perdas suplementares. Para redução das perdas no motor de alto rendimento foi focada uma melhoria

do projeto do pacote magnético do mesmo, e isso tanto é verdade que não há grande diferença entre as perdas joule de um tipo de motor para outro.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo teve como foco a determinação do rendimento de motores de indução trifásicos pelo método 2 da NBR 5383-1. O método aplicado se mostrou confiável quanto aos resultados obtidos, principalmente o que tange as perdas que ocorrem em motores elétricos. O fato de este método ser recomendado para a obtenção do rendimento a ser marcado na placa dos motores pesou na escolha pelo mesmo, porém não da mesma maneira como pesou o fato de que por este procedimento é possível a obtenção de todas as perdas que ocorrem nessas máquinas elétricas.

Quanto à execução, há um alto nível de detalhes a serem considerados para a viabilização dos resultados e, dessa forma, são necessários equipamentos adequados e precisos para medição, bem como uma conduta atenciosa durante a realização dos ensaios.

Para a separação das perdas no núcleo das perdas mecânicas é necessária a realização de um ensaio onde a tensão é reduzida desde um valor de 125% do nominal até o valor onde a redução da tensão produz um aumento de corrente. Através da plotagem dos dados obtidos em função do quadrado da tensão aplicada pode-se notar pela Figura 3.16 e Figura 3.17 que a curva tende a ser uma parábola e não uma reta. É indicado que a aproximação dos dados seja feita através de uma reta para obtenção das perdas mecânicas, as quais o valor que as determina é o coeficiente linear da reta obtida. Analisando a curva pode-se notar que esse tipo de aproximação sacrifica a precisão dos resultados e, embasado nessa teoria, fica a proposta para uma análise da curva através de polinômios, o que levaria em tese a um valor mais preciso para as perdas mecânicas.

O ensaio com carga é considerado o mais importante, pois fornece os pontos os quais serão quantificadas as perdas, bem como os valores que serão utilizados para a obtenção indireta das perdas suplementares. Tão importante quanto o ensaio, é a análise dos dados coletados, principalmente os referentes à medição de velocidade e conjugado. Um exemplo do nível de precisão desejado é o cálculo do coeficiente de correlação, durante a linearização da curva das perdas suplementares em função do quadrado do conjugado. Para o motor da linha padrão, o valor desse coeficiente se mostrou bastante próximo ao limite definido em [6], mesmo desconsiderando-se um ponto de carga.

Quanto às perdas, seus valores foram obtidos em função do ponto de carregamento dos motores e observou-se que, praticamente todas as perdas do motor de alto rendimento eram inferiores às do motor da linha padrão, estando ambos fornecendo a mesma potência mecânica. Dentre as perdas, as que merecem destaque são as perdas suplementares, as quais a redução no motor de alto rendimento em relação ao da linha padrão chegou a aproximadamente 60%. É importante salientar que estas foram obtidas indiretamente, através de cálculos e linearização, chegando à conclusão que seu regimento é através de uma equação em função do quadrado do conjugado aplicado. Através desta equação e da Figura 3.30 observa-se que o aumento em função da carga é bastante superior no motor da linha padrão do que no de alto rendimento.

Acerca das perdas dos motores submetidos à carga nominal, sob a temperatura final do ensaio de elevação de temperatura de ambos, pode-se afirmar que ao todo há uma redução de aproximadamente 93 W na mudança do motor da linha padrão para um de alto rendimento e, as perdas que mais sofreram redução foram a que ocorrem no núcleo e suplementares, dada a característica de projeto do material que compõe o pacote magnético do motor de alto rendimento.



CAPÍTULO 4 – MODELAGEM DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO E SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.1 INTRODUÇÃO

A utilização de modelos matemáticos para análise do comportamento de motores de indução é de grande valia uma vez que permitem representar diversos fenômenos físicos que ocorrem nestas máquinas elétricas, podendo determinar grandezas elétricas relacionadas à operação sob alimentação ideal, ou mesmo com distúrbios na alimentação.

Dentre os modelos que são aplicáveis à representação e análise do desempenho elétrico de motores de indução, destacam-se o modelo no domínio do tempo e o modelo no domínio da frequência. Partindo deste último, o circuito equivalente clássico do motor de indução é estudado considerando que o funcionamento da máquina é em regime permanente.

Neste capítulo será analisado o comportamento de motores de indução trifásicos quando alimentados com tensões ideais. Nos capítulos seguintes, serão realizados os cálculos do desempenho dos mesmos quando ligados em uma rede cujas tensões apresentam conteúdo harmônico e desequilíbrios, partindo da modelagem do motor no domínio da frequência, separadamente para cada condição de alimentação citada. Para a análise com tensões ideais, o modelo a ser estudado é apresentado em [9]. No entanto, para o estudo com tensões não ideais, será mostrado que há necessidade de se adaptar o modelo clássico de acordo com o comportamento físico de cada componente presente no mesmo, porque o circuito equivalente clássico do motor de indução é obtido através da consideração de que as tensões são puramente senoidais e conseqüentemente, não representa de forma satisfatória o desempenho quando da submissão da máquina aos indicadores de qualidade de energia citados.

4.2 DETERMINAÇÃO DO MODELO PARA ALIMENTAÇÃO IDEAL

Primeiramente, será considerada como alimentação ideal, tensões que apresentam apenas a componente fundamental em 60 Hz, cujos valores eficazes estejam dentro da faixa “adequada” pela classificação da ANEEL [10], e que ainda, possuam os mesmos valores eficazes, tendo entre si mesma defasagem angular. Sendo assim, o modelo tradicional do circuito equivalente, por fase, do motor de indução pode ser utilizado.

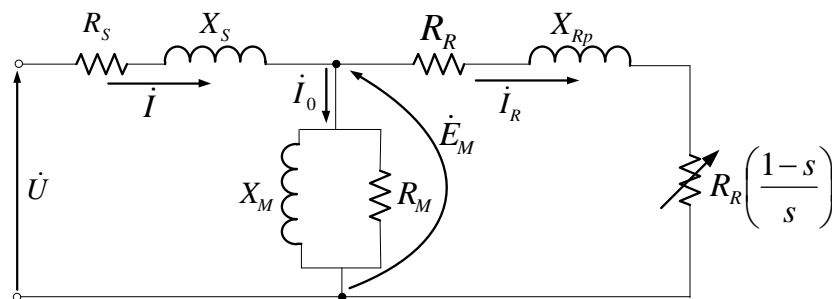
Com relação aos motores que serão modelados, é importante considerar que, além do funcionamento em regime permanente, os mesmos possuem os enrolamentos do estator simetricamente espaçados. Ainda, deve-se considerar que o fluxo magnético principal

produzido pelo estator apresenta distribuição senoidal e que, o comportamento do motor é linear, desconsiderando-se assim o efeito da saturação magnética.

A determinação dos parâmetros do circuito equivalente de motores de indução trifásicos, tradicionalmente é realizada através de ensaios, dentre os quais, pode-se citar o ensaio à vazio, ensaio com rotor bloqueado e o ensaio de medição da resistência do enrolamento do estator. Porém, a rotina destes testes é bastante invasiva no que se refere ao ambiente industrial. Dessa forma, há necessidade de se retirar o motor da linha de produção para que os testes possam ser realizados. Sendo possível a determinação dos parâmetros do circuito equivalente através dos dados disponíveis na placa de identificação do motor e no catálogo do fabricante, baseado em [9], será utilizado o modelo no domínio da frequência, brevemente apresentado na próxima seção.

4.2.1 O MODELO DO CIRCUITO EQUIVALENTE

A Figura 4.1 apresenta o circuito equivalente, por fase, do motor de indução trifásico considerando que as tensões de alimentação se encontram sob condições ideais.



Fonte: Autor, baseado em [9].

Figura 4.1– Circuito equivalente por fase do motor de indução trifásico.

Na Figura 4.1:

\dot{U} representa a tensão da fonte aplicada em uma fase do motor, em [V];

\dot{I} representa a corrente que percorre uma fase do enrolamento do estator, em [A];

\dot{E}_M é a tensão que aparece no entreferro do motor, induzida no rotor, em [V];

\dot{I}_R é a corrente que percorre as barras do rotor em gaiola, em [A];

\dot{I}_0 é a corrente de magnetização do motor, em [A];

R_S é a resistência do enrolamento do estator, por fase, em [Ω];

X_S representa a reatância de dispersão do enrolamento do estator, por fase, em $[\Omega]$;

R_R é a resistência das barras do rotor, referida ao estator, por fase, em $[\Omega]$;

X_{Rp} representa a reatância de dispersão do rotor, referida ao estator, por fase, em $[\Omega]$;

R_M representa a resistência de perdas no ferro, por fase, em $[\Omega]$;

X_M representa a reatância de magnetização do núcleo, por fase, em $[\Omega]$;

s representa o valor em p.u. do escorregamento da máquina.

Resolvendo o modelo mostrado pode-se fazer um levantamento de todas as perdas incidentes nos motores, ainda considerando a obtenção das mesmas em função do carregamento imposto.

Dentre estas perdas, há uma parcela resultante dos efeitos do fluxo magnético de dispersão nas várias partes constituintes do motor, denominada de perdas suplementares. Contudo, a modelagem apresentada em [9] separa as perdas joule no estator e no rotor do total através de uma proporção em função do rendimento nominal dos motores. Consequentemente, as perdas no núcleo magnético, perdas mecânicas e perdas suplementares estão inclusas nessa parcela restante. Assim, o modelo clássico do circuito equivalente de um motor de indução trifásico não possui um elemento dedicado que contemple as perdas suplementares bem como as perdas mecânicas. Há autores [12] que consideram um elemento resistivo no circuito do estator, argumentando que a parte mais significativa das perdas suplementares ocorre devido à presença de harmônicos espaciais no interior da máquina de indução, fenômeno também ligado à saturação magnética. Ainda, em [12] é enfatizado que o modelo proposto é válido apenas para a análise com tensões senoidais. Dessa forma, não seria de utilidade e coerência fazer uso do mesmo no presente estudo uma vez que, apesar de haver uma etapa onde se faz análise utilizando tensões senoidais, o foco é a análise utilizando indicadores de qualidade de energia, mais especificamente, harmônicos e desequilíbrios de tensão. Além disso, há um confronto de ideias entre o que é apresentado nas referências [6] e [12], uma vez que a primeira relaciona as perdas suplementares com o quadrado do conjugado do motor.

Uma vez que há dependência de vários fatores, não há um consenso de qual deles é preponderante na existência e variação das perdas suplementares, em função do tipo de alimentação, do valor da tensão aplicada, frequência, se há dependência com carregamento, ou influência principal de harmônicos espaciais e saturação magnética. Assim, a escolha de um modelo específico para a representação das perdas suplementares acarreta na desconsideração de outros fatores talvez relevantes. Por isso, será considerado o modelo

clássico do circuito equivalente, uma vez que, como afirmado anteriormente, possui incorporado na resistência do ramo magnetizante as perdas suplementares, mecânicas e no núcleo magnético, dado o rendimento do motor.

Sabe-se que os valores das resistências do enrolamento do estator e das barras do rotor sofrem variação em função da temperatura na qual o motor opera. Essa variação pode ser aproximada pela equação (3.8). Porém, pelo fato dos parâmetros serem provenientes dos dados nominais que constam no catálogo do fabricante, e que ainda, os valores encontrados para as resistências são semelhantes aos obtidos via medição e correção para temperatura de referência, apontados no Capítulo 3 deste trabalho, conclui-se que não há necessidade de se corrigir os valores estimados a uma temperatura de trabalho.

4.2.2 RESOLUÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ALIMENTAÇÃO PURAMENTE SENOIDAL

Após determinados os parâmetros do circuito equivalente do motor, segue-se para o desenvolvimento de equações que possam resolvê-lo. Assim, inicia-se com as impedâncias do estator, do rotor e, do ramo magnetizante, dadas pelas equações (4.32), (4.33) e (4.34), respectivamente.

$$\dot{Z}_S = R_S + jX_S \quad (4.32)$$

$$\dot{Z}_R = \frac{R'_{RN}}{s} + jX'_{RNp} \quad (4.33)$$

$$\dot{Z}_M = \frac{jR_M X_M}{R_M + jX_M} \quad (4.34)$$

É importante salientar que, o escorregamento s na equação (4.33) é referente ao ponto de carga do motor em questão, explicitando o carregamento do mesmo, quando em uma faixa de operação que vai da condição à vazio até a condição de carga nominal.

Assim, a impedância equivalente do motor será dada pela equação (4.35):

$$\dot{Z}_{eq} = \dot{Z}_S + \frac{\dot{Z}_R \dot{Z}_M}{\dot{Z}_R + \dot{Z}_M} \quad (4.35)$$

O escorregamento referente a um ponto de carga específico pode ser estimado fazendo-se uso da equação de Kloss, como mostra a equação (4.36) a seguir.

$$\frac{M}{M_{max}} \cong \frac{2}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (4.36)$$

Ainda, esta equação considera como linear a região de operação do motor, que vai desde o ponto o qual a máquina se encontra à vazio, até o ponto de carga nominal da mesma. Para pontos de carga acima da nominal deve ser avaliado o uso da equação (4.36) pois a curva que relaciona velocidade vs. conjugado deixa de ser linear. Assim, até uma margem de erro aceitável para uma condição de sobrecarga, a equação pode ser utilizada no presente estudo.

A corrente que percorre o enrolamento do estator, sendo a corrente de entrada do motor, para a condição nominal, é dada por:

$$i_s = \frac{\dot{V}_s}{\dot{Z}_{eq}} \quad (4.37)$$

Para o conhecimento da corrente no rotor, é necessário o valor da tensão presente no entreferro. A mesma é obtida através de:

$$\dot{E}_M = \dot{V}_s - \dot{Z}_s i_s \quad (4.38)$$

Assim, a corrente no ramo do rotor é dada pela equação (4.39):

$$i_r = \frac{\dot{E}_M}{\dot{Z}_R} \quad (4.39)$$

A perda Joule no enrolamento do estator é dada por:

$$P_{JS} = 3R_s |i_s|^2 \quad (4.40)$$

Analogamente, para o rotor, tem-se que:

$$P_{JR} = 3R'_{RN} |i_r|^2 \quad (4.41)$$

As perdas no núcleo magnético são obtidas através de:

$$P_{fe} = \frac{3|\dot{E}_M|^2}{R_M} \quad (4.42)$$

A potência transferida pelo entreferro, do circuito do estator para o circuito do rotor é calculada partido da equação (4.43).

$$P_{SR} = 3 \frac{R'_{RN}}{s} |\dot{I}_R|^2 \quad (4.43)$$

Tendo posse do valor da potência transferida através do entreferro, do estator para o rotor, pode-se calcular o conjugado eletromagnético, como em (4.44):

$$C_e = \frac{P_{SR}}{n_s * \frac{2\pi}{60}} \quad (4.44)$$

A potência mecânica desenvolvida pelo motor é dada por:

$$P_{otmec} = 3 \frac{R'_{RN}}{s} |\dot{I}_R|^2 (1 - s) \quad (4.45)$$

É importante salientar que na equação (4.45), o valor obtido deveria ainda sofrer uma redução referente às perdas mecânicas. Contudo, todas as perdas não-joules, isto é, perdas no núcleo magnético, perdas mecânicas e perdas suplementares, foram incorporadas na resistência calculada para o ramo magnetizante.

O conjugado mecânico pode ser obtido então, a partir da equação (4.46). Esta equação mostra claramente a diferença entre o conjugado eletromagnético e o conjugado mecânico, o qual a carga sofre efeito. O conjugado eletro magnético é função da potência transferida do estator para o rotor pelo entreferro do motor e, o conjugado mecânico é, em termos de circuito equivalente, correspondente à potência dissipada no elemento resistivo do rotor variável com o escorregamento.

$$C_{mec} = \frac{P_{otmec}}{n_R * \frac{2\pi}{60}} \quad (4.46)$$

A potência reativa no estator pode ser calculada através de:

$$Q_S = 3X_S|i_S|^2 \quad (4.47)$$

Seguindo o mesmo princípio, no rotor:

$$Q_R = 3X'_{RNP}|i_R|^2 \quad (4.48)$$

No ramo magnetizante, a potência reativa é calculada como:

$$Q_{fe} = \frac{3|\dot{E}_M|^2}{X_M} \quad (4.49)$$

Além de todas as potências mencionadas, há uma parcela resultante dos efeitos do fluxo magnético de dispersão nas várias partes constituintes do motor, denominada de perdas suplementares. Como citado anteriormente, a parcela correspondente a estas perdas está inclusa nas perdas no ramo magnetizante do circuito elétrico equivalente. Portanto, não há a necessidade de uma contabilização extra das mesmas.

Se forem levados em conta os preceitos de [6], por exemplo, as perdas totais seriam calculadas como sendo o somatório dado pela equação (4.50):

$$Perdas = P_{JS} + P_{JR} + P_{fe} + P_{mec} + P_{sup} \quad (4.50)$$

Onde:

P_{mec} são as perdas mecânicas, em [W];

P_{sup} são as perdas suplementares, em [W].

Como as perdas no núcleo magnético, mecânicas e suplementares foram incorporadas na resistência do ramo magnetizante do circuito, as perdas totais calculadas pelo modelo considerado neste trabalho serão dadas pela equação (4.51).

$$Perdas = P_{JS} + P_{JR} + P_{fe} \quad (4.51)$$

A potência ativa trifásica de entrada pode ser escrita como:

$$P_{ent} = P_{otmec} + Perdas \quad (4.52)$$

A potência reativa trifásica de entrada é dada pelo somatório das potências reativa no estator, rotor e ramo magnetizante:

$$Q_{ent} = Q_S + Q_R + Q_{fe} \quad (4.53)$$

Considerando a alimentação como puramente senoidal, a potência aparente trifásica pode ser escrita como:

$$S_{ent} = \sqrt{(P_{ent})^2 + (Q_{ent})^2} \quad (4.54)$$

O rendimento é dado como sendo a relação entre a potência mecânica na ponta do eixo e a potência elétrica de entrada do motor:

$$\eta = \frac{P_{otmec}}{P_{ent}} 100 \quad (4.55)$$

O fator de potência é calculado a partir da relação entre a potência elétrica de entrada e a potência aparente:

$$fp = \frac{P_{ent}}{S_{ent}} \quad (4.56)$$

Na Figura 4.2 é mostrado mais didaticamente o balanço energético no motor de indução, citando as perdas e as potências transferidas entre cada parte da máquina. Nela, o balanço energético é referente à localização das potências e perdas e não, de fato, a todos os elementos calculados pelo circuito equivalente.

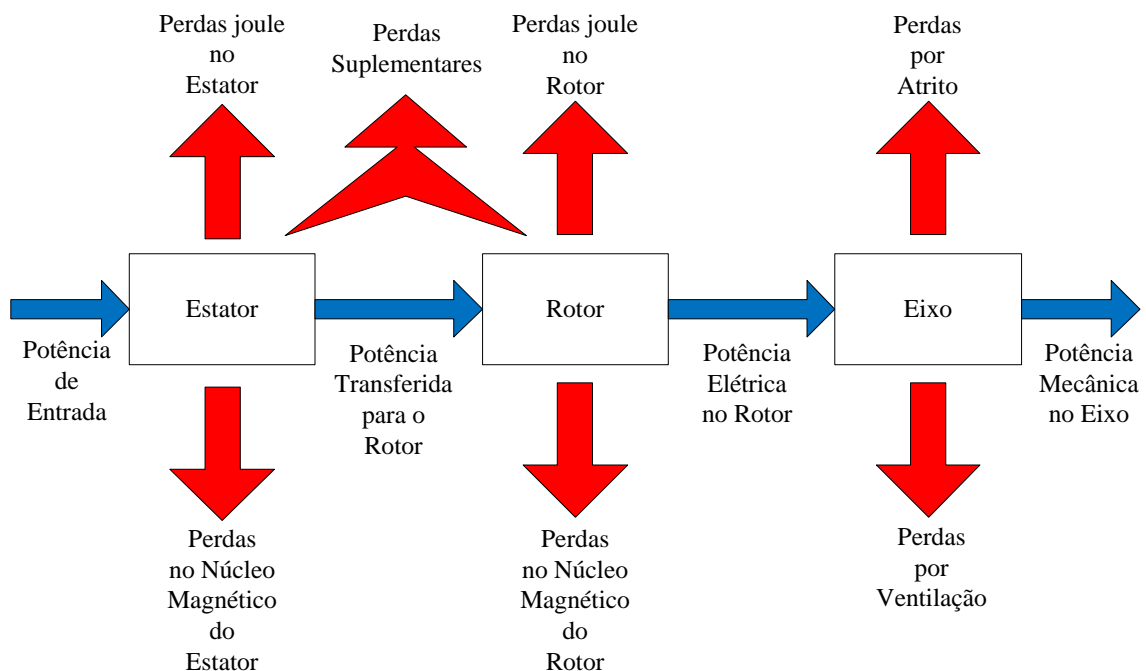


Figura 4.2 – Balanço energético de um motor de indução.

4.3 SIMULAÇÕES

Neste item será realizada a análise das simulações computacionais feitas considerando os motores operando em pontos de carga diversificados, alimentados por uma fonte de tensão puramente senoidal.

As simulações foram realizadas através do software Matlab®, onde o conjunto de equações necessárias para o desenvolvimento dos circuitos equivalentes no domínio da frequência foi inserido em um M-file. O programa desenvolvido exporta os resultados em arquivos de formato texto podendo ser manipulados em outros softwares, como o de planilhas eletrônicas para melhor visualização dos valores.

Entrando com os dados de placa dos motores no programa, pode-se obter os parâmetros do circuito equivalente dos mesmos, bem como as grandezas elétricas, principalmente as potências, para operação com as formas de alimentação dispostas neste trabalho.

À seguir, serão apresentados os resultados obtidos para os parâmetros do circuito equivalente dos dois motores estudados em função do carregamento, este fixado em 25%, 50%, 75%, 100% e 110% do valor da potência nominal.

4.3.1 OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE DOS MOTORES DE INDUÇÃO EM ESTUDO

Implementando a metodologia de obtenção de parâmetros do circuito equivalente através de dados do fabricante dos motores, segundo [9], são apresentados abaixo, os resultados para cada motor.

Tabela 4.1 – Dados dos motores e determinação dos parâmetros do circuito equivalente.

	Linha Padrão	Alto Rendimento
Potência nominal [W]	1104	1104
Velocidade síncrona [rpm]	3600	3600
Velocidade nominal [rpm]	3370	3400
Tensão nominal [V]	220	220
Rendimento [p.u.]	0,785	0,83
Fator de potência [p.u.]	0,86	0,87
Ip/In [p.u.]	7,5	7,5
Mp/Mn [p.u.]	3	3,1
Mk/Mn [p.u.]	3	3

Corrente nominal [A]	2,477747	2,316476
Conjugado nominal [N.m]	3,128316	3,100713
Escorregamento nominal [p.u.]	0,06388889	0,05555556
Escorregamento Mk [p.u.]	0,3723717	0,3238015
Corrente nominal do rotor [A]	2,161999	2,044782
Resistência do rotor [Ω]	5,373224	5,177319
$X1 + X2_{np}$ [Ω]	14,42973	15,98918
Resistência de partida do rotor [Ω]	4,485474	5,1359
Resistência do estator [Ω]	5,165525	4,169643
$X1 + X2_p$ [Ω]	6,856624	8,588145
Reatância do estator [Ω]	4,2886	5,371611
Reatância de partida do rotor [Ω]	2,568024	3,216534
Reatância do rotor [Ω]	10,14113	10,61756
$R2n/sn$ [Ω]	93,73215	99,22336
Reatância de magnetização [Ω]	202,6327	238,1731
Relação das perdas joule e nominais [p.u.]	0,5638277	0,5840464
Resistência ramo mag. [Ω]	942,8149	1347,646
$1/(Resis. mag.)$ (S)	0,001060654	0,000742034
Resistência do rotor corrigida [Ω]	6,639981	5,944684
Reatância do rotor corrigida [Ω]	12,50194	12,37149

Tabela 4.2 – Parâmetros do circuito equivalente do motor da linha padrão e de alto rendimento.

	Linha Padrão	Alto Rendimento
Resistência do estator [Ω]	5,165525	4,169643
Reatância do estator [Ω]	4,2886	5,371611
Resistência do rotor corrigida [Ω]	6,639981	5,944684
Reatância do rotor corrigida [Ω]	12,50194	12,37149
Resistência ramo mag. [Ω]	942,8149	1347,646
Reatância de magnetização [Ω]	202,6327	238,1731

4.3.2 RESULTADOS

Resolvendo o circuito equivalente para cada ponto de carga citado anteriormente, foram obtidos valores de corrente, potências, perdas, fator de potência, rendimento, conjugado, ou seja, foi feita uma análise de desempenho dos motores quando representado por circuitos elétricos equivalentes. A abordagem em função do ponto de carga foi escolhida pois as curvas de desempenho fornecidas por fabricantes geralmente são também função da grandeza “carregamento”.

Tabela 4.3 – Simulação do motor da linha padrão com alimentação ideal.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão no estator [V]	220	220	220	220	220
Corrente do estator [A]	1,274	1,613	2,027	2,478	2,664
Tensão no entreferro [V]	211,785	209,181	206,444	203,587	202,414
Corrente no rotor [A]	0,484	0,970	1,458	1,945	2,139
Perdas Joule no estator [W]	25,16	40,33	63,68	95,14	109,97
Perdas Joule no rotor [W]	4,67	18,76	42,33	75,35	91,17
Perdas no ferro [W]	142,72	139,23	135,61	131,89	130,37
Potência transferida no entreferro [W]	307,42	607,95	899,32	1179,35	1287,73
Conjugado eletromagnético [N.m]	0,815	1,613	2,386	3,128	3,416
Potência reativa no estator [VAr]	20,89	33,49	52,87	78,99	91,30
Potência reativa no rotor [VAr]	8,79	35,32	79,70	141,87	171,66
Potência reativa no ramo magnetizante [VAr]	664,05	647,82	630,98	613,64	606,59
Perdas totais [W]	172,55	198,32	241,62	302,37	331,51
Potência mecânica [W]	302,75	589,19	856,98	1104,00	1196,56
Conjugado mecânico [N.m]	0,8154	1,6126	2,3855	3,1283	3,4158
Potência ativa de entrada [W]	475,30	787,51	1098,61	1406,37	1528,06
Potência reativa de entrada [VAr]	693,73	716,62	763,55	834,49	869,55
Potência aparente de entrada [VA]	840,93	1064,77	1337,89	1635,31	1758,15
Velocidade [rpm]	3545,344	3488,92	3430,544	3370	3345,118
Escorregamento [p.u.]	0,01518	0,03086	0,04707	0,06389	0,07080
Rendimento [%]	63,70	74,82	78,01	78,50	78,31
Fator de potência [p.u.]	0,565	0,740	0,821	0,860	0,869

Tabela 4.4 – Simulação do motor de alto rendimento com alimentação ideal.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão no estator [V]	220	220	220	220	220
Corrente do estator [A]	1,104	1,450	1,867	2,316	2,501
Tensão no entreferro [V]	212,499	210,344	208,024	205,551	204,522
Corrente no rotor [A]	0,4750	0,9525	1,4308	1,9082	2,0987
Perdas Joule no estator [W]	15,26	26,30	43,61	67,12	78,23
Perdas Joule no rotor [W]	4,02	16,18	36,51	64,94	78,55
Perdas no ferro [W]	100,52	98,49	96,33	94,06	93,12
Potência transferida no entreferro [W]	302,71	600,11	889,66	1168,94	1277,26
Conjugado eletromagnético [N.m]	0,80297	1,59184	2,35991	3,10071	3,38803
Potência reativa no estator [VAr]	19,66	33,88	56,19	86,47	100,79
Potência reativa no rotor [VAr]	8,37	33,67	75,98	135,15	163,47
Potência reativa no ramo magnetizante [VAr]	568,78	557,30	545,07	532,19	526,88
Perdas totais [W]	119,80	140,98	176,45	226,12	249,90
Potência mecânica [W]	298,69	583,93	853,16	1104,00	1198,71
Conjugado mecânico [N.m]	0,8030	1,5918	2,3599	3,1007	3,3880
Potência ativa de entrada [W]	418,49	724,91	1029,61	1330,12	1448,61

Potência reativa de entrada [VAr]	596,81	624,86	677,24	753,81	791,13
Potência aparente de entrada [VA]	728,91	957,04	1232,37	1528,87	1650,56
Velocidade [rpm]	3552,142	3502,939	3452,271	3400	3378,607
Escorregamento [p.u.]	0,01329	0,02696	0,04104	0,05556	0,06150
Rendimento [%]	71,37	80,55	82,86	83,00	82,75
Fator de potência [p.u.]	0,574	0,757	0,835	0,870	0,878

A Figura 4.3 apresenta as curvas da corrente de entrada dos motores. Como esperado, há uma menor exigência de corrente da alimentação por parte do motor de alto rendimento para todos os pontos de carga, se comparada com a curva do motor da linha padrão.

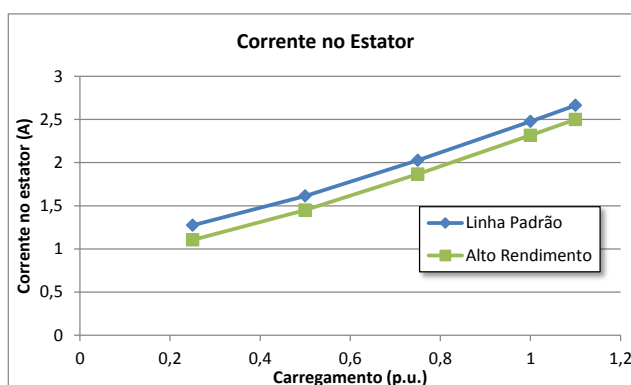


Figura 4.3 – Corrente de entrada dos motores.

A grandeza “tensão no entreferro” utilizada na análise do circuito equivalente representa a tensão aplicada no ramo magnetizante, que por razão da modelagem, também é aplicada ao ramo do rotor. Por este motivo que se denominou de tensão no entreferro esta grandeza. Pela Figura 4.4 pode ser visto que há uma pequena variação desta tensão em função do carregamento dos motores, e ainda, que os valores obtidos são bastante próximos entre os dois tipos de motores analisados.

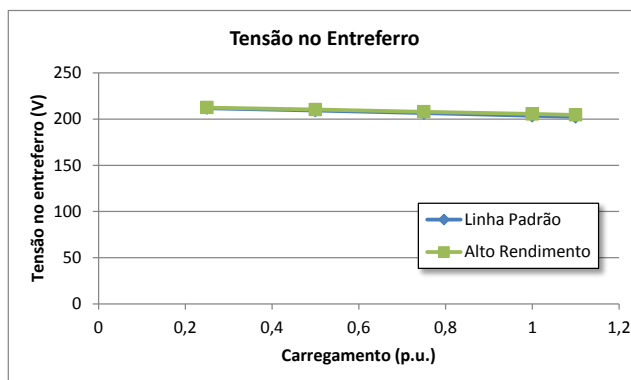


Figura 4.4 – Tensões nos ramos magnetizantes e ramos dos rotores.

Como não há grande diferença entre os valores das tensões no ramo do rotor bem como da impedância do mesmo em função do tipo de motor e suas respectivas potências nominais, era esperado um valor de corrente no rotor que não divergisse de maneira demasiada de um tipo de motor para o outro. Esse fato foi confirmado e é mostrado na Figura 4.5.

Comparando os valores desta grandeza presentes na Tabela 4.3 e Tabela 4.4 com os presentes na Tabela 4.1, pode ser observado que os valores obtidos pela resolução do circuito equivalente para carga nominal são ligeiramente menores do que os apresentados na Tabela 4.1. Esse fato é decorrente da correção da resistência e reatância do circuito do rotor objetivando a adequação do fluxo de potência do circuito equivalente após a inserção da resistência de perdas no ferro no modelo. Como consequência, em relação ao valor nominal de corrente calculado em um primeiro momento para obtenção dos parâmetros do circuito, o procedimento leva à obtenção de uma impedância de rotor menor do que a que efetivamente é alcançada após a correção e assim, a corrente de rotor inicial é maior do que a obtida pela simulação. Resumindo, a corrente de rotor obtida pela simulação é menor pois a impedância deste ramo é maior após a inserção da resistência de perdas no ferro em paralelo.

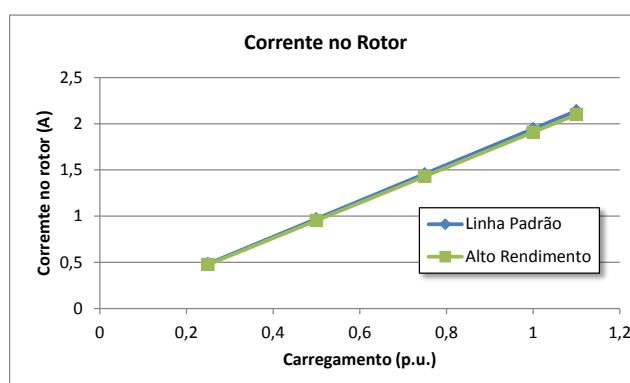


Figura 4.5 – Correntes de rotor dos motores.

A Figura 4.6 mostra o comportamento das perdas joule que ocorrem no estator de cada máquina, plotada em função do ponto de operação. Há ainda a comparação com os dados obtidos pelos ensaios desenvolvidos e apresentados no Capítulo 3. Pode ser observada uma diferença um pouco mais significativa entre as perdas incidentes no motor da linha padrão e de alto rendimento, para um mesmo ponto de carga. Porém, como a corrente de entrada do motor de alto rendimento é menor do que a do motor da linha padrão, a perda joule nesta parte do motor é menor, favorecendo o aumento do rendimento. Ainda, o gráfico mostra à medida que se aproxima do ponto de carga nominal, esta diferença aumenta.

Sobre a comparação com os resultados dos ensaios realizados, nota-se que o padrão de variação entre os dados é semelhante, fazendo com que as curvas tenham a mesma tendência no comportamento. Há semelhança entre os valores apresentados, o que contribui para a validação do modelo adotado para as simulações.

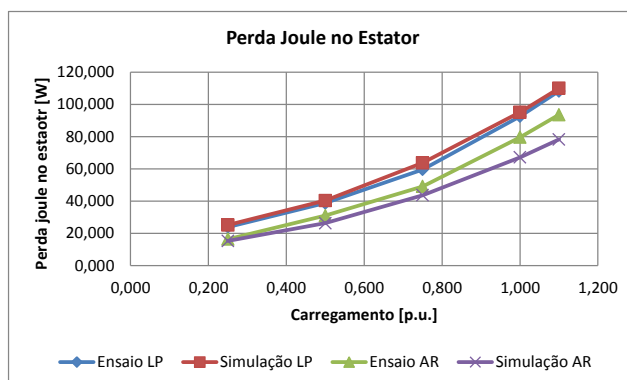


Figura 4.6 – Perdas Joule no estator dos motores.

No rotor, as perdas joule não sofrem grande diferença de um tipo de motor para o outro, como mostrado na Figura 4.7, pois a construção das barras e o material utilizado não difere muito entre os tipos analisados. Ambos apresentam barras de alumínio e como os resultados apresentados no próprio Capítulo 3 demonstram, a diferença maior de perdas está nas perdas suplementares e perdas no núcleo magnético. As perdas joule dos dois tipos de motores não sofrem significativa mudança pois para tanto, de maneira imediata, seria necessário alterar seções transversais, o que contribuiria para redução destas perdas em detrimento do aumento físico do motor de alto rendimento. A figura ainda apresenta as curvas de perdas joule no rotor obtidas pelos ensaios. Há uma leve discrepância entre o que são resultados de ensaios e de simulações. Contudo, é observado que a tendência de variação da grandeza é semelhante. Essa diferença pode ser explicada pela forma de obtenção das perdas joule no rotor durante os ensaios, sendo dependente diretamente da medição da velocidade de rotação dos motores. A velocidade medida foi menor do que a calculada através da linearização da curva de conjugado vs. velocidade na região de operação dos motores. Com isso, essa diferença se propagou até a obtenção das perdas joule do rotor.

Quanto às perdas no núcleo magnético, é importante salientar que o circuito equivalente considera estas como sendo ocorrentes na resistência em paralelo no ramo magnetizante e a mesma é obtida da parcela de perdas totais que não ocorrem nos condutores. Porém, sabe-se que motores de indução apresentam, além de perdas joule e no ferro, as perdas mecânicas e suplementares.

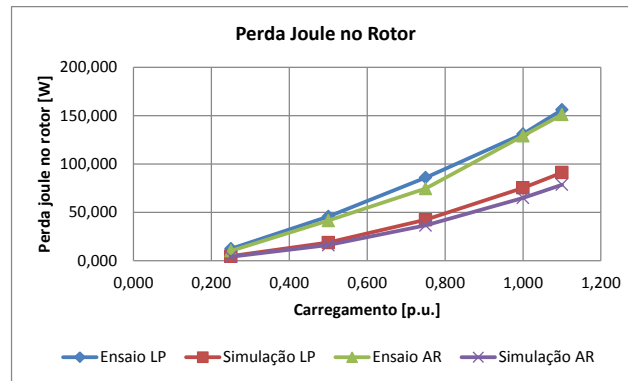


Figura 4.7 – Perdas Joule no rotor dos motores.

A Figura 4.8 apresenta os resultados obtidos para as perdas no ferro, mecânicas e suplementares. É notável que esta parcela é menor no motor de alto rendimento e, além disso, em ambos motores há leve redução em função do carregamento. Isso pode ser explicado através da análise do circuito equivalente, onde, com o aumento da carga, a queda de tensão no estator aumenta, e com isso a tensão aplicada no ramo magnetizante e ramo do rotor se reduz. Consequentemente, as perdas ocorrentes na resistência do ramo magnetizante, se reduzem.

Há ainda as curvas das perdas no ferro obtidas pelos dados dos ensaios. Estas perdas foram mantidas constantes independente do ponto de carga. Entretanto, comparando simulações e ensaios, observa-se uma diferença considerável entre as curvas. Essa diferença ocorre justamente devido à incorporação do que seriam as perdas mecânicas e suplementares nas perdas no ferro em se tratando de simulação. No caso de ensaios, estas perdas foram segregadas, e assim, o valor apresentado é de apenas o que foi obtido para as perdas no ferro. Complementando, as curvas das simulações sofrem pequenas variações ao longo da região de operação dos motores e por isso a consideração generalizada de que esse tipo de perda é constante.

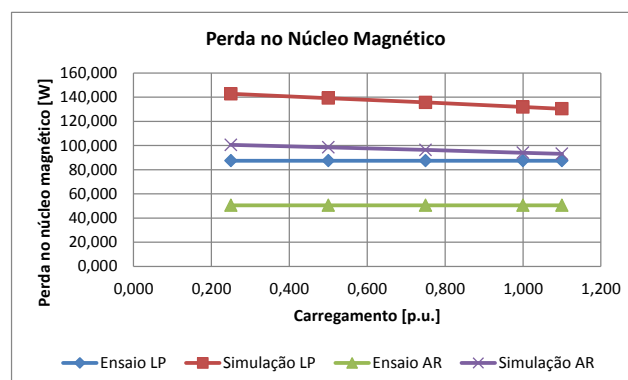


Figura 4.8 – Perdas no núcleo magnético, mecânicas e suplementares.

Generalizando as perdas, o valor total destas em função do carregamento apresenta clara distinção entre os motores estudados, apontando as menores perdas ao motor de alto rendimento, como mostra a Figura 4.9. Esta diferença se dá principalmente pela redução das perdas no ferro, e, pode-se considerar também as perdas joule no estator, porém sob menor expressividade. Pelo mesmo gráfico observa-se que as perdas totais obtidas pelos ensaios apresentam valores cuja tendência de variação é um pouco maior do que os obtidos pelas simulações, mas isso não invalida os resultados pois mostra que a curva de perdas obtida pelos dados do fabricante tende a ser mais baixa do que a obtida via ensaios ou metodologias afins.

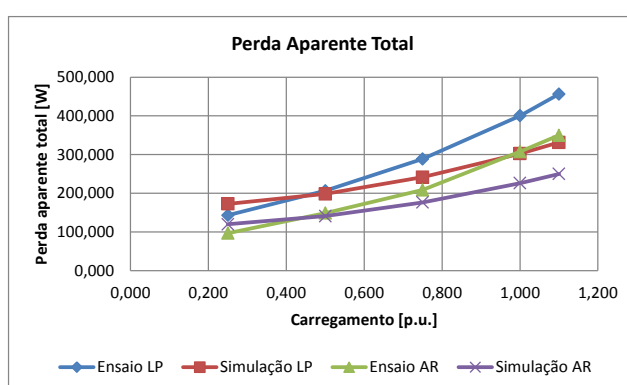


Figura 4.9 – Perdas totais nos motores.

A Figura 4.10 mostra a potência ativa trifásica demandada por cada motor. Nota-se a diferença entre as curvas obtidas para os dois tipos de motores, e ainda, independente do ponto de carga dentre os analisados, a potência demandada pelo motor de alto rendimento foi sempre menor que para o motor da linha padrão. As curvas vermelha e roxa representam dados obtidos dos ensaios, e as mesmas são próximas dos valores simulados, mais outro ponto positivo em relação ao modelo adotado para estudo.

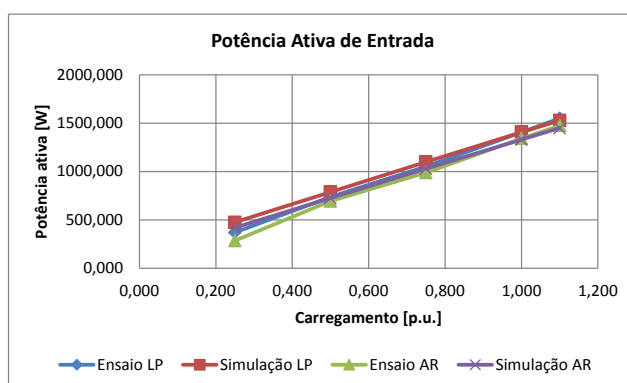


Figura 4.10 – Potência ativa de entrada.

Sobre a potência mecânica desenvolvida por cada motor, era esperado, uma vez que os motores possuem a mesma potência nominal, que esta fosse semelhante independente do ponto de carga e do tipo de motor, fato contemplado pelo circuito equivalente utilizado e apresentado na Figura 4.11. As curvas experimentais obtidas nos ensaios são inferiores às das simulações, porém seguindo a mesma forma de comportamento, ou seja, a mesma tendência de variação, mostrando que apesar da pequena diferença entre simulação e ensaios, para um mesmo caso, as potências dos motores da linha padrão e de alto rendimento permaneceram sob mesmas variações e comportamento.

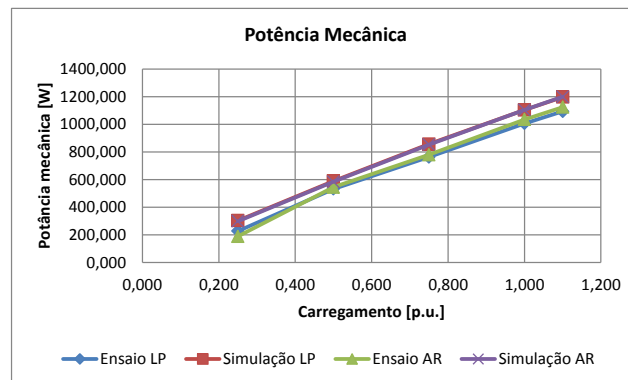


Figura 4.11 – Potência mecânica desenvolvida.

Consequentemente, o conjugado mecânico desenvolvido também apresenta semelhanças nos valores. Ainda, os valores obtidos para o torque são coerentes com os percentuais de carga adotados para estudo, ou seja, 25%, 50%, 75%, 100% e 110% do torque nominal de cada motor.

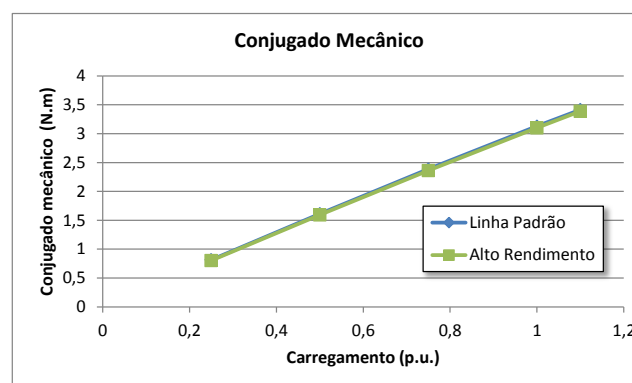


Figura 4.12 – Conjugado mecânico desenvolvido.

O escorregamento foi considerado como possuindo uma variação praticamente linear quando da operação entre à vazio e com carga nominal. Ainda, arriscou-se uma extrapolação para 10% de sobrecarga, mantendo esta linearidade, gerando resultados satisfatórios. Esta

extrapolação não é usual, uma vez que a equação de Kloos é utilizada apenas entre 0% e 100% de carga.

A Figura 4.13 apresenta o escorregamento obtido para cada motor em função da carga desejada após a resolução da equação de Kloos. Nota-se a característica linear, o que é coerente, e ainda a linearidade da operação entre 100% e 110% de carregamento. A pequena diferença que pode ser encontrada entre os pontos das curvas é função da diferença de velocidade nominal de cada motor, onde o motor de alto rendimento possui uma velocidade nominal de 3400 rpm enquanto que o motor da linha padrão possui 3370 rpm de velocidade nominal. Assim, o escorregamento do motor da linha padrão é maior pois este opera sob velocidades menores, se comparado ao motor de alto rendimento.

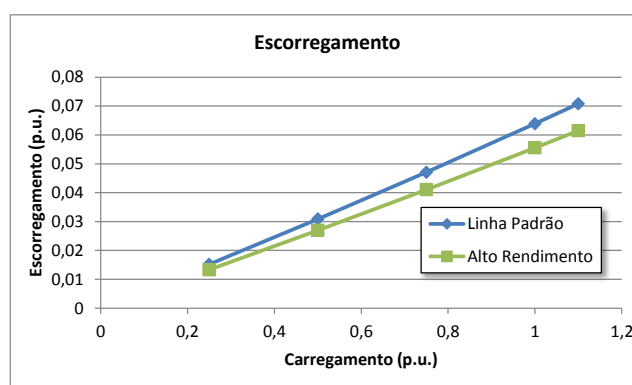


Figura 4.13 – Escorregamento.

Acerca do rendimento, foi visto que as perdas no motor de alto rendimento são menores, bem como sua potência ativa de entrada, quando comparado a um motor de mesma potência da linha padrão. Assim, a Figura 4.14 apresenta as curvas de rendimento dos dois motores, mostrando que o tipo de alto rendimento, de fato apresenta sua curva superior à do motor da linha padrão. Ainda, o modelo utilizado reproduz de maneira bastante fiel esta grandeza para carga nominal, uma vez fornecido o rendimento de placa.

As curvas de rendimento obtidas pelos ensaios, mostradas também na Figura 4.14, são inferiores às das simulações, e esse fato se deve à curva das perdas totais dos ensaios apresentar inclinação superior. Contudo, não há grande diferença entre os dados apresentados na Figura 4.14 para um mesmo tipo de motor.

A potência reativa de entrada dos motores apresenta uma diferença aproximada de 11% entre todos os pontos de carga analisados. A Figura 4.15 mostra as curvas desta grandeza e, pode ser visto que para o motor de alto rendimento a demanda por potência reativa da rede elétrica é menor se comparada à do motor da linha padrão. O motor de alto rendimento

apresenta maior pacote magnético e com isso há possibilidade de maior concentração de linhas de fluxo no interior da máquina do que no motor da linha padrão. Com isso, é de se concluir que como a dispersão de fluxo será menor, a demanda de potência reativa da rede elétrica também o será uma vez que a característica das bobinas dos dois tipos de motores é semelhante, diferenciando apenas no material magnético e quantidade do mesmo.

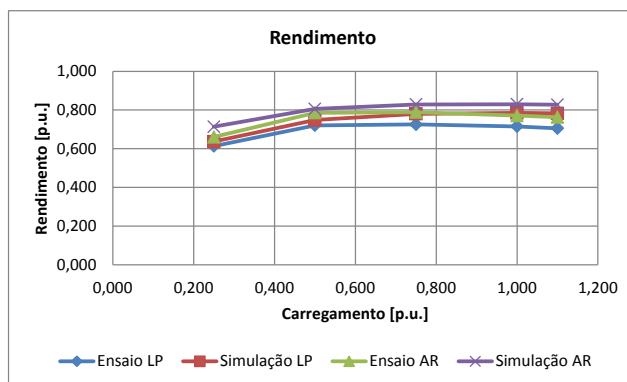


Figura 4.14 – Rendimento.

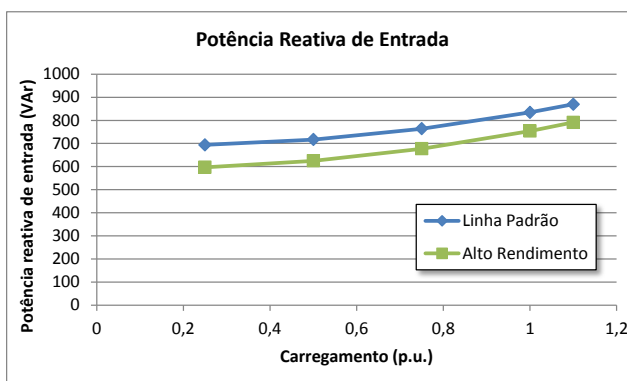


Figura 4.15 – Potência reativa de entrada.

A potência aparente, no caso de uma alimentação ideal, dependerá das potências ativa e reativa, apenas. Como estas duas são menores no motor de alto rendimento, a potência aparente de entrada também é menor, independente do ponto de carregamento dos motores.

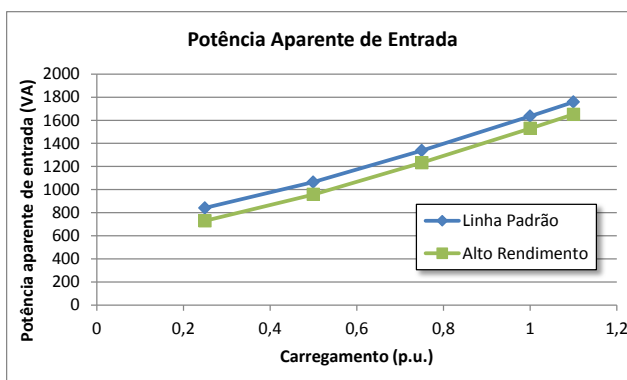


Figura 4.16 – Potência aparente de entrada.

Em uma rede elétrica com características ideais, o fator de potência é influenciado pela potência reativa, uma vez que, mesmo obtendo o valor deste indicador através da relação entre potência ativa e aparente, esta última depende dos ativos e reativos que participam do balanço energético dos motores. Sendo assim, como há menos demanda de reativos por parte do motor de alto rendimento, este é um dos motivos de seu fator de potência ser superior ao do motor da linha padrão, apesar da proximidade das curvas mostradas na Figura 4.17. Concluindo, os resultados são coerentes com os dados fornecidos pelo fabricante dos motores.

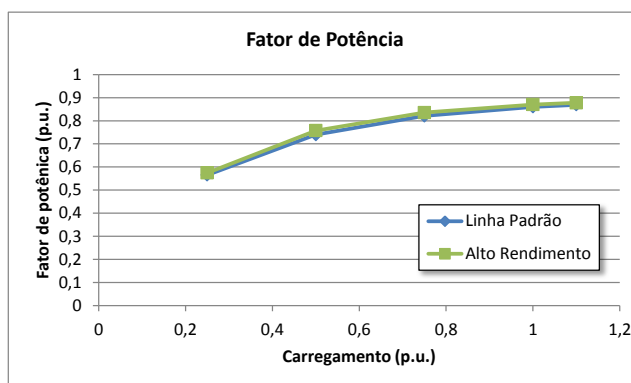


Figura 4.17 – Fator de potência dos motores.

Será feita uma comparação quanto ao balanço energético entre alguns resultados obtidos pela simulação e testes realizados e apresentados no Capítulo 3. O objetivo dessa comparação é apontar as principais diferenças entre as grandezas calculadas e medidas.

Tabela 4.5 – Comparação da potência de entrada, perda Joule no estator e rotor.

Linha Padrão									
Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]			Perda Joule Estator [W]			Perda Joule Rotor [W]		
	Ensaio	Simulação	Desvio [%]	Ensaio	Simulação	Desvio [%]	Ensaio	Simulação	Desvio [%]
3,400	1549,154	1528,064	-1,380	108,220	109,966	1,588	156,070	91,172	-71,182
3,100	1406,317	1406,369	0,004	92,593	95,137	2,674	131,004	75,347	-73,867
2,300	1051,540	1098,606	4,284	59,612	63,678	6,385	85,890	42,332	-102,897
1,600	738,108	787,514	6,274	38,781	40,333	3,847	45,653	18,759	-143,370
0,800	370,523	475,295	22,044	23,900	25,158	4,999	12,305	4,667	-163,649
Alto Rendimento									
Conjugado [N.m]	Potência de Entrada [W]			Perda Joule Estator [W]			Perda Joule Rotor [W]		
	Ensaio	Simulação	Desvio [%]	Ensaio	Simulação	Desvio [%]	Ensaio	Simulação	Desvio [%]
3,400	1473,692	1448,608	-1,732	93,566	78,234	-19,598	151,093	78,549	-92,356
3,100	1342,201	1330,120	-0,908	79,623	67,124	-18,622	129,152	64,941	-98,875
2,300	987,937	1029,609	4,047	49,058	43,613	-12,484	74,588	36,508	-104,306
1,600	693,886	724,905	4,279	30,991	26,302	-17,826	41,503	16,180	-156,509
0,800	285,164	418,492	31,859	16,372	15,258	-7,304	10,154	4,024	-152,326

Tabela 4.6 – Comparação das perdas no núcleo, aparente total e potência mecânica.

Linha Padrão									
Conjugado [N.m]	Perdas no Núcleo [W]			Perda Aparente Total [W]			Potência mecânica [W]		
	Ensaio	Simulação	Desvio [%]	Ensaio	Simulação	Desvio [%]	Ensaio	Simulação	Desvio [%]
3,400	87,460	130,370	32,914	456,305	331,508	-37,645	1092,850	1196,556	8,667
3,100	87,460	131,885	33,685	400,424	302,369	-32,429	1005,893	1104	8,886
2,300	87,460	135,612	35,507	288,682	241,621	-19,477	762,858	856,9847	10,983
1,600	87,460	139,231	37,184	206,351	198,323	-4,048	531,757	589,1913	9,748
0,800	87,460	142,721	38,720	143,168	172,545	17,026	227,355	302,7498	24,903
Alto Rendimento									
Conjugado [N.m]	Perdas no Núcleo [W]			Perda Aparente Total [W]			Potência mecânica [W]		
	Ensaio	Simulação	Desvio [%]	Ensaio	Simulação	Desvio [%]	Ensaio	Simulação	Desvio [%]
3,400	50,593	93,116	45,667	349,692	249,899	-39,933	1124,000	1198,709	6,232
3,100	50,593	94,056	46,210	307,599	226,121	-36,033	1034,602	1104	6,286
2,300	50,593	96,332	47,481	208,715	176,453	-18,283	779,223	853,1553	8,666
1,600	50,593	98,493	48,633	148,870	140,975	-5,600	545,015	583,9299	6,664
0,800	50,593	100,522	49,670	96,790	119,804	19,210	188,375	298,6884	36,933

A Tabela 4.5 mostra que os valores da potência de entrada são coerentes entre as situações simuladas e ensaiadas. Deve ser chamada a atenção para o ponto de 25% de carregamento, onde o desvio se torna mais distante entre os valores. Tanto para o motor da linha padrão quanto para o de alto rendimento, a potência ativa de entrada calculada pela simulação foi maior do que a obtida por ensaios.

A perda joule no estator no motor da linha padrão mostrou valores próximos entre o que foi simulado e ensaiado, para todos os pontos de carga. O fato do valor estimado para a resistência do enrolamento ter sido próximo do valor medido contribui em muito para esta proximidade de resultados. Porém no motor de alto rendimento, houve uma diferença de até aproximadamente 20% nestas perdas, que pode ser justificada pela discrepância entre o valor estimado e medido para a resistência do enrolamento.

No caso das perdas no rotor, houveram grandes desvios entre os valores. A obtenção do valor destas perdas na rotina de ensaio é através do valor do escorregamento e este depende diretamente da velocidade que é medida. A Figura 3.19 e Figura 3.21 mostra que há grandes oscilações durante o período de aquisição de dados e, é também notado que à medida que o carregamento se reduz essas oscilações aumentam, independente do tipo de motor ensaiado. Mesmo utilizando um valor médio da velocidade em cada ponto de carga foi notado o desvio em relação ao que foi simulado. Nas simulações, o escorregamento foi obtido através da resolução da equação de Kloos e esta considera como linear a variação desta grandeza para pontos compreendidos entre a operação à vazio e operação nominal. Bem como na potência de entrada, para valores de carregamento inferiores a 50%, o desvio percentual aumenta.

A Tabela 4.6 apresenta comparações para as perdas no núcleo, perda aparente total e potência mecânica, em função do ponto de operação de cada motor.

As perdas no núcleo sofrem desvios da ordem 30% para o motor da linha padrão e 40% para o motor de alto rendimento. A rotina de ensaios para segregação das perdas aponta para a obtenção das perdas no núcleo separadamente das perdas mecânicas e, principalmente, das perdas suplementares. A modelagem do circuito equivalente realizada e as simulações guiam para a obtenção de uma parcela de perdas que ocorrem nos motores que não são classificadas como perdas joule em materiais condutores do estator e rotor. Este valor tende a ser maior, de fato, do que o valor segregado das perdas no núcleo obtido via ensaios. Assim, as simulações obtêm um pacote de perdas que ocorrem em partes generalizadas dos motores de indução que são compostas para fins de entendimento, por perdas no núcleo magnético, perdas mecânicas e perdas suplementares, uma vez que esses três tipos são retratados também pelos ensaios realizados, porém de maneira segregada.

A perda aparente total é o total de perdas que ocorrem nos motores, em função do carregamento aplicado. Nota-se que praticamente todos os valores obtidos via ensaios são maiores do que os obtidos pelas simulações. O único ponto em que ocorre o oposto é o de 25% de carregamento. O que ocorre de fato é uma redução do desvio entre simulação e ensaios de modo que entre 50% e 25% de carregamento ele se inverte seguindo a tendência anterior. Pode-se explicar o fato através dos dados fornecidos pelo fabricante dos motores, onde o modelo obtido para simulação é embasado nos dados nominais. É, então, de se esperar do modelo uma curva de rendimento, que é influenciada pela perda aparente total, próxima do nominal de cada motor. Porém, para baixos valores de carregamentos, entenda-se abaixo de 50%, a curva de rendimento apresenta um joelho que torna imprecisa a comparação entre a curva obtida por ensaios, simulações ou até mesmo a fornecida pelo fabricante, uma vez que não é utilizado o rendimento do motor a 25% de carga para obtenção dos parâmetros do circuito equivalente. Em decorrência, a curva de rendimento obtida pelas simulações, acima de 50% de carregamento é acima da curva obtida pelos ensaios, para ambos motores, e mais coerente com os dados do fabricante.

A potência mecânica sofre desvios da ordem de 8% para os dois motores estudados. No caso desta grandeza obtida pelos ensaios, foi visto que a mesma depende da leitura da velocidade no ponto de carga e, bem como para o caso das perdas joule no rotor, há grandes oscilações das medições e com isso foi utilizada uma média referente o ponto de operação. Em relação ao valor simulado, o mesmo depende do escorregamento fixado em função do ponto de operação. Como há diferença entre os dois escorregamentos, medido e calculado, esta se reflete no valor do desvio entre as potências mecânicas.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por objetivo levantar a performance dos motores de indução estudados através de simulações, dando enfoque nas perdas incidentes nos mesmos.

Para tanto procedeu-se para a modelagem do circuito equivalente referente a condição de alimentação ideal, pois dessa forma seriam calculados valores que servirão de padrão para a comparação quando da alimentação não ideal. Além disso, [6] aponta o procedimento de ensaios para obtenção do rendimento de motores, segregando as perdas e para isso faz inúmeras restrições quanto à forma de alimentação dos motores quando da realização dos testes, a qual, de uma maneira resumida, deve apresentar baixo fator de desequilíbrio, baixa

distorção harmônica, com valores definidos no item 3.2, se compondo da maneira mais ideal possível. O circuito equivalente do motor de indução foi modelado considerando a alimentação ideal, e com isso, o confronto de resultados entre os ensaios realizados no Capítulo 3 e simulações apresentadas no presente capítulo é inevitável.

Embasado nessas informações, era objetivo também analisar a viabilidade do modelo adotado e de seus resultados frente os obtidos no Capítulo 3 uma vez que não há uma normatização para ensaios em motores de indução utilizando os indicadores de qualidade de energia afim de se levantar suas perdas e rendimento. Será mostrado nos próximos capítulos que, para a simulação com harmônicos e desequilíbrios de tensão, o circuito equivalente do motor de indução deve sofrer algumas modificações para que possam ser reproduzidos resultados coerentes com estas condições de alimentação.

Com relação ao modelo adotado, o mesmo é embasado nos dados de catálogo dos motores, fornecidos pelo respectivo fabricante. Assim, alguns parâmetros obtidos podem diferir, como de fato ocorre, em relação a um parâmetro medido, como por exemplo, a resistência estatórica. Contudo, o desvio entre os dois parâmetros deve ser analisado uma vez que o balanço energético do modelo teórico de cada motor se mostrou coerente com o que de fato representa. Portanto, os parâmetros do circuito equivalente dos motores podem não ser de fato o valor preciso de uma determinada grandeza no interior da máquina física, mas apenas elementos que ilustram o comportamento dos dados de performance referente a uma determinada condição que o motor se encontra. No caso do presente estudo, condicionou os motores a operarem em 5 pontos de carregamento específicos através da fixação do escorregamento, que foi a maneira mais simples encontrada para alteração do ponto de carga das máquinas.

Os resultados das simulações mostram que o modelo adotado é convincente. Para uma alimentação ideal, reproduz de uma maneira coerente resultados dos ensaios semelhantes. Há ressalvas quanto às perdas no rotor e no núcleo magnético. Estas obtiveram desvios, quando comparadas com os respectivos valores alcançados pelos ensaios. No caso das perdas no rotor, nos ensaios as mesmas eram obtidas em função do escorregamento e, foi mostrado que há muitas oscilações na medida dessa grandeza, sendo necessário o tratamento dos dados obtidos da medição. Esse fato comprova a importância da correta medição da velocidade no valor das perdas joule no rotor. Ainda, comparando outros resultados entre simulações e ensaios, foi notado que o modelo se aproxima da máquina física quando a operação é nos arredores da região nominal. Para carregamentos inferiores a 50%, há discrepância entre os resultados colocando em xeque o modelo do circuito equivalente para 25% de carga, por

exemplo. É importante lembrar que, durante os ensaios, à medida que o carregamento dos motores se reduzia, surgiam maiores oscilações nas medições de velocidade e este fato pode estar intimamente ligado ao desvio dos valores medidos com os valores fixados em função do carregamento.

Para o caso das perdas no núcleo magnético fornecidas pela simulação, as mesmas foram consideradas compostas por três perdas, sendo, perdas no núcleo magnético, perdas mecânicas e perdas suplementares. Essa consideração foi feita devido ao modo de obtenção da resistência presente no ramo magnetizante do circuito equivalente estudado, uma vez que todas as perdas que não são perdas joule em condutores dos motores são englobadas e representadas por esta resistência. Com isso, pode-se justificar a diferença entre o que foi medido nos ensaios e o que foi calculado pelas simulações. Nos ensaios foi feita a consideração de que as perdas no núcleo magnético são constantes, não importando o ponto de operação do motor. O mesmo não ocorre no circuito equivalente, pois dependendo do ponto de operação, a tensão aplicada na resistência de representação das perdas no ferro, mecânicas e suplementares, tinha seu valor alterado.

Concluindo, analisando cuidadosamente as perdas no rotor, perdas no núcleo magnético e a operação abaixo de 50% de carregamento, pode-se afirmar que o modelo adotado é válido para análise com tensões senoidais, bem como os resultados obtidos do mesmo.



CAPÍTULO 5 DETERMINAÇÃO DO MODELO PARA ALIMENTAÇÃO NÃO SENOIDAL E SIMULAÇÕES

5.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo tem por objetivo mostrar a modelagem utilizada para as simulações com tensões harmônicas, falando sobre os ajustes necessários no circuito equivalente e em seguida, apresentar os resultados obtidos.

Foram simulados casos com 10% e 20% de 5°, 7°, 11° e 13° harmônicos, cada caso simulado separadamente.

5.2 MODELO REFERENTE A ALIMENTAÇÃO COM HARMÔNICOS

Antes de se desenvolver o modelo no domínio da frequência do motor de indução trifásico para análise com tensões que apresentam harmônicos, é necessário fazer algumas considerações.

Primeiramente, sabe-se que os harmônicos apresentam sequência de fases análoga às observadas para componentes simétricas [14]. De posse dessa informação, a Tabela 5.1 mostra as sequências de fases para cada componente harmônica até o 19° harmônico.

Tabela 5.1 – Relação entre ordem harmônica e sequência de fases.

Ordem Harmônica	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	etc
Sequência de Fases	+	0	-	+	0	-	+	0	-	+	...

Assim, pode-se concluir que uma ordem harmônica h terá a sua sequência baseada em:

$$h = 3k + 1 \rightarrow \text{Sequência positiva}$$

$$h = 3k + 2 \rightarrow \text{Sequência negativa}$$

$$h = 3k + 3 \rightarrow \text{Sequência zero}$$

Onde:

$$k=1, 2, 3, 4, \dots$$

Como mostra a Tabela 5.1, as componentes harmônicas de sequência positiva produzirão conjugados que serão somados ao produzido pela fundamental. As componentes de sequência negativa produzirão conjugados opostos ao da fundamental, e, as componentes

de sequência zero, não produzirão conjugado algum pois os campos magnéticos nesta sequência se anulam espacialmente nas máquinas em questão.

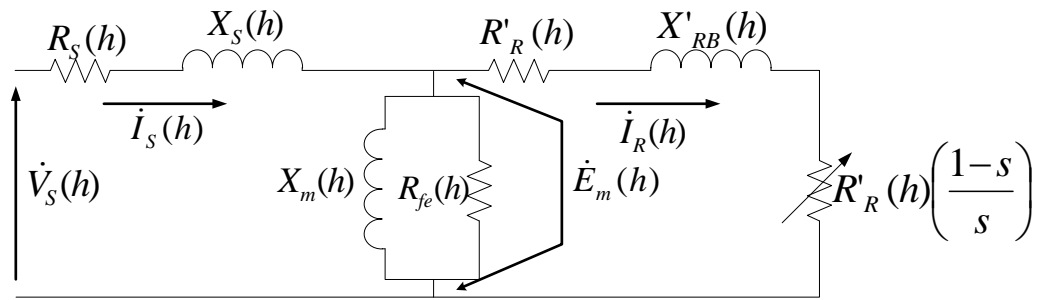
Outra consideração a ser feita é a de que o circuito equivalente convencional do motor de indução será utilizado para esta análise devido ao fato de que as tensões de alimentação do mesmo serão decompostas em componentes múltiplas da fundamental. Há, neste caso, a necessidade de correção do circuito a fim de se considerar os efeitos associados à existência de distorções harmônicas nas tensões de alimentação [14].

Sobre a natureza não linear do motor de indução é importante afirmar que, apesar de existir na prática, a modelagem do circuito equivalente no domínio da frequência não a leva em consideração, tratando do motor como um elemento linear. Dessa forma, ao alterar o ponto de operação do mesmo, toda a reavaliação do circuito equivalente é feita de forma linear, e esse fato torna possível a aplicação do princípio da superposição de efeitos [14]. Consequentemente, ao estudar o circuito equivalente alimentado com tensões harmônicas, pode-se considerar que ao invés do motor ser alimentado por apenas uma fonte de tensão contendo várias frequências harmônicas, o mesmo é alimentado por várias fontes de tensão senoidal, cada fonte representando um harmônico, seguindo a decomposição da forma de onda resultante utilizando a série de Fourier.

Assim, pode-se encontrar as perdas referentes a cada ordem harmônica. No final, as perdas totais serão um somatório entre a componente fundamental e as referentes a cada ordem harmônica. Dessa forma:

$$Perdas\ Totais = Perdas_{fundamental} + Perdas_{harmônicas} \quad (5.1)$$

O circuito equivalente genérico que pode então ser usado para o estudo perante cada ordem harmônica é mostrado na Figura 5.1. De acordo com [17], para este circuito em específico pode-se desprezar o ramo de magnetização dado que o motor comporta-se como se estivesse na condição de rotor bloqueado, isto é, o escorregamento é próximo de 1. Contudo, o circuito apresentado na Figura 5.1 será mantido, uma vez que o objetivo deste trabalho é o levantamento das perdas nos motores de indução quando os mesmos estão submetidos a uma alimentação não ideal e, para tanto, as perdas no núcleo magnético, representadas pela resistência do ramo magnetizante são também importantes de serem computadas.



Fonte: Autor, baseado em [14].

Figura 5.1 – Circuito equivalente para a h-ésima componente harmônica.

De acordo com a Figura 5.1, cada parâmetro do circuito equivalente deve ser avaliado em função da frequência harmônica de ordem h , que será mostrado à seguir.

5.2.1 CORREÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE EM FUNÇÃO DA ORDEM HARMÔNICA

No estator, a frequência da onda de tensão, para cada harmônico é dada como um múltiplo da fundamental. Assim, para uma ordem harmônica h :

$$f_s(h) = hf_s(1) \quad (5.2)$$

Para conhecimento da frequência que aparecerá no circuito do rotor, antes se deve definir o escorregamento relacionado a tal ordem harmônica, levando em consideração o sentido de rotação do campo magnético girante produzido pelas correntes da mesma ordem. A Tabela 5.2 indica o sentido de rotação do campo girante produzido por cada frequência harmônica, baseado nas componentes simétricas, e indica ainda, o sinal a ser usado para o cálculo do escorregamento correspondente.

Tabela 5.2 – Sinal para escorregamento em função da ordem harmônica.

Ordem Harmônica	1	5	7	11	13	17	19	etc
Sequência de Fases	+	-	+	-	+	-	+	...
Sinal para o escorregamento	-	+	-	+	-	+	-	...

Fonte: Autor, baseado em [14].

O escorregamento das ordens harmônicas de sequência positiva é fruto da diferença da velocidade entre o campo girante harmônico e o rotor. Para as ordens harmônicas de sequência negativa, o escorregamento depende da soma das duas velocidades.

O escorregamento para a frequência harmônica de ordem n é dado pela equação (5.3) [13]:

$$s(h) = \frac{\omega_S(h) \pm \omega_R}{\omega_S(h)} \quad (5.3)$$

A velocidade angular referente a uma ordem harmônica da tensão é determinada em função da velocidade angular calculada para a frequência fundamental, sendo um múltiplo desta.

$$\omega_S(h) = h \cdot \omega_S(1) \quad (5.4)$$

Ainda, a velocidade do rotor em função do escorregamento para alimentação com tensões puramente senoidais, é dada por:

$$\omega_R = \omega_S(1)[1 - s(1)] \quad (5.5)$$

Substituindo as equações (5.5) e (5.4) em (5.3), obtém-se:

$$s(h) = 1 \pm \frac{[1 - s(1)]}{h} \quad (5.6)$$

Na equação (5.6), o sinal positivo ou negativo é escolhido através da Tabela 5.2. Com isso, pode-se definir a frequência das tensões e correntes presentes no rotor quando há presença de harmônicos nas tensões de alimentação através de:

$$f_R(h) = h \cdot f_S(1) \cdot s(h) \quad (5.7)$$

Com isso feito, o próximo passo é corrigir os parâmetros do circuito equivalente para cada frequência harmônica.

5.2.1.1 CONSIDERAÇÕES SOBRE O EFEITO SKIN

O efeito pelicular (*skin*) é caracterizado como o deslocamento da densidade de corrente para regiões mais externas da seção transversal de um condutor elétrico, implicando na redução da área útil do condutor. Dessa forma, é de se esperar que a resistência elétrica dos condutores do estator e do rotor de um motor de indução terá seu valor acrescido em função

da ordem harmônica da corrente que percorre os mesmos. Este fenômeno também influencia o comportamento da indutância de condutores.

Fazendo um levantamento geral sobre o assunto, as referências [11], [15], [16] não consideram a variação dos parâmetros do estator, principalmente pelo fato de que o enrolamento é composto por fios de pequena seção transversal. O método apresentado por estas referências necessita de dados minuciosos quanto à construção do rotor, que nem sempre são fornecidos pelo fabricante de motores elétricos, sendo um fator que dificulta a implementação.

Em [17] e [18] conclui-se que a resistência sofre um aumento considerável e função da frequência, ao passo que a indutância de dispersão praticamente não varia, e dessa forma, leva a uma alteração diretamente proporcional entre frequência e reatância de dispersão. Ainda em [18] é mostrado que a variação da resistência e indutância de dispersão do rotor pode ser desprezada uma vez que o aumento da reatância equivalente em função da ordem harmônica é preponderante.

Em [19] é mostrado que há distinção na variação da resistência do rotor referente a harmônicos de sequência positiva e negativa. Para a sequência positiva, a resistência no rotor na partida possui um valor que vai diminuindo à medida que a velocidade aumenta. Para harmônicos de sequência negativa ocorre o oposto, a resistência aumenta à medida que o motor de indução acelera até a velocidade nominal. Nota-se também, para velocidade nominal, significativa diferença entre o valor da resistência do rotor em função da ordem harmônica.

As referências [14], [20] e [21] consideram que a resistência do rotor varia em função da raiz quadrada da ordem harmônica, como mostra a equação (5.8):

$$R(h) = R(1) * \sqrt{h} \quad (5.8)$$

Em [20] ainda é proposta a equação (5.11) para avaliação da resistência do rotor:

$$R(h) = R(1) * h^{0,9} \quad (5.9)$$

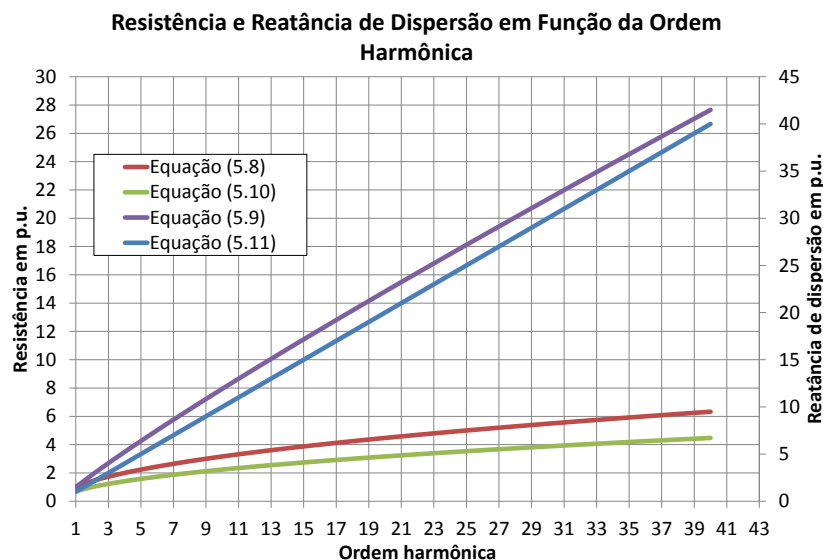
Além da equação (5.9), [21] apresenta outra expressão que pode ser utilizada para aproximação da resistência, apontada na equação (5.10):

$$R(h) = R(1) * \sqrt{\frac{h}{2}} \quad (5.10)$$

Perante a análise dos trabalhos citados, a reatância de dispersão sofre aumento devido ao aumento da frequência, em motores de baixa potência, uma vez que a redução da indutância de dispersão se apresenta pouco significativa, como na expressão (5.11).

$$X(h) = h. 2\pi f(1)L(1) = h. X(1) \quad (5.11)$$

A título de exemplificação, serão comparadas as equações (5.8), (5.9), (5.10) e (5.11), uma vez que são de simples implementação e segundo as referências pesquisadas citadas anteriormente, podem ser utilizadas para a modelagem de uma estimativa da alteração dos valores de resistência e reatância de dispersão devido ao efeito pelicular.



Fonte: Autor, 2011.

Figura 5.2 – Comparação de métodos de estimativa de variação de resistência e reatância de dispersão em função da ordem harmônica.

Para a resistência, os resultados que se mostraram mais próximos em termos de tendência foram os obtidos através das equações (5.8) e (5.10). Assim, para uma estimativa mais conservadora será utilizada a equação (5.10), mesmo sabendo que esta não considera os dados construtivos do motor, uma vez também que estes não são conhecidos. Considera-se esta escolha conservadora pois a resistência terá seu valor alterado de uma maneira relativamente aceitável de forma que não sofrerá um grande aumento. Dessa forma, com um

valor menor para a resistência as perdas que podem ser obtidas são relativamente superiores às obtidas caso a aproximação pelas equações (5.8) ou (5.9) fossem utilizadas.

5.2.1.2 RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO DO ESTATOR

No caso do presente estudo, o efeito pelicular no estator é pouco relevante, pois os condutores constituintes do enrolamento são de pequena seção transversal. Isso exposto, será utilizada para cada ordem harmônica, o valor da resistência obtido para a componente fundamental de tensão:

$$R_S(h) = R_S(1) \quad (5.12)$$

5.2.1.3 INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO DO ENROLAMENTO DO ESTATOR

Como visto em 5.2.1.2, a indutância pode ser considerada constante e igual ao valor obtido em 4.2.2 :

$$L_S(h) = L_S(1) \quad (5.13)$$

No modelo apresentado, no domínio da frequência, não se trabalha simplesmente com indutância, mas sim com a reatância indutiva devido a uma indutância. Neste caso, mantendo-se a indutância constante, a reatância indutiva para uma ordem harmônica h dependerá da frequência do harmônico [14] [16], como mostra a equação (5.14):

$$X_S(h) = h \cdot 2\pi f_S(1) L_S(1) = h \cdot X_S(1) \quad (5.14)$$

5.2.1.4 RESISTÊNCIA DO ENROLAMENTO DO ROTOR

Deve-se dar importância para o valor das resistências das barras do rotor, em decorrência do efeito pelicular, devido à redistribuição da densidade de corrente pela seção do condutor para suas extremidades, que pode ser estimada pela equação (5.15).

$$R_R(n) = R_R(1) * \sqrt{\frac{h}{2}} \quad (5.15)$$

5.2.1.5 INDUTÂNCIA DE DISPERSÃO DO ROTOR

Além da resistência das barras do rotor, o efeito pelicular também influencia a indutância de dispersão da gaiola do rotor, que deve sofrer uma correção no seu valor, para cada ordem harmônica, em função do efeito pelicular, obtida pela equação (5.16):

$$X'_{RNP}(h) = h \cdot 2\pi f_R(1) L_R(1) = h \cdot X'_{RNP}(1) \quad (5.16)$$

Após a análise da equação (5.16) pode-se concluir que o aumento da reatância será devido principalmente ao aumento da ordem harmônica, e a redução da indutância é insignificante perante esse aumento. Sendo assim, pode-se considerar o valor da indutância para a h-ésima ordem harmônica como sendo o mesmo da indutância de dispersão para a fundamental.

5.2.1.6 RESISTÊNCIA DE PERDAS NO NÚCLEO MAGNÉTICO

Para pequenos motores, as perdas por histerese e correntes parasitas, assim como suas resistências representativas, sofrem pouca alteração quanto à frequência de alimentação. Dessa forma, a resistência de perdas no núcleo magnético para cada ordem harmônica será considerada constante, igual ao valor encontrado pelo ensaio à vazio usando tensões puramente senoidais de alimentação, como apresenta a equação (5.17).

$$R_M(h) = R_M(1) \quad (5.17)$$

5.2.1.7 INDUTÂNCIA DE MAGNETIZAÇÃO DO MOTOR

Quando há harmônicos na tensão de alimentação, o valor máximo da densidade de fluxo magnético aumenta, fazendo o ponto de operação ultrapassar a região da curva de magnetização a qual o motor foi projetado para operar, entrando na região de saturação. Há então aumento da corrente de magnetização e, há diminuição da indutância de magnetização do motor [9].

Para correção do valor da reatância de magnetização do motor em função da ordem harmônica, pode-se usar a seguinte equação [14] [22]:

$$X_M(h) = h[0,25 X_M(1)] \quad (5.18)$$

5.2.2 RESOLUÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ALIMENTAÇÃO COM TENSÕES HARMÔNICAS

Nesta etapa, determinam-se as correntes absorvidas pelo motor para posterior obtenção das perdas elétricas, como apresentado em [14]. Iniciando, a corrente eficaz total absorvida pelo motor é dada por:

$$I_S = \frac{\dot{V}_S}{\dot{Z}_{eq}} \quad (5.19)$$

Dessa forma, para a avaliação da corrente produzida pelas componentes harmônicas de ordem h :

$$I_S(h) = \frac{\dot{V}_S(h)}{\dot{Z}_{eq}(h)} \quad (5.20)$$

Em todo caso, as tensões de alimentação que contém distorções harmônicas são decompostas pela série de Fourier, obtendo-se, assim, os valores eficazes de cada componente harmônica. No caso de simulações computacionais, situação proposta no presente capítulo, os valores já são impostos.

A impedância do enrolamento do estator é dada por:

$$\dot{Z}_S(h) = R_S(h) + jX_S(h) \quad (5.21)$$

A impedância do enrolamento do rotor pode ser obtida através da seguinte equação:

$$\dot{Z}_R(h) = \frac{R_R(h)}{s(h)} + jX_R(h) \quad (5.22)$$

O circuito de magnetização possui uma impedância dada pela associação em paralelo entre a resistência de perdas R_M com a reatância de magnetização X_M . Dessa forma:

$$\dot{Z}_m(h) = \frac{jR_M(h)X_M(h)}{R_M(h) + jX_M(h)} \quad (5.23)$$

A impedância equivalente do motor, por fase, é dada por:

$$\dot{Z}_{eq}(h) = \dot{Z}_S(h) + \frac{\dot{Z}_R(h)\dot{Z}_M(h)}{\dot{Z}_R(h) + \dot{Z}_M(h)} \quad (5.24)$$

O valor eficaz total da corrente que é absorvida pelo motor é obtido através de uma relação matemática proporcional à raiz quadrada da soma dos quadrados das componentes harmônicas individuais, incluindo a fundamental, como mostra a equação (5.25).

$$I_{S_{RMS}} = \sqrt{I_S^2(1) + \sum_{h \neq 1}^{\infty} I_S^2(h)} \quad (5.25)$$

Para a determinação do valor da corrente que percorre o ramo do rotor, antes é necessário o conhecimento do valor da tensão harmônica que é induzida no mesmo, referida ao estator, dada por:

$$\dot{E}_M(h) = \dot{V}_S(h) - [R_S(h) + jX_S(h)]\dot{I}_S(h) \quad (5.26)$$

A corrente do rotor pode ser obtida por:

$$\dot{I}_R(h) = \frac{\dot{E}_M(h)}{\dot{Z}_R(h)} \quad (5.27)$$

As perdas joule resultantes no enrolamento do estator serão dadas pela seguinte equação:

$$P_{JS_{harm}} = 3R_{S_{\theta ref}}(1).I_S^2(1) + 3 \sum_{n=2}^{\infty} R_{S_{\theta ref}}(h)I_S^2(h) \quad (5.28)$$

Pela equação (5.28), nota-se que as perdas joule no enrolamento do estator possuem uma parcela de perdas decorrente da componente fundamental de corrente, e outra parcela dada pela soma de todas as perdas joule produzidas pelos harmônicos.

Analogamente, as perdas joule produzidas nas barras do rotor podem ser determinadas a partir de:

$$P_{JR_{harm}} = 3 \sum_{n=1}^{\infty} R_{R_{\theta ref}}(h)I_R^2(h) \quad (5.29)$$

Observando as equações (5.28) e (5.29), nota-se que as resistências, tanto do estator quanto do rotor, são dadas à temperatura de referência, escolhida de acordo com a classe de isolamento do motor. Porém, como os parâmetros do circuito equivalente foram obtidos através dos dados fornecidos pelo fabricante, os mesmos já estão referenciados às condições nominais de operação do motor, dispensando assim, uma eventual correção para a temperatura de referência.

As perdas no núcleo magnético, referentes à cada frequência harmônica podem ser determinadas por:

$$P_{fe_{harm}}(h) = 3 \frac{\dot{E}_m(h)^2}{R_M(h)} \quad (5.30)$$

Lembrando que $R_M(h)$ foi determinado anteriormente, sendo considerado com o mesmo valor de $R_M(1)$. As perdas totais no núcleo magnético podem então ser obtidas pela expressão:

$$P_{fe_{harm}} = 3 \frac{\dot{E}_M(1)^2}{R_M(1)} + 3 \sum_{n=2}^{\infty} \frac{\dot{E}_M(h)^2}{R_M(h)} \quad (5.31)$$

Quando às perdas mecânicas, será considerado que as mesmas não sofrem alteração quando um motor de indução é alimentado com distorções harmônicas de tensão [14].

Completando todas as perdas citadas, têm-se as perdas suplementares, provocadas pela interação do fluxo magnético de dispersão com as diversas partes metálicas do motor. Como citado anteriormente, essas perdas são de difícil determinação e os métodos para tanto divergem entre os vários autores pesquisados. De acordo com [14], as perdas suplementares produzidas quando da alimentação com tensões que contém distorções harmônicas aumentam em 8% do valor referente às mesmas perdas produzidas quando o motor é alimentado com tensões puramente senoidais. Ainda segundo [14], tal consideração pode ser feita, pois a elevação de temperatura produzida por essas perdas não é tão significativa.

Entretanto, o modelo do circuito equivalente adotado engloba na resistência do ramo magnetizante todas as perdas exceto as que ocorrem por efeito joule nos condutores do estator e do rotor. Isso posto, a equação (5.31) fornecerá um valor aproximado para o conjunto de perdas constituído pela perda no núcleo magnético, perdas mecânicas e suplementares.

Neste ponto é importante equacionar o comportamento do conjugado eletromagnético. Dessa maneira, para cada harmônica, tem-se:

$$C_e(h) = \frac{3R_R(h)I_R(h)^2}{s(h)\omega_s(h)} \quad (5.32)$$

Sendo assim, o conjugado resultante pode ser determinado por:

$$C_{e_{total}} = C_e(1) + \sum_{h=2}^{\infty} \pm \frac{3R_R(h)I_R(h)^2}{s(h)\omega_s(h)} \quad (5.33)$$

Na equação (5.33), o sinal negativo está associado às componentes harmônicas de sequência negativa, e o sinal positivo, às de sequência positiva. Dependendo da ordem harmônica incidente no motor, haverá uma redução do conjugado médio e a presença de conjugados oscilatórios, o que contribuirá para o aparecimento de vibrações, aumentando possivelmente a necessidade de manutenções ou, no pior dos casos, a redução da vida útil da máquina.

5.2.3 RESULTADOS

Serão apresentados os resultados para simulações dos motores quando a tensão de alimentação apresenta conteúdo harmônico. Foi considerado em cada caso, a frequência harmônica separada das outras uma vez que estas existem para sequência positiva e negativa. No caso de harmônicos de diferentes sequências de fase, os conjugados produzidos se influenciam, dificultando parte da análise dos efeitos em motores de indução.

Dado o exposto acima, fixou-se a distorção individual de tensão em 10% e 20% e, para cada uma dessas proporções foram aplicadas juntamente com a tensão em 60 [Hz] as seguintes ordens harmônicas: 5ª, 7ª, 11ª e 13ª.

É interessante citar que [10] define os valores máximos para distorção total de tensão por faixa de tensão e, para o caso de tensões abaixo de 1 [kV], este limite é de 10%. É apresentado também limites para distorção individual de tensão, os quais limitam em função da ordem harmônica o percentual permitido. Será considerado neste trabalho o limite para a DTT por ser um valor mais conservativo.

5.2.3.1 SIMULAÇÃO APLICANDO 10% DE 5º HARMÔNICO

Sabe-se que o 5º harmônico possui sequência negativa e com isso produz conjugado no sentido oposto ao da rotação principal do motor. Ainda, é uma frequência bastante comum em ambientes industriais dada a natureza de algumas cargas presentes nestes ambientes.

Neste item serão apresentados os resultados das simulações quando é aplicado 10% de 5º harmônico juntamente com valor nominal da tensão senoidal de 60 [Hz].

Tabela 5.3 – Variação da performance do motor da linha padrão para 10% de 5º harmônico.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876
Corrente eficaz no estator [%]	2,81574	1,76536	1,12168	0,75210	0,65099
Corrente eficaz no rotor [%]	11,83147	3,07048	1,37199	0,77304	0,63926
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,26048	0,26701	0,27413	0,28187	0,28514
Fator de potência [%]	-2,46256	-1,75927	-1,26554	-0,97654	-0,89788
Perdas Joule totais no estator [%]	5,71076	3,56189	2,25593	1,50986	1,30622
Perdas Joule totais no rotor [%]	39,62774	9,85878	4,36836	2,45400	2,02798
Perdas totais no ferro [%]	0,52165	0,53473	0,54900	0,56452	0,57109
Potência total transferida entreferro [%]	0,50264	0,25481	0,17271	0,13206	0,12108
Perdas totais [%]	2,33604	2,03229	1,66800	1,33280	1,21562
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,10053	-0,05096	-0,03454	-0,02641	-0,02422
Potência mecânica total [%]	-0,10053	-0,05096	-0,03454	-0,02641	-0,02422
Potência ativa total de entrada [%]	0,78401	0,47367	0,33991	0,26582	0,24476
Potência reativa total no estator [%]	28,55379	17,80946	11,27967	7,54931	6,53110
Potência reativa total no rotor [%]	125,31390	31,17619	13,81397	7,76023	6,41304
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,41732	0,42778	0,43920	0,45162	0,45687
Potência reativa total de entrada [%]	2,84656	2,75543	2,58592	2,36591	2,27046
Potência aparente total de entrada [%]	3,32854	2,27292	1,62603	1,25461	1,15299
Rendimento [%]	-0,87766	-0,52216	-0,37318	-0,29146	-0,26832

Tabela 5.4 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 10% de 5º harmônico.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876
Corrente eficaz no estator [%]	3,16539	1,84811	1,11857	0,72817	0,62507
Corrente eficaz no rotor [%]	11,17384	2,89244	1,29201	0,72833	0,60251
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,22896	0,23368	0,23891	0,24469	0,24716
Fator de potência [%]	-2,92797	-1,93812	-1,33878	-1,01473	-0,92967
Perdas Joule totais no estator [%]	6,43097	3,73037	2,24965	1,46163	1,25404
Perdas Joule totais no rotor [%]	37,30893	9,27899	4,11208	2,31155	1,91106
Perdas totais no ferro [%]	0,45845	0,46790	0,47840	0,48999	0,49493

Potência total transferida entreferro [%]	0,41424	0,20942	0,14159	0,10802	0,09895
Perdas totais [%]	2,45691	2,08785	1,66800	1,30157	1,17770
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,08285	-0,04188	-0,02832	-0,02160	-0,01979
Potência mecânica total [%]	-0,08285	-0,04188	-0,02832	-0,02160	-0,01979
Potência ativa total de entrada [%]	0,64422	0,37229	0,26239	0,20334	0,18679
Potência reativa total no estator [%]	32,15486	18,65183	11,24824	7,30817	6,27020
Potência reativa total no rotor [%]	117,98120	29,34275	13,00355	7,30978	6,04329
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,36676	0,37432	0,38272	0,39199	0,39595
Potência reativa total de entrada [%]	3,06415	2,92650	2,70004	2,42564	2,31119
Potência aparente total de entrada [%]	3,67993	2,35608	1,62290	1,23055	1,12694
Rendimento [%]	-0,72241	-0,41264	-0,28995	-0,22448	-0,20619

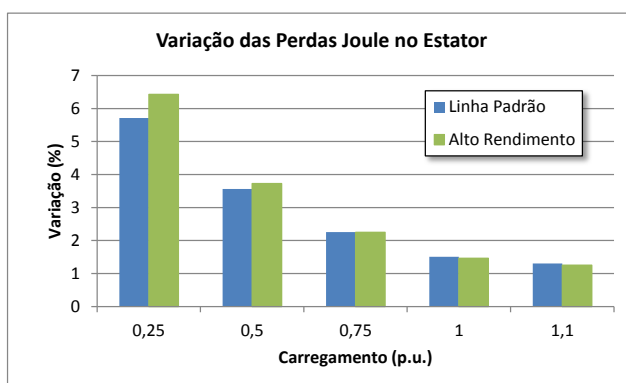


Figura 5.3 – Variação das perdas joule no estator para 10% de 5º harmônico.

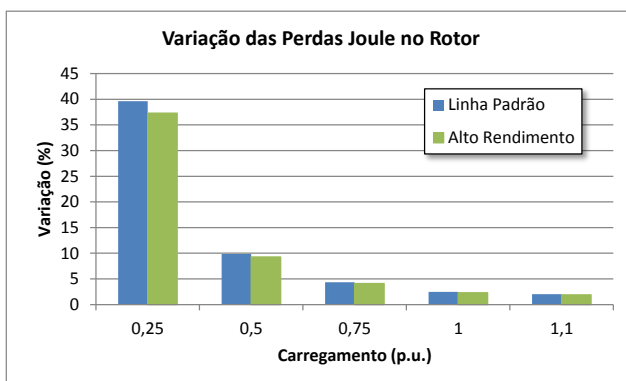


Figura 5.4 – Variação das perdas joule no rotor para 10% de 5º harmônico.

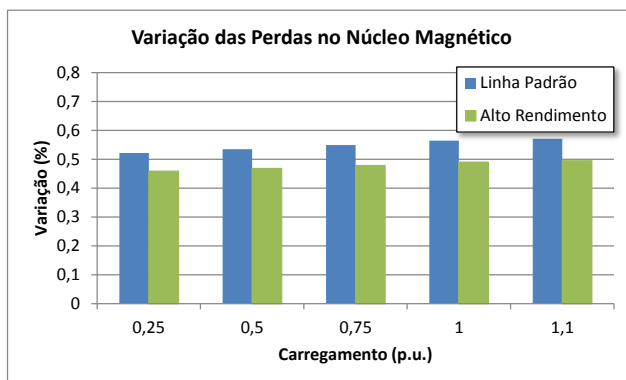


Figura 5.5 – Variação das perdas no núcleo magnético para 10% de 5º harmônico.

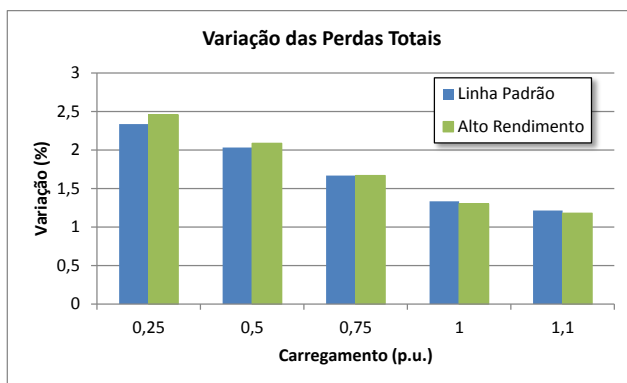


Figura 5.6 – Variação das perdas totais nos motores para 10% de 5º harmônico.

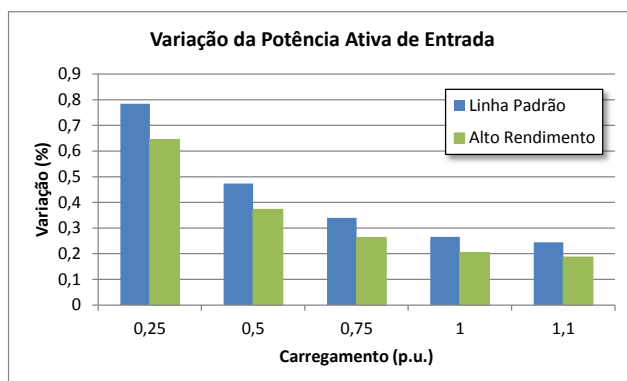


Figura 5.7 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 10% de 5º harmônico.

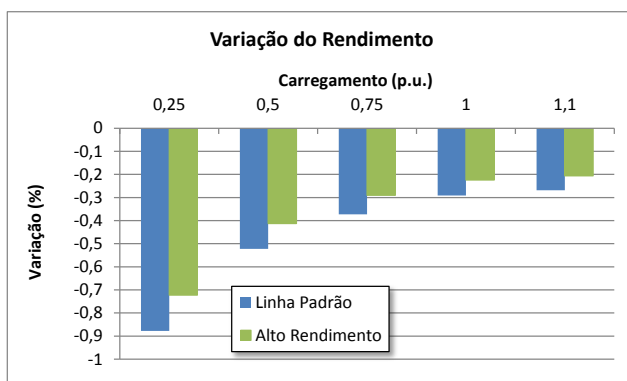


Figura 5.8 – Variação do rendimento para 10% de 5º harmônico.

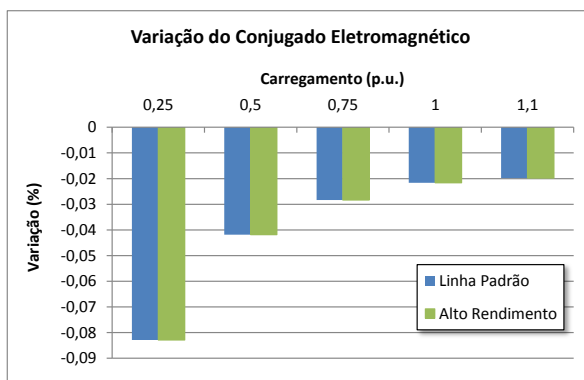


Figura 5.9 – Variação do conjugado eletromagnético desenvolvido para 10% de 5º harmônico.

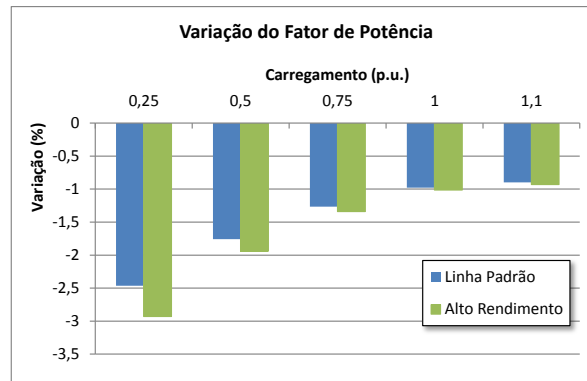


Figura 5.10 – Variação do fator de potência para 10% de 5º harmônico.

Pelos gráficos apresentados pode-se afirmar que os maiores desvios em relação à alimentação puramente senoidal se deram à medida que o carregamento dos motores se reduziu. Esse fato pode ser explicado através da análise do escorregamento harmônico obtido. O valor desta grandeza é próximo de 1, e, no caso de harmônicos de sequência negativa, como o de 5ª ordem, é superior a 1, o que é visto como uma condição análoga à de partida referente a ordem harmônica em questão. Como o motor permanece nesse estado durante todo o regime, e pelos cálculos não houve significativa variação do escorregamento de 5º harmônico em função do carregamento, independente da condição de carga, o comportamento do motor para o 5º harmônico é aproximadamente o mesmo.

Exposto esses argumentos, pode-se afirmar que quando da aplicação do princípio da superposição de efeitos, entre fundamental e 5º harmônico, uma determinada grandeza na fundamental sofre aumento com o carregamento e a mesma grandeza para o 5º harmônico permanece constante. Assim, ao longo dos aumentos dos carregamentos, a proporção entre um parâmetro no 5º harmônico e o mesmo na fundamental varia devido à alteração da referência.

Considerando que a operação com baixos carregamentos direciona a uma elevação de temperatura que esteja abaixo da máxima admissível, os efeitos da DTT aplicada podem ser considerados como pouco influenciáveis no comportamento dos motores estudados.

Os gráficos mostram ainda que para carregamentos superiores a 75%, as variações notadas para as perdas no motor de alto rendimento foram iguais ou inferiores às do motor da linha padrão. Em contrapartida, para carregamentos inferiores a 75% esse padrão se inverte.

As perdas totais sofrem aumentos de até 2,5% à medida que se reduz o carregamento dos motores. Entretanto, deve ser analisada com cautela a operação dos motores alimentados à base de tensões distorcidas, uma vez que para carregamentos acima de 75% a elevação de temperatura passa a ser relevante e, o aumento das perdas influencia diretamente sobre esta.

Além disso, há queda generalizada do rendimento para todos os pontos de carga. A redução do rendimento foi maior ao longo da redução do carregamento, chegando a quase 0,9% para o motor da linha padrão com 25% de carga. O motor de alto rendimento manteve o rendimento superior ao do motor da linha padrão em todos os casos, e as variações sofridas devido à DTT de 10% foram inferiores às de seu concorrente. Porém, a Figura 5.6 que para carregamentos superiores a 75%, a variação das perdas totais no motor de alto rendimento é inferior do que no motor da linha padrão, e para carregamentos inferiores ocorre o oposto, porém com valores bastante próximos.

A Figura 5.10 mostra a redução do fator de potência, que é significativa até mesmo para pontos de carga acima de 75%, com valores próximos a 1%. Sabe-se que o fator de potência é uma grandeza que depende do carregamento dos motores de indução e com isso, o mesmo se reduz com a diminuição da carga no eixo. Além dessa redução que é intrínseca à característica de motores de indução, a presença de harmônicos catalisa ainda mais a diminuição do fator de potência, representada no circuito equivalente pelo aumento das reatâncias.

5.2.3.2 SIMULAÇÃO APLICANDO 20% DE 5º HARMÔNICO

Como foi considerado apenas um único harmônico, a Distorção Total de Tensão será igual à Distorção Individual de Tensão. Assim, uma tensão com 20% de DTI ultrapassa os limites impostos em [10], e com isso, poderá ser observado o efeito dessa condição desfavorável em motores de indução.

Tabela 5.5 – Variação da performance do motor da linha padrão para 20% de 5º harmônico.

	Linha Padrão				
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039
Corrente eficaz no estator [%]	10,83458	6,88665	4,41443	2,97546	2,57918
Corrente eficaz no rotor [%]	41,51012	11,77699	5,38082	3,05736	2,53313
Tensão eficaz no entreferro [%]	1,03791	1,06379	1,09205	1,12275	1,13573
Fator de potência [%]	-8,75300	-6,52158	-4,81078	-3,76280	-3,47154
Perdas Joule totais no estator [%]	22,84303	14,24757	9,02374	6,03945	5,22488
Perdas Joule totais no rotor [%]	158,51100	39,43511	17,47344	9,81601	8,11192
Perdas totais no ferro [%]	2,08659	2,13890	2,19602	2,25810	2,28435
Potência total transferida entreferro [%]	2,01055	1,01924	0,69083	0,52824	0,48432
Perdas totais [%]	9,34416	8,12915	6,67200	5,33121	4,86248
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,40211	-0,20385	-0,13817	-0,10565	-0,09686

Potência mecânica total [%]	-0,40211	-0,20385	-0,13817	-0,10565	-0,09686
Potência ativa total de entrada [%]	3,13605	1,89468	1,35962	1,06328	0,97905
Potência reativa total no estator [%]	114,21520	71,23783	45,11868	30,19724	26,12441
Potência reativa total no rotor [%]	501,25570	124,70480	55,25587	31,04094	25,65215
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	1,66927	1,71112	1,75682	1,80648	1,82748
Potência reativa total de entrada [%]	11,38623	11,02171	10,34367	9,46366	9,08185
Potência aparente total de entrada [%]	13,02953	9,00343	6,48225	5,01477	4,61065
Rendimento [%]	-3,43058	-2,05951	-1,47770	-1,15663	-1,06548

Tabela 5.6 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 20% de 5º harmônico.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039
Corrente eficaz no estator [%]	12,12666	7,20143	4,40239	2,88174	2,47739
Corrente eficaz no rotor [%]	39,42200	11,11894	5,07275	2,88237	2,38879
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,91273	0,93146	0,95227	0,97522	0,98502
Fator de potência [%]	-10,29351	-7,16698	-5,09100	-3,91335	-3,59755
Perdas Joule totais no estator [%]	25,72389	14,92147	8,99859	5,84653	5,01616
Perdas Joule totais no rotor [%]	149,23570	37,11597	16,44833	9,24622	7,64422
Perdas totais no ferro [%]	1,83378	1,87159	1,91360	1,95995	1,97974
Potência total transferida entreferro [%]	1,65696	0,83768	0,56635	0,43207	0,39581
Perdas totais [%]	9,82762	8,35140	6,67198	5,20628	4,71080
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,33139	-0,16754	-0,11327	-0,08641	-0,07916
Potência mecânica total [%]	-0,33139	-0,16754	-0,11327	-0,08641	-0,07916
Potência ativa total de entrada [%]	2,57687	1,48917	1,04958	0,81334	0,74715
Potência reativa total no estator [%]	128,61940	74,60734	44,99296	29,23266	25,08079
Potência reativa total no rotor [%]	471,92470	117,37100	52,01418	29,23910	24,17316
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	1,46703	1,49727	1,53088	1,56796	1,58379
Potência reativa total de entrada [%]	12,25662	11,70601	10,80017	9,70257	9,24474
Potência aparente total de entrada [%]	14,34721	9,32444	6,46997	4,91920	4,50684
Rendimento [%]	-2,83520	-1,63240	-1,15077	-0,89250	-0,82019

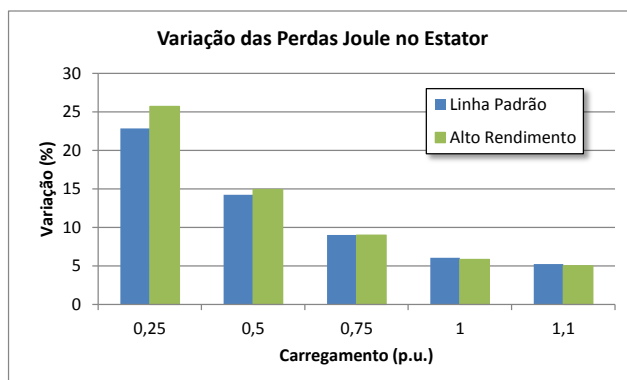


Figura 5.11 – Variação das perdas joule no estator para 20% de 5º harmônico.

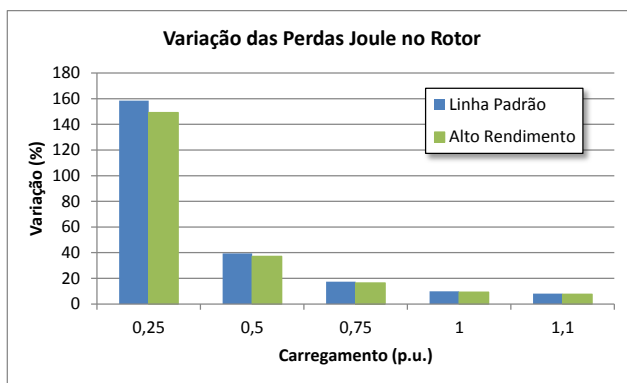


Figura 5.12 – Variação das perdas joule no rotor para 20% de 5º harmônico.

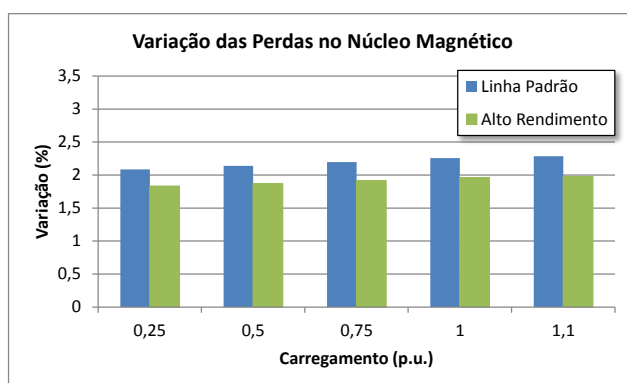


Figura 5.13 – Variação das perdas no núcleo magnético para 20% de 5º harmônico.

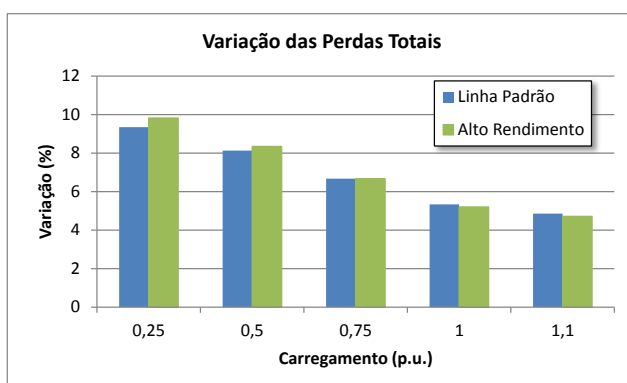


Figura 5.14 – Variação das perdas totais para 20% de 5º harmônico.

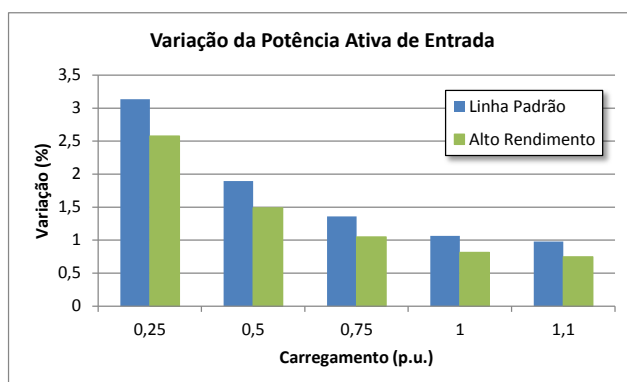


Figura 5.15 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 20% de 5º harmônico.

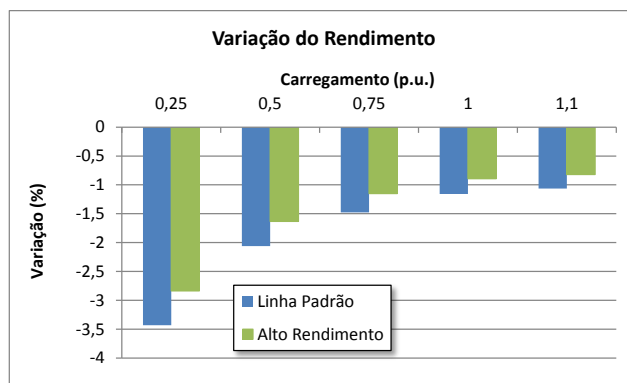


Figura 5.16 – Variação do rendimento para 20% de 5º harmônico.

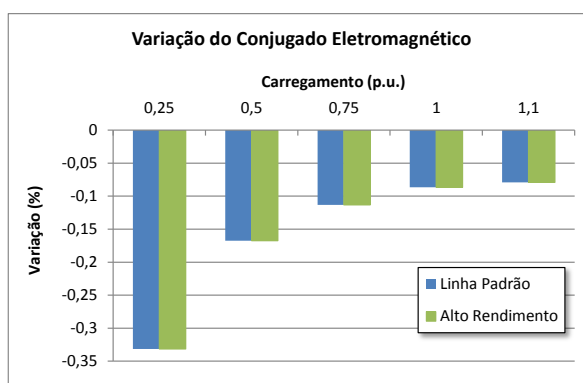


Figura 5.17 – Variação do conjugado eletromagnético desenvolvido para 20% de 5º harmônico.

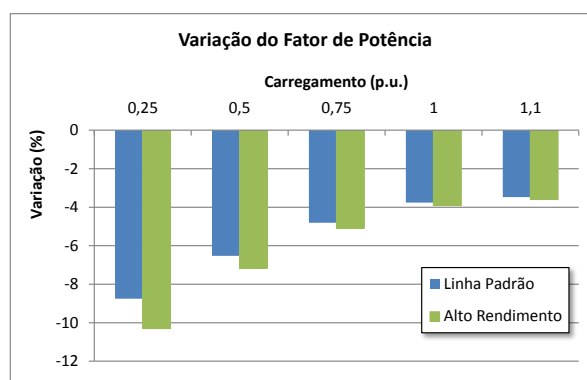


Figura 5.18 – Variação do fator de potência para 20% de 5º harmônico.

Comparando as variações obtidas com a situação de 10% de DTT para o 5º harmônico, nota-se que as mesmas sofrem aumento da ordem de 3 a 4 vezes, dado que esta última condição simulada é uma extrapolação em relação ao limite previsto pela ANEEL. Com isso, conclui-se que ao dobrar a DTT, variações dos dados de performance são multiplicados na ordem de 3 ou 4 vezes.

Seguindo o que foi exposto acima, há um aumento de 5% nas perdas para condição nominal, dado que vai aumentando à medida que o carregamento diminui, uma vez que as

perdas produzidas pelo 5º harmônico separadamente vão ficando cada vez mais significativas perante às produzidas pela componente fundamental de tensão.

Pode ser observada queda de até 10% no fator de potência para 25% de carregamento, porém este é um ponto de carga incomum pois apesar das ocorrências de má especificação de motores na indústria, considera-se que a maioria destes funcionam com carregamentos superiores a 50%. Portanto, pela análise da Figura 5.18, o fator de potência sofre redução de pouco mais de 6% em ambos os motores.

Apesar do 5º harmônico ser de sequência negativa e com isso produzir conjugado no sentido oposto ao da rotação principal, para a simulação deste caso com 20% de DTT, a variação do conjugado eletromagnético do motor foi insignificante. Entretanto, a Figura 5.17 mostra que à medida que o carregamento diminui, a redução do conjugado é mais apresentável.

Quanto ao rendimento, para carregamentos superiores a 50%, a máxima redução notada é de 2% para o motor da linha padrão e de aproximadamente 1,5% para o motor de alto rendimento.

5.2.3.3 SIMULAÇÃO APLICANDO 10% DE 7º HARMÔNICO

O 7º harmônico possui sequência de fases positiva e produz campo girante e conjugado em sentido favorável à rotação do eixo do motor de indução, sendo também uma frequência comum em ambientes industriais.

Este item apresenta resultados das simulações para 10% de 7º harmônico. Esse percentual de harmônicos é definido em [10] como o limite para distorção presente em redes de alimentação até 1 [kV].

Tabela 5.7 – Variação da performance do motor da linha padrão para 10% de 7º harmônico.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876
Corrente eficaz no estator [%]	1,46032	0,91340	0,57953	0,38829	0,33602
Corrente eficaz no rotor [%]	6,19546	1,57696	0,70193	0,39501	0,32658
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,26217	0,26872	0,27588	0,28365	0,28694
Fator de potência [%]	-1,35327	-1,04831	-0,81919	-0,68539	-0,64934
Perdas Joule totais no estator [%]	2,94197	1,83515	1,16243	0,77808	0,67317
Perdas Joule totais no rotor [%]	23,89938	5,94698	2,63561	1,48091	1,22393
Perdas totais no ferro [%]	0,52503	0,53817	0,55251	0,56811	0,57470

Potência total transferida entreferro [%]	0,42225	0,21299	0,14361	0,10922	0,09992
Perdas totais [%]	1,50969	1,31353	1,07821	0,86164	0,78592
Conjugado eletromagnético resultante [%]	0,06032	0,03043	0,02052	0,01560	0,01427
Potência mecânica total [%]	0,06032	0,03043	0,02052	0,01560	0,01427
Potência ativa total de entrada [%]	0,58648	0,35356	0,25314	0,19750	0,18168
Potência reativa total no estator [%]	20,59382	12,84607	8,13700	5,44659	4,71221
Potência reativa total no rotor [%]	89,42331	22,25157	9,86155	5,54107	4,57953
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,30001	0,30752	0,31572	0,32463	0,32840
Potência reativa total de entrada [%]	2,03997	1,97494	1,85370	1,69625	1,62791
Potência aparente total de entrada [%]	1,96636	1,41672	1,08118	0,88898	0,83645
Rendimento [%]	-0,52309	-0,32199	-0,23204	-0,18154	-0,16710

Tabela 5.8 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 10% de 7º harmônico.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876
Corrente eficaz no estator [%]	1,63592	0,95223	0,57538	0,37423	0,32118
Corrente eficaz no rotor [%]	5,84052	1,48417	0,66051	0,37188	0,30756
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,23005	0,23477	0,24002	0,24582	0,24829
Fator de potência [%]	-1,62533	-1,16051	-0,87188	-0,71726	-0,67709
Perdas Joule totais no estator [%]	3,29859	1,91353	1,15406	0,74987	0,64339
Perdas Joule totais no rotor [%]	22,49139	5,59446	2,47956	1,39404	1,15257
Perdas totais no ferro [%]	0,46062	0,47009	0,48062	0,49224	0,49720
Potência total transferida entreferro [%]	0,34806	0,17519	0,11790	0,08953	0,08186
Perdas totais [%]	1,56208	1,32753	1,06065	0,82771	0,74896
Conjugado eletromagnético resultante [%]	0,04972	0,02503	0,01684	0,01279	0,01169
Potência mecânica total [%]	0,04972	0,02503	0,01684	0,01279	0,01169
Potência ativa total de entrada [%]	0,48267	0,27833	0,19573	0,15133	0,13888
Potência reativa total no estator [%]	23,09015	13,39469	8,07844	5,24909	4,50371
Potência reativa total no rotor [%]	84,15507	20,93255	9,27766	5,21600	4,31252
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,26321	0,26863	0,27464	0,28128	0,28411
Potência reativa total de entrada [%]	2,19225	2,09395	1,93209	1,73589	1,65404
Potência aparente total de entrada [%]	2,14283	1,45574	1,07700	0,87486	0,82154
Rendimento [%]	-0,43087	-0,25260	-0,17854	-0,13833	-0,12701

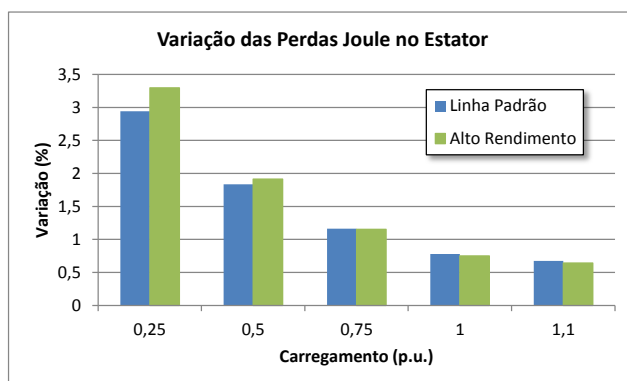


Figura 5.19 – Variação das perdas joule no estator para 10% de 7º harmônico.

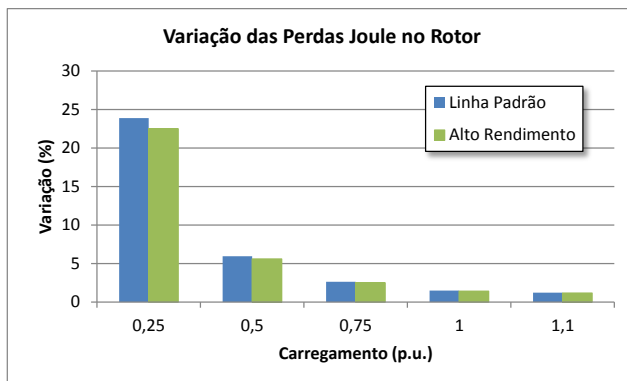


Figura 5.20 – Variação das perdas joule no rotor para 10% de 7º harmônico.

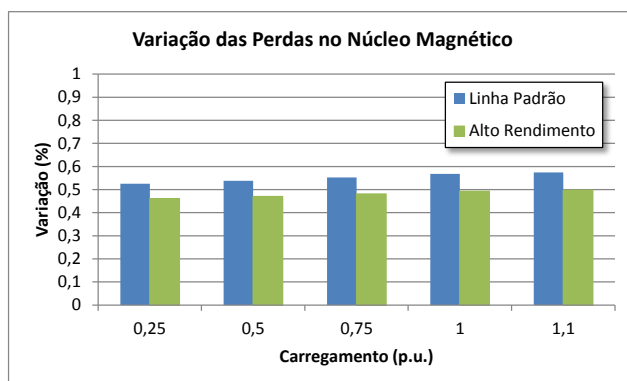


Figura 5.21 – Variação das perdas no núcleo magnético para 10% de 7º harmônico.

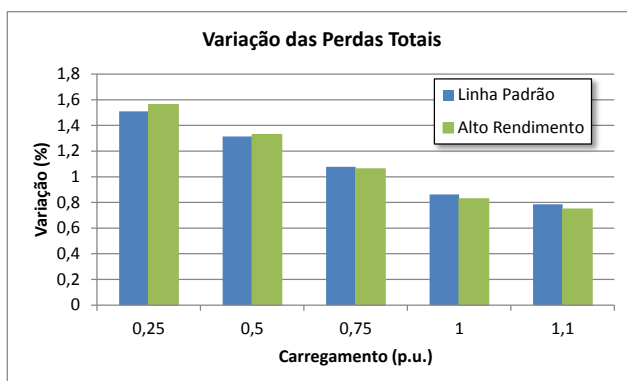


Figura 5.22 – Variação das perdas totais para 10% de 7º harmônico.

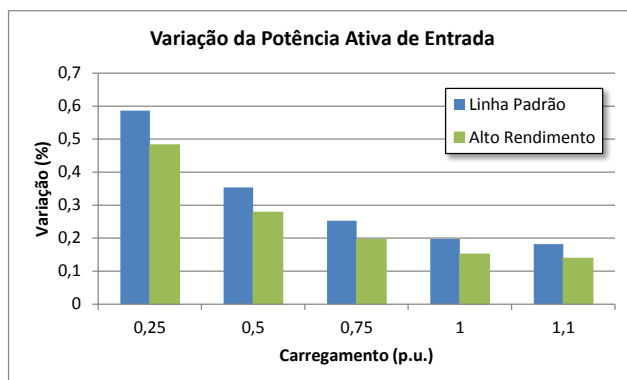


Figura 5.23 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 10% de 7º harmônico.

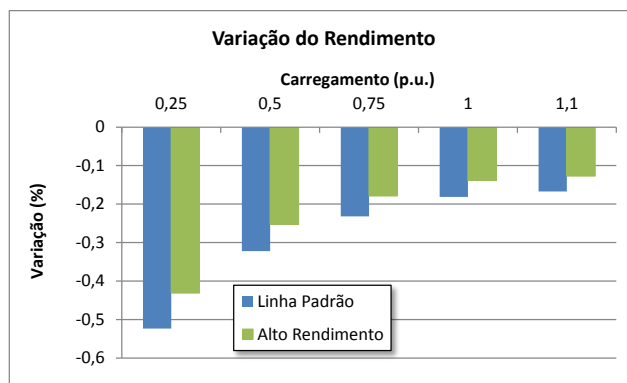


Figura 5.24 – Variação do rendimento para 10% de 7º harmônico.

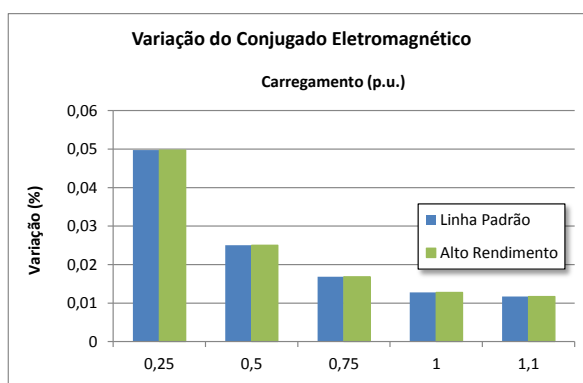


Figura 5.25 – Variação do conjugado eletromagnético para 10% de 7º harmônico.

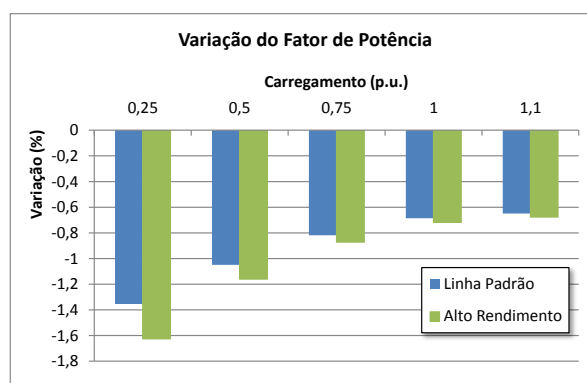


Figura 5.26 – Variação do fator de potência para 10% de 7º harmônico.

Foi notado que as variações apresentadas são inferiores às obtidas para 10% de 5º harmônico. Algumas chegam a ser até metade do valor.

A parcela de perdas é influenciada pela corrente que percorre os condutores. No caso do rotor, a resistência aumentou devido à frequência provocando redução da corrente, uma vez que o escorregamento harmônico é obtido baseado no escorregamento fundamental, e a potência desenvolvida pelo harmônico é dependente do escorregamento, da resistência e da corrente.

Sobre o rendimento pode ser visto pela Figura 5.24 que as variações são pequenas e vão aumentando à medida que o carregamento dos motores se reduz. Ainda, é notado um comportamento mais adequado do motor de alto rendimento no que tange o quesito “rendimento”.

O conjugado eletromagnético sofre mínimas variações percentuais, e mesmo sabendo que o 7º harmônico é de sequência positiva e com isso tende a contribuir com um aumento do conjugado, este fato praticamente pode ser desconsiderado.

Quanto ao fator de potência, a redução se mostrou inferior à obtida na simulação com 10% de 5º harmônico.

5.2.3.4 SIMULAÇÃO APLICANDO 20% DE 7º HARMÔNICO

Como dito anteriormente, com 20% de distorção total de tensão, pode-se observar o comportamento de cargas alimentadas por uma tensão completamente fora dos padrões de qualidade de energia estabelecidos pela ANEEL.

Tabela 5.9 – Variação da performance do motor da linha padrão para 20% de 7º harmônico.

	Linha Padrão				
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039
Corrente eficaz no estator [%]	5,72034	3,60531	2,29844	1,54425	1,33740
Corrente eficaz no rotor [%]	22,92235	6,16741	2,77897	1,57083	1,29999
Tensão eficaz no entreferro [%]	1,04460	1,07060	1,09899	1,12983	1,14288
Fator de potência [%]	-5,07177	-4,01570	-3,17452	-2,67028	-2,53285
Perdas Joule totais no estator [%]	11,76790	7,34061	4,64971	3,11234	2,69269
Perdas Joule totais no rotor [%]	95,59754	23,78793	10,54244	5,92366	4,89572
Perdas totais no ferro [%]	2,10010	2,15267	2,21006	2,27243	2,29881
Potência total transferida entreferro [%]	1,68901	0,85194	0,57444	0,43688	0,39967
Perdas totais [%]	6,03876	5,25414	4,31283	3,44654	3,14367
Conjugado eletromagnético resultante [%]	0,24129	0,12171	0,08206	0,06241	0,05710
Potência mecânica total [%]	0,24129	0,12171	0,08206	0,06241	0,05710
Potência ativa total de entrada [%]	2,34593	1,41423	1,01256	0,79000	0,72672
Potência reativa total no estator [%]	82,37527	51,38427	32,54798	21,78636	18,84883
Potência reativa total no rotor [%]	357,69320	89,00627	39,44619	22,16429	18,31811
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	1,20006	1,23009	1,26289	1,29853	1,31361
Potência reativa total de entrada [%]	8,15990	7,89975	7,41482	6,78498	6,51164
Potência aparente total de entrada [%]	7,81401	5,65710	4,32435	3,55522	3,34428
Rendimento [%]	-2,05640	-1,27450	-0,92116	-0,72189	-0,66479

Tabela 5.10 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 20% de 7º harmônico.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039
Corrente eficaz no estator [%]	6,39285	3,75650	2,28209	1,48866	1,27860
Corrente eficaz no rotor [%]	21,69167	5,81184	2,61653	1,47934	1,22465
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,91704	0,93581	0,95667	0,97968	0,98950
Fator de potência [%]	-6,05453	-4,43994	-3,37919	-2,79543	-2,64202
Perdas Joule totais no estator [%]	13,19437	7,65411	4,61625	2,99948	2,57355
Perdas Joule totais no rotor [%]	89,96556	22,37784	9,91824	5,57614	4,61027
Perdas totais no ferro [%]	1,84248	1,88038	1,92249	1,96896	1,98880
Potência total transferida entreferro [%]	1,39225	0,70075	0,47161	0,35810	0,32742
Perdas totais [%]	6,24831	5,31012	4,24261	3,31084	2,99585
Conjugado eletromagnético resultante [%]	0,19889	0,10011	0,06737	0,05116	0,04677
Potência mecânica total [%]	0,19889	0,10011	0,06737	0,05116	0,04677
Potência ativa total de entrada [%]	1,93069	1,11332	0,78292	0,60530	0,55552
Potência reativa total no estator [%]	92,36062	53,57875	32,31374	20,99635	18,01483
Potência reativa total no rotor [%]	336,62030	83,73020	37,11064	20,86401	17,25006
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	1,05285	1,07450	1,09857	1,12512	1,13646
Potência reativa total de entrada [%]	8,76901	8,37580	7,72834	6,94356	6,61616
Potência aparente total de entrada [%]	8,49984	5,81128	4,30767	3,49853	3,28431
Rendimento [%]	-1,69899	-1,00206	-0,70999	-0,55081	-0,50593

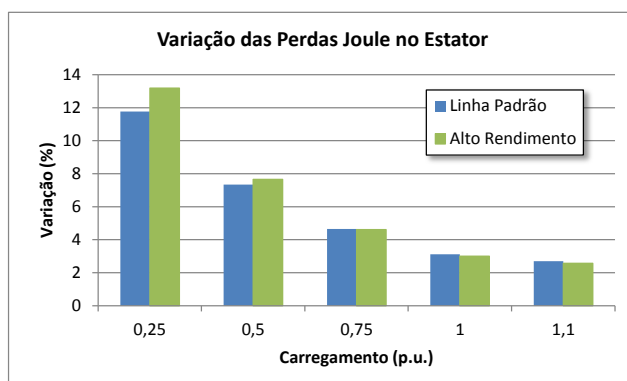


Figura 5.27 – Variação das perdas joule no estator para 20% de 7º harmônico.

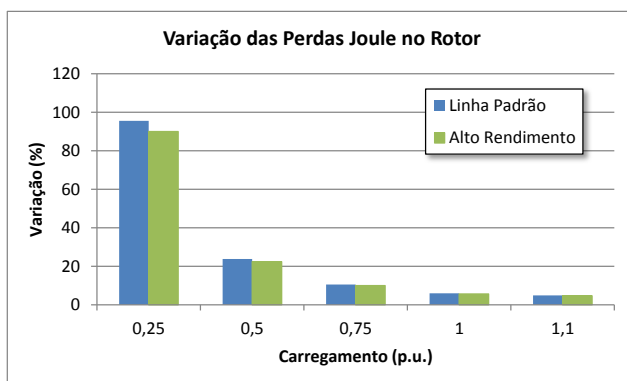


Figura 5.28 – Variação das perdas joule no rotor para 20% de 7º harmônico.

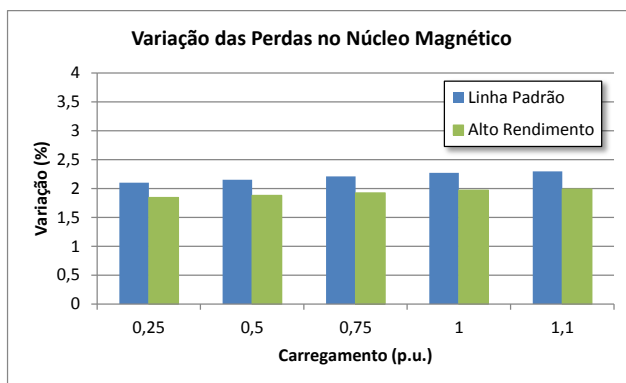


Figura 5.29 – Variação das perdas no núcleo magnético para 20% de 7º harmônico.

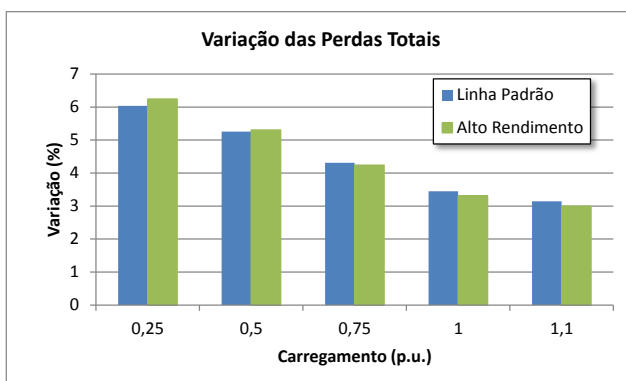


Figura 5.30 – Variação das perdas totais para 20% de 7º harmônico.

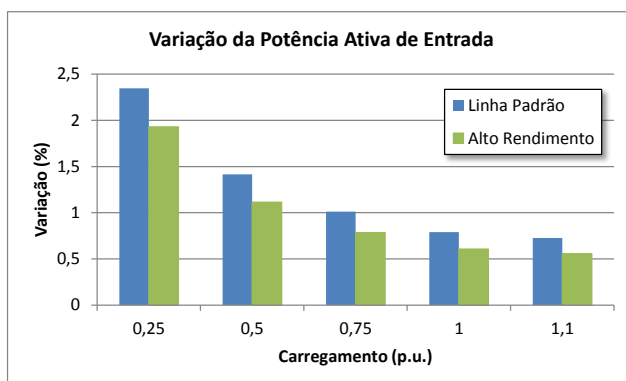


Figura 5.31 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 20% de 7º harmônico.

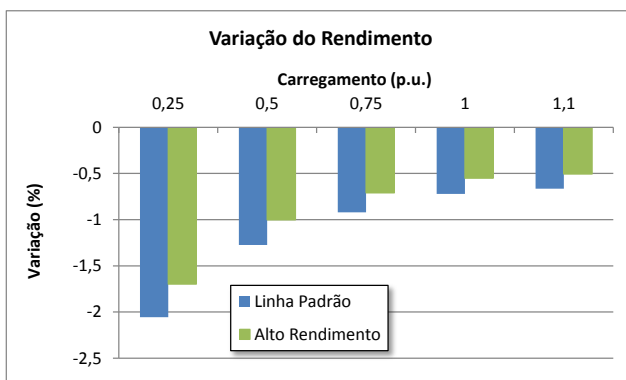


Figura 5.32 – Variação do rendimento para 20% de 7º harmônico.

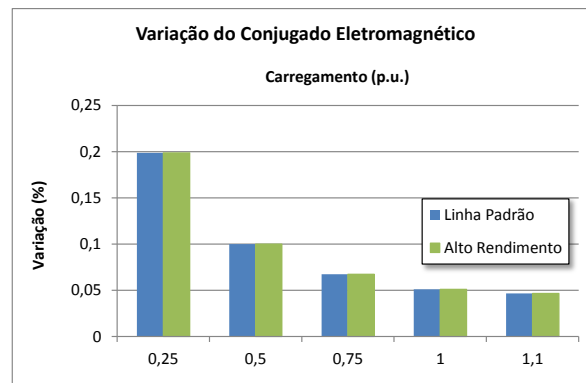


Figura 5.33 – Variação do conjugado eletromagnético para 20% de 7º harmônico.

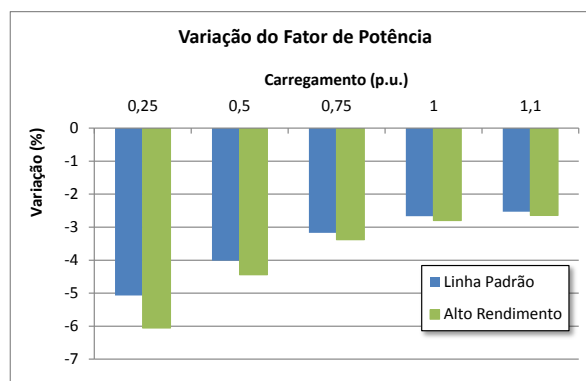


Figura 5.34 – Variação do fator de potência para 20% de 7º harmônico.

Analisando os resultados desta simulação foi visto que, como previsto, as variações aumentaram, deixando subentendido que há piora na condição e comportamento de funcionamento dos motores.

Seguindo o padrão notado no item anterior, as variações de performance obtidas na presente simulação foram menores que a análoga para 5º harmônico. Conforme explicado, esta redução das variações se resume em decorrência do aumento da impedância harmônica dos motores.

Como nos casos apresentados até aqui, o rendimento é menos influenciado do que o fator de potência. Não se pode afirmar que há uma relação de um evento com o outro, mas o que se pode dizer é que harmônicos influenciam em maior proporção o fator de potência do que o rendimento e as perdas que ocorrem em motores.

5.2.3.5 SIMULAÇÕES APLICANDO 10% DE 11º HARMÔNICO

A 11ª ordem harmônica apresenta característica semelhante à 5ª ordem, sendo de sequência negativa, produzindo campo girante no sentido contrário ao da rotação principal do motor de indução.

A seguir são apresentados os resultados das simulações aplicando uma tensão com 10% de 11º harmônico nos motores.

Tabela 5.11 – Variação da performance do motor da linha padrão para 10% de 11º harmônico.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876
Corrente eficaz no estator [%]	0,60762	0,37944	0,24050	0,16104	0,13933
Corrente eficaz no rotor [%]	2,59419	0,65169	0,28930	0,16263	0,13442
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,26207	0,26863	0,27579	0,28358	0,28687
Fator de potência [%]	-0,76769	-0,67297	-0,59179	-0,54424	-0,53159
Perdas Joule totais no estator [%]	1,21893	0,76031	0,48157	0,32233	0,27886
Perdas Joule totais no rotor [%]	12,32564	3,06664	1,35890	0,76344	0,63093
Perdas totais no ferro [%]	0,52483	0,53799	0,55235	0,56796	0,57456
Potência total transferida entreferro [%]	0,17175	0,08696	0,05887	0,04495	0,04119
Perdas totais [%]	0,94524	0,82238	0,67500	0,53939	0,49197
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,01561	-0,00791	-0,00535	-0,00409	-0,00374
Potência mecânica total [%]	-0,01561	-0,00791	-0,00535	-0,00409	-0,00374
Potência ativa total de entrada [%]	0,33320	0,20119	0,14428	0,11276	0,10380
Potência reativa total no estator [%]	13,40827	8,36344	5,29732	3,54564	3,06750
Potência reativa total no rotor [%]	57,81239	14,38380	6,37381	3,58086	2,95930
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,19085	0,19563	0,20085	0,20653	0,20893
Potência reativa total de entrada [%]	1,31871	1,27656	1,19810	1,09623	1,05203
Potência aparente total de entrada [%]	1,10941	0,88008	0,74045	0,66060	0,63879
Rendimento [%]	-0,34766	-0,20867	-0,14942	-0,11672	-0,10743

Tabela 5.12 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 10% de 11º harmônico.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876
Corrente eficaz no estator [%]	0,67531	0,39229	0,23677	0,15390	0,13206
Corrente eficaz no rotor [%]	2,43128	0,61019	0,27088	0,15237	0,12599
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,22949	0,23421	0,23946	0,24525	0,24772
Fator de potência [%]	-0,90514	-0,73532	-0,62566	-0,56729	-0,55228
Perdas Joule totais no estator [%]	1,35518	0,78612	0,47410	0,30804	0,26429
Perdas Joule totais no rotor [%]	11,54236	2,87078	1,27227	0,71522	0,59131
Perdas totais no ferro [%]	0,45950	0,46897	0,47949	0,49110	0,49605

Potência total transferida entreferro [%]	0,14081	0,07111	0,04802	0,03659	0,03351
Perdas totais [%]	0,94585	0,80380	0,64218	0,50113	0,45344
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,01280	-0,00646	-0,00437	-0,00333	-0,00305
Potência mecânica total [%]	-0,01280	-0,00646	-0,00437	-0,00333	-0,00305
Potência ativa total de entrada [%]	0,26164	0,15111	0,10644	0,08243	0,07570
Potência reativa total no estator [%]	14,90695	8,64728	5,21505	3,38844	2,90723
Potência reativa total no rotor [%]	54,13847	13,46517	5,96748	3,35469	2,77351
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,16709	0,17053	0,17436	0,17858	0,18038
Potência reativa total de entrada [%]	1,40992	1,34662	1,24246	1,11623	1,06358
Potência aparente total de entrada [%]	1,17743	0,89300	0,73670	0,65343	0,63147
Rendimento [%]	-0,27372	-0,15734	-0,11069	-0,08569	-0,07869

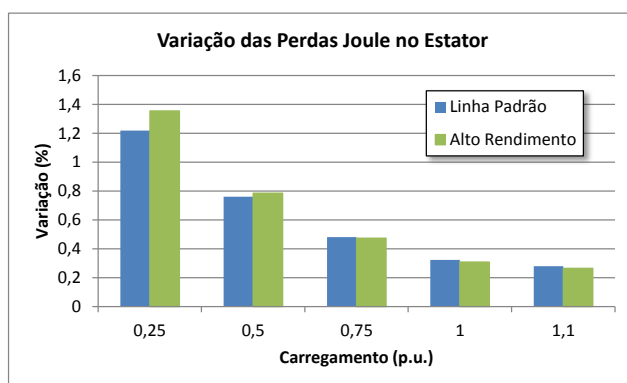


Figura 5.35 – Variação das perdas joule no estator para 10% de 11º harmônico.

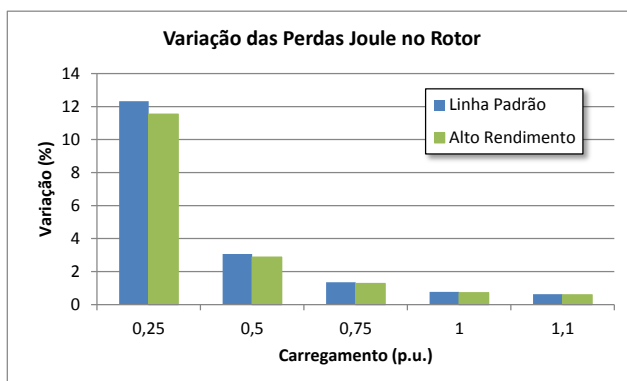


Figura 5.36 – Variação das perdas joule no rotor para 10% de 11º harmônico.

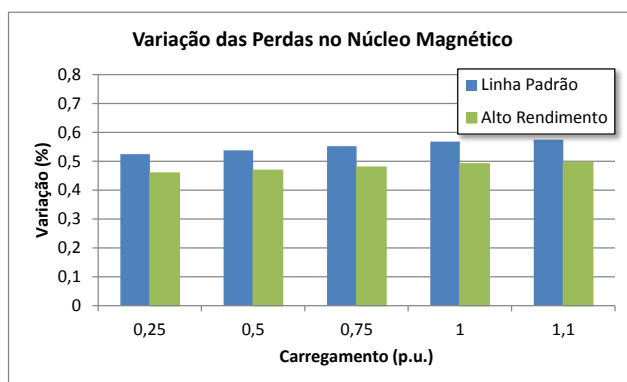


Figura 5.37 – Variação das perdas no núcleo magnético para 10% de 11º harmônico.

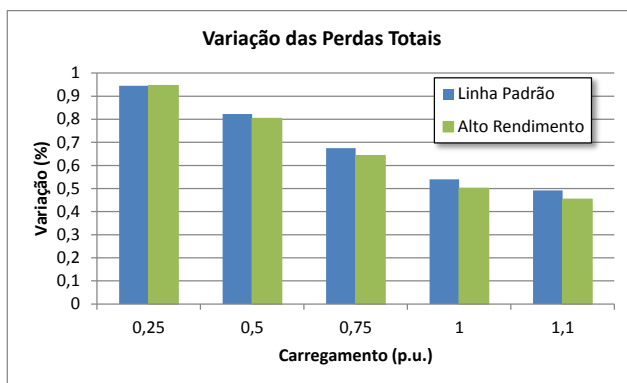


Figura 5.38 – Variação das perdas totais para 10% de 11º harmônico.

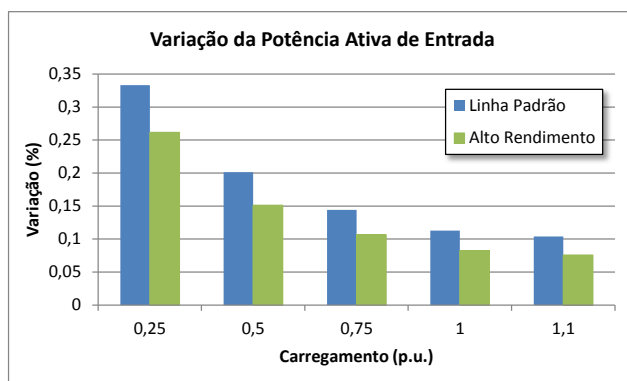


Figura 5.39 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 10% de 11º harmônico.

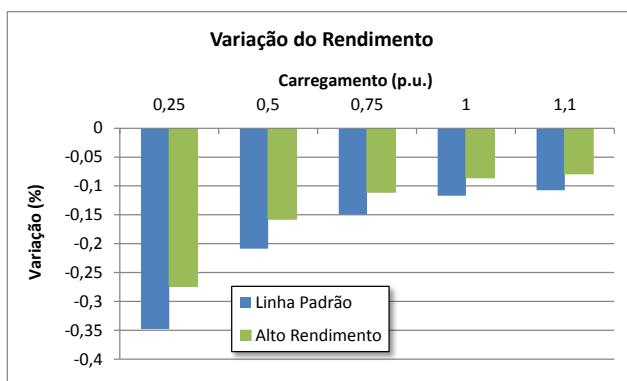


Figura 5.40 – Variação do rendimento para 10% de 11º harmônico.

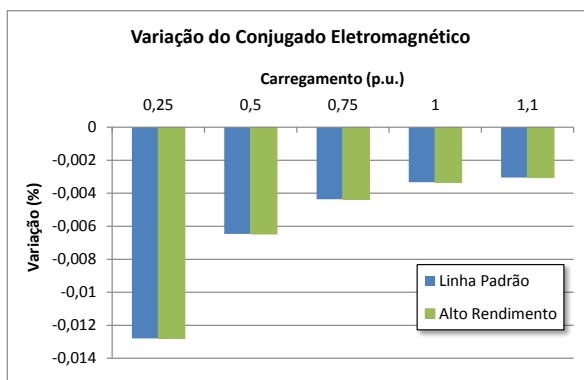


Figura 5.41 – Variação do conjugado eletromagnético para 10% de 11º harmônico.

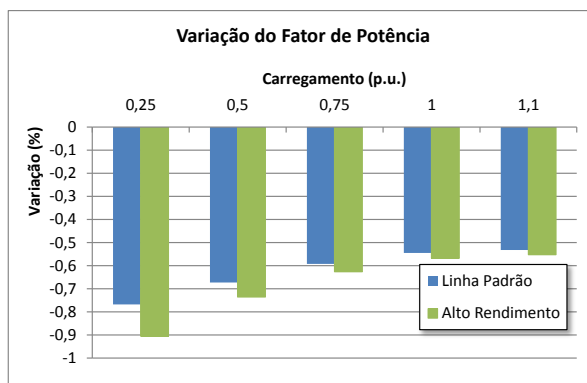


Figura 5.42 – Variação do fator de potência para 10% de 11º harmônico.

As simulações para esta condição mostram que há pouca influência nas perdas e rendimento. Ainda, se for feito um paralelo com o mesmo nível de distorção para o 5º e 7º harmônicos, poderá ser notado que as variações calculadas são inferiores às duas condições citadas, explicado pelo aumento da impedância harmônica dos motores com o aumento da frequência.

Com relação à comparação entre o motor da linha padrão com o de alto rendimento, pode ser afirmado que para as perdas com exceção das perdas joule no estator, o motor de alto rendimento obteve menores variações das grandezas do que o motor da linha padrão. A variação do conjugado notada é semelhante para ambos os motores. O fator de potência no motor de alto rendimento sofreu maior variação pois esta grandeza depende do valor eficaz da corrente que percorre o circuito do motor e, esta sofre uma variação superior à observada no motor da linha padrão.

5.2.3.6 SIMULAÇÕES APLICANDO 20% DE 11º HARMÔNICO

Serão apresentados os resultados referentes à simulação com 20% de 11º harmônico.

Tabela 5.13 – Variação da performance do motor da linha padrão para 20% de 11º harmônico.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039
Corrente eficaz no estator [%]	2,40886	1,50924	0,95856	0,64260	0,55618
Corrente eficaz no rotor [%]	10,01031	2,58191	1,15224	0,64896	0,53662
Tensão eficaz no entreferro [%]	1,04421	1,07024	1,09866	1,12954	1,14259
Fator de potência [%]	-2,97226	-2,62247	-2,31240	-2,12857	-2,07941
Perdas Joule totais no estator [%]	4,87574	3,04125	1,92630	1,28932	1,11546
Perdas Joule totais no rotor [%]	49,30257	12,26654	5,43560	3,05377	2,52370

Perdas totais no ferro [%]	2,09932	2,15194	2,20939	2,27183	2,29824
Potência total transferida entreferro [%]	0,68702	0,34785	0,23546	0,17980	0,16476
Perdas totais [%]	3,78096	3,28950	2,70001	2,15755	1,96790
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,06246	-0,03162	-0,02141	-0,01635	-0,01498
Potência mecânica total [%]	-0,06246	-0,03162	-0,02141	-0,01635	-0,01498
Potência ativa total de entrada [%]	1,33281	0,80475	0,57713	0,45104	0,41520
Potência reativa total no estator [%]	53,63308	33,45374	21,18929	14,18256	12,27001
Potência reativa total no rotor [%]	231,24960	57,53520	25,49524	14,32343	11,83720
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,76339	0,78252	0,80341	0,82612	0,83572
Potência reativa total de entrada [%]	5,27484	5,10624	4,79238	4,38491	4,20811
Potência aparente total de entrada [%]	4,43695	3,51952	2,95793	2,63571	2,54759
Rendimento [%]	-1,37692	-0,82970	-0,59510	-0,46529	-0,42840

Tabela 5.14 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 20% de 11º harmônico.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039
Corrente eficaz no estator [%]	2,67459	1,56006	0,94374	0,61419	0,52720
Corrente eficaz no rotor [%]	9,40142	2,41896	1,07917	0,60810	0,50301
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,91482	0,93358	0,95442	0,97742	0,98723
Fator de potência [%]	-3,49678	-2,86460	-2,44511	-2,21918	-2,16081
Perdas Joule totais no estator [%]	5,42071	3,14446	1,89638	1,23216	1,05717
Perdas Joule totais no rotor [%]	46,16944	11,48313	5,08909	2,86089	2,36526
Perdas totais no ferro [%]	1,83800	1,87587	1,91796	1,96439	1,98421
Potência total transferida entreferro [%]	0,56325	0,28444	0,19209	0,14637	0,13402
Perdas totais [%]	3,78340	3,21520	2,56873	2,00450	1,81376
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,05120	-0,02586	-0,01746	-0,01331	-0,01218
Potência mecânica total [%]	-0,05120	-0,02586	-0,01746	-0,01331	-0,01218
Potência ativa total de entrada [%]	1,04654	0,60444	0,42576	0,32972	0,30281
Potência reativa total no estator [%]	59,62781	34,58911	20,86020	13,55374	11,62891
Potência reativa total no rotor [%]	216,55390	53,86067	23,86993	13,41877	11,09405
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,66837	0,68214	0,69744	0,71432	0,72153
Potência reativa total de entrada [%]	5,63967	5,38650	4,96984	4,46493	4,25431
Potência aparente total de entrada [%]	4,70795	3,57135	2,94282	2,60675	2,51803
Rendimento [%]	-1,08638	-0,62651	-0,44134	-0,34190	-0,31404

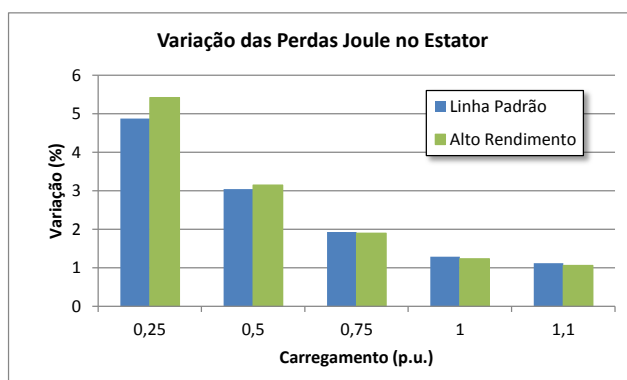


Figura 5.43 – Variação das perdas joule no estator para 20% de 11º harmônico.

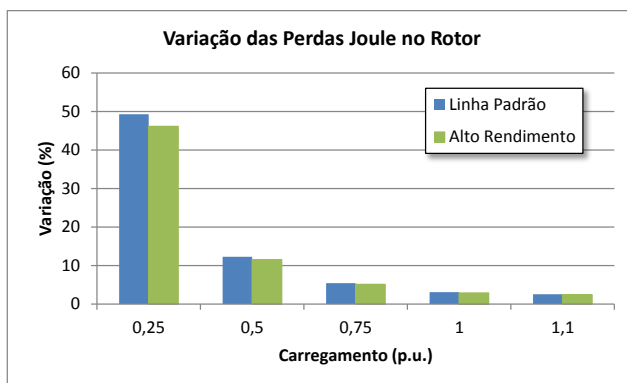


Figura 5.44 – Variação das perdas joule no rotor para 20% de 11º harmônico.

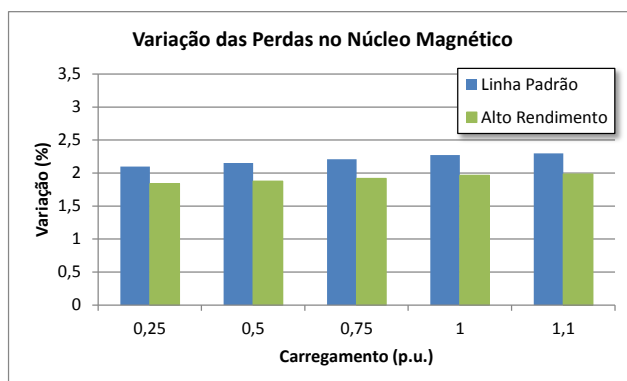


Figura 5.45 – Variação das perdas no núcleo magnético para 20% de 11º harmônico.

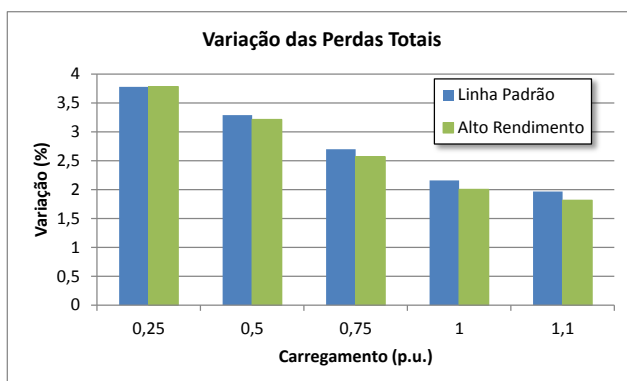


Figura 5.46 – Variação das perdas totais para 20% de 11º harmônico.

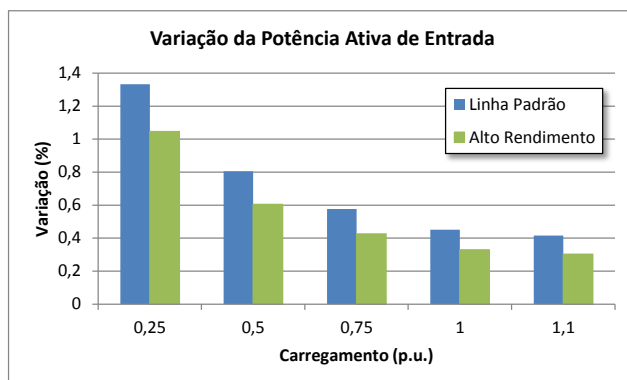


Figura 5.47 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 20% de 11º harmônico.

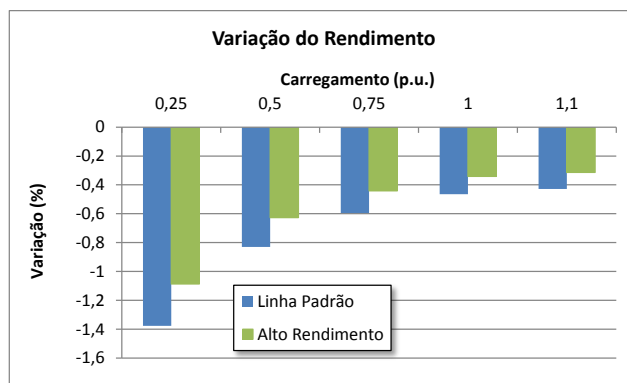


Figura 5.48 – Variação do rendimento para 20% de 11º harmônico.

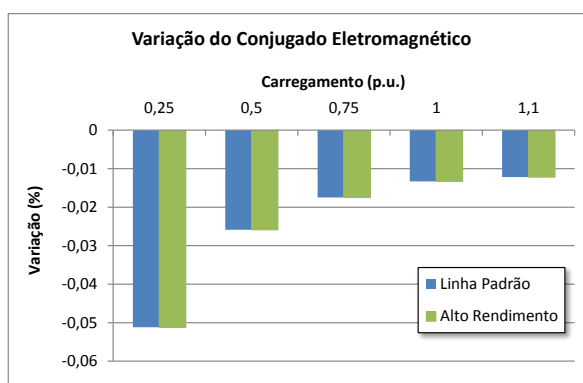


Figura 5.49 – Variação do conjugado eletromagnético desenvolvido para 20% de 11º harmônico.

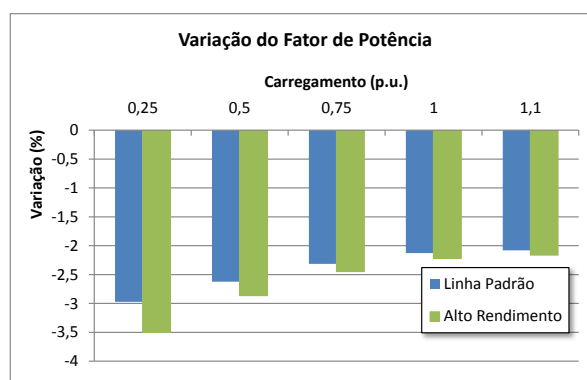


Figura 5.50 – Variação do fator de potência para 20% de 11º harmônico.

Os resultados obtidos para esta simulação mostram que para carregamentos superiores a 50%, as perdas totais sofrem variação máxima de 3,5%, o que representa aproximadamente a metade do que é notado para mesma DTT de 5º harmônico, por exemplo.

No que tange as perdas e o rendimento, o motor de alto rendimento apresenta comportamento mais adequado do que o motor da linha padrão. Entretanto, novamente o fator de potência se mostra mais afetado no motor de alto rendimento, explicado pela variação maior do valor eficaz da corrente de estator.

5.2.3.7 SIMULAÇÃO APLICANDO 10% DE 13º HARMÔNICO

Esta ordem harmônica é presente em ambientes industriais porém, geralmente em menor proporção em relação à fundamental. Além disso, é uma ordem harmônica de sequência positiva.

A Tabela 5.15 e Tabela 5.16 apresenta os resultados para estas simulações.

Tabela 5.15 – Variação da performance do motor da linha padrão para 10% de 13º harmônico.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876
Corrente eficaz no estator [%]	0,43944	0,27433	0,17384	0,11639	0,10070
Corrente eficaz no rotor [%]	1,86143	0,46637	0,20694	0,11632	0,09614
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,26219	0,26875	0,27591	0,28369	0,28698
Fator de potência [%]	-0,62841	-0,58527	-0,53754	-0,50929	-0,50189
Perdas Joule totais no estator [%]	0,88082	0,54941	0,34799	0,23291	0,20150
Perdas Joule totais no rotor [%]	9,57982	2,38359	1,05628	0,59346	0,49046
Perdas totais no ferro [%]	0,52506	0,53821	0,55258	0,56819	0,57479
Potência total transferida entreferro [%]	0,15736	0,07947	0,05365	0,04086	0,03740
Perdas totais [%]	0,82186	0,71504	0,58691	0,46899	0,42777
Conjugado eletromagnético resultante [%]	0,01210	0,00611	0,00413	0,00314	0,00288
Potência mecânica total [%]	0,01210	0,00611	0,00413	0,00314	0,00288
Potência ativa total de entrada [%]	0,30607	0,18464	0,13230	0,10330	0,09506
Potência reativa total no estator [%]	11,45064	7,14229	4,52382	3,02788	2,61955
Potência reativa total no rotor [%]	48,84766	12,15397	5,38600	3,02606	2,50086
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,16156	0,16560	0,17002	0,17483	0,17686
Potência reativa total de entrada [%]	1,11817	1,08246	1,01595	0,92959	0,89212
Potência aparente total de entrada [%]	0,94039	0,77445	0,67347	0,61573	0,59996
Rendimento [%]	-0,29307	-0,17820	-0,12800	-0,10005	-0,09209

Tabela 5.16 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 10% de 13º harmônico.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876	0,49876
Corrente eficaz no estator [%]	0,48648	0,28249	0,17046	0,11079	0,09506
Corrente eficaz no rotor [%]	1,74460	0,43676	0,19380	0,10900	0,09012
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,22957	0,23429	0,23954	0,24533	0,24780
Fator de potência [%]	-0,74100	-0,63953	-0,56905	-0,53165	-0,52215
Perdas Joule totais no estator [%]	0,97533	0,56577	0,34121	0,22170	0,19021
Perdas Joule totais no rotor [%]	8,97336	2,23190	0,98916	0,55609	0,45976
Perdas totais no ferro [%]	0,45967	0,46913	0,47965	0,49126	0,49621
Potência total transferida entreferro [%]	0,12909	0,06504	0,04382	0,03331	0,03047
Perdas totais [%]	0,81132	0,68948	0,55085	0,42986	0,38896

Conjugado eletromagnético resultante [%]	0,00993	0,00500	0,00337	0,00256	0,00234
Potência mecânica total [%]	0,00993	0,00500	0,00337	0,00256	0,00234
Potência ativa total de entrada [%]	0,23935	0,13812	0,09720	0,07520	0,06904
Potência reativa total no estator [%]	12,67929	7,35502	4,43570	2,88205	2,47275
Potência reativa total no rotor [%]	45,75535	11,38050	5,04377	2,83551	2,34431
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,14144	0,14435	0,14759	0,15116	0,15268
Potência reativa total de entrada [%]	1,19446	1,14086	1,05263	0,94570	0,90109
Potência aparente total de entrada [%]	0,98766	0,78265	0,67006	0,61010	0,59429
Rendimento [%]	-0,22887	-0,13293	-0,09374	-0,07259	-0,06665

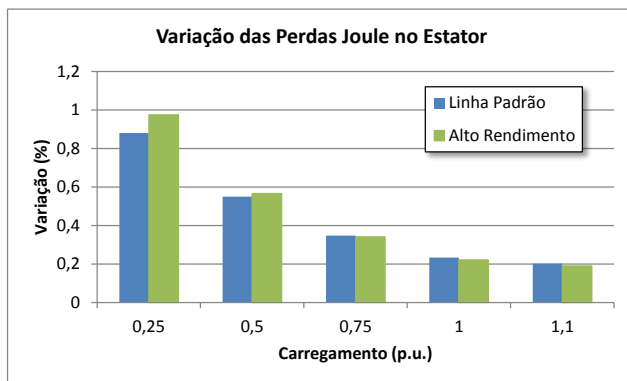


Figura 5.51 – Variação das perdas joule no estator para 10% de 13º harmônico.

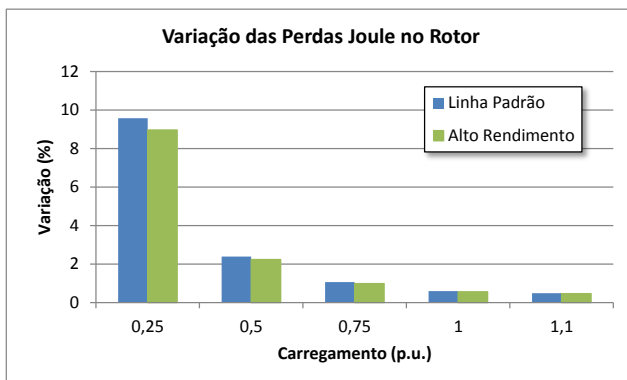


Figura 5.52 – Variação das perdas joule no rotor para 10% de 13º harmônico.

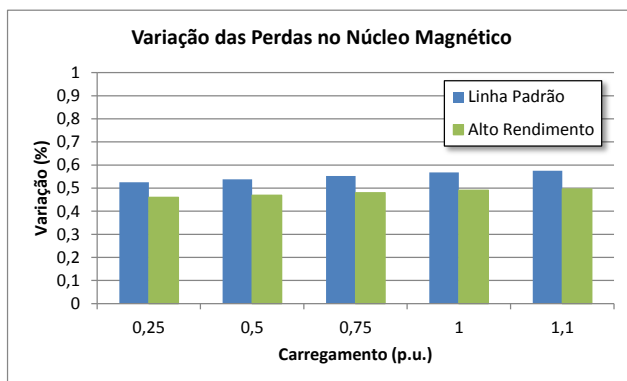


Figura 5.53 – Variação das perdas no núcleo magnético para 10% de 13º harmônico.

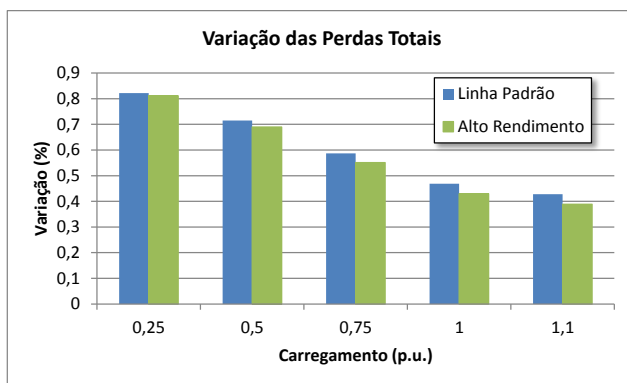


Figura 5.54 – Variação das perdas totais para 10% de 13º harmônico.

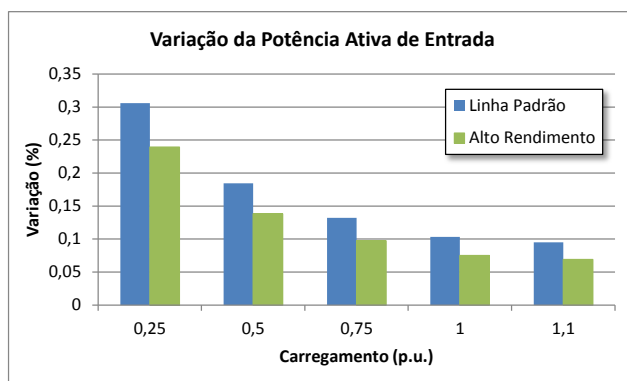


Figura 5.55 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 10% de 13º harmônico.

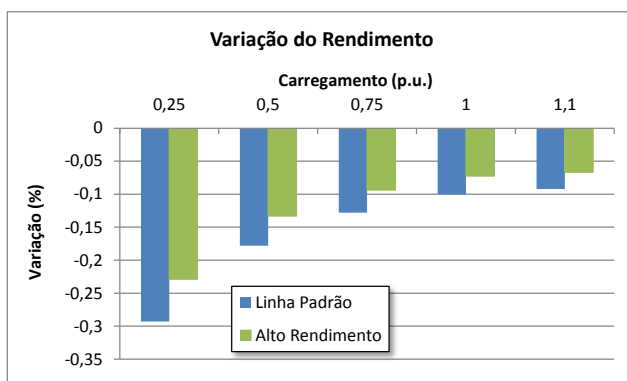


Figura 5.56 – Variação do rendimento para 10% de 13º harmônico.

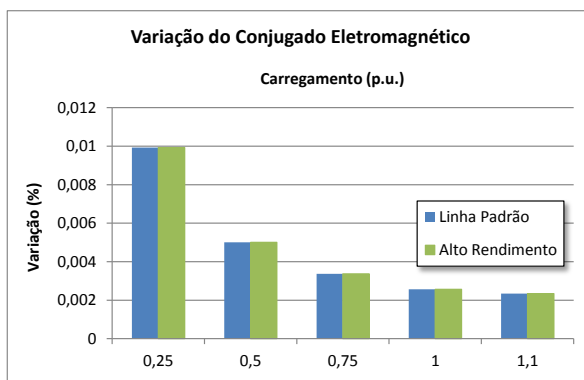


Figura 5.57 – Variação do conjugado eletromagnético para 10% de 13º harmônico.

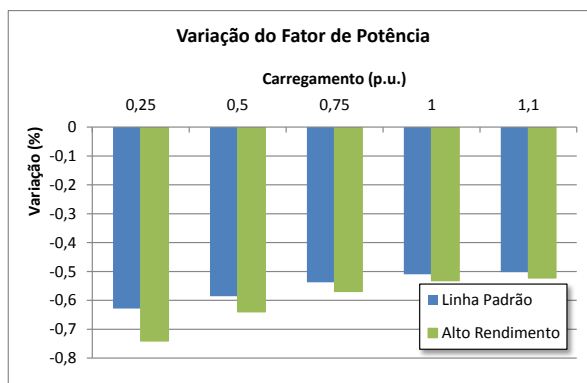


Figura 5.58 – Variação do fator de potência para 10% de 13º harmônico.

Como nas simulações para 11º harmônico, os resultados obtidos para análise dos efeitos do 13º harmônico nos motores se mostram como sendo de pequena influência uma vez que a impedância harmônica das máquinas teve seu valor incrementado com a frequência. Novamente, as perdas e rendimento no motor de alto rendimento são menos afetados. Contudo, o fator de potência para este motor continua sofrendo maiores alterações do que o do motor da linha padrão.

5.2.3.8 SIMULAÇÕES APLICANDO 20% DE 13º HARMÔNICO

Este é um caso apenas para averiguar uma situação com alta ordem harmônica e alta DTI.

Tabela 5.17 – Variação da performance do motor da linha padrão para 20% de 13º harmônico.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039
Corrente eficaz no estator [%]	1,74639	1,09284	0,69357	0,46475	0,40220
Corrente eficaz no rotor [%]	7,25206	1,85268	0,82521	0,46447	0,38401
Tensão eficaz no entreferro [%]	1,04466	1,07070	1,09911	1,12999	1,14304
Fator de potência [%]	-2,44512	-2,28556	-2,10200	-1,99224	-1,96339
Perdas Joule totais no estator [%]	3,52327	2,19763	1,39194	0,93166	0,80602
Perdas Joule totais no rotor [%]	38,31926	9,53436	4,22512	2,37383	1,96183
Perdas totais no ferro [%]	2,10024	2,15285	2,21030	2,27274	2,29915
Potência total transferida entreferro [%]	0,62946	0,31789	0,21461	0,16343	0,14959
Perdas totais [%]	3,28743	2,86015	2,34762	1,87598	1,71109
Conjugado eletromagnético resultante [%]	0,04842	0,02445	0,01651	0,01257	0,01151
Potência mecânica total [%]	0,04842	0,02445	0,01651	0,01257	0,01151
Potência ativa total de entrada [%]	1,22427	0,73858	0,52920	0,41320	0,38022
Potência reativa total no estator [%]	45,80256	28,56916	18,09527	12,11152	10,47822

Potência reativa total no rotor [%]	195,39060	48,61587	21,54398	12,10423	10,00342
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,64623	0,66242	0,68009	0,69930	0,70743
Potência reativa total de entrada [%]	4,47269	4,32983	4,06379	3,71836	3,56847
Potência aparente total de entrada [%]	3,76136	3,09488	2,68769	2,45434	2,39056
Rendimento [%]	-1,16163	-0,70889	-0,50999	-0,39898	-0,36732

Tabela 5.18 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 20% de 13º harmônico.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Tensão eficaz no estator [%]	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039	1,98039
Corrente eficaz no estator [%]	1,93200	1,12521	0,68010	0,44241	0,37970
Corrente eficaz no rotor [%]	6,80757	1,73578	0,77298	0,43528	0,36001
Tensão eficaz no entreferro [%]	0,91515	0,93391	0,95475	0,97774	0,98755
Fator de potência [%]	-2,87950	-2,49731	-2,22566	-2,08017	-2,04309
Perdas Joule totais no estator [%]	3,90132	2,26308	1,36483	0,88678	0,76085
Perdas Joule totais no rotor [%]	35,89345	8,92760	3,95666	2,22436	1,83903
Perdas totais no ferro [%]	1,83867	1,87653	1,91861	1,96504	1,98485
Potência total transferida entreferro [%]	0,51636	0,26018	0,17530	0,13326	0,12190
Perdas totais [%]	3,24528	2,75791	2,20341	1,71943	1,55583
Conjugado eletromagnético resultante [%]	0,03972	0,02001	0,01348	0,01025	0,00938
Potência mecânica total [%]	0,03972	0,02001	0,01348	0,01025	0,00938
Potência ativa total de entrada [%]	0,95739	0,55246	0,38879	0,30081	0,27615
Potência reativa total no estator [%]	50,71714	29,42009	17,74278	11,52819	9,89100
Potência reativa total no rotor [%]	183,02140	45,52201	20,17507	11,34203	9,37722
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,56575	0,57740	0,59034	0,60463	0,61072
Potência reativa total de entrada [%]	4,77784	4,56342	4,21050	3,78279	3,60437
Potência aparente total de entrada [%]	3,95065	3,12789	2,67396	2,43157	2,36761
Rendimento [%]	-0,90897	-0,52952	-0,37385	-0,28969	-0,26604

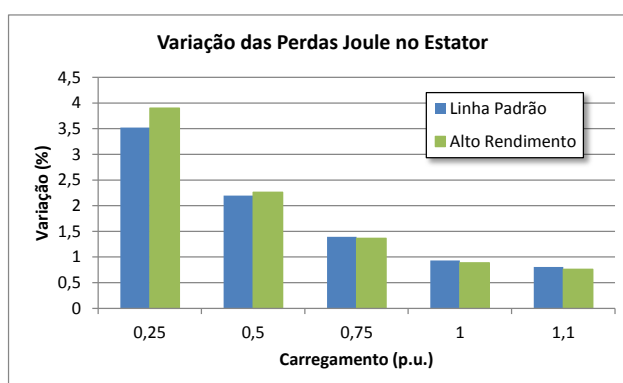


Figura 5.59 – Variação das perdas joule no estator para 20% de 13º harmônico.

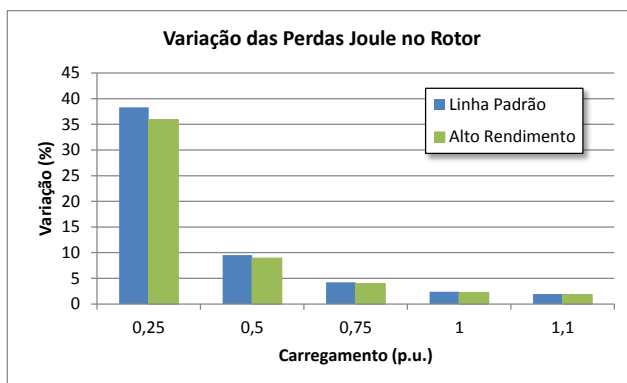


Figura 5.60 – Variação das perdas joule no rotor para 20% de 13º harmônico.

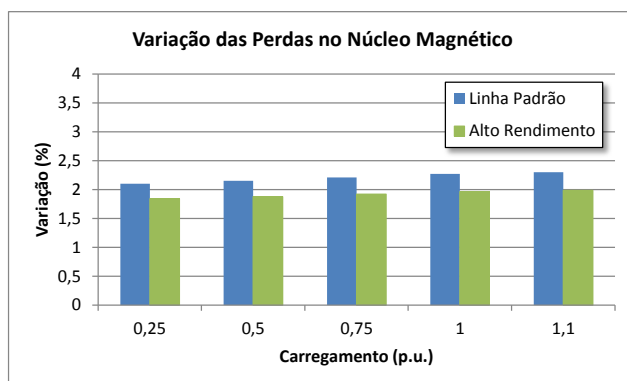


Figura 5.61 – Variação das perdas no núcleo magnético para 20% de 13º harmônico.

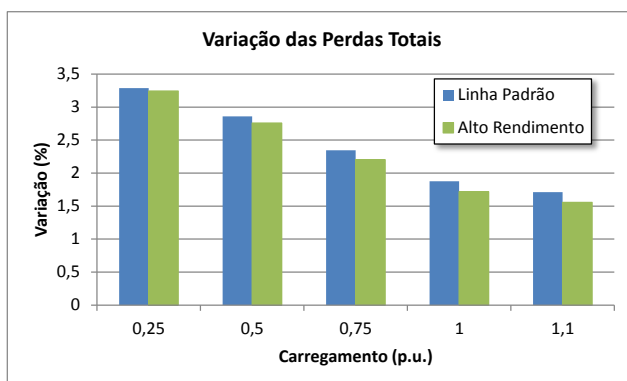


Figura 5.62 – Variação das perdas totais para 20% de 13º harmônico.

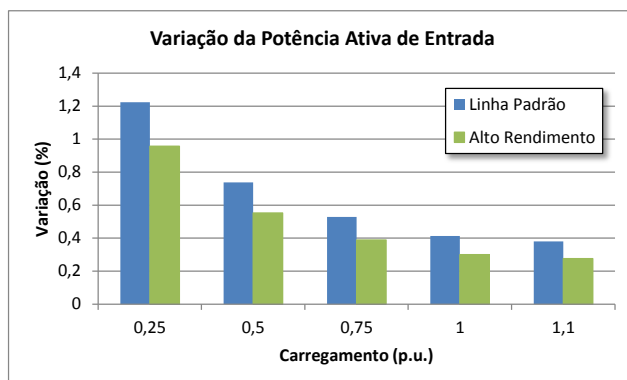


Figura 5.63 – Variação da potência ativa trifásica de entrada para 20% de 13º harmônico.

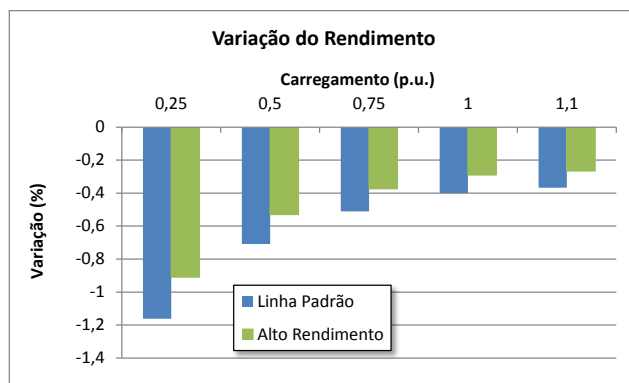


Figura 5.64 – Variação do rendimento para 20% de 13º harmônico.

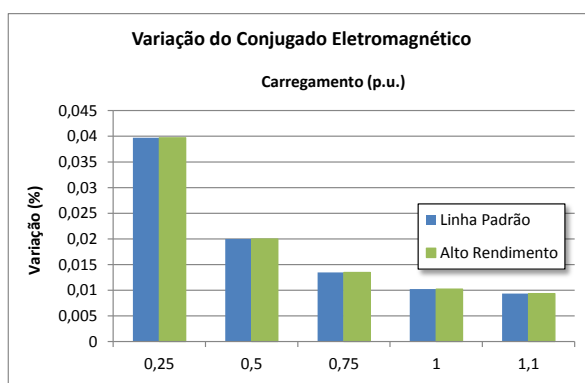


Figura 5.65 – Variação do conjugado eletromagnético para 20% de 13º harmônico.

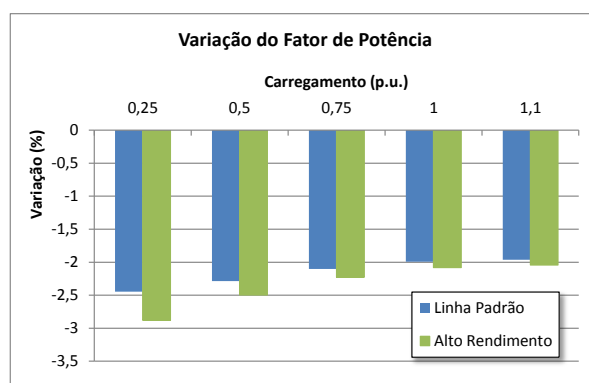


Figura 5.66 – Variação do fator de potência para 20% de 13º harmônico.

Nesta última etapa de simulações, como foi dobrada a distorção total de tensão em relação ao caso anterior, as variações observadas quadruplicaram. Porém este é um caso muito particular pois é referente a um índice alto de harmônicos, 20%, em uma frequência já considerada elevada. Não que seja um fato impossível de ocorrer, mas cuja existência é de baixa probabilidade.

Ainda, as variações observadas, comparando-se para a mesma DTT com os harmônicos inferiores, foram as menores, justamente pela elevada impedância harmônica dos motores.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações com tensões harmônicas foram selecionadas de modo que as análises pudessem ser feitas sobre cada ordem separadamente, sem que uma ordem harmônica influenciasse a outra.

Foram feitas simulações aplicando separadamente 5°, 7°, 11° e 13° harmônicos nos circuitos dos motores, com diferentes DTT's. É importante citar que a Distorção Total de Tensão, como o próprio nome diz, leva em consideração todas as ordens harmônicas presentes na tensão de alimentação de um equipamento. Como foi aplicada em cada simulação uma única ordem harmônica, apesar de individual, a Distorção Harmônica Individual de Tensão (DIT) se torna igual à Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT).

Preferiu-se a apresentação de gráficos de variações das grandezas para que a noção de alteração de comportamento pudesse ser melhor visualizada.

Os resultados mostraram que à medida que o carregamento dos motores diminui, as variações notadas devido aos harmônicos aumentam. Como explicado anteriormente, a variação do ponto de carga através do escorregamento fundamental pouco influencia no escorregamento harmônico, que é praticamente unitário ao longo de toda a faixa de operação dos motores. Dessa forma, como a referência, que é a frequência fundamental, varia de maneira mais significativa e os resultados de harmônicos praticamente permanecem constantes, para menores valores de referência, os dados harmônicos são mais consideráveis.

Ainda, foi notado que harmônicos de ordens inferiores alteram de maneira mais notável o comportamento dos motores. Esse fato é explicado pela alteração da impedância harmônica dos circuitos equivalentes adotados, de modo que para baixas frequências a impedância é menor e assim as correntes são maiores, influenciando diretamente os valores das perdas, rendimento, fator de potência, etc.

Em comparação entre os motores estudados, o motor de alto rendimento sofre menores alterações no seu comportamento de operação em relação ao motor da linha padrão, com exceção das perdas no estator. Estas perdas se mostram com variações próximas de um motor para outro, porém, para carregamentos superiores a 50%, as mesmas são menores do motor de alto rendimento. O fator de potência também se mostra mais alterado no motor de alto rendimento, pois, esta grandeza é calculada utilizando o valor RMS da corrente de entrada dos circuitos equivalentes. Pelas tabelas apresentadas, a corrente de estator desse motor sofre mais alteração do que a do motor da linha padrão, decorrendo a uma maior variação do fator de potência.



CAPÍTULO 6 – DETERMINAÇÃO DO MODELO PARA ALIMENTAÇÃO COM DESEQUILÍBRIOS E SIMULAÇÕES

6.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo irá apresentar o modelo do motor de indução trifásico referente a uma alimentação desbalanceada, e em seguida, os resultados para as simulações aplicando 2%, 3% e 5% de desequilíbrio de tensão.

6.2 MODELO REFERENTE À ALIMENTAÇÃO COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS

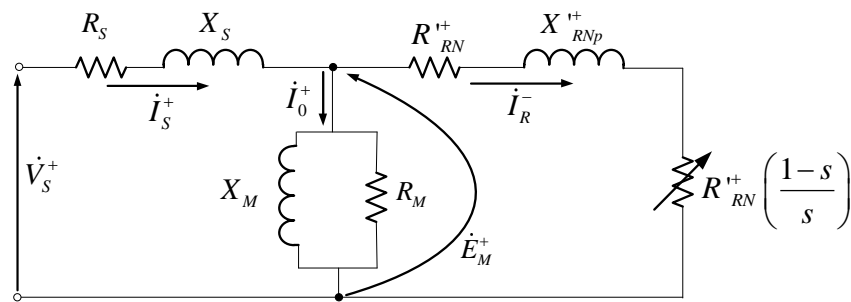
O modelo elétrico do motor de indução trifásico quando alimentado com tensões desequilibradas é obtido aplicando o método das componentes simétricas. Assim, as tensões são decompostas em sequência positiva e negativa, podendo-se analisar o comportamento do motor para essas duas condições, independentemente uma da outra. No final, o resultado total a ser obtido é a combinação dos dois resultados individuais, usando o método da superposição de efeitos. Para tanto, é necessário representar o circuito equivalente do motor no domínio da frequência na sequência positiva e outra representação também no domínio da frequência para a sequência negativa. A análise em sequência zero não é necessária, pois normalmente o motor é conectado em delta ou em estrela não aterrada. No caso da primeira ligação, há presença de correntes de sequência zero no estator, porém com valor baixo. No segundo tipo de ligação, não há circulação de corrente desta sequência. De qualquer forma, havendo ou não corrente de sequência zero no interior do motor, mesmo que apenas no estator, o fluxo magnético resultante dessa sequência é nulo pois, ou as correntes estão em fase, produzindo um campo espacialmente simétrico que se anula, ou não há a presença de campo magnético [14] [23].

Novamente, as mesmas considerações feitas para a modelagem em tensões ideais são feitas aqui, isto é:

- Enrolamentos do motor são espacialmente simétricos, isto é, defasados de 120° no espaço entre si;
- Tensões e correntes puramente senoidais;
- Distribuição senoidal do fluxo magnético principal;
- Circuito equivalente do rotor referido ao estator;

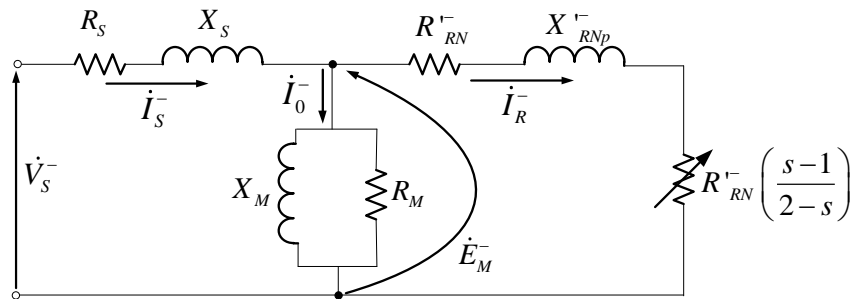
- Desconsidera-se a saturação do núcleo magnético, ou seja, o comportamento do motor é linear;
- O entreferro da máquina é totalmente uniforme.

Feitas as considerações necessárias, agora é possível obter os circuitos equivalentes para cada sequência de fase e o equacionamento dos mesmos a fim de se verificar o comportamento das perdas elétricas, conjugado desenvolvido e rendimento, quando da alimentação com tensões desequilibradas. Os circuitos para as duas sequências são ilustrados a seguir:



Fonte: Autor, baseado em [14].

Figura 6.1 – Circuito equivalente para sequência positiva.



Fonte: Autor, baseado em [14].

Figura 6.2 – Circuito equivalente para sequência negativa.

Analisando os dois circuitos, observa-se que existem parâmetros que são específicos para cada modelo, mostrando então a necessidade de correção destes para cada condição dada.

Para a sequência positiva, o modelo a ser usado é o mesmo para alimentação ideal, pois além de se considerar esta sequência como sendo um sistema trifásico de tensões equilibradas, a mesma determina o sentido de rotação do motor, predominando sobre o comportamento do mesmo. Os parâmetros, para este modelo são os mesmos obtidos através de dados do fabricante para a alimentação ideal, podendo ainda ser obtidos através de ensaios.

6.2.1 CORREÇÃO DOS PARÂMETROS DO CIRCUITO EQUIVALENTE EM FUNÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FASES

A análise do circuito equivalente com tensões desequilibradas, como mencionado anteriormente, parte do princípio que há um campo girante principal com o sentido de rotação definido pelas tensões de sequência positiva e, outro campo girante cujo sentido é definido pelas tensões de sequência negativa. Assim, como há dois circuitos em duas condições distintas, deve-se avaliar a necessidade de correção dos parâmetros para a condição em questão, seja de sequência positiva, seja de sequência negativa.

Para a sequência positiva, o circuito apresenta as mesmas características quando do funcionamento sob alimentação ideal, e, conseqüentemente, não necessita de adaptações nos seus parâmetros.

Entretanto, para a sequência negativa, alguns parâmetros merecem atenção. O circuito do estator e do ramo magnetizante não necessitam de correção pois, apesar do fluxo magnético apresentar sentido oposto ao fluxo principal, o mesmo não muda de frequência, e dessa forma, não influencia nos parâmetros destas duas partes do circuito equivalente. Ainda, segundo [24], as perdas no núcleo magnético e mecânicas não sofrem influência relevante quando as tensões de alimentação possuem fatores de desequilíbrio inferiores à 15%, como é o objeto de estudo deste trabalho. Quanto ao circuito do rotor, os parâmetros necessitam de correção devido ao aumento da frequência dos sinais em relação à parte girante, que agora chega a ser aproximadamente de 120 Hz, uma vez que o rotor gira no sentido do campo principal, e o fluxo magnético de sequência negativa gira em sentido oposto a este, porém, a 60 Hz. Adiante, será tratada como se dá esta correção.

6.2.1.1 RESISTÊNCIA DAS BARRAS DO ROTOR

No funcionamento com tensões desequilibradas há internamente ao motor um campo magnético que gira no sentido contrário ao da rotação do rotor. Esse campo faz com que tensões sejam induzidas no rotor a uma frequência de praticamente o dobro da frequência do campo principal. Assim, a priori, há ocorrência do efeito pelicular e dessa forma pode ser conveniente corrigir o valor da resistência do rotor em função dessa frequência de aproximadamente 120 [Hz]. Em [14] e [25] é apresentado um equacionamento utilizado para aproximação do valor da resistência do rotor no caso do funcionamento com escorregamento

compreendido entre 0 e 1, ou seja, entre a condição à vazio e a condição de partida. Em [14] é realizada uma extrapolação para escorregamento entre 1 e 2. Como para a sequência negativa o escorregamento é próximo de 2, é questionável a utilização desse equacionamento.

Em [24] os autores apresentam uma aproximação para a variação da resistência do rotor em função da frequência. Segundo os mesmos, a variação da resistência se dá proporcionalmente à razão entre a resistência do rotor na partida e em regime permanente. Ainda, é mostrado que esta relação é matematicamente próxima de:

$$\frac{R_{Rp}}{R_{RNp}} \cong \sqrt{f_R} \quad (6.1)$$

Isso exposto, será utilizada a aproximação dada pela equação (6.1) para a correção da resistência do rotor em função da frequência para o circuito de sequência negativa dos motores de indução em estudo.

6.2.1.2 REATÂNCIA DE DISPERSÃO DO ROTOR

A reatância de dispersão do rotor possui uma dependência com a indutância e com a frequência a qual esta indutância é submetida. Assim, em diversas referências foi notado que a indutância de dispersão do rotor sofre uma pequena variação em função da frequência.

Durante a operação com tensões desequilibradas, em particular com tensões de sequência negativa, o rotor gira no sentido oposto ao campo girante produzido por estas tensões. Sendo assim, como as tensões de sequência negativa consideradas possuem a mesma frequência da sequência positiva, aparecem no rotor tensões induzidas a uma frequência de aproximadamente o dobro da frequência da sequência positiva. Segundo [24], para uma frequência de 120 [Hz], o que representa 2 p.u. em relação à frequência nominal, a redução da indutância é pequena, o que leva a desconsiderar esta variação. Porém, como dito anteriormente, a frequência das tensões e correntes induzidas no rotor é praticamente o dobro se comparada à frequência fundamental. Com isso, conclui-se que é conveniente corrigir a reatância de dispersão para uma frequência de 120 [Hz], isto é, será considerada como reatância de dispersão do rotor para sequência negativa, o dobro do valor da reatância de dispersão referente à sequência positiva, como mostrado abaixo:

$$X_{RNp}^- = 2 * X_{RNp}^+ \quad (6.2)$$

6.2.2 RESOLUÇÃO DO CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ALIMENTAÇÃO CONTENDO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Determinando os parâmetros para a sequência positiva, inicia-se pela impedância do estator:

$$\dot{Z}_S^+ = R_S + jX_S \quad (6.3)$$

A impedância do rotor, referida ao estator, é dada por:

$$\dot{Z}_R^+ = \frac{R_{RN}^+}{s} + jX_{RNp}^+ \quad (6.4)$$

A impedância do ramo de magnetização é obtida pela associação em paralelo entre a resistência que representa as perdas no núcleo magnético, mecânicas e suplementares e a reatância de magnetização, sendo então, dada por:

$$\dot{Z}_M = \frac{jR_M \cdot X_M}{R_M + jX_M} \quad (6.5)$$

Para a sequência de fases positiva, a impedância equivalente do motor é dada pela associação série da impedância do estator com o paralelo entre as impedâncias de magnetização e do rotor:

$$\dot{Z}_{eq}^+ = \dot{Z}_S^+ + \frac{\dot{Z}_M \cdot \dot{Z}_R^+}{\dot{Z}_R^+ + \dot{Z}_M} \quad (6.6)$$

A corrente que é absorvida pelo estator, de sequência positiva é dada por:

$$\dot{I}_S^+ = \frac{\dot{V}_S^+}{\dot{Z}_{eq}^+} \quad (6.7)$$

A tensão por fase induzida no enrolamento do rotor é dada pela diferença entre a tensão aplicada nos terminais do estator e a queda de tensão no ramo do mesmo:

$$\dot{E}_M^+ = \dot{V}_S^+ - [R_S + jX_S]\dot{I}_S^+ \quad (6.8)$$

A corrente do rotor é então obtida através de:

$$I_R^+ = \frac{\dot{E}_M^+}{\dot{Z}_R^+} \quad (6.9)$$

O próximo passo é a análise do circuito de sequência negativa. Nesta etapa deve-se considerar que o fenômeno principal que ocorre no interior da máquina de indução é a produção de um campo girante que está na mesma direção, porém em oposição ao fluxo girante principal. Assim, os sentidos de rotação do motor e do campo magnético de sequência negativa são opostos:

$$\omega_S^- = -\omega_S^+ \quad (6.10)$$

Como o rotor gira com um escorregamento s em relação à velocidade de sequência positiva, o escorregamento do mesmo em relação à velocidade de sequência negativa é dado por:

$$s^- = 2 - s \quad (6.11)$$

De acordo com os circuitos equivalentes mostrados na Figura 6.1 e Figura 6.2, a resistência do rotor é dividida em duas parcelas: uma referente às perdas joule nas barras do rotor e outra parcela relativa à carga no eixo. Como a parcela de carga depende do escorregamento do motor, para cada sequência possui uma expressão para sua determinação [14].

Para o enrolamento do estator e ramo de magnetização, os parâmetros considerados são os mesmos usados na sequência positiva:

$$\dot{Z}_S^- = \dot{Z}_S^+ = \dot{Z}_S = R_S + jX_S \quad (6.12)$$

Para o ramo de magnetização, a expressão que pode ser usada é baseada nos parâmetros de sequência positiva, considerando desequilíbrios de até 15% [14] [24] [25]. Então:

$$\dot{Z}_M^- = \dot{Z}_M^+ = \dot{Z}_M = \frac{jR_M \cdot X_M}{R_M + jX_M} \quad (6.13)$$

No enrolamento do rotor, os parâmetros sofrem variações importantes quanto à frequência da tensão induzida no mesmo, fazendo com que a impedância seja diferente em

relação à análise com sequência positiva. Considera-se então os parâmetros obtidos por aproximações no item 6.2.1 .

$$\dot{Z}_R^- = \frac{R'_{RN}}{2-s} + jX'_{RNp} \quad (6.14)$$

A impedância equivalente pode ser determinada por:

$$\dot{Z}_{eq}^- = \dot{Z}_S + \frac{\dot{Z}_M \dot{Z}_R^-}{\dot{Z}_R^- + \dot{Z}_M} \quad (6.15)$$

A corrente de sequência negativa é então determinada:

$$\dot{I}_S^- = \frac{\dot{V}_S^-}{\dot{Z}_{eq}^-} \quad (6.16)$$

Para determinação da corrente de sequência negativa que circula nas barras do rotor, antes é necessário determinar a tensão de sequência negativa que é induzida no rotor:

$$\dot{E}_M^- = \dot{V}_S^- - [R_S + jX_S]\dot{I}_S^- \quad (6.17)$$

A corrente de sequência negativa do rotor é então obtida de:

$$\dot{I}_R^- = \frac{\dot{E}_M^-}{\dot{Z}_R^-} \quad (6.18)$$

Pode-se determinar as perdas no motor à partir dos parâmetros calculados previamente. Iniciando pelas perdas joule no estator, temos:

$$P_{JS_{deseq}} = 3R_S(I_S^+)^2 + 3R_S(I_S^-)^2 \quad (6.19)$$

Em [14] são comparados duas das possíveis formas de se ocorrer os desequilíbrios de tensão. Uma delas é mantendo-se a médias das tensões trifásicas constante e variando igualmente, porém de maneira oposta, duas das tensões. A outra é fazendo com que as tensões de sequência positiva e negativa estejam em fase no tempo. Os resultados apresentados pelo autor mostram que o pior caso para o aumento das perdas é o segundo citado, o qual o aumento se dá de maneira desigual entre as fases do motor e, na fase que mais se destaca, de maneira mais pronunciada quando comparada ao primeiro método citado.

Para o rotor, as perdas joule são determinadas por:

$$P_{JR_{deseq}} = 3R'_{RN}(I_R^+)^2 + 3R'_{RN}(I_R^-)^2 \quad (6.20)$$

Nas equações (6.19) e (6.20) os valores das resistências do estator e do rotor, respectivamente, não precisam ser corrigidos para a temperatura de referência no caso dos parâmetros do motor serem obtidos através de equacionamentos utilizando os dados de placa fornecidos pelo fabricante, sendo então, valores referentes às condições nominais de operação.

Para cálculo das perdas no núcleo magnético, mecânicas e suplementares, procede-se baseando nas tensões de sequência positiva e negativa:

$$P_{fe_{deseq}} = 3 \left[\frac{|\dot{E}_M^+|^2}{R_M} + \frac{|\dot{E}_M^-|^2}{R_M} \right] \quad (6.21)$$

A potência mecânica total produzida pelo motor é determinada por:

$$P_{otmec} = 3R'_{RN}(I_R^+)^2 \left(\frac{1-s}{s} \right) - 3R'_{RN}(I_R^-)^2 \left(\frac{1-s}{2-s} \right) \quad (6.22)$$

O conjugado eletromagnético, determinado em função de grandezas de sequência positiva e negativa é:

$$C_{e_{deseq}} = \frac{180}{2\pi n_s} (I_R^+)^2 \left(\frac{R'_{RN}}{s} \right) - \frac{180}{2\pi n_s} (I_R^-)^2 \left(\frac{R'_{RN}}{2-s} \right) \quad (6.23)$$

O conjugado mecânico pode ser determinado fazendo-se uso da equação (6.24):

$$C_{e_{deseq}} = \frac{180}{2\pi n_s} (I_R^+)^2 R'_{RN} \left(\frac{1-s}{s} \right) - \frac{180}{2\pi n_s} (I_R^-)^2 R'_{RN} \left(\frac{1-s}{2-s} \right) \quad (6.24)$$

Pelas equações (6.23) e (6.24), pode-se observar a presença de um conjugado contrário ao produzido pelas correntes de sequência positiva. Considerando que a carga mecânica não varia, o comportamento do motor é de aumentar a corrente de sequência positiva, compensando o conjugado oposto da sequência negativa [14].

Para a obtenção das perdas suplementares, como dito anteriormente, há grande dificuldade na sua obtenção devido à complexidade de técnicas necessárias para tanto. Com isso, há na literatura pesquisada equações empíricas que levam a valores aproximados, mostrando ainda, proporções em relação ao estator e rotor [14]. As equações são:

$$P_{supdeseq}^{estator} = \left[\left(\frac{I_R^+}{I_R} \right)^2 + \left(\frac{I_R^-}{I_R} \right)^2 \right] P_{sup} \cdot 0,25 \quad (6.25)$$

$$P_{supdeseq}^{rotor} = \left(\frac{I_R^+}{I_R} \right)^2 P_{sup} \cdot 0,75 + \left(\frac{I_R^-}{I_R} \right)^2 P_{sup} \sqrt{2} \cdot 0,75 \quad (6.26)$$

Onde:

P_{sup} representa as perdas suplementares para alimentação equilibrada;

$P_{supdeseq}^{estator}$ representa as perdas suplementares no estator para alimentação desequilibrada;

$P_{supdeseq}^{rotor}$ representa as perdas suplementares no rotor quando da alimentação desequilibrada.

Os valores 0,25 e 0,75 indicam que 25% das perdas são produzidas no estator e os outros 75% são produzidos no rotor. O fator $\sqrt{2}$ é usado para se considerar o aumento da frequência das tensões e correntes nas barras do rotor quando há dessas grandezas em sequência negativa [14]. Na realidade, é o mesmo fator de correção para a resistência das barras do rotor, dado pela equação (5.10), onde a frequência em p.u. vale 2, pois o rotor gira no sentido oposto ao campo girante de sequência negativa.

Porém, na presente modelagem, não estão sendo contabilizadas as perdas suplementares como proveniente de um elemento de circuito elétrico dedicado, como por exemplo, uma resistência. O valor destas perdas está sendo englobado pelas perdas que ocorrem no ramo magnetizante da máquina. Sendo assim, as equações (6.25) e (6.26) são apenas para ilustração de que há métodos para se estimar o aumento das perdas suplementares em função do desequilíbrio de tensão a que um motor de indução trifásico é submetido.

O diagrama a seguir mostra o balanço energético em um motor de indução trifásico quando alimentado com tensões desequilibradas.

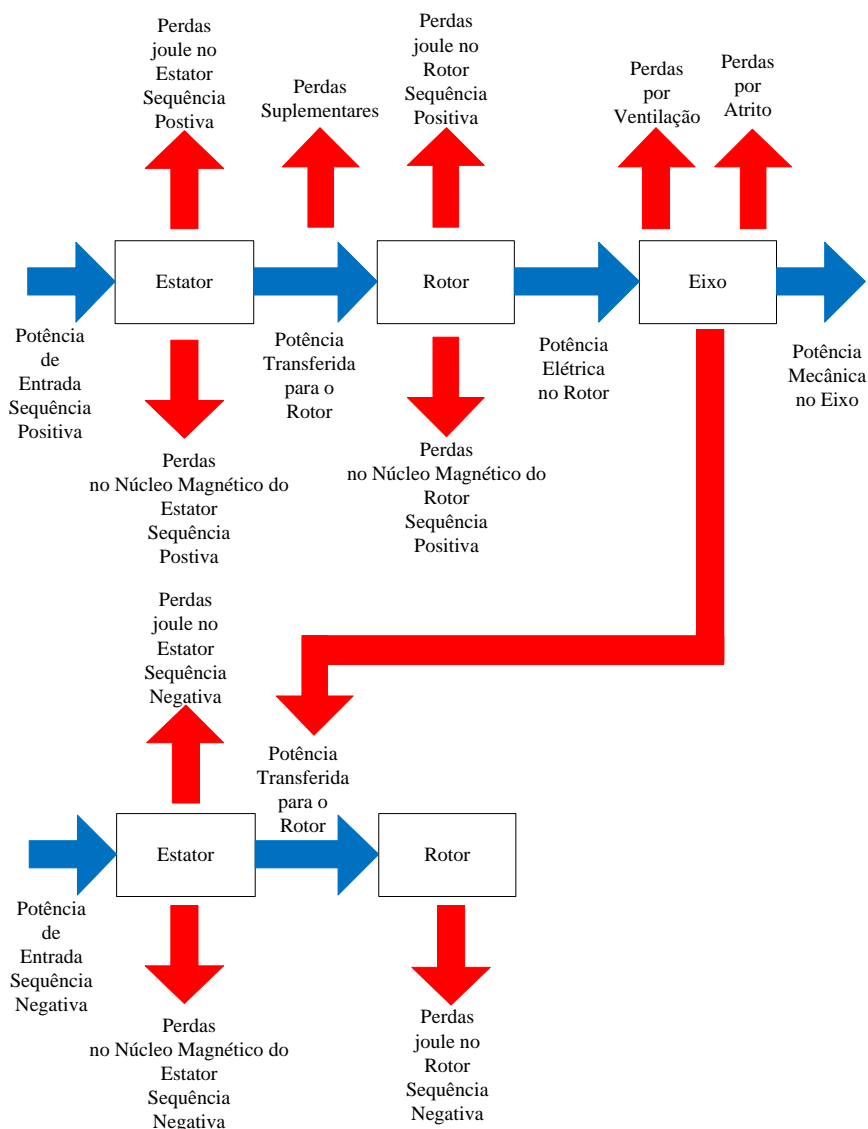


Figura 6.3 – Fluxo de potência de motores de indução alimentados com tensões desequilibradas.

6.2.3 RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados das simulações para o comportamento dos motores de indução alimentados por sistema de tensões trifásicas desequilibradas. Foi simulado um caso com 2%, outro com 3% e um último caso com 5% de desequilíbrio.

Em [10] é especificado o limite de desequilíbrio de tensão para sistemas de distribuição, sendo de 2%. Porém o PRODIST não especifica um valor a ser utilizado como limite em sistemas de baixa tensão. Dessa forma, como o limite de 2% é fixado objetivando a proteção e garantia de bom funcionamento de equipamentos, será considerado que esse valor é o limite para o fator de desequilíbrio em baixa tensão. É importante salientar que o fator de desequilíbrio de 0,5% exigido em [6] é em função da certeza de que os ensaios para obtenção

do rendimento a ser marcado na placa de um motor de indução foram realizados com o sistema de tensões mais próximo possível de um ideal.

Considerando as informações anteriores, todas as simulações realizadas com desequilíbrios de tensão competem a resultados referentes a uma operação acima do limite para tensões de alimentação.

6.2.3.1 SIMULAÇÃO APLICANDO 2% DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Neste item poderá ser observado o comportamento dos motores para o limite considerado para os desequilíbrios de tensão em redes de baixa tensão.

Tabela 6.1 – Variação da performance do motor da linha padrão para 2% de desequilíbrio.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Corrente eficaz no estator [%]	11,94117	8,67172	6,38931	4,95283	4,53719
Corrente eficaz no rotor [%]	13,27160	6,34831	4,37905	3,46243	3,22030
Tensão eficaz no entreferro [%]	1,65311	1,67149	1,69149	1,71315	1,72229
Perdas Joule totais no estator [%]	1,51423	0,94384	0,59738	0,39953	0,34554
Perdas Joule totais no rotor [%]	11,65255	2,89701	1,28273	0,72005	0,59486
Perdas totais no ferro [%]	0,02787	0,02857	0,02932	0,03014	0,03049
Perdas totais [%]	0,55903	0,48602	0,39862	0,31828	0,29021
Potência mecânica total [%]	-0,11350	-0,05781	-0,03937	-0,03026	-0,02780
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,08913	-0,04539	-0,03092	-0,02376	-0,02183
Potência ativa total de entrada [%]	0,13065	0,07915	0,05696	0,04468	0,04119
Potência reativa total no estator [%]	1,51423	0,94384	0,59738	0,39953	0,34554
Potência reativa total no rotor [%]	16,47919	4,09700	1,81405	1,01830	0,84126
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,02787	0,02857	0,02932	0,03014	0,03049
Potência reativa total de entrada [%]	0,28102	0,27185	0,25495	0,23310	0,22362
Potência aparente total de entrada [%]	0,23301	0,16648	0,12149	0,09377	0,08584
Rendimento [%]	-0,24383	-0,13685	-0,09628	-0,07490	-0,06896
Fator de potência [%]	-0,10212	-0,08719	-0,06445	-0,04905	-0,04462

Tabela 6.2 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 2% de desequilíbrio.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Corrente eficaz no estator [%]	13,14973	8,96048	6,34260	4,81579	4,39070
Corrente eficaz no rotor [%]	12,20946	5,79206	4,01714	3,20285	2,98931
Tensão eficaz no entreferro [%]	1,61769	1,63219	1,64823	1,66584	1,67334
Perdas Joule totais no estator [%]	1,90661	1,10549	0,66638	0,43276	0,37122
Perdas Joule totais no rotor [%]	11,89296	2,95656	1,30962	0,73583	0,60821
Perdas totais no ferro [%]	0,02648	0,02702	0,02763	0,02829	0,02858

Perdas totais [%]	0,66453	0,56446	0,45075	0,35156	0,31804
Potência mecânica total [%]	-0,09753	-0,04951	-0,03362	-0,02577	-0,02365
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,07958	-0,04040	-0,02743	-0,02102	-0,01930
Potência ativa total de entrada [%]	0,12063	0,06989	0,04939	0,03838	0,03529
Potência reativa total no estator [%]	1,90661	1,10549	0,66638	0,43276	0,37122
Potência reativa total no rotor [%]	16,81919	4,18120	1,85208	1,04062	0,86015
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,02648	0,02702	0,02763	0,02829	0,02858
Potência reativa total de entrada [%]	0,32405	0,30936	0,28530	0,25619	0,24405
Potência aparente total de entrada [%]	0,25704	0,17204	0,12069	0,09137	0,08329
Rendimento [%]	-0,21789	-0,11932	-0,08297	-0,06412	-0,05892
Fator de potência [%]	-0,13607	-0,10198	-0,07122	-0,05294	-0,04796

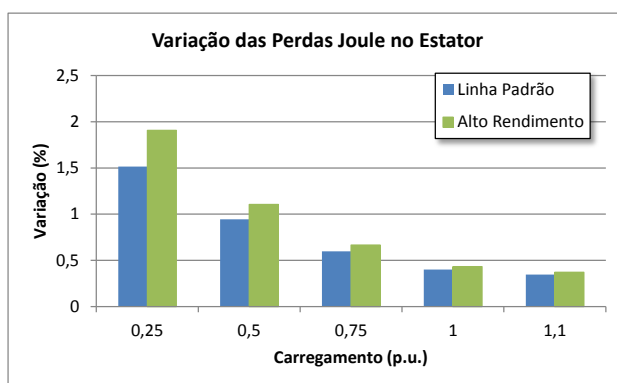


Figura 6.4 – Variação das perdas joule no estator dos motores para 2% de desequilíbrio.

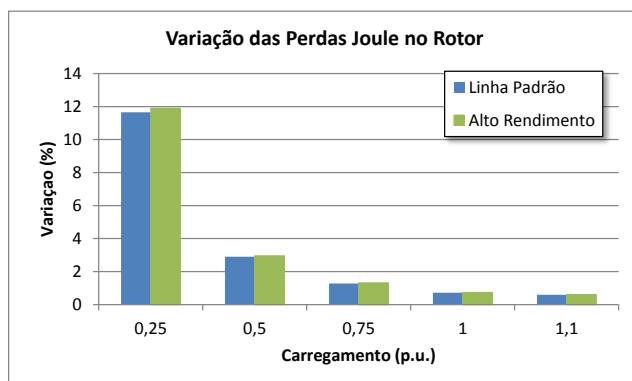


Figura 6.5 – Variação das perdas joule no rotor dos motores para 2% de desequilíbrio.

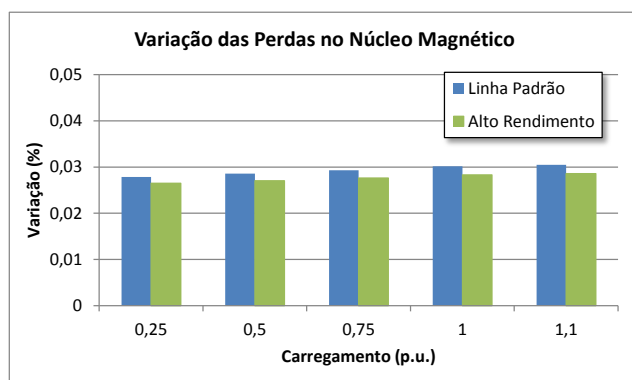


Figura 6.6 – Variação das perdas no núcleo magnético dos motores para 2% de desequilíbrio.

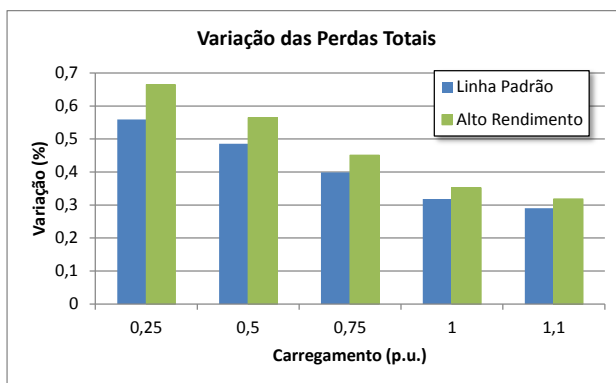


Figura 6.7 – Variação das perdas totais dos motores para 2% de desequilíbrio.

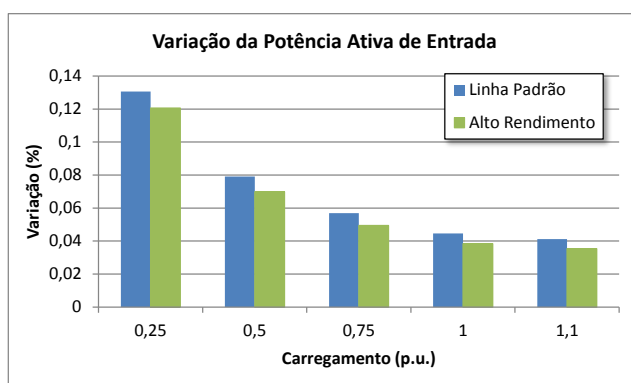


Figura 6.8 – Variação da potência ativa de entrada dos motores para 2% de desequilíbrio.

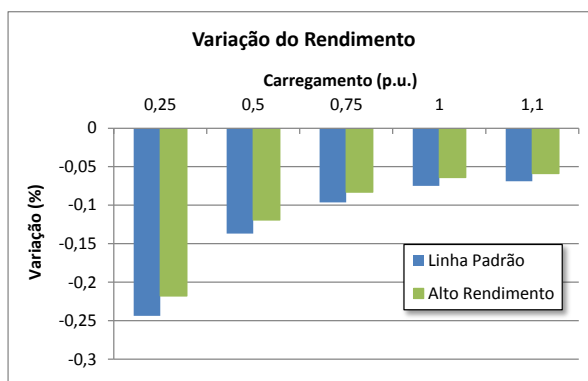


Figura 6.9 – Variação do rendimento dos motores para 2% de desequilíbrio.

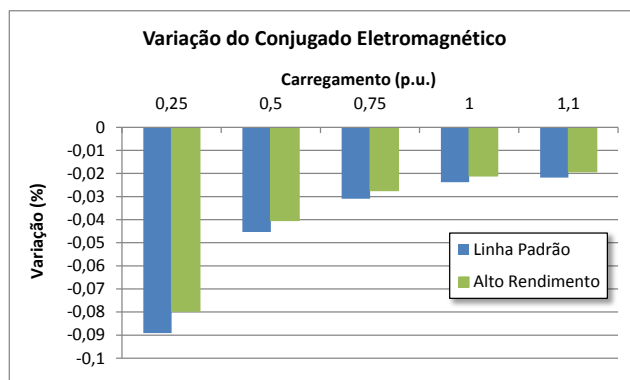


Figura 6.10 – Variação do conjugado eletromagnético dos motores para 2% de desequilíbrio.

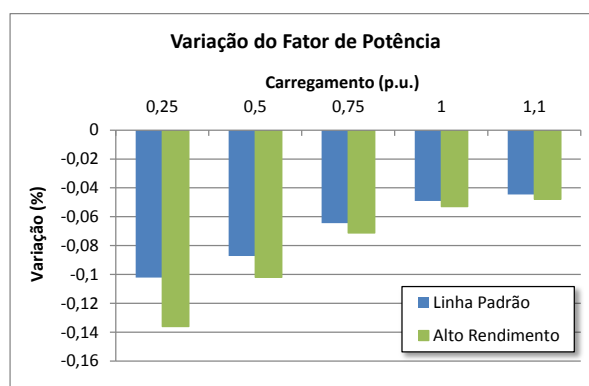


Figura 6.11 – Variação do fator de potência dos motores para 2% de desequilíbrio.

De uma maneira geral, os efeitos do desequilíbrio de tensão são mais influentes para regiões de baixo carregamento. Isso se deve ao fato de que o circuito de sequência negativa praticamente não muda os parâmetros em função do carregamento pois o escorregamento nessa sequência é próximo de 2. Assim, como a referência é a sequência positiva, a proporção de sequência negativa se altera devido à mudança no valor da referência.

O motor de alto rendimento sofreu aumento de perdas superior ao da linha padrão, porém a discretos percentuais. Essa diferença pode ser explicada pelo comportamento da impedância dos motores. Como a velocidade do motor de alto rendimento é superior à do motor da linha padrão, o escorregamento de sequência negativa também o é. Com isso, a redução percentual da impedância do circuito equivalente do motor de alto rendimento é levemente superior à do motor da linha padrão, resultando em variações de corrente maiores.

Contudo, a potência ativa de entrada não se comporta da mesma forma, compensada pela menor variação da potência mecânica do motor de alto rendimento, influenciando inclusive no rendimento, que sofre menores alterações também nesse tipo de motor.

6.2.3.2 SIMULAÇÃO APLICANDO 3% DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Um segundo caso de desequilíbrios de tensão simulado é considerando um fator de 3%, que já é considerado acima do limite adotado como prejudicial a equipamentos elétricos. A Tabela 6.3 e Tabela 6.4 mostram as variações das grandezas obtidas com as resoluções dos modelos de circuito adotados.

Tabela 6.3 – Variação da performance do motor da linha padrão para 3% de desequilíbrio.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Corrente eficaz no estator [%]	17,93984	13,07123	9,64867	7,48307	6,85481
Corrente eficaz no rotor [%]	21,91658	10,08443	6,81996	5,33233	4,94376
Tensão eficaz no entreferro [%]	2,47987	2,50747	2,53749	2,57002	2,58374
Perdas Joule totais no estator [%]	3,40701	2,12364	1,34410	0,89894	0,77746
Perdas Joule totais no rotor [%]	26,21824	6,51828	2,88614	1,62011	1,33843
Perdas totais no ferro [%]	0,06271	0,06427	0,06597	0,06782	0,06860
Perdas totais [%]	1,25782	1,09355	0,89690	0,71614	0,65297
Potência mecânica total [%]	-0,25536	-0,13006	-0,08859	-0,06809	-0,06256
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,20055	-0,10214	-0,06956	-0,05346	-0,04912
Potência ativa total de entrada [%]	0,29396	0,17808	0,12815	0,10052	0,09267
Potência reativa total no estator [%]	3,40701	2,12364	1,34410	0,89894	0,77746
Potência reativa total no rotor [%]	37,07819	9,21824	4,08162	2,29118	1,89283
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,06271	0,06427	0,06597	0,06782	0,06860
Potência reativa total de entrada [%]	0,63229	0,61166	0,57364	0,52447	0,50316
Potência aparente total de entrada [%]	0,52434	0,37471	0,27347	0,21109	0,19324
Rendimento [%]	-0,54772	-0,30760	-0,21647	-0,16844	-0,15509
Fator de potência [%]	-0,22917	-0,19590	-0,14492	-0,11034	-0,10037

Tabela 6.4 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 3% de desequilíbrio.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Corrente eficaz no estator [%]	19,78016	13,54069	9,60430	7,29391	6,64881
Corrente eficaz no rotor [%]	20,48720	9,29197	6,29582	4,95364	4,60618
Tensão eficaz no entreferro [%]	2,42665	2,44843	2,47251	2,49896	2,51022
Perdas Joule totais no estator [%]	4,28988	2,48735	1,49936	0,97370	0,83525
Perdas Joule totais no rotor [%]	26,75916	6,65225	2,94665	1,65561	1,36848
Perdas totais no ferro [%]	0,05958	0,06080	0,06216	0,06366	0,06430
Perdas totais [%]	1,49519	1,27004	1,01418	0,79101	0,71559
Potência mecânica total [%]	-0,21944	-0,11141	-0,07565	-0,05798	-0,05321
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,17906	-0,09090	-0,06173	-0,04730	-0,04341
Potência ativa total de entrada [%]	0,27141	0,15725	0,11112	0,08635	0,07941
Potência reativa total no estator [%]	4,28988	2,48735	1,49936	0,97370	0,83525
Potência reativa total no rotor [%]	37,84317	9,40770	4,16719	2,34139	1,93533
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,05958	0,06080	0,06216	0,06366	0,06430
Potência reativa total de entrada [%]	0,72911	0,69607	0,64192	0,57642	0,54911
Potência aparente total de entrada [%]	0,57848	0,38729	0,27172	0,20571	0,18752
Rendimento [%]	-0,48952	-0,26823	-0,18657	-0,14420	-0,13252
Fator de potência [%]	-0,30529	-0,22915	-0,16016	-0,11911	-0,10790

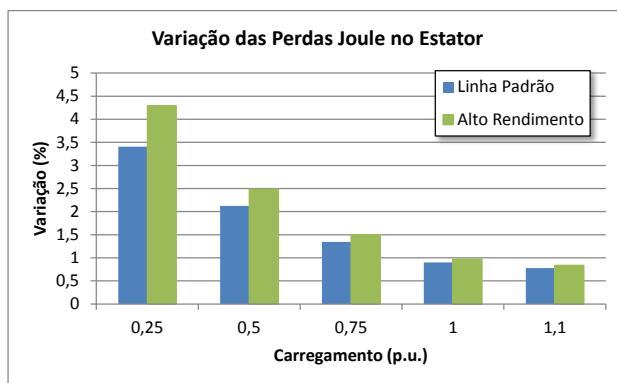


Figura 6.12 – Variação das perdas joule no estator dos motores para 3% de desequilíbrio.

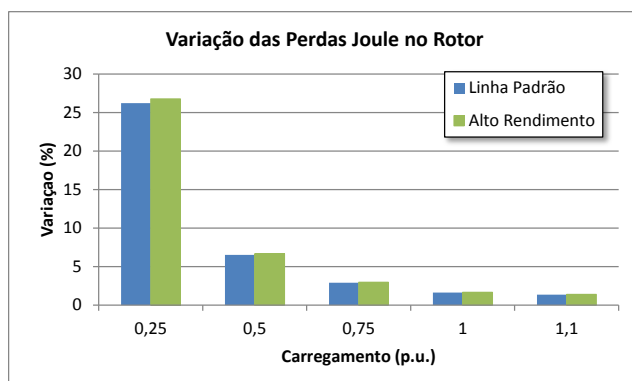


Figura 6.13 – Variação das perdas joule no rotor dos motores para 3% de desequilíbrio.

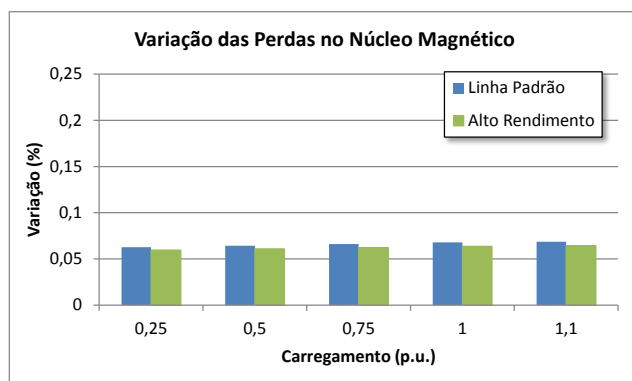


Figura 6.14 – Variação das perdas no núcleo magnético dos motores para 3% de desequilíbrio.

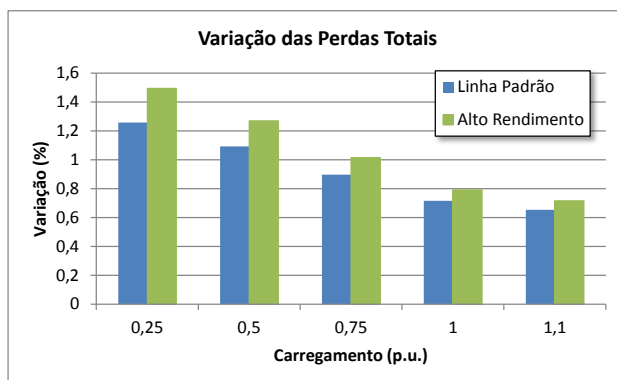


Figura 6.15 – Variação das perdas totais dos motores para 3% de desequilíbrio.

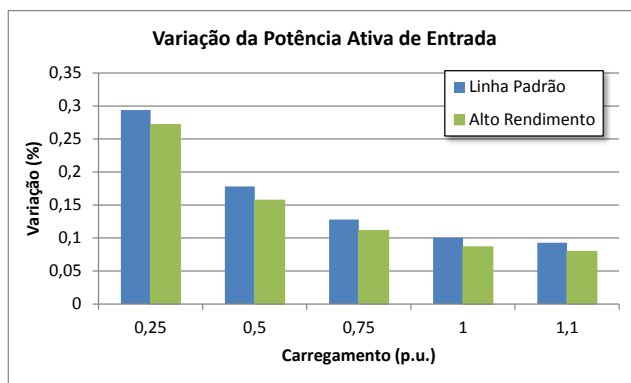


Figura 6.16 – Variação da potência ativa de entrada dos motores para 3% de desequilíbrio.

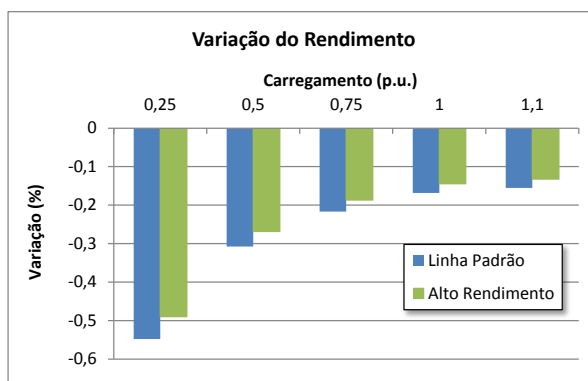


Figura 6.17 – Variação do rendimento dos motores para 3% de desequilíbrio.

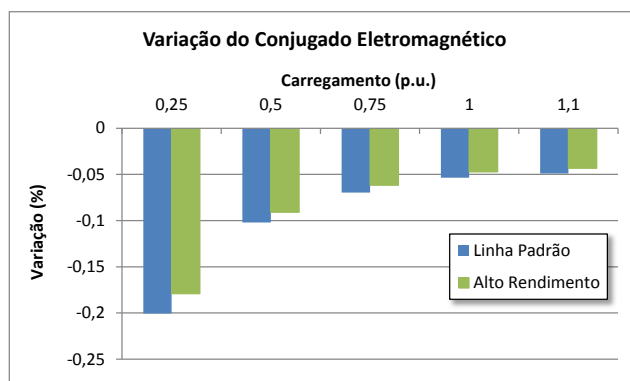


Figura 6.18 – Variação do conjugado eletromagnético dos motores para 3% de desequilíbrio.

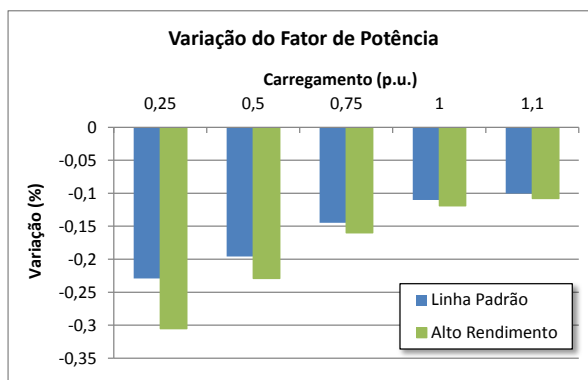


Figura 6.19 – Variação do fator de potência dos motores para 3% de desequilíbrio.

O gráficos mostram uma tendência semelhante ao caso com 2% de desequilíbrios, porém, em maior proporção. Notou-se que as variações praticamente duplicaram com o aumento de 1% no fator de desequilíbrio.

É importante salientar que as variações sofridas por ambos os motores são semelhantes e seguem a mesma tendência entre si.

O motor de alto rendimento tem suas perdas alteradas em maior proporção, porém em valores próximos aos do motor da linha padrão. Em contrapartida, o fato da potência mecânica pouco variar contribui para uma menor variação do rendimento, que continua superior ao do motor da linha padrão.

6.2.3.3 SIMULAÇÃO APLICANDO 5% DE DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO

Um fator de desequilíbrio de 5% é considerado alto e influencia de maneira bastante negativa o comportamento de motores de indução. Com as simulações pode se obter informações sobre esses efeitos sem que de fato o motor esteja sob esta condição de alimentação.

A Tabela 6.5 e Tabela 6.6 apresenta os resultados das variações da performance dos motores de indução da linha padrão e de alto rendimento alimentados por tensões com 5% de desequilíbrio.

Tabela 6.5 – Variação da performance do motor da linha padrão para 5% de desequilíbrio.

Linha Padrão					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Corrente eficaz no estator [%]	29,98038	21,97457	16,27867	12,63910	11,57794
Corrente eficaz no rotor [%]	42,00699	18,50356	12,14989	9,32575	8,59932
Tensão eficaz no entreferro [%]	4,13377	4,17986	4,23000	4,28431	4,30722
Perdas Joule totais no estator [%]	9,46390	5,89900	3,73361	2,49705	2,15962
Perdas Joule totais no rotor [%]	72,82843	18,10633	8,01706	4,50031	3,71786
Perdas totais no ferro [%]	0,17421	0,17853	0,18326	0,18839	0,19056
Perdas totais [%]	3,49394	3,03763	2,49140	1,98927	1,81381
Potência mecânica total [%]	-0,70934	-0,36129	-0,24608	-0,18914	-0,17378
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,55708	-0,28372	-0,19323	-0,14850	-0,13644
Potência ativa total de entrada [%]	0,81656	0,49467	0,35598	0,27922	0,25742
Potência reativa total no estator [%]	9,46390	5,89900	3,73361	2,49705	2,15962
Potência reativa total no rotor [%]	102,99500	25,60622	11,33783	6,36439	5,25785
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,17421	0,17853	0,18326	0,18839	0,19056
Potência reativa total de entrada [%]	1,75637	1,69905	1,59346	1,45685	1,39766
Potência aparente total de entrada [%]	1,45709	1,04201	0,76071	0,58720	0,53753

Rendimento [%]	-1,51355	-0,85175	-0,59993	-0,46705	-0,43009
Fator de potência [%]	-0,63133	-0,54169	-0,40167	-0,30618	-0,27861

Tabela 6.6 – Variação da performance do motor de alto rendimento para 5% de desequilíbrio.

Alto Rendimento					
Carregamento [p.u.]	0,25	0,5	0,75	1	1,1
Corrente eficaz no estator [%]	33,12450	22,86383	16,28313	12,37509	11,27782
Corrente eficaz no rotor [%]	40,11070	17,31954	11,33814	8,72989	8,06606
Tensão eficaz no entreferro [%]	4,04479	4,08117	4,12140	4,16558	4,18439
Perdas Joule totais no estator [%]	11,91634	6,90930	4,16489	2,70474	2,32014
Perdas Joule totais no rotor [%]	74,33101	18,47847	8,18513	4,59892	3,80134
Perdas totais no ferro [%]	0,16550	0,16889	0,17266	0,17682	0,17860
Perdas totais [%]	4,15329	3,52789	2,81717	2,19725	1,98774
Potência mecânica total [%]	-0,60955	-0,30946	-0,21014	-0,16105	-0,14781
Conjugado eletromagnético resultante [%]	-0,49738	-0,25251	-0,17146	-0,13140	-0,12060
Potência ativa total de entrada [%]	0,75393	0,43680	0,30868	0,23986	0,22059
Potência reativa total no estator [%]	11,91634	6,90930	4,16489	2,70474	2,32014
Potência reativa total no rotor [%]	105,11990	26,13250	11,57552	6,50385	5,37591
Potência reativa total no núcleo mag. [%]	0,16550	0,16889	0,17266	0,17682	0,17860
Potência reativa total de entrada [%]	2,02532	1,93353	1,78312	1,60117	1,52532
Potência aparente total de entrada [%]	1,60799	1,07754	0,75622	0,57249	0,52184
Rendimento [%]	-1,35328	-0,74302	-0,51722	-0,39995	-0,36759
Fator de potência [%]	-0,84055	-0,63390	-0,44418	-0,33073	-0,29968

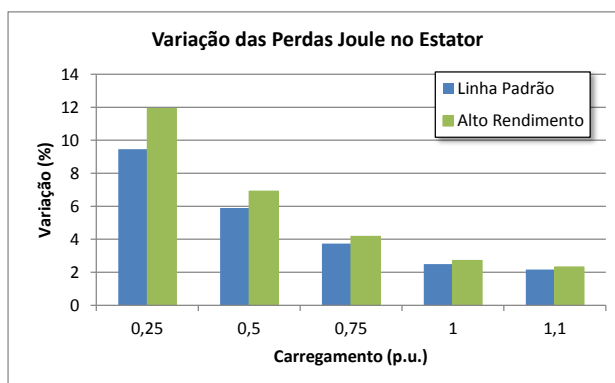


Figura 6.20 – Variação das perdas joule no estator dos motores para 5% de desequilíbrio.

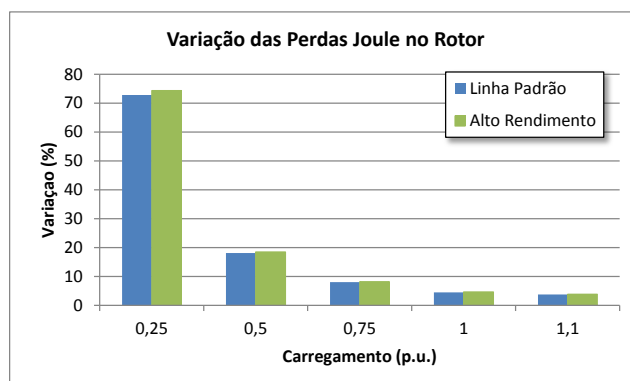


Figura 6.21 – Variação das perdas joule no rotor dos motores para 5% de desequilíbrio.

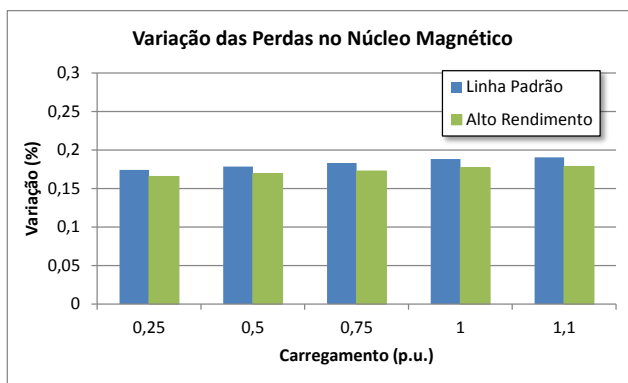


Figura 6.22 – Variação das perdas no núcleo magnético dos motores para 5% de desequilíbrio.

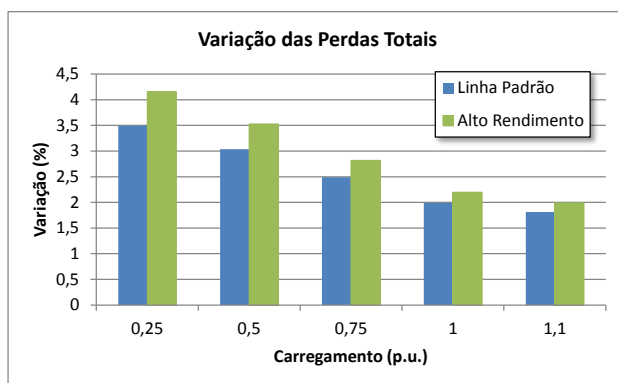


Figura 6.23 – Variação das perdas totais dos motores para 5% de desequilíbrio.

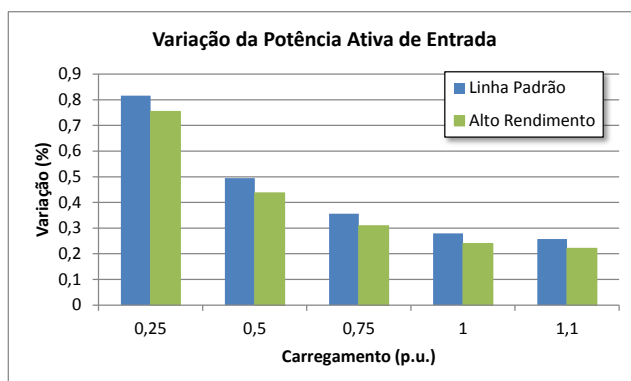


Figura 6.24 – Variação da potência ativa de entrada dos motores para 5% de desequilíbrio.

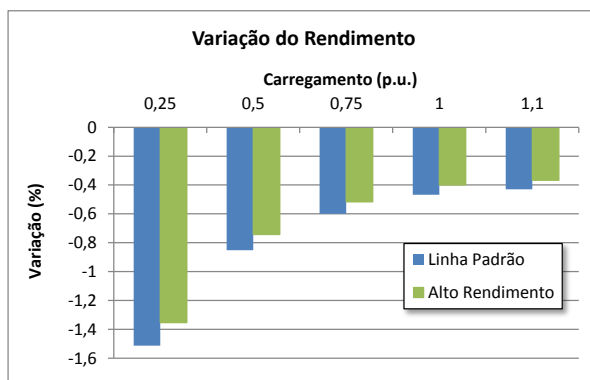


Figura 6.25 – Variação do rendimento dos motores para 5% de desequilíbrio.

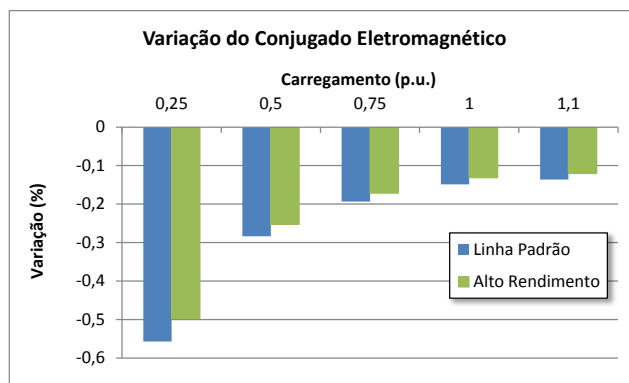


Figura 6.26 – Variação do conjugado eletromagnético dos motores para 5% de desequilíbrio.

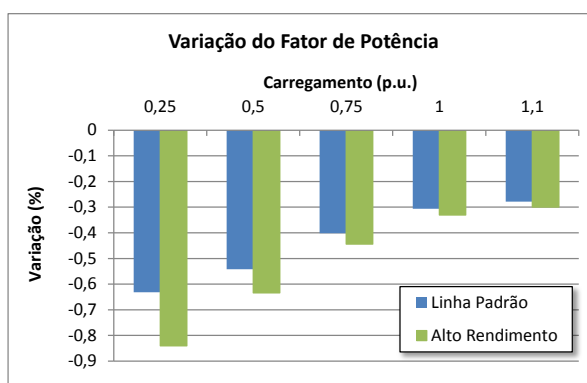


Figura 6.27 – Variação do fator de potência dos motores para 5% de desequilíbrio.

As simulações aplicando 5% de desequilíbrio de tensão revelam que há um aumento de perdas médio em função do carregamento em torno de 3% do valor total das mesmas. Talvez a consequência principal a ser considerada nesse caso seria o aumento dos esforços mecânicos devido às vibrações produzidas pelos campos magnéticos com amplitudes diferentes. De toda forma, essa condição de alimentação gera influências na parte elétrica, onde há um aumento de perdas, já comentado, aumento da potência de entrada, queda do rendimento em torno de 0,6% considerando uma média ao longo dos pontos de carga.

Apesar de maiores, as variações das perdas no motor de alto rendimento foram bastante próximas das do motor da linha padrão, o que leva a concluir que o tipo de motor não define se os efeitos desse indicador de qualidade de energia são dependentes do mesmo.

6.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação aos desequilíbrios de tensão aplicados nos motores, foram simulados 3 casos, os quais compreendiam 2%, 3% e 5% de fator de desequilíbrio.

As simulações para 2% de desequilíbrio mostraram que, como sendo esse o valor limite considerado para o indicador, as alterações no comportamento dos motores foram as menores. Apesar de baixas variações, esta simulação tem sua importância fundamentada no fato de poder se conhecer dados da performance do motor caso a alimentação atinja esse limite de 2% de desequilíbrio de tensão.

Para 3% e 5% de desequilíbrios observou-se que o aumento das perdas já era mais considerável, alterando de maneira mais ativa o rendimento dos motores, com o pior caso sendo o de 5%, conforme previsto.

De uma maneira geral, os desequilíbrios também influenciam de maneira mais significativa motores operando em regiões de baixo carregamento. Partindo da análise do circuito desequilibrado utilizando componentes simétricas, o circuito de sequência negativa praticamente não tem seus parâmetros alterados em função do carregamento, ao passo que no circuito de sequência positiva o carregamento contribui diretamente para a variação dos parâmetros do rotor. Com isso, semelhante ao estudo com harmônicos, a referência (sequência positiva) varia, enquanto que o objeto a ser comparado (sequência negativa) praticamente se mantém constante.

Quanto à comparação dos motores, da linha padrão e de alto rendimento, as perdas, se computadas separadamente, sofrem maiores alterações no último do que no primeiro. Entretanto, as variações percentuais se mostram bastante próximas. O fato que compensa a variação de perdas é a variação da potência mecânica, onde no motor de alto rendimento a mesma é inferior à do motor da linha padrão. Com isso, a potência de entrada sofre menor variação, bem como o rendimento.



CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo fazer o levantamento das perdas que ocorrem em motores de indução, analisando as mesmas sob diversas condições de carregamento, e ainda, os efeitos que alguns indicadores de qualidade de energia têm sobre o rendimento destas máquinas. Foram analisados dois tipos de motores, um da linha padrão e outro de alto rendimento. Preferiu-se a análise comparativa dos dois tipos devido ao fato de que apesar dos motores da linha padrão não serem mais fabricados, ainda estão difundidos no parque industrial do país.

Um estudo preliminar contribuiu para elucidação do método mais apropriado para obtenção dos dados relativos à eficiência dos motores para condição de alimentação ideal. Como o objetivo era alcançar cada valor de perda separadamente, foi escolhido o método 2 da NBR 5383-1, que através de um conjunto de procedimentos de laboratório e tratamento de dados, fornece estes resultados e inclusive é o mais indicado para o caso da obtenção do rendimento que deve ser marcado nas placas de motores de indução trifásicos.

A aplicação deste método requer grande atenção aos procedimentos que são desenvolvidos, uma vez que toda etapa é dependente da anterior, o que contribui para a propagação de um erro ao longo do processo. Apesar de detalhista, todo o método é constituído por um conjunto de passos simples de serem implementados, como os testes para obtenção de resistências de enrolamento, ensaio à vazio, ensaio de elevação de temperatura, etc. O ensaio com carga é a etapa mais importante do processo, pois nele se definem os pontos de carregamento, além de serem obtidos os valores das respectivas potências mecânicas, de entrada, perdas, etc. Novamente, uma grande importância deve ser dada à medição de velocidade, pois dela se calcula a potência mecânica bem como as perdas joule no rotor, através do escorregamento.

Além da etapa de procedimentos laboratoriais, outra referente ao tratamento dos dados alcançados foi executada, para cálculo das perdas. Foram obtidas todas as perdas incidentes nos motores para cada condição de carga, considerando um piso para a temperatura, e um valor máximo referente à obtida pela temperatura de referência adotada. No presente estudo, o piso adotado foi de 25°C e a temperatura de referência adotada foi a mesma obtida pelo ensaio de elevação de temperatura.

As perdas provenientes dos ensaios para o motor de alto rendimento, com exceção das mecânicas, foram inferiores às do motor da linha padrão, com destaque para as suplementares que apresentaram redução de aproximadamente 60% para o ponto de carga nominal. Outras perdas que apresentaram grande diferença entre os dois tipos de motores foram as ocorrentes no material magnético, sendo aproximadamente 42% inferiores no motor de alto rendimento.

O restante das perdas, principalmente as joule, não apresentaram grandes diferenças, o que era esperado, pois a concepção do motor de alto rendimento está na redução das perdas no material magnético, bem como das suplementares, através de melhoria de técnicas de projeto e processo de fabricação, além dos materiais empregados. Para uma melhoria quanto às perdas joule seriam necessários condutores de seção maior, o que contribuiria para o aumento do tamanho físico do motor em relação a um equivalente da linha padrão.

O levantamento dos dados de perdas através de um ensaio foi necessário para se comparar com os obtidos através de uma simulação, a qual considerou os mesmos pontos de carregamento fixados nos testes, tentando se reproduzir computacionalmente as condições de alimentação ideal, e verificar se algum modelo poderia ser coerente com o que foi ensaiado, de modo que pudesse ser aplicado posteriormente na etapa de análise com condições não ideais de alimentação. Isso se justifica partindo do pressuposto de que não há uma norma que esquematiza procedimentos para testes em laboratório com foco na análise do comportamento de motores de indução quando alimentados com tensões que apresentam harmônicos ou desequilíbrios de tensão.

O modelo de circuito equivalente no domínio da frequência pode ser obtido através dos dados fornecidos pelo fabricante, o que é um ponto a favor, pois nem sempre um motor pode sair da linha de produção para testes relacionados à modelagem visando estudos de eficiência energética.

A representação utilizada se mostrou coerente em vários aspectos aos resultados dos testes realizados, principalmente quando o ponto de operação fixado era superior a 50% de carregamento e próximo do nominal dos motores.

É importante citar que o modelo adotado não segrega todas as perdas assim como os procedimentos dos testes realizados o faz. Como citado anteriormente no Capítulo 4, o circuito equivalente apresenta um elemento que representa as perdas joule no estator, outro elemento referente ao rotor, e um elemento resistivo referente às perdas no núcleo magnético, perdas mecânicas e suplementares. Dessa forma, os valores desses parâmetros podem não ser o mesmo obtido caso fossem de alguma maneira mensurados na máquina real, porém representam um conjunto que, funcionando em harmonia, levam à obtenção de um balanço energético coerente para motores de indução trifásicos.

As simulações com tensões harmônicas revelaram que à medida que o carregamento dos motores se reduz, as variações notadas para as grandezas analisadas aumentam. Isso ocorre devido à condição intrínseca de harmônicos em motores, a qual define que o ponto de operação para determinada frequência é sempre próximo do que seria o análogo da condição

de rotor bloqueado, independente do carregamento imposto. Comparando então com a fundamental que sofre notáveis mudanças devido à faixa de operação, é visto que há maior expressividade dos harmônicos quando os motores estão operando cada vez com menores cargas.

Além disso, os harmônicos de ordens inferiores, como os de 5ª e 7ª, influenciam de maneira mais ativa o comportamento dos motores, uma vez que a impedância harmônica destes últimos aumenta juntamente com a frequência.

O motor de alto rendimento sofre menores alterações no comportamento se comparado ao da linha padrão, para os pontos de carga superiores a 50%. Abaixo desse valor, o comportamento entre ambos os tipos é semelhante, o que pode ser explicado pelas melhorias no projeto e materiais utilizados no núcleo magnético.

Complementando a análise dos harmônicos, para uma mesma ordem harmônica, ao se dobrar a DTT, as variações dos parâmetros coletados praticamente quadruplicavam. Esse fato pode ser explicado a partir da consideração de que o circuito equivalente no domínio da frequência, por sua concepção é tido como de natureza linear. Em outras palavras, como as perdas dependem no quadrado da corrente e esta é diretamente proporcional à tensão pela Lei de Ohm, se a tensão dobra, as perdas têm que aumentar na proporção do quádruplo do valor.

Sobre os desequilíbrios de tensão aplicados em simulação, quanto maior o fator de desequilíbrio, maior a alteração do comportamento dos motores no sentido de aumento de perdas, consumo e queda de rendimento.

De maneira semelhante à observada para as simulações com harmônicos, a operação de motores com carregamentos cada vez menores aparentemente é mais influenciada pela presença dos desequilíbrios de tensão. Isso é justificado pela análise do circuito de sequência negativa, que praticamente não muda em função do carregamento principal do motor. Dessa forma, considerando a sequência positiva como referência e, esta se altera de maneira mais pronunciada com a carga, para pequenos carregamentos, a sequência negativa passa a ser mais notável.

O motor de alto rendimento é menos influenciado pelos desequilíbrios em termos de potência mecânica e potência de entrada, quando comparado ao motor da linha padrão. Quanto às variações das perdas, a diferença entre os dois tipos de motores foi bastante insignificante.

A comparação dos efeitos provocados por desequilíbrios de tensão e harmônicos não pode ser feita com valores aleatórios das simulações realizadas devido à falta de referência entre ambos. Visando contornar esse fato, é conveniente comparar utilizando os limites

presentes no PRODIST. No caso, o limite DTT em redes de baixa tensão é de 10% e de desequilíbrios, 2%. Como dito, o limite de desequilíbrios de 2% não vem explícito em [10], porém é citado como referência para sistemas de distribuição e, com isso, foi adotado também para baixa tensão.

As simulações com 10% de DTT com 5º harmônico, entre as ordens harmônicas simuladas foi a preponderante em termos de variações do comportamento dos motores. Fazendo um paralelo dos efeitos provocados por um desequilíbrio de tensão de 2%, é possível concluir que o nível e a ordem harmônica considerada produz maiores efeitos nos motores do que o desequilíbrio de tensão. As variações das perdas são maiores, principalmente as perdas no núcleo magnético devido ao aumento da frequência. O rendimento dos motores se torna bastante influenciável devido a isso, porém não tanto quanto o fator de potência. Este último tem seu valor afetado em maior proporção devido à distorção harmônica do que devido ao desequilíbrio de tensão. Quanto ao conjugado eletromagnético e à potência mecânica, alimentações desequilibradas no nível considerado acarretam em maiores alterações dessas grandezas, porém bastante semelhantes às obtidas pelas simulações com 10% de 5º harmônico.

Concluindo, para os limites adotados, aparentemente os harmônicos alteram as perdas em maiores proporções, levando a esforços térmicos, enquanto que os desequilíbrios alteram o comportamento mecânico de maneira mais significativa. Porém ambos acarretam em maiores perdas, consequentemente em maior aquecimento, e redução da vida útil dos motores.

Apesar de ser um tema bastante difundido, este estudo não esgota o mesmo, abrindo portas para continuação considerando:

- Melhoria do modelo do motor de indução no domínio da frequência considerando a separação das perdas no núcleo magnético, mecânicas e suplementares, sendo representadas por elementos no circuito equivalente;
- Ajuste do ponto de carga do motor considerando outras curvas de conjugado (centrífuga, por exemplo);
- Realização do levantamento das perdas em motores de indução acionados por conversores estáticos;
- Análise da influência de componentes harmônicas de sequência zero frente a topologias diversas de conexão dos motores de indução trifásicos (delta, estrela isolada, estrela aterrada, etc.).]



CAPÍTULO 8 – BIBLIOGRAFIA

- [1]. Ministério de Minas e Energia. Portaria Interministerial Nº 553, de 8 de dezembro de 2005. Disponível em: www.mme.gov.br. Acessado em 07/02/2012.
- [2]. Ministério das Minas e Energia. Balanço Energético Nacional 2011: Ano Base 2010. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 17/02/2012.
- [3]. Ministério das Minas e Energia. Balanço de Energia Útil 2005: Ano Base 2004. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>. Acesso em 17/02/2012.
- [4]. IEEE Power Engineering Society. **IEEE 112: Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. New York, 1991.
- [5]. IEEE Power Engineering Society. **IEEE 112: Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. New York, 2004.
- [6]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5383-1: Máquinas elétricas girantes Parte 1: Motores de indução trifásicos – Ensaio**. Rio de Janeiro, 2002.
- [7]. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 17094: Máquinas elétricas girantes - Motores de indução Parte 1: Trifásicos**. Rio de Janeiro, 2008.
- [8]. ANDRADE, Cássio Tersandro De Castro. **ANÁLISE DE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUÇÃO**. 2009. 143 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2009.
- [9]. SÁ, Jocélio Souza de. **Contribuição à análise do comportamento térmico de motores de indução trifásicos com rotor do tipo gaiola**. 1989. 308 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989.
- [10]. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **PRODIST: módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica – Revisão 4**. Brasília, 2012. 72 p.
- [11]. KOSTENKO, M.; PIOTROVSKY, L.. **Electrical Machines**. 3. ed. Moscou: Mir Publishers, 1977. 2 v.
- [12]. Boglietti, A.; Cavagnino, A.; Ferraris, L.; Lazzari, M.; , "Induction Motor Equivalent Circuit Including the Stray Load Losses in the Machine Power Balance," **Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE** , vol., no., pp.1250-1255, 5-8 Nov. 2007.
- [13]. Xiaodong Liang; Yilmaz Luy; , "Harmonic Analysis for Induction Motors," **Electrical and Computer Engineering, 2006. CCECE '06. Canadian Conference on** , vol., no., pp.172-177, May 2006
- [14]. SOUTO, Olivio Carlos Nascimento. **Modelagem e análise do desempenho térmico de motores de indução sob condições não ideais de alimentação**. 2001. 426 f. Tese de

- Doutorado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.
- [15]. Kabbaj, H.; Roboam, X.; Lefevre, Y.; Faucher, J.; , "Skin effect characterization in a squirrel cage induction machine ," **Industrial Electronics, 1997. ISIE '97., Proceedings of the IEEE International Symposium on** , vol.2, no., pp.532-536 vol.2, 7-11 Jul 1997.
- [16]. Cipín, R.; Belousek J.; "Influence of a skin effect in the squirrel cage on a speed-torque characteristics of the induction motor". Disponível em: http://www.feec.vutbr.cz/EEICT/2009/sbornik/03-Doktorske_projekty/04-Silnoprouda_elektrotechnika_a_elektroenergetika/04-xcipin00.pdf. Acessado em 06/10/2011.
- [17]. Sá, J. S.; Cogo, J. R.; Arango, H.; Ayoub, H. Y.; "Modelagem de acionamentos com inversores autocontroladores de corrente imposta". Disponível em: [http://www.gsiconsultoria.com.br/publicacoes_gsi/42_-ART539-07_\(Modelagem_de_acionamentos\).pdf](http://www.gsiconsultoria.com.br/publicacoes_gsi/42_-ART539-07_(Modelagem_de_acionamentos).pdf). Acessado em: 06/10/2011.
- [18]. Cummings, Paul G.; , "Estimating Effect of System Harmonics on Losses and Temperature Rise of Squirrel-Cage Motors," **Industry Applications, IEEE Transactions on** , vol.IA-22, no.6, pp.1121-1126, Nov. 1986.
- [19]. de Abreu, J.P.G.; de Sa, J.S.; Prado, C.C.; , "Harmonic torques in three-phase induction motors supplied by nonsinusoidal voltages," **Harmonics and Quality of Power, 2004. 11th International Conference on** , vol., no., pp. 652- 657, 12-15 Sept. 2004.
- [20]. B. J. Chalmers, K. N. Chandra, "High-Frequency No-Load Losses of Cage Induction Motors", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-89, No. 6, July/August 1970, pp. 1043-1049. {10}
- [21]. D. W. Novotny, S. A. Nasar, B. Jeftenic, D. Maly. "Frequency Dependence of Time Harmonic Losses in Induction Machines", **ICEM – 1980**, pp. 233-238.
- [22]. E. A. Klingshirn, H. E. Jordan, "Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, March-1968, pp. 624-631.
- [23]. J. E. Williams, "Operation of 3-Phase Induction Motors on Unbalanced Voltages", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, Vol. PAS-73, April-1954, pp. 125-133.
- [24]. Gafford, B. N.; Duesterhoeft, W. C.; Mosher, C. C.; , "Heating of Induction Motors on Unbalanced Voltages", **Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers** , vol.78, no.3, pp.282-286, April 1959



- [25]. M. Akbaba, S. Q. Fakra, “New Model for Single-unit Representation of Induction Motor Loads, Including Skin Effect, for Power Systems Transient Stability Studies”, **IEE Proceedings – B**, Vol. 139, No. 6, November 1992.