

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DA INDÚSTRIA
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MECATRÔNICA

METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO
APLICADO À CARGA MOTRIZ – UTILIZANDO
FERRAMENTA COMPUTACIONAL

LEON MOREIRA SILVEIRA

FORTALEZA

2018

LEON MOREIRA SILVEIRA

**METODOLOGIA DE DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO
APLICADO À CARGA MOTRIZ – UTILIZANDO
FERRAMENTA COMPUTACIONAL**

Trabalho de final de curso apresentado e julgado adequado para aprovação na sua forma final pelos professores do curso de bacharelado em engenharia de mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

Orientador: Prof. Francisco Fabio Damasceno Montenegro

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Instituto Federal do Ceará - IFCE

Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S587m Silveira, Leon Moreira.

Metodologia de diagnóstico energético aplicado à carga motriz : Utilizando ferramenta computacional / Leon Moreira Silveira. - 2018.

81 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal do Ceará, Bacharelado em Engenharia de Mecatrônica, Campus Fortaleza, 2018.

Orientação: Prof. Me. Francisco Fabio Damasceno Montenegro.

1. Motor de indução trifásico. 2. Carga motriz. 3. Eficiência energética. 4. MIT. 5. Motor elétrico trifásico. I. Título.

CDD 629.8

TERMO DE APROVAÇÃO

Aluno:

Leon Moreira Silveira

Curso:

Engenharia de Mecatrônica

Matrícula:

20111015010431

Título:

Metodologia de diagnóstico energético aplicado à carga motriz – Utilizando ferramenta computacional.

Data de Apresentação:

Banca Examinadora

Conceito: _____

Fortaleza, ____ de _____ de _____

DEDICATÓRIA

A Deus, pois tudo é possível àquele que crê.

Aos meus pais, por todo empenho que tiveram em minha vida acadêmica.

À Thaís Angelim por tantas vezes me motivar a escrever este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao departamento da indústria do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, pela oportunidade de agregar conhecimento e experiências a minha vida.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, por me acolher por tanto tempo e proporcionar experiências únicas.

Ao professor Fabio Montenegro por sua orientação e motivação, tantas vezes oportuna e precisa, por sua enorme paciência e seu constante incentivo.

A todos os professores que tive em minha carreira acadêmica, que de alguma forma proporcionaram a concretização desse sonho.

Aos meus pais que sempre acreditaram nesse momento.

“Dificuldades preparam pessoas comuns
para destinos extraordinários.”

C.S. Lewis

“Não basta dar passos que nos devem levar
um dia ao objetivo, cada passo deve ser ele
próprio um objetivo em si mesmo, ao tempo
que nos leva para diante.”

J. Goethe

RESUMO

A eficiência energética é um assunto de grande relevância devido a crise hídrica e dos recursos naturais que ocorre no planeta. A partir da observação que a maior parcela de cargas no sistema elétrico do Brasil são motores de indução trifásicos, este trabalho apresenta uma metodologia de análise de eficiência energética dessas máquinas. O método consiste na realização de medições *in loco* de corrente e tensão, ou potência, sem a necessidade de outros procedimentos invasivos, ou que gerem paradas no processo no qual a máquina está inserida, proporcionando maior facilidade de aplicação. Os dados coletados são inseridos em um *software*, que realiza uma análise minuciosa do motor com base nas curvas de desempenho do mesmo, fornecidas pelo fabricante. Com posse de tais dados determina-se a condição de eficiência energética na qual o motor se encontra e realiza-se um comparativo com outros motores escolhidos pelo usuário nas mesmas condições. O *software* determina a economia gerada, a redução de CO₂ emitida na atmosfera e o *payback* do investimento da troca do motor.

Palavras-chave: Eficiência energética. Carga motriz. Motor de indução trifásico. MIT.

ABSTRACT

Energy efficiency is a subject of great relevance due to the water and natural crisis resources that occur on the planet. From the observation that the largest portion of loads in the Brazilian electrical system are three-phase induction motors, this work presents a methodology of energy efficiency analysis of these machines. The method consists of performing in loco measurements of current and voltage, or power, without the need for other invasive procedures, or that generate shutdowns in processing in which the machine is inserted, providing greater ease of application. The collected data is entered into software, which performs a thorough analysis of the motor based on performance curves provided by the manufacturer. With the possession of such data the energy efficiency condition in which the motor is found is determined and a comparison is made with other motors chosen by the user in the same conditions. The software determines the generated economy, the reduction of CO₂ emitted into the atmosphere and the payback of the motor exchange investment.

Keywords: Energy efficiency. Motor load. Three-phase induction motor. MIT.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	DESCRIÇÃO	PAGINA
Figura 1.1	Participações setoriais no consumo de energia elétrica no Brasil em 2015	3
Figura 1.2	Usos finais de energia elétrica no setor da indústria	4
Figura 1.3	Evolução da relação potência x massa dos motores elétricos no decorrer dos anos	5
Figura 1.4	Curva rendimento nominal x potência nominal, para motores standard (IR1), motores alto rendimento (IR2) e motores premium (IR3).	7
Figura 2.1	Diagrama esquemático de conversão eletromecânica de energia	11
Figura 2.2	Estator e rotor de um motor	16
Figura 2.3	Curva característica de velocidade x conjugado de um MIT	18
Figura 2.4	Curva característica de velocidade x conjugado de um MIT, incluindo região de frenagem e de ação geradora	19
Figura 2.5	Gráfico do fator de potência do rotor com relação a velocidade	20
Figura 2.6	Foto ilustrativa do motor gaiola de esquilo (à esquerda) e motor com rotor bobinado (à direita)	21
Figura 2.7	Vista explodida do motor modelo W21 da WEG	22
Figura 2.8	Vista em corte de um MIT gaiola de esquilo	24
Figura 2.9	Representação dos enrolamentos de um motor de 6 terminais e 12 terminais	25
Figura 2.10	Placas de identificação de motores trifásicos de 6 terminais (à esquerda) e 12 terminais (à direita)	26
Figura 2.11	Ligação Y e Δ .	27
Figura 2.12	Ligações delta série, delta paralelo, estrela série e estrela paralelo.	28
Figura 2.13	Circuito equivalente por fase de um MIT no qual o estator e o rotor são conectados através de um transformador ideal com relação de espiras a_{ef} .	30
Figura 2.14	Circuito equivalente do rotor de um motor de indução.	32
Figura 2.15	Circuito equivalente do rotor de um motor de indução com todos os efeitos devido a variação de escorregamento, concentrados no parâmetro R_r' .	33
Figura 2.16	Gráfico de corrente x velocidade do rotor	34
Figura 2.17	Motor queimado devido sobrecarga ou rotor travado	34
Figura 2.18	Circuito equivalente por fase de um motor de indução com todas as variáveis referidas ao estator.	35
Figura 2.19	Fluxo de potência de um motor de indução trifásico (MIT).	36
Figura 2.20	Curva típica de torque x escorregamento, para diversas categorias de motores.	43
Figura 2.21	Conjugado resistente de uma carga com conjugado constante em função da velocidade da máquina.	46
Figura 2.22	Conjugado resistente de uma carga com conjugado linear em função da velocidade da máquina.	47
Figura 2.23	Conjugado resistente de uma carga com conjugado quadrático em função da velocidade da máquina.	48
Figura 2.24	Conjugado resistente de uma carga com conjugado hiperbólico em função da velocidade da máquina.	49
Figura 4.1	Curvas de desempenho do motor	54
Figura 5.1	Interface do software desenvolvido – Diagnóstico energético aplicado a carga motriz.	61
Figura 5.2	Dados de um motor de acordo com o percentual de carregamento.	62
Figura 5.3	Simulação de troca de motor com estimativa de economia	63

LISTA DE SIGLAS

SIGLA	SIGNIFICADO
MIT	Motor de indução trifásico
ABINEE	Associação brasileira da indústria elétrica e eletrônica
ABESCO	Associação brasileira das empresas de serviços de conservação de energia
Procel	Programa nacional de conservação de energia elétrica
FP	Fator de potência
IEC	Comissão eletrotécnica internacional
NEMA	National electrical manufacturers Association
ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
NBR	Norma brasileira
AR	Alto rendimento
IR	Índice de rendimento

SUMÁRIO

METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	3
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	3
1.2. JUSTIFICATIVA.....	6
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.3.1. OBJETIVO GERAL.....	8
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1.4. DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	9
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	10
2.1. CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA.....	10
2.2. INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA.....	11
2.2.1. EFEITO 1 – FORÇA INDUZIDA EM UM CONDUTOR.....	11
2.2.2. EFEITO 2 – TENSÃO INDUZIDA EM UM CONDUTOR DEVIDO AO MOVIMENTO.....	12
2.2.3. EFEITO 3 – LEI DE FARADAY.....	12
2.3. CAMPO GIRANTE.....	14
2.4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	16
2.5. FATOR DE POTÊNCIA.....	20
2.6. DETALHES CONSTRUTIVOS.....	21
2.7. LIGAÇÃO DE MOTORES.....	25
2.8. CIRCUITO EQUIVALENTE.....	30
2.9. FLUXO DE POTÊNCIA.....	36
2.9.1. Potência de entrada:.....	37
2.9.2. Perdas no cobre do Estator:.....	37
2.9.3. Perdas no núcleo do estator:.....	37
2.9.4. Potência de entreferro:.....	38
2.9.5. Perdas no cobre do rotor:.....	38
2.9.6. Potência mecânica:.....	38
2.9.7. Perdas por atrito e ventilação:.....	39
2.9.8. Perdas suplementares:.....	39
2.9.8.1. Perdas nos condutores do estator devido ao fluxo de dispersão nas ranhuras:.....	39
2.9.8.2. Perdas nas partes finais da estrutura da máquina:.....	39
2.9.8.3. Perdas nas superfícies do estator e do rotor:.....	40
2.9.8.4. Perdas resistivas e de pulsação no rotor:.....	40
2.9.8.5. Outras perdas suplementares:.....	40
2.9.9. Potência de saída:.....	40
2.10. CATEGORIAS DE MOTORES.....	42
2.10.1. Categoria A:.....	42
2.10.2. Categoria B:.....	42
2.10.3. Categoria C:.....	42
2.10.4. Categoria D:.....	43
2.10.5. Categoria F:.....	43
2.11. REGIMES DE SERVIÇO (<i>DUTY CYCLE</i>).....	44
2.11.1. Regime contínuo – S1:.....	44
2.11.2. Regime de tempo limitado – S2:.....	44
2.11.3. Regime intermitente periódico – S3:.....	44
2.11.4. Regime intermitente periódico com paradas – S4:.....	44
2.11.5. Regime intermitente periódico com frenagem elétrica – S5:.....	44

2.11.6. Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente – S6:	45
2.11.7. Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica – S7:.	45
2.11.8. Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade de rotação – S8:.....	45
2.11.9. Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade – S9:.....	45
2.11.10. Regime com cargas constantes distintas – S10:.....	45
2.12. TIPOS DE CONJUGADO DA CARGA.....	46
2.12.1. Conjugado constante:.....	46
2.12.2. Conjugado linear:.....	47
2.12.3. Conjugado quadrático:.....	47
2.12.4. Conjugado hiperbólico:.....	48
2.12.5. Conjugado não definido:.....	49
3. MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES DE INDUÇÃO.....	50
3.1. MÉTODO DE HIRZEL DAS PERDAS SEGREGADAS (E1 DO PADRÃO IEEE 112-1996 MODIFICADO).....	50
3.2. MÉTODO DA ONTÁRIO HIDRO DE PERDAS SEGREGADAS.....	51
3.3. MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE F1 DO PADRÃO IEEE 112-1996...	51
3.4. MÉTODO PADRÃO DE ESCORREGAMENTO.....	51
3.5. MÉTODO ONTÁRIO DO ESCORREGAMENTO COMPENSADO.....	52
3.6. MÉTODO DA CORRENTE.....	52
3.6.1. BD Motor.....	53
4. METODOLOGIA DE ANÁLISE ENERGÉTICA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS - ELETROBRAS.....	54
4.1. MÉTODO ELETROBRAS.....	54
4.2. MOTORES DE “ALTO RENDIMENTO PLUS”.....	55
4.2.1. Características construtivas.....	55
4.2.2. Vantagens do motor de alto rendimento plus da WEG.....	56
4.3. DIAGNÓSTICO E RECOMENDAÇÕES PARA A OTIMIZAÇÃO DO USO DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA.....	57
4.4. PROCEDIMENTO MATEMÁTICO.....	58
4.5. ANÁLISE FINANCEIRA.....	59
5. RESULTADOS.....	61
6. CONCLUSÃO.....	64
6.1. DISCUSSÕES.....	64
6.2. TRABALHOS FUTUROS.....	65
REFERÊNCIAS.....	66

METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento do presente trabalho segue o seguinte roteiro: Introdução com objetivos, relato das justificativas e limites do trabalho; descrição do princípio de funcionamento de um MIT com abordagem sobre detalhes construtivos; fluxo de potência em um motor de indução trifásico; possíveis teorias de diagnóstico de um MIT; exploração da metodologia em questão com estudo de caso; conclusões.

Estes itens foram divididos da seguinte forma:

Capítulo I – Introdução:

Mostra o cenário geográfico e temporal no qual o trabalho está inserido. Apresenta dados sobre a importância dos MIT na indústria e dados sobre o setor elétrico brasileiro. Justifica a escolha do tema, apresenta os objetivos esperados e as delimitações adotados.

Capítulo II – Motor de Indução Trifásico – Princípio de Funcionamento:

Descreve o princípio de funcionamento de um motor de indução trifásico, salientando aspectos importantes para a metodologia explorada, tais como princípio de funcionamento, detalhes construtivos, escorregamento, circuitos equivalente, fator de potência, rendimento, fluxo de potência com ênfase no detalhamento das perdas e outras.

Capítulo III – Possíveis teorias de diagnóstico de um MIT:

Apresenta diferentes metodologias para fazer um diagnóstico de eficiência energética em um MIT, explorando a metodologia proposta – Método Procel.

Capítulo IV – Desenvolvimento com Estudo de Caso:

Aplica a metodologia proposta em um estudo de caso.

Capítulo V – O desenvolvimento do software:

Mostra o desenvolvimento do software criado no MATLAB.

Aplica a metodologia proposta em um estudo de caso utilizando o software desenvolvido com a ferramenta computacional MATLAB.

Capítulo VI – Conclusões:

São apresentadas as conclusões do presente trabalho com ênfase nos resultados obtidos.

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo vai tratar do tema proposto no trabalho, realizando uma contextualização dos problemas que envolvem a eficiência energética no Brasil e suas implicações para o meio ambiente.

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A necessidade de tomar atitudes conscientes e sustentáveis, torna-se cada vez mais necessária para o futuro. Com o crescimento acelerado dos processos de automação e toda a modernização dos setores produtivos, como exemplo a quarta revolução industrial com o novo conceito de *IoT, Internet of Things*.

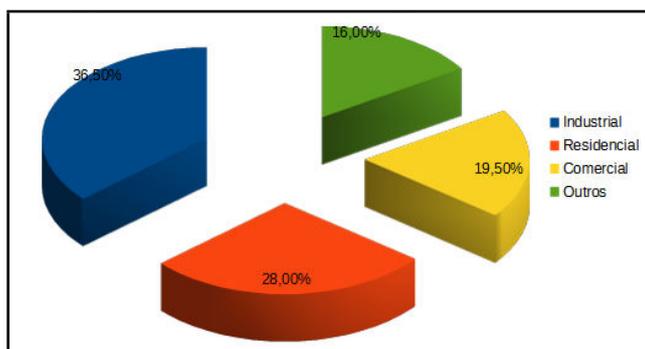
De acordo com a ABESCO, pela Folha de São Paulo em 2015, 10% de toda a energia gerada no Brasil seja desperdiçada, energia suficiente para abastecer os estados do Rio de Janeiro e Ceará por um ano.

Com base nessa necessidade de evitar desperdício é preciso identificar qual setor de consumo é mais representativo na matriz energética brasileira, para buscar soluções.

Segundo a Eletrobras, em 2015, o consumo de energia no país é distribuído como mostrado no Figura 1.1, que mostra o setor da indústria responsável pela maior parte do consumo de energia elétrica no país.

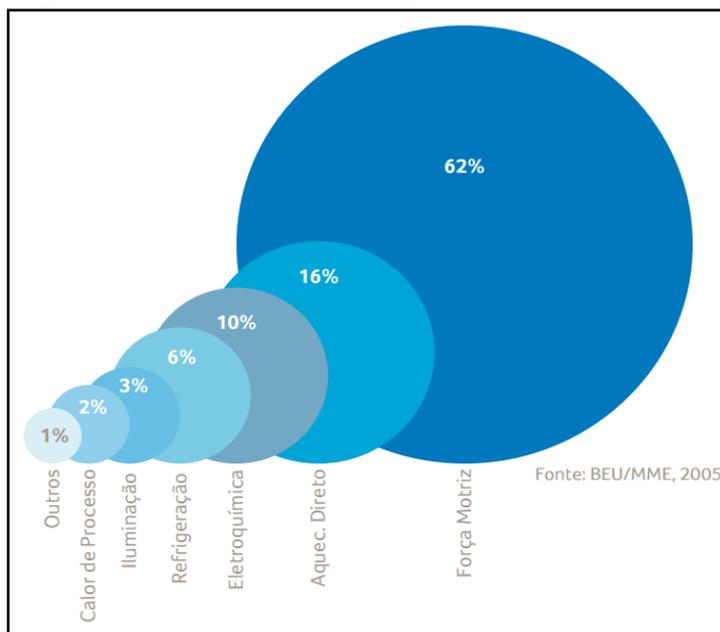
Como a indústria é o setor com maior responsabilidade pelo consumo de energia elétrica no Brasil a Eletrobras, em 2015, realizou um levantamento sobre o uso final da energia elétrica no setor industrial, os resultados são mostrados na Figura 1.2.

Figura 1.1 – Participações setoriais no consumo de energia elétrica no Brasil em 2015.



Fonte: Relatório Anual de sustentabilidade 2015 – Eletrobras.

Figura 1.2 – Usos finais de energia elétrica no setor da indústria.



Fonte: Motor elétrico *premium*. Eletrobras - Procobre

De acordo com dados da ABINEE – Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica, apud Maciel, (2010, p.143), os motores mais vendidos no Brasil possuem potências de 1cv a 10 cv. Conforme mostrado na Tabela 1.1.

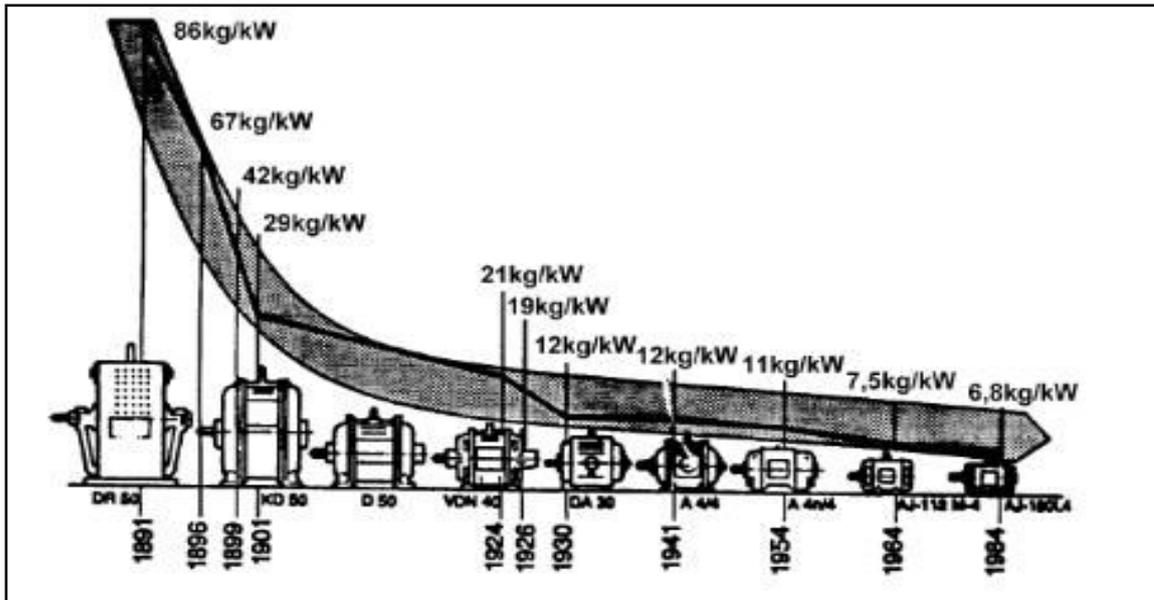
Tabela 1.1 – Representação da venda de motores no Brasil, de acordo com a faixa de potência.

Faixa de Potência	Percentual
Até 1 cv	32 a 36%
De 1 a 10 cv	54 a 59%
De 10 a 40 cv	6 a 8%
De 40 a 100 cv	0,5 a 1%
De 100 a 300 cv	0,4 a 0,5%
Acima de 300 cv	Menos de 0,4%

Fonte: MACIEL, Ednilson Soares. Transformadores e motores de indução. 22. Ed. Curitiba: Base Editorial, 2010

Um fato pertinente ao assunto é a evolução dos motores de indução trifásicos, segundo a Eletrobras (2003) apud Maciel (2010, p.142) os motores elétricos, especialmente os MIT estão progredindo muito na relação potência *versus* massa com o decorrer dos anos. A evolução do tamanho dos motores com relação a potência é mostrada na Figura 1.3.

Figura 1.3 – Evolução da relação potência x massa dos motores elétricos no decorrer dos anos.



Fonte: MACIEL, Ednilson Soares. Transformadores e motores de indução. 22. Ed. Curitiba: Base Editorial, 2010

O motor de indução trifásico (MIT) é o tipo de motor elétrico mais utilizado na indústria brasileira, Maciel (2010, p.142, p143) representando cerca de 90% dos motores utilizados, dentre os quais, 80% desses, são motores com potência de até 10 CV.

Tendo em vista a extensão do uso dos motores de indução trifásicos, é notória a sua importância para o país, expressando uma grande parcela do uso de energia proveniente de nossa matriz energética, especialmente dos nossos recursos hídricos.

Os dados apresentados, provam que o motor de indução trifásico é o tipo de motor mais utilizado devido sua robustez, tamanho reduzido e pequeno custo.

Diante da expressiva importância do motor de indução trifásico para a indústria brasileira, este trabalho tem por objetivo apresentar o desenvolvimento e a validação de uma metodologia para se realizar um diagnóstico energético, aplicado à carga motriz em um motor elétrico de indução trifásico.

1.2. JUSTIFICATIVA

A gestão de energia nos dias de hoje é uma preocupação mundial crescente, colocando o assunto em pauta entre os mais diversos países, inclusive no Brasil. Devido a escassez dos recursos hídricos, frentes de pesquisas buscam meios de geração de energia renováveis alternativos, ou aperfeiçoar os meios já existentes, tais como, geração de energia solar e eólica.

Mesmo com o crescimento das formas alternativas de geração de energia, a geração através de hidrelétricas ainda corresponde a maior parcela na matriz elétrica brasileira, na qual, segundo o Portal Brasil (2010), todas as 140 usinas hidrelétricas em operação do Brasil fornecem aproximadamente 77,1% de toda a potência utilizada no país.

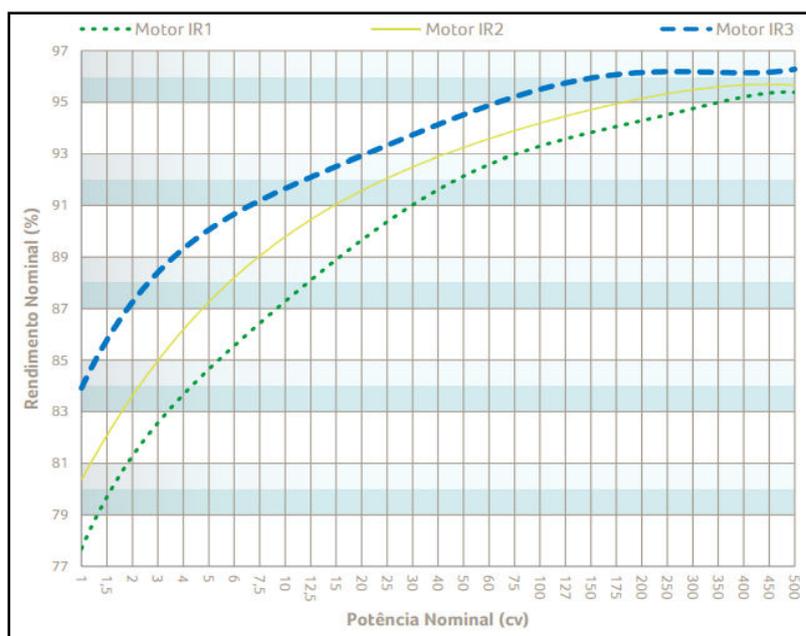
A crise dos recursos hídricos impacta diretamente no aumento da tarifa de energia. A preocupação com o assunto é tamanha que o governo federal lançou o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), com o *slogan* “Energia é dinheiro, não desperdice”, criado em 1985, tem como objetivo diminuir o desperdício de energia e buscar a eficiência energética.

O assunto apresenta tanta importância que em 2001 o governo brasileiro criou a lei da Eficiência Energética nº 10.295/2001. A lei estimula o desenvolvimento tecnológico, a preservação ambiental e a introdução de produtos mais eficientes no mercado nacional.

A lei da eficiência energética é a ferramenta da Política Energética Nacional, para determinar os níveis mínimos de eficiência energética e os níveis máximos de consumo de energia de diversos tipos de aparelhos e equipamentos, inclusive motores.

Com relação a motores elétricos, em 2009 ficou proibida a fabricação de motores com baixo nível de eficiência energética. Fazendo-se necessário que o motor possua no mínimo IR2, Índice de Rendimento Dois. Na Figura 1.4 é mostrado um gráfico com os índices de rendimento dos motores.

Figura 1.4 – Curva rendimento nominal x potência nominal, para motores standard (IR1), motores alto rendimento (IR2) e motores premium (IR3).



Fonte: Motor elétrico *premium*. Eletrobras - Procobre

A eficiência energética também tem importância ambiental, pois ao atingir um patamar satisfatório de eficiência ocorre a redução da emissão de carbono na atmosfera e os impactos ambientais da construção de novas usinas hidrelétricas.

Apesar da recessão econômica que o país está atravessando, existe uma prospecção de crescimento nos próximos anos, assim a demanda de produção nas indústrias aumentará e com isso a demanda por energia elétrica também.

Então tem-se um quadro, no qual existe a escassez de recursos hídricos e nossas fontes alternativas de geração de energia ainda não são suficientes para suprir nossas necessidades, com isso a tarifa das contas de energia aumenta, o país tem uma projeção de crescimento, exigindo uma maior demanda de energia.

Contudo, desenvolver novas formas de geração de energia, ou aperfeiçoar tecnologias já existentes não é o suficiente para levar o mundo para a sustentabilidade, a eficiência energética é necessária.

O setor industrial brasileiro é responsável por um consumo em cerca de 40% da energia elétrica do país e pouco mais de dois terços dessa energia utilizada é proveniente do uso de motores, os quais 90% são motores de indução trifásicos.

Então é de suma importância que exista um trabalho de eficiência nessas cargas tão representativas para o quadro energético brasileiro.

1.3. OBJETIVOS

Este tópico tratará dos objetivos esperados no trabalho.

1.3.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho se propõe a desenvolver um software capaz de demonstrar uma metodologia de diagnóstico energético aplicada em motores de indução trifásicos, com base na carga motriz, através dos dados de placa do motor e aquisição de dados de tensão, corrente e potência em regime de funcionamento.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Descrever o princípio de funcionamento, detalhes construtivos, fluxo de potência de um motor de indução trifásico.

Apresentar o circuito equivalente de um motor trifásico simplificado e por fase, com análise em função do escorregamento.

Comentar sobre eficiência energética e a lei da Eficiência Energética nº 10.295/2001.

Apresentar vantagens de motores de alto rendimento sobre motores *standard*.

1.4. DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Com a intenção de atingir a maior parcela de cargas da indústria brasileira com eficácia e simplicidade, no presente trabalho será explorado apenas o motor de indução trifásico, tipo gaiola de esquilo, ou *squirrel cage*.

A metodologia empregada neste trabalho se prende a análises em regime de funcionamento, não considerando momento de inércia da carga, potência necessária para partida ou análises para métodos de partida.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os conceitos básicos sobre o motor de indução trifásico, iniciando com uma apresentação de conversão eletromagnética, explanação sobre a formação do campo girante e o princípio de funcionamento do MIT, abordando detalhes construtivos do motor de indução trifásico com rotor em gaiola de esquilo.

Serão abordadas as diversas formas de ligação dos terminais de um MIT, os circuitos equivalentes do motor de indução, modelo simples, mais usual e o modelo de Thévenin.

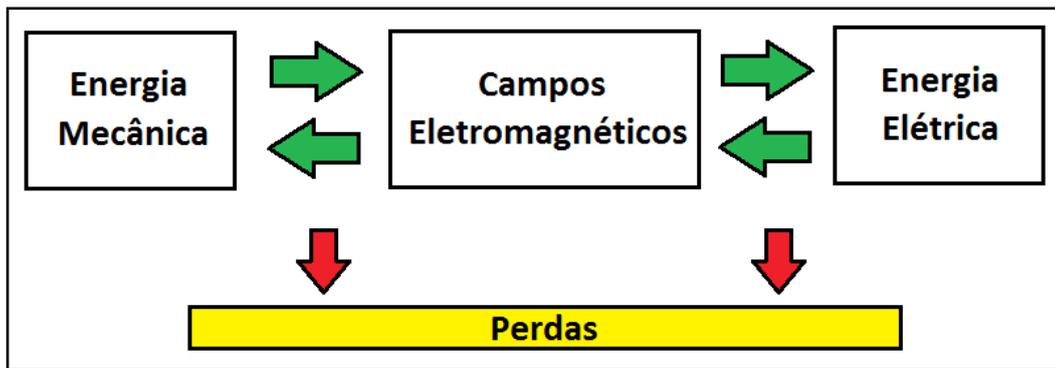
O capítulo é finalizado abordando o fluxo de potência no motor de indução trifásico, enfatizando as perdas e o conceito de eficiência energética.

2.1. CONVERSÃO ELETROMECAÂNICA

Em 1831, Michael Faraday apresentou o primeiro trabalho sobre a possibilidade de conversão entre energia elétrica e energia mecânica. Esta grande descoberta, proporcionou grandes avanços para a humanidade, em decorrência da criação de motores, geradores, transformadores e todos os outros equipamentos cujos princípios são baseados na conversão eletromagnética.

Segundo Kosow, (2005, p.2), “a conversão eletromagnética de energia como entendemos hoje, relaciona as forças elétricas e magnéticas do átomo com a força mecânica aplicada à matéria e ao movimento”. Esta relação proporciona a transformação de energia elétrica em energia mecânica e/ou vice-versa, tal conversão é sempre tida como reversível, porém existe a geração de outras formas indesejáveis de energia, fato este, que representa perda de rendimento no sistema. Como exemplos podemos citar energia luminosa, energia química e a energia térmica, presente na forma de calor em diversos processos de conversão de energia. Como mostrado no diagrama da Figura 2.1.

Figura 2.1 – Diagrama esquemático de conversão eletromecânica de energia.



Fonte: Autor

2.2. INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA

Existem basicamente três efeitos importantes que os campos magnéticos causam no seu entorno:

- A produção de força induzida em condutor carregado dentro do campo.
- Tensão induzida em um condutor que se desloca dentro de um campo.
- Tensão induzida a partir de um campo variante no tempo – lei de Faraday.

2.2.1. EFEITO 1 – FORÇA INDUZIDA EM UM CONDUTOR

Quando um condutor carregado é submetido a um campo magnético uniforme, esse exerce uma força sobre o condutor, representada matematicamente pela equação 2.1.

$$F = i \cdot l \cdot B \cdot \sin \theta \quad (2.1)$$

No qual F (N) é a força gerada, i (A) é a intensidade da corrente que o flui através do condutor, l (m) é o comprimento da parte do condutor imersa no campo, orientado no mesmo sentido da corrente, B é o vetor densidade de fluxo magnético (T) e θ é o ângulo formado entre os vetores l e B .

2.2.2. EFEITO 2 – TENSÃO INDUZIDA EM UM CONDUTOR DEVIDO AO MOVIMENTO

Quando um condutor descarregado se movimento dentro de um campo magnético uniforme, surgirá nele uma tensão induzida dada por

$$e_{ind}=(v \times B) \cdot l \quad (2.2)$$

Onde e_{ind} é a tensão induzida (V) e v é a velocidade relativa entre o condutor e o campo (m/s).

2.2.3. EFEITO 3 – LEI DE FARADAY

Segundo Chapman (2013, p.28), “A lei de Faraday afirma que, se houver um fluxo passando através de uma espira de fio condutor, então uma tensão será induzida sendo diretamente proporcional à taxa de variação do fluxo em relação ao tempo.”, como mostrado na Equação 2.3.

$$e_{ind}=\frac{-d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

No qual, ϕ é o fluxo magnético que passa através dessa espira (Wb). Quando ocorre o caso de uma bobina ter N espiras e o mesmo fluxo cruzar todas as N espiras, tem-se que a tensão induzida na bobina será como mostrado na equação 2.4.

$$e_{ind}=-N\frac{d\phi}{dt} \quad (2.4)$$

O sinal negativo é oriundo da lei de Lenz que afirma que o campo magnético gerado no circuito induzido, caso exista circulação de corrente, se opõe ao campo magnético que o originou.

A lei de Faraday é de fundamental importância para a compreensão do princípio de funcionamento de máquinas eletromecânicas e a lei de Lenz permite determinar a polaridade das tensões induzidas.

A descoberta de Michael Faraday proporcionou métodos para a transformação de energia mecânica (movimento) em energia elétrica (tensão induzida), necessitando apenas de um campo magnético de acoplamento.

O motor elétrico é uma máquina elétrica capaz de converter energia elétrica em energia mecânica, através da geração de um campo eletromagnético.

2.3. CAMPO GIRANTE

Para o funcionamento de um MIT é necessário a criação de um campo magnético de intensidade constante, cuja velocidade é expressa na equação 2.5.

$$n_{sinc} = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.5)$$

Onde n_{sinc} é velocidade síncrona (RPM), f é a frequência da rede elétrica na qual o motor está conectado (Hz) e P é o número de pólos do motor.

Este trabalho se limita a estudar motores com 2, 4, 6 e 8 pólos, os mais utilizados na indústria.

Tal campo, é gerado no indutor e é denominado de campo girante ou campo rotativo. É no campo girante onde os condutores do rotor estarão imersos, para que seja possível ocorrer todos os efeitos mencionados acima.

É possível criar um campo girante em qualquer sistema polifásico (bifásico, trifásico...), porém este trabalho se atém a explanação do campo girante trifásico, devido sua utilização nos motores de indução trifásicos.

Primeiramente é necessário saber que um sistema trifásico é composto por três correntes senoidais de mesma amplitude e frequência, mas defasadas entre si em 120° . A frequência da rede no Brasil corresponde à 60 Hz, os valores de tensão podem mudar de uma região para outra, podendo ter valores de linha (tensão entre fases) de 220 V ou 380 V.

Para se produzir um campo girante trifásico são necessários três enrolamentos (bobinas) idênticas, dispostas de 120° (espacialmente) entre si, com os seus respectivos eixos, tais enrolamentos são denominados de fases do motor.

As correntes equilibradas ao atravessar os seus respectivos enrolamentos, geram três campos pulsantes definidos respectivamente por

$$H_1 = H_M \cdot \text{sen } \omega t \quad (2.6)$$

$$H_2 = H_M \cdot \text{sen}(\omega t - 120^\circ) \quad (2.7)$$

$$H_3 = H_M \cdot \text{sen}(\omega t + 120^\circ) \quad (2.8)$$

A combinação desses três campos produz um campo magnético girante uniforme.

Considerando as três senóides que representam os valores instantâneos dos campos pulsantes H_1 , H_2 e H_3 , logo abaixo a representação vetorial de tais campos de acordo com o sistema de eixo adotado.

De acordo com a Figura 2.4, para $\omega t = 90^\circ$, tem-se que

$$H_1 = H_M \quad (2.9)$$

$$H_2 = -0,5 \cdot H_M \quad (2.10)$$

$$H_3 = -0,5 \cdot H_M \quad (2.11)$$

$$H_R = H_1 + H_2 + H_3 \Rightarrow \quad (2.12)$$

$$H_R = H_M + \sqrt{2 \cdot (0,5 \cdot H_M)^2 + 2 \cdot 0,25 \cdot H_M^2 \cdot \cos(120)} \Rightarrow \quad (2.13)$$

$$H_R = 1,5 \cdot H_M \quad (2.14)$$

De acordo com Maciel (2010, P.167), “Para qualquer instante pode-se demonstrar que $H_R = 1,5 H_M$ ”, ou seja, para uma mesma corrente, o motor trifásico gera um campo resultante 50% maior que uma máquina monofásica, que gera um $H_R = H_M$. Tal fato representa mais um motivo para o MIT ser o motor mais usado nas indústrias brasileiras, pois para uma mesma potência possui um tamanho reduzido com relação a um motor monofásico.

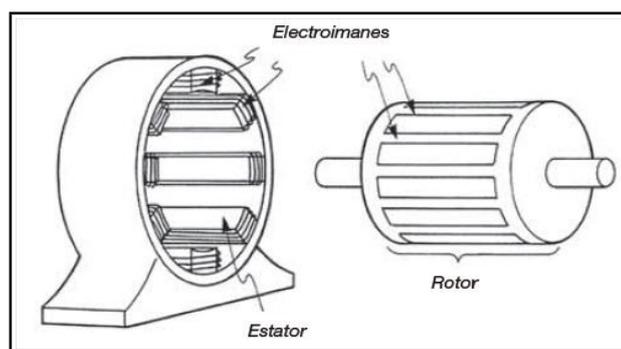
O sentido de rotação do motor está diretamente ligado a sequência das fases conectadas à rede elétrica, já que a sucessão de atrasos determina o sentido do campo girante. Para inverter o sentido de giro, deve-se inverter a corrente de duas fases.

2.4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O motor de indução é constituído basicamente por duas partes ativas, o sistema estatórico, indutor ou primário, onde se aloja os enrolamentos indutores e o sistema rotórico, que constitui o induzido ou secundário.

O estator é onde se localiza a armadura da máquina, os enrolamentos de cobre (bobinas) que são ligados à rede elétrica, com o intuito de torná-lo uma máquina de indução. Vide a Figura 2.2.

Figura 2.2 – Estator e rotor de um motor.



Fonte: <<http://pt.greatmagtech.org/magnetic-assembly/magnetic-components/magnetic-stator.html>>

Diferentemente do estator, o rotor, não possui alimentação elétrica. As tensões presentes no rotor são induzidas através da variação de fluxo, produzida pelo campo girante presente no estator – lei de Faraday, gerando assim correntes induzidas, que por sua vez geram campos magnéticos, que pela lei de Lenz tentam se opôr ao campo que os originou, gerando assim movimento relativo entre os enrolamentos estatórico e rotóricos.

Devido ao seu princípio de funcionamento baseado nas leis de Faraday-Lenz, é que o motor de indução recebe essa denominação.

A interação entre campos magnéticos no interior do motor só é possível devido a circulação de correntes rotóricas, responsáveis por manter o campo magnético induzido, que por sua vez, só são geradas quando há variação de fluxo. Para haver variação de fluxo é necessário que o rotor nunca alcance a velocidade do campo girante presente no estator, pois se os dois girassem na mesma velocidade, a lei de Faraday não seria válida, já que não haveria variação no fluxo magnético que atravessa o enrolamento rotórico.

De acordo com Martignoni (1987, p.173), “o sistema induzido pode acompanhar a rotação do campo indutor, mas necessariamente a uma velocidade inferior, a fim de se processar a geração das correntes induzidas e, por conseguinte, a reação motora”.

Chapman (2013, p.313) afirma que,

“há um limite superior finito para a velocidade do motor. Se o rotor do motor de indução estivesse girando na velocidade síncrona, as barras do rotor estariam estacionárias em relação ao campo magnético e não haveria tensão induzida. Se e_{ind} fosse igual a 0, então não haveria corrente nem campo magnético no motor. Sem campo magnético no rotor, o conjugado induzido seria zero e o rotor perderia velocidade como resultado das perdas por atrito”

Devido essa diferença de velocidade, é dito que não há um sincronismo entre o campo girante e o rotor, daí o termo de máquina assíncrona. Essa diferença entre a velocidade do campo girante e a velocidade do rotor é denominada de velocidade de escorregamento, equação 2.15.

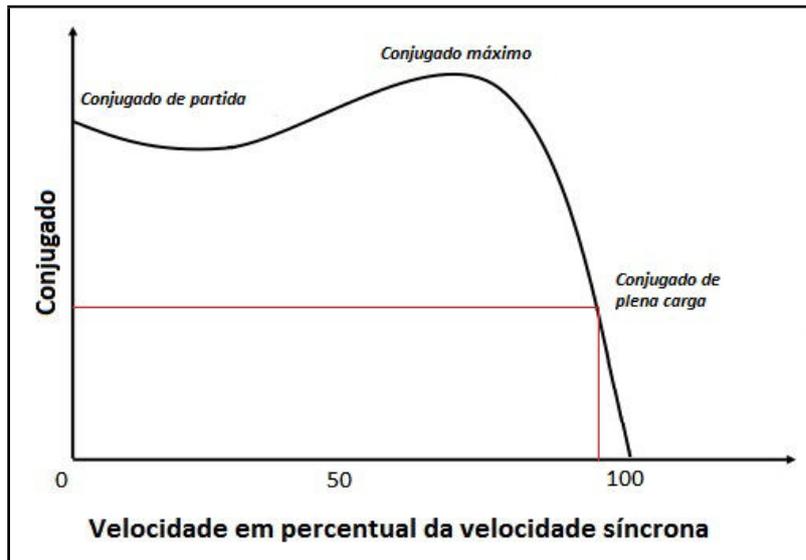
$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \quad (2.15)$$

Um termo mais comum é o escorregamento, que é tido como uma condição para que exista indução magnética. Sua representação é feita de forma percentual de expressar essa diferença de velocidade, como mostrado na equação 2.16.

$$S = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (\times 100\%) \quad (2.16)$$

De forma geral, o motor assíncrono opera com uma velocidade abaixo da velocidade síncrona, pois seu conjugado seria zero nessas condições, como é mostrado na figura 2.3.

Figura 2.3 – Curva característica de velocidade x conjugado de um MIT.



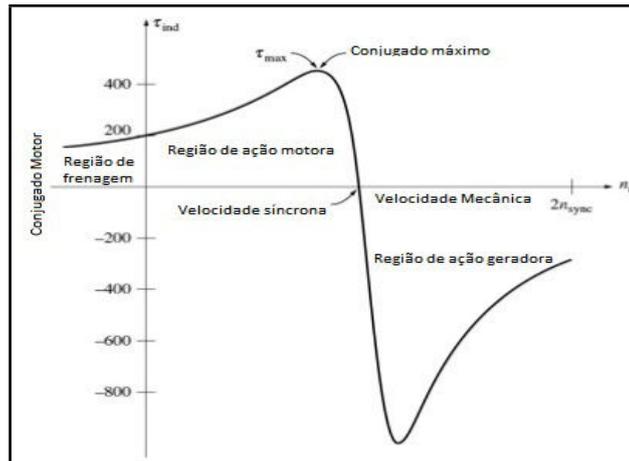
Fonte: Autor.

Dando continuidade à análise gráfica, também é notório que o seu conjugado de partida excede o conjugado de plena carga, de modo que ele consiga bancar a partida de qualquer carga que esteja dentro do seu limite de operação.

Apesar do conjugado de partida ser maior que o conjugado de plena carga, existe um ponto de conjugado máximo, que equivale a 200% a 300% do conjugado nominal.

Observando o gráfico apresentado na Figura 2.4, pode-se notar que ao fazer com que o rotor ultrapasse a velocidade síncrona, o motor passa a se comportar como gerador.

Figura 2.4 – Curva característica de velocidade x conjugado de um MIT, incluindo região de frenagem e de ação geradora.



Fonte: <<https://pt.slideshare.net/angeloahafner/induction-motors-casa>>

Caso o motor assuma um sentido de giro contrário ao sentido do campo girante, o conjugado induzido da máquina irá freá-la e posteriormente fazê-la girar no sentido oposto.

2.5. FATOR DE POTÊNCIA

A natureza indutiva do motor (propiciada pela presença de bobinas) gera uma reatância indutiva, que acarreta em uma defasagem entre a corrente e a tensão do motor, ou seja, um atraso entre tais grandezas, ao analisar de forma fasorial tal atraso se traduz em um ângulo, o fator de potência é o cosseno de tal ângulo. Muitas vezes encontrado nas placas dos motores como $\cos\phi$.

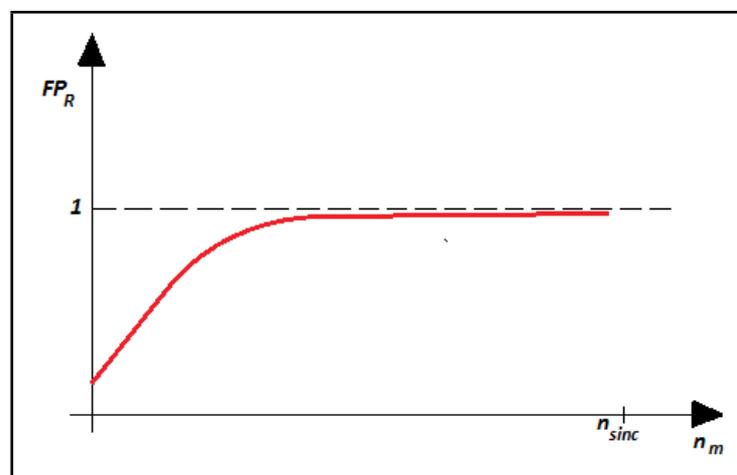
Os motores de indução trifásica possuem um fp (fator de potência) baixo devido sua natureza indutiva, porém quando operam com pouca carga, ou a vazio, esse fp assume um baixo valor, de 0,1 a 0,3 de acordo com a potência nominal do motor.

Um fator de potência muito baixo não é interessante para uma instalação, as concessionárias de energia exigem um fator de potência maior que 0,92 de seus clientes.

Fatores de potência baixo podem representar uma perda de energia, pois está se deixando de consumir energia ativa para consumir energia reativa.

É notório na Figura 2.3 e na Figura 2.4, que a curva de velocidade x conjugado na região de trabalho do motor é quase linear, pois nessa faixa a resistência do rotor é muito maior que sua reatância, desse modo o fp do motor é mais otimizado nessa região, conforme o gráfico mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Gráfico do fator de potência do rotor com relação a velocidade



Fonte: Autor.

2.6. DETALHES CONSTRUTIVOS

O motor de indução trifásico se divide em dois tipos com relação a construção do seu rotor, são eles, o motor de indução com rotor bobinado e o motor de indução com gaiola de esquilo.

Este trabalho se restringe ao estudo de motores com rotor gaiola de esquilo, porém será feito um breve comparativo entre os dois tipos. Na figura 2.6 são mostrados os dois tipos de motor de indução.

Figura 2.6 – Foto ilustrativa do motor gaiola de esquilo (à esquerda) e motor com rotor bobinado (à direita)



Fonte: Catálogo eletrônico de motores WEG.

O motor de indução trifásico com rotor bobinado, tem algumas vantagens sobre o motor do tipo gaiola de esquilo, sendo elas:

- Acesso aos enrolamentos rotóricos;
- Inserção de resistências no rotor, aumentando o conjugado de partida;
- Uma corrente de partida menor.

Porém existem desvantagens do rotor bobinado, sobre o rotor com gaiola de esquilo, tais como:

- Maior dificuldade na instalação;
- Maior necessidade de manutenção e uma equipe de manutenção mais capacitada, devido à presença de anéis coletores, molas e escovas de carvão;

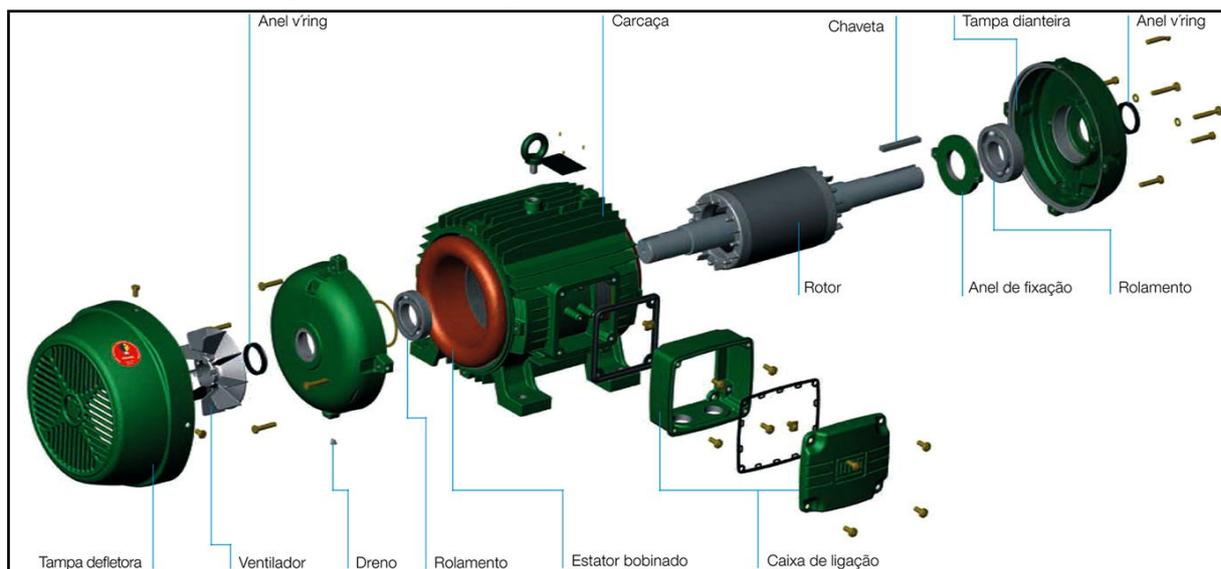
- Acionamento mais complexo devido à presença do banco de resistências, reostato, ou qualquer outro dispositivo que se conecte ao rotor.
- Um custo mais elevado devido à presença dos anéis coletores, o porta-escovas, as escovas e todo o trabalho realizado para a confecção do rotor bobinado;
- Maior peso e tamanho para uma mesma potência, exigindo suportes e fixações mais robustas.

Devido as vantagens de menor mão de obra na instalação e manutenção, tamanho e custos reduzidos, o motor de indução trifásico com rotor tipo gaiola de esquilo é o mais utilizado no Brasil.

A construção de um motor de indução do tipo gaiola de esquilo tem como principal característica sua simplicidade. Podendo ser dividido em estator, sua parte estacionária e no rotor, sua parte rotativa.

Na Figura 2.7 é ilustrado uma vista explodida de um motor com rotor do tipo gaiola de esquilo destacando os principais componentes.

Figura 2.7 – Vista explodida do motor modelo W21 da WEG



Fonte: <<http://www.sotofilhos.com.br/biblioteca/Noticias/Vista%20explodida%20motor%20eletrico%20WEG.html>>

Analisando a Figura 2.7, temos os seguintes elementos:

- Caixa de ligação: Permite o acesso aos terminais dos enrolamentos do estator;
- Carcaça: Suporte e proteção pra os enrolamentos do estator. Importante também para o resfriamento do motor devido as aletas que possibilitam maior troca de calor;
- Anel de fixação e tampas traseiras e dianteiras: Tem a função de fechar o motor e impedir o movimento radial do eixo;
- Rolamentos: Unem a parte fixa e a parte rotativa, possibilitando o movimento relativo entre elas.
- Anel V'ring ou Retentores: Localizados em volta do eixo, são responsáveis pela vedação do motor contra poeira e respingos.
- Ventilador ou Ventoinha: Acoplado diretamente ao eixo, tem a função de resfriar o motor durante o seu funcionamento, utilizando para tal função parte da potência do próprio motor.
- Tampa defletora: Responsável por direcionar a ventilação para as aletas da carcaça do motor a fim de resfriá-lo.
- Dreno: Dispositivo por onde a graxa de lubrificação do eixo é expelida ao inserir uma nova graxa.
- Estator bobinado: Composto por um núcleo ferromagnético com os enrolamentos de cobre ou alumínio esmaltado, responsáveis pela geração do campo girante.
- Rotor: Parte rotativa do motor, composta por barras de alumínio fundido e injetado no núcleo ferromagnético (semelhante ao núcleo do estator), formando uma única peça. Nas extremidades são soldados anéis de curto-circuito para realizar o fechamento das bobinas, que são formadas pelo conjunto de barras de alumínio e anéis de curto-circuito.
- Chaveta: Elemento responsável por acoplar o eixo do motor a um elemento de transmissão mecânica, tais como polia, correia, engrenagem e outros.

O núcleo ferromagnético é formado por um pacote de chapas de ferro silício isoladas entre si com uma fina camada de verniz, para dificultar a circulação de correntes de Foucault, ou correntes parasitas. Esse material é tratado termicamente para que sua estrutura cristalina tenha seus dipolos

alinhados ao máximo com campo magnético gerado, buscando otimizar as propriedades ferromagnéticas da estrutura.

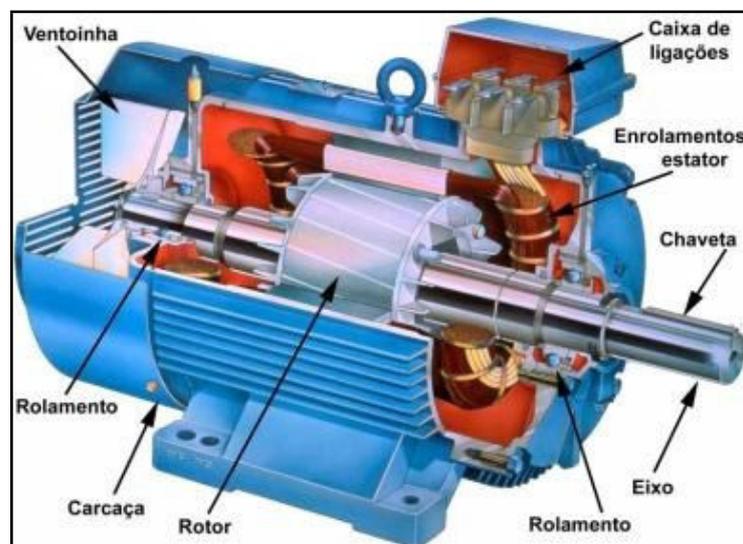
A manutenção das propriedades ferromagnéticas do núcleo são de suma importância para a eficiência energética do motor, pois com a perda desse comportamento ferromagnético o rendimento do motor cai.

Segundo Callister (2012, p.709):

Com o aumento da temperatura, maiores vibrações térmicas tendem a contrabalancear as forças de acoplamento dos dipolos nos materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos. Conseqüentemente, magnetização de saturação diminui gradualmente com a temperatura até a temperatura de Curie, em cujo ponto ela cai para próximo a zero

Na Figura 2.8 são mostrados maiores detalhes as partes ativas do motor, ou seja, as partes responsáveis por conduzir corrente elétrica ou campos eletromagnéticos.

Figura 2.8 – Vista em corte de um MIT gaiola de esquilo



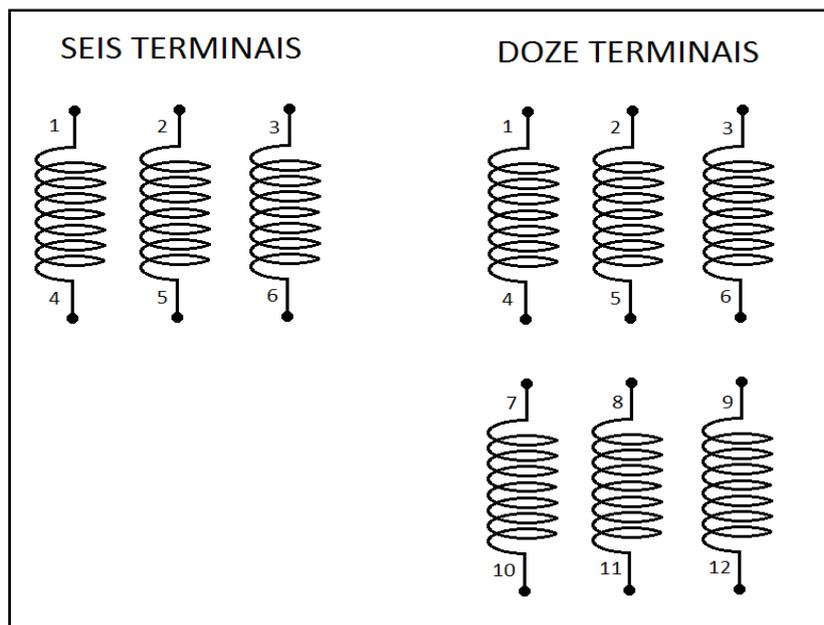
Fonte: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Vista-em-corte-de-um-MIT-O-principio-de-funcionamento-do-MIT-esta-ilustrado-no_fig1_272364115>

O nome gaiola de esquilo ou *squirrel cage*, vem da semelhança entre as barras rotóricas e os anéis de curto circuito, sem o núcleo, com uma roda para esquilos.

2.7. LIGAÇÃO DE MOTORES

Os motores de indução trifásicos tipo gaiola de esquilo podem apresentar um conjunto de três bobinas com seis terminais, ou seis bobinas com doze terminais no seu estator, para criar o campo girante, como mostrado na Figura 2.19. Um maior número de bobinas possibilita um maior leque de níveis de tensões no qual o motor pode operar.

Figura 2.9. - Representação dos enrolamentos de um motor de 6 terminais e 12 terminais.



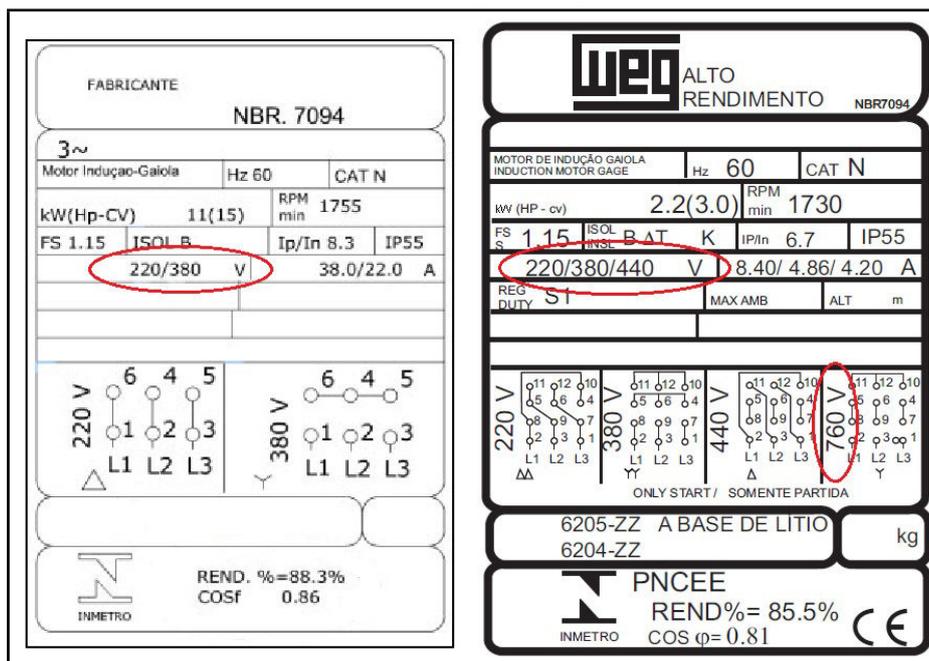
Fonte: Autor.

A sequência da numeração de identificação dos terminais de começo e fim das bobinas do motor segue padrões internacionais.

Como o motor é ligado a um sistema trifásico, então ele só terá três fases nas quais deverá se conectar, para isso é preciso realizar a conexão das bobinas, de tal forma que o motor seja alimentado por um nível de tensão adequado (e possível, de acordo com os dados da placa de identificação do motor) e de tal maneira que o motor tenha três terminais disponíveis, para a ligação à rede. Tais conexões são conhecidas como fechamento do motor.

Na placa de identificação do motor possui um campo que informa as diferentes tensões no qual aquele motor pode ser ligado. Para um motor de seis terminais, dois níveis de tensão, para um motor de doze terminais, quatro níveis de tensão. Conforme mostrado na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Placas de identificação de motores trifásicos de 6 terminais (à esquerda) e 12 terminais (à direita).



Fonte: <<https://www.eletronicamoderna.com/blog/date/2017-02> e <https://www.saladaeletrica.com.br/como-calculer-a-corrente-nominal-do-motor-trifasico-completo/>>

A placa de identificação mostra os níveis de tensão de linha nos quais o motor pode operar (na qual deve-se procurar a tensão disponível na rede elétrica do local da instalação) e suas respectivas ligações. Dentre esses vários níveis de tensão deve-se atentar ao mais baixo, pois ele é o nível de tensão nominal de uma bobina.

Para o motor de doze terminais existe uma tensão especial, a mais elevada, que só deve ser empregada na partida dos motores.

De uma forma sucinta, deve-se realizar o fechamento do motor, de tal forma que diante da tensão disponível na rede, a menor tensão na placa de identificação incida sobre a bobina.

Para um motor de seis terminais só existem duas formas de ligação possível, estrela (Y) ou triângulo (Δ). Na ligação estrela a tensão da rede (entre fases) é $\sqrt{3}$ vezes maior que a tensão na fase do motor, ou seja,

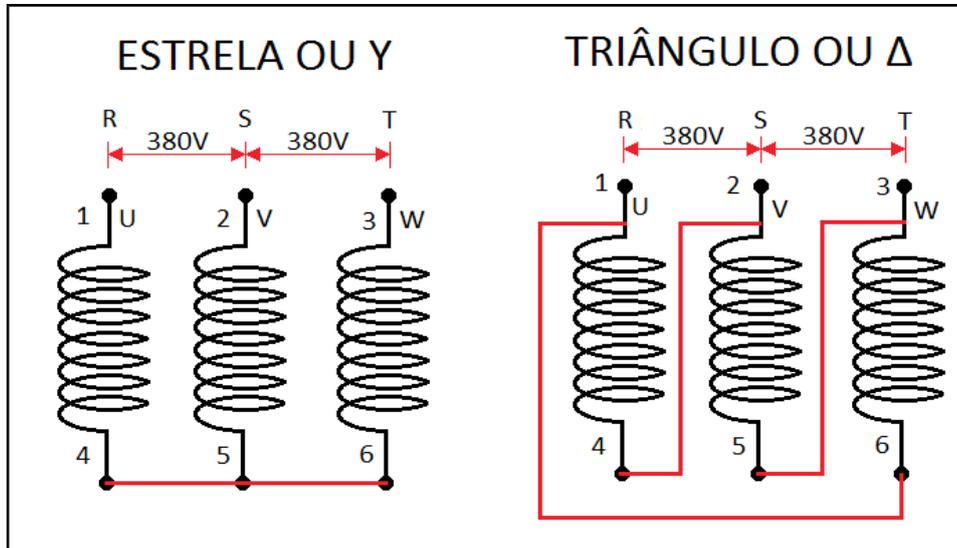
$$V_{LINHA} = \sqrt{3} \cdot V_{FASE} \quad (2.17)$$

Na ligação triângulo a tensão da rede (tensão de linha) é igual à tensão na fase do motor, ou seja,

$$V_{LINHA} = V_{FASE} \quad (2.18)$$

Na figura 2.11 são mostradas as ligações estrela e triângulo.

Figura 2.11 – Ligação Y e Δ.



Fonte: Autor.

Para o motor de doze terminais existem 4 ligações possíveis:

- Y paralelo: a relação entre as tensões é expressa pela equação (2.17);
- Δ paralelo: a relação entre as tensões é expressa pela equação (2.18);
- Y série: a relação entre as tensões é expressa por,

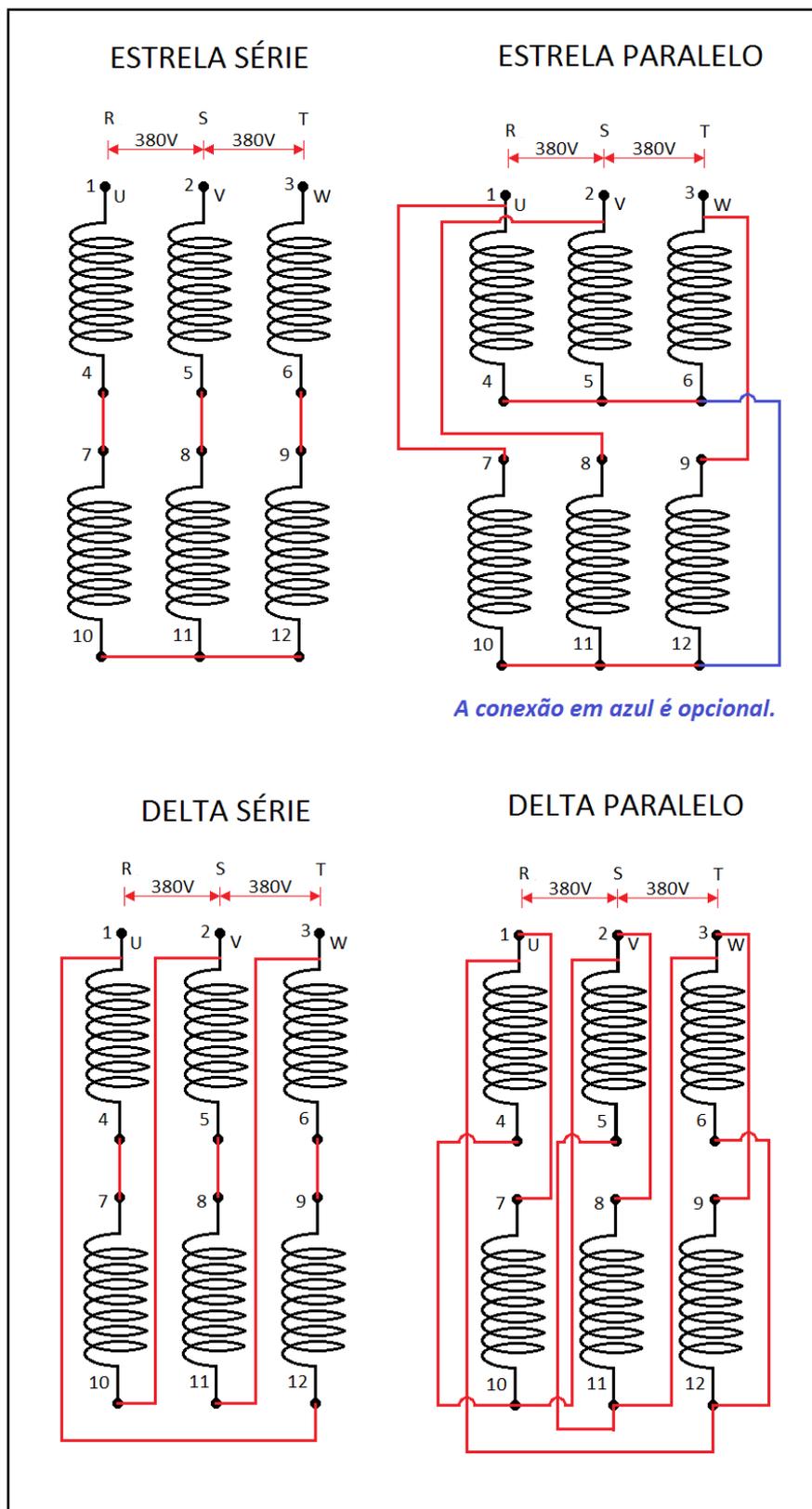
$$V_{LINHA} = 2\sqrt{3} \cdot V_{FASE} \quad (2.19)$$

- Δ série: a relação entre as tensões é expressa por,

$$V_{LINHA} = 2 \cdot V_{FASE} \quad (2.20)$$

Na figura 2.12 são mostradas as ligações: estrela série, estrela paralelo, triângulo série e triângulo paralelo.

Figura 2.12 – Ligações delta série, delta paralelo, estrela série e estrela paralelo.



Fonte: Autor

Os terminais 1, 2 e 3 em todas as situações são os terminais que recebem as fases R, S e T.

Após o fechamento do motor deve-se conectá-lo à rede, porém não é interessante ligar motores de grande porte diretamente a rede através de uma partida direta, pois ocorreram distúrbios no sistema, como afundamentos de tensão e transientes.

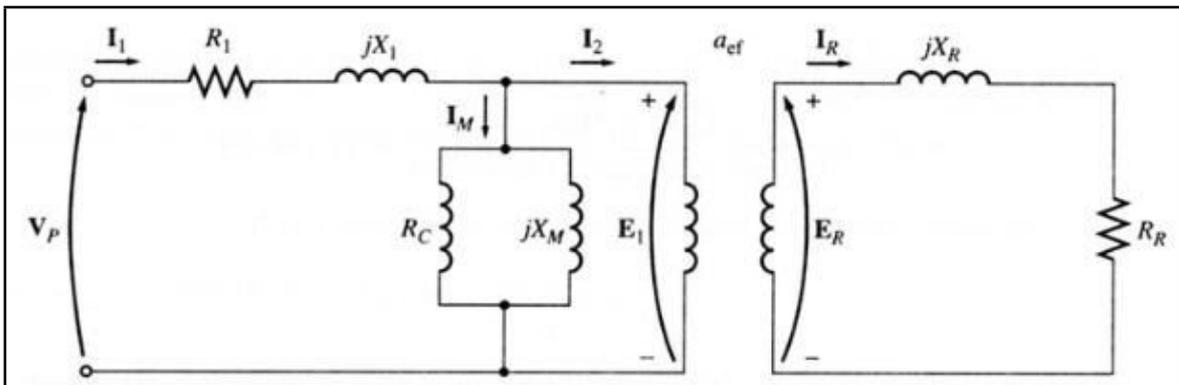
Então deve se definir um método de partida, podendo ser tanto um método convencional, como partida compensada ou Y- Δ , como um método com partida eletrônica através de *soft-starters* ou conversores de frequência.

2.8. CIRCUITO EQUIVALENTE

Como o motor de indução tem toda sua potência fornecida apenas pelo estator, é dito que ele possui excitação simples. Diferentemente das máquinas síncronas e máquinas de corrente contínua, que possuem o circuito de campo independente, ou seja, excitação dupla.

Devido a tal peculiaridade o circuito equivalente de um motor de indução é muito similar ao circuito equivalente de um transformador, o qual será usado para construir o modelo do MIT, modelo este mostrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Circuito equivalente por fase de um MIT no qual o estator e o rotor são conectados através de um transformador ideal com relação de espiras a_{ef} .



Fonte: CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2012

No circuito apresentado na figura 2.13 temos as seguintes variáveis:

- V_P = Tensão aplicada por fase ao estator;
- I_1 = Corrente de entrada do estator, por fase;
- R_1 = Resistência do enrolamento do estator;
- X_1 = Reatância de dispersão do enrolamento estatórico;
- I_M = Corrente de magnetização;
- X_M = Reatância de magnetização do núcleo;
- R_C = Resistência de perdas do núcleo;
- I_2 = Corrente efetiva que gera E_1 ;
- E_1 = Tensão interna primária;
- E_R = Tensão induzida no rotor;
- I_R = Corrente rotórica;

X_R = Reatância do enrolamento do rotor;

R_R = Resistência do bobinado do rotor.

Porém tal modelo deve ser aperfeiçoado para incluir a frequência variável do rotor e outros efeitos do motor de indução. Em uma máquina de indução quando uma tensão é aplicada nos enrolamentos do estator surge uma tensão induzida no circuito do rotor.

De acordo com a Lei de Faraday, quanto maior for o movimento relativo entre os campos, indutor e induzido, maior será a tensão e a frequência induzidas. O movimento relativo máximo ocorre na situação de rotor travado (ou bloqueado), de modo que nessa situação é onde ocorre a maior tensão e maior frequência induzidas. A situação que gera tensão e frequência induzidas nulas é quando o rotor girar na velocidade do campo girante do indutor, ou seja, com velocidade síncrona, assim não há movimento relativo entre os campos magnéticos.

Quaisquer situações entre essas duas condições possuem tensão e frequência induzidas proporcionais ao escorregamento da máquina, portanto,

$$E_R = sE_{R0} \quad (2.21)$$

$$f_{\mathfrak{R}} = sf_{se} \quad (2.22)$$

Onde E_{R0} é a tensão induzida no rotor na condição de rotor travado, e f_{se} é a frequência do campo girante do estator.

A tensão é induzida em um circuito que apresenta resistência e reatância, conforme mostrado na Figura 2.15, porém a parte resistiva é fixa conforme a variação de frequência no induzido, exceto pelo efeito pelicular, mas a reatância é afetada de forma mais incisiva por essa variação de frequência, ou seja, a reatância do rotor é diretamente influenciada pelo escorregamento.

$$X_R = \omega_{\mathfrak{R}} L_R \Rightarrow X_R = (2\pi f_{\mathfrak{R}}) L_R \quad (2.23)$$

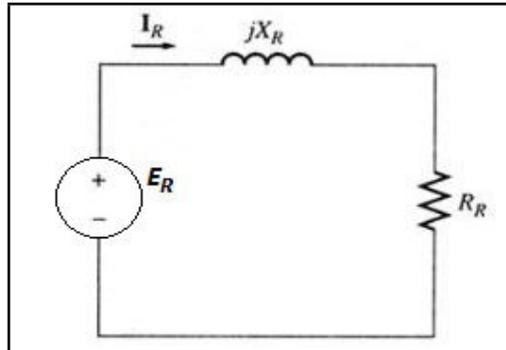
Onde, L_R corresponde a indutância do rotor, substituindo a Eq. (2.22) na Eq. (2.23), tem-se,

$$\begin{aligned} X_R &= 2\pi (sf_{se}) L_R \Rightarrow X_R = s(2\pi f_{se} L_R) \\ X_R &= sX_{R0} \end{aligned} \quad (2.24)$$

Onde X_{R0} é a reatância do rotor, estando o mesmo bloqueado, situação mais crítica.

Com as relações encontradas que se referem a E_R e X_R , é possível encontrar os valores referentes a parte rotórica do circuito equivalente, conforme mostrado na Figura 2.14.

Figura 2.14 – Circuito equivalente do rotor de um motor de indução.



Fonte: CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2012

De acordo com a Eq. (2.21) e a Eq. (2.24), temos os valores das incógnitas apresentadas no modelo da Figura 2.13, relacionando a tensão induzida com a impedância é possível encontrar a corrente I_R .

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} \Rightarrow I_R = \frac{E_R}{R_R + jsX_{R0}} \quad (2.25)$$

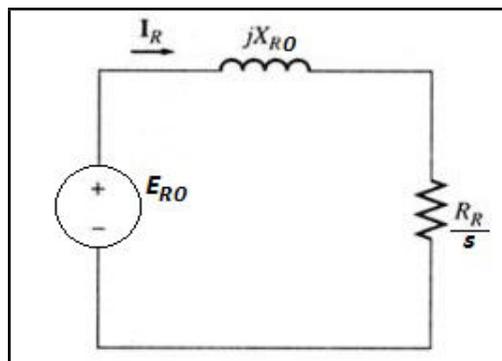
Ao realizar a divisão do numerador e do denominador por s , segundo Chapman é observado que, “é possível tratar todos os efeitos, que ocorrem no rotor devidos a uma velocidade variável, como causados por uma impedância variável alimentada [...] a partir de uma fonte de tensão constante E_{R0} ”.

$$I_R = \frac{E_{R0}}{\frac{R_R}{s} + jX_{R0}} \quad (2.26)$$

Com isso é apresentado um novo circuito equivalente, mostrado na Figura 2.15, cujo a tensão é constante e impedância equivalente corresponde a relação mostrada na Eq. (2.27).

$$Z_{R,eq} = \frac{R_R}{s} + jX_{R0} \quad (2.27)$$

Figura 2.15 – Circuito equivalente do rotor de um motor de indução com todos os efeitos devido a variação de escorregamento, concentrados no parâmetro R_R .



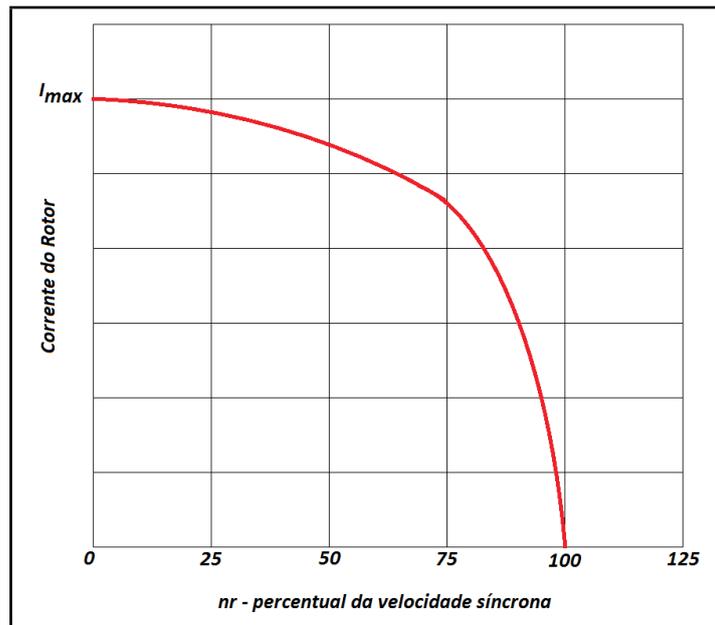
Fonte: CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2013

Com posse da equação (2.26) é possível fazer uma análise da corrente rotórica com relação ao escorregamento de um motor, possibilitando a geração do gráfico mostrado na Figura (2.16).

A partir do gráfico da Figura (2.16) observa-se que a corrente do rotor tende a valores muito elevados na situação de rotor bloqueado, portanto, tal situação é destrutiva para o motor, conforme mostrado na Figura (2.17) e deve ser evitada.

A situação apresentada na Figura (2.17) pode ocorrer por diversas causas quando não existe uma proteção adequada para o motor, tais como motor com rotor travado, motor subdimensionado, troca de um motor por outro de menor potência sem estudo prévio.

Figura 2.16 – Gráfico de corrente x velocidade do rotor.



Fonte: Autor.

Figura 2.17 – Motor queimado devido sobrecarga ou rotor travado.



Fonte: <<http://bezerramotores.com.br/queimas-de-motores-eletricos/causas-de-queima-de-motores-eletricos/>>

O circuito equivalente final do motor de indução é obtido ao refletir o circuito rotórico, Figura (2.15), para o lado do circuito estatórico através da relação de transformação a_{ef} , Figura (2.13). Então tem-se que,

$$E_1 = E'_R = a_{ef} E_{R0} \quad (2.28)$$

$$I_2 = \frac{I_R}{a_{ef}} \quad (2.29)$$

$$Z_2 = a_{ef}^2 \left(\frac{R_R}{s} + jX_{R0} \right) \quad (2.30)$$

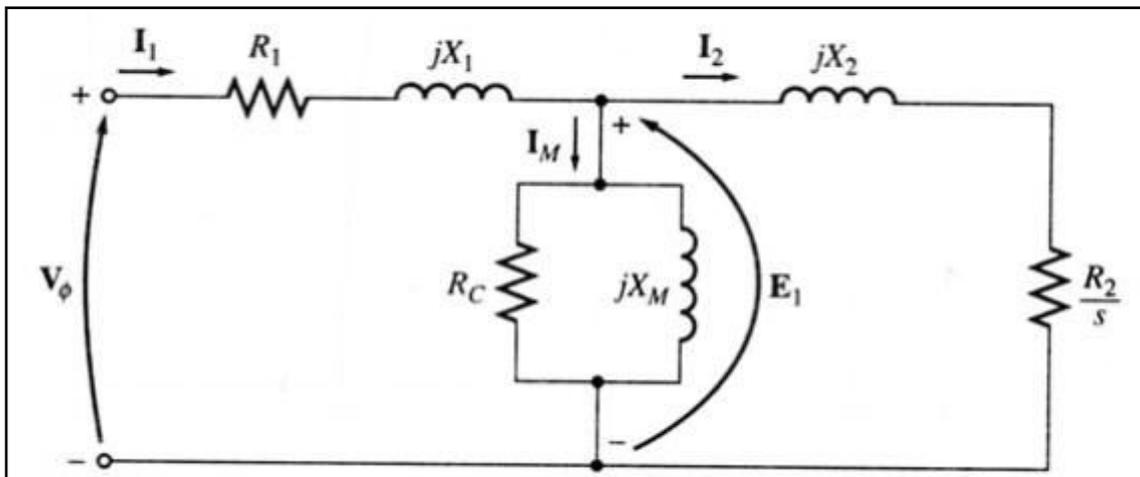
Adotando-se que,

$$R_2 = a_{ef}^2 R_R \quad (2.31)$$

$$X_2 = a_{ef}^2 X_{R0} \quad (2.32)$$

Pode-se criar o circuito equivalente mostrado na Figura (2.18).

Figura 2.18 – Circuito equivalente por fase de um motor de indução com todas as variáveis referidas ao estator.



Fonte: CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2013

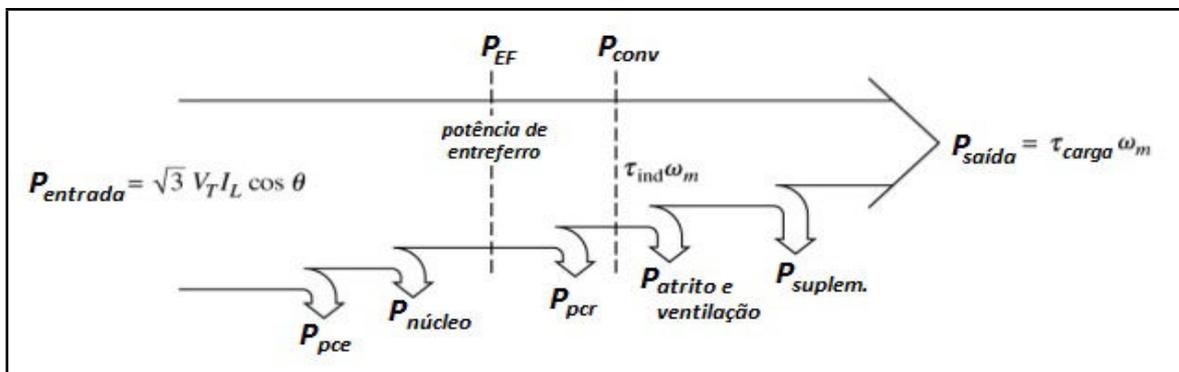
2.9. FLUXO DE POTÊNCIA

A potência de entrada de um MIT é na forma de tensões e correntes trifásicas e sua potência de saída é na forma de energia mecânica. Assim como qualquer outra máquina, o motor de indução possui perdas de potência durante seu funcionamento.

Apesar de possuir perdas, o rendimento nominal de um motor de indução trifásico é acima de 80%, dependendo de sua potência nominal, um rendimento bastante elevado.

Na Figura (2.19) é mostrada a relação entre a potência de entrada de um MIT e a potência de saída, com suas perdas durante a conversão.

Figura 2.19 – Fluxo de potência de um motor de indução trifásico (MIT).



Fonte: CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2013

Com base na Figura (2.18) e na Figura (2.19) pode-se classificar as perdas como:

- Perdas no cobre do estator;
- Perdas no núcleo do estator;
- Perdas no cobre do rotor;
- Perdas por atrito e ventilação;
- Perdas suplementares.

E as potências intermediárias, relacionadas as perdas, como:

- Potência de entrada;
- Potência de entreferro;
- Potência mecânica;
- Potência de saída.

2.9.1. Potência de entrada:

É a potência requerida da rede pelo motor, é expressa como,

$$P_{ENTRADA} = \sqrt{3} V_L I_L \cos\theta \quad (2.33)$$

2.9.2. Perdas no cobre do Estator:

As primeiras perdas enfrentadas pela máquina são as perdas joulicas no enrolamento do estator (perdas no cobre do estator P_{PCE}), que se dão na forma de I^2R , ou seja, variam de acordo com o quadrado da corrente que circula no estator da máquina. A resistência apresentada pelos condutores do estator também influenciam diretamente na P_{PCE} , logo o projeto da máquina deve se ater a bitola do condutor utilizado, sua geometria, seu comprimento e a temperatura de trabalho do mesmo.

Representado como R_1 no circuito equivalente pode ter a sua potência expressa como,

$$P_{PCE} = 3 I_1^2 R_1 \quad (2.34)$$

2.9.3. Perdas no núcleo do estator:

Logo em seguida das perdas no cobre do estator temos as perdas no núcleo do estator, $P_{NÚCLEO}$, que são oriundas devido a histerese do material ferromagnético e a existência de correntes parasitas, também denominadas como correntes de Foucault, circulando no núcleo.

Apesar da sua localização no fluxo de potência, essas perdas englobam também as perdas no núcleo do rotor, tratando-as assim de uma forma mais simples, sendo arbitrária sua localização no fluxo.

Representado como a condutância do resistor G_C , no circuito equivalente pode ter a sua potência expressa como,

$$P_{NÚCLEO} = 3 E_1^2 G_C \quad (2.35)$$

Onde E_1 é a tensão sobre o ramo paralelo de magnetização, conforme visto na Figura 2.18.

2.9.4. Potência de entreferro:

A potência que segue em direção ao eixo da máquina através do entreferro da máquina, ou *air-gap*, é chamada de potência de entreferro, P_{EF} . Dada por,

$$P_{EF} = P_{ENTRADA} - P_{PCE} - P_{NÚCLEO} \quad (2.36)$$

Essa potência é a responsável pelo conjugado eletromecânico do motor, porém parte dela é perdida no rotor da máquina.

2.9.5. Perdas no cobre do rotor:

Ao chegar no rotor da máquina as primeiras perdas são relativas as perdas joulicas no cobre do rotor, P_{PCR} , a qual segue os mesmos preceitos das perdas no cobre do estator.

Representado como R_2 no circuito equivalente pode ter a sua potência expressa como,

$$P_{PCR} = 3 I_R^2 R_2 \quad (2.37)$$

2.9.6. Potência mecânica:

A potência que supera todas as perdas mencionadas anteriormente é convertida em potência mecânica, P_{CONV} . Dada por,

$$P_{CONV} = P_{EF} - P_{PCR} \quad (2.38)$$

2.9.7. Perdas por atrito e ventilação:

Após a conversão da potência elétrica em potência mecânica temos as perdas por atrito nos rolamentos dos mancais que podem prejudicar bastante o motor caso não sejam corretamente lubrificados, respeitando a periodicidade de troca dos rolamentos. Atrito com os retentores (anéis *o'ring* ou *v'ring*), que devem ser trocados periodicamente. Atrito do rotor com o ar em volta dele.

As perdas por ventilação, potência essa utilizada para o funcionamento do ventilador do motor, que joga o ar para a tampa defletora, que por sua força a passagem do mesmo pelas aletas do motor, para sua refrigeração.

2.9.8. Perdas suplementares:

São todas as perdas da máquina, que não estão englobadas nos itens expostos anteriormente. Apesar de contradições quanto a sua origem, considera-se, que são causadas pela corrente de carga da máquina, que gera pulsos de fluxo magnético causando uma dispersão do campo magnético principal, resultando assim em correntes parasitas no núcleo e em toda a estrutura metálica da máquina. Os principais componentes dessas perdas são:

2.9.8.1. Perdas nos condutores do estator devido ao fluxo de dispersão nas ranhuras:

Geradas por um fluxo de dispersão que atravessa as ranhuras do estator transversalmente, diminuindo a resistência do condutor, efeito pelicular, devido à presença de harmônicas.

2.9.8.2. Perdas nas partes finais da estrutura da máquina:

Causadas devido a dispersão do fluxo presente no final do enrolamento do estator que possui uma curvatura.

2.9.8.3. Perdas nas superfícies do estator e do rotor:

Essas perdas são causadas devido à presença das ranhuras nas superfícies das máquinas, que geram uma perda durante a transferência do campo, causando pequenos afundamentos no campo magnético principal que atravessa o entreferro.

2.9.8.4. Perdas resistivas e de pulsação no rotor:

As componentes de altas frequências geradas devido as perdas suprarreferidas induzem correntes parasitas em toda a estrutura do rotor, que mais uma vez aumenta a resistência das barras condutoras do rotor, devido ao efeito pelicular.

2.9.8.5 Outras perdas suplementares:

Podem ser citadas como perdas suplementares a saturação do material ferromagnético e as imperfeições no isolamento entre os barramentos do rotor e o núcleo.

2.9.9. Potência de saída:

A potência que atravessa todas as perdas presentes na máquina e fornece energia mecânica à ponta do eixo do motor é chamada de potência de saída. Caso a potência das perdas suplementares, de atrito e de ventilação sejam conhecidas, pode-se colocar que,

$$P_{SAÍDA} = P_{CONV} - P_{AeV} - P_{SUPLEM} \quad (2.39)$$

Ainda sobre o fluxo de potência de um motor de indução pode-se afirmar que; quanto maior a velocidade do motor com relação a velocidade síncrona, maiores são as perdas por atrito, ventilação e as perdas suplementares, todavia, menor serão as perdas no núcleo.

Esse fato torna esse conjunto de perdas denominado como perdas rotacionais, que são tidas como constante mesmo com a variação da velocidade da máquina, devido a esse comportamento de o acréscimo de uma ser compensada pelo decréscimo da outra.

2.10. CATEGORIAS DE MOTORES

O advento do rotor de dupla gaiola possibilitou uma versatilidade nos projetos de motores de indução trifásico, no tocante a relação conjugado *versus* escorregamento, proporcionando diferentes categorias de motores, que **segundo Kosow**, se dividem da seguinte forma:

2.10.1. Categoria A:

Um motor de indução com um rotor do tipo gaiola de esquilo normal, um torque de partida de 1,5 a 1,75 vezes o torque nominal, com uma regulação de velocidade em torno de 5%.

Possui uma rápida aceleração e uma corrente de partida de 5 a 7 vezes a corrente nominal.

2.10.2. Categoria B:

Conhecido como motor de utilização geral, é muito semelhante ao motor da categoria A, mas possui uma corrente de partida reduzida com relação a este, na qual a corrente de partida varia de 4,5 a 5 vezes a corrente nominal, todavia o conjugado de partida também é reduzido.

2.10.3. Categoria C:

Possui um rotor do tipo dupla gaiola de esquilo, desenvolve um maior conjugado de partida, variando de 2 a 2,5 vezes o conjugado nominal, com uma baixa corrente de partida de 3,5 a 5 vezes a nominal.

Tende a se aquecer com partidas frequentes, devido a dissipação térmica limitada nos enrolamentos da dupla gaiola, indicado para movimentação de cargas rápidas e com baixa inércia. Tem uma regulação de velocidade pior que as categorias A e B.

2.10.4. Categoria D:

Conhecido como motor do rotor de alta resistência, logo, alto torque. Possui um torque de partida em torno de 3 vezes o torque nominal, com uma corrente de partida de 3 a 8 vezes a corrente nominal.

Projetado para ciclos de trabalhos duradouros e cargas com alta inércia, porém como os motores da categoria C, tende a sobreaquecer com partidas frequentes.

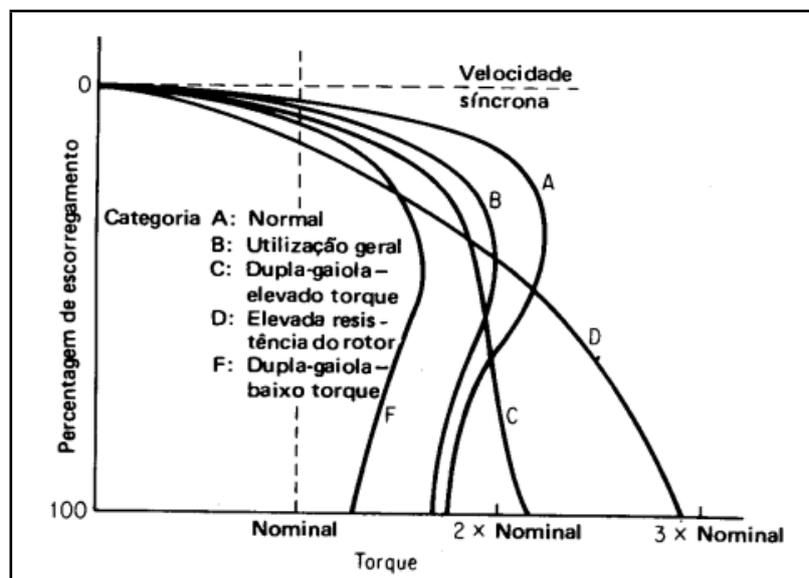
2.10.5. Categoria F:

Conhecido como motor de dupla gaiola para baixo torque, produz um conjugado de partida de aproximadamente 1,25 vezes o conjugado nominal e baixas correntes de partida, de 2 a 4 vezes a corrente nominal.

Possui uma regulação de velocidade mais pobre que a categoria B, menos capacidade de sobrecarga e normalmente menor rendimento.

Na Figura 2.20 é mostrado as curvas típicas de torque *versus* escorregamento para cada categoria.

Figura 2.20 – Curva típica de torque x escorregamento, para diversas categorias de motores.



Fonte: CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. Ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2014

2.11. REGIMES DE SERVIÇO (*DUTY CYCLE*)

Regime de serviço, segundo a IEC60034-1 é o grau de regularidade da carga a que o motor é submetido.

Os regimes de serviço podem ser classificados como:

2.11.1. Regime contínuo – S1:

Operação com carga constante com duração de tempo suficiente para a máquina atingir seu equilíbrio térmico.

2.11.2. Regime de tempo limitado – S2:

Operação com carga constante com duração de tempo menor que a requerida para atingir o equilíbrio térmico da máquina, sucedido de um tempo de repouso com duração suficiente para reestabelecer o equilíbrio térmico da máquina.

2.11.3. Regime intermitente periódico – S3:

Operação em ciclos idênticos, um período de funcionamento com carga constante e um período de repouso. Este ciclo tem como fator limitante a corrente de partida do motor não elevar significativamente sua temperatura.

2.11.4. Regime intermitente periódico com paradas – S4:

Operação em ciclos idênticos de intervalos bem curtos, compostos por, um período de partida, um período de funcionamento com carga constante e um período de repouso.

2.11.5. Regime intermitente periódico com frenagem elétrica – S5:

Operação em ciclos idênticos de intervalos bem curtos, compostos por, um período de partida, um período de funcionamento com carga constante, um período de frenagem e um período de repouso.

2.11.6. Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente – S6:

Operação em ciclos idênticos, um período de funcionamento com carga constante e um período com o motor a vazio, não possuindo período de repouso.

2.11.7. Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica – S7:

Operação em ciclos idênticos de intervalos bem curtos, compostos por, um período de partida, um período de funcionamento com carga constante e um período de frenagem, não possuindo período de repouso.

2.11.8. Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade de rotação – S8:

Operação em ciclos idênticos de intervalos bem curtos, compostos por, um período de partida, um período de funcionamento com carga constante com certa velocidade e um período com outra carga constante, distinta da primeira com diferentes velocidades, não possuindo período de repouso.

2.11.9. Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade – S9:

Operação com carga e velocidade variante no tempo sem periodicidade, admitindo sobrecargas frequentes, dentro da faixa de funcionamento admissível.

2.11.10. Regime com cargas constantes distintas – S10:

Operação com carga e velocidade variante no tempo com duração suficiente para a máquina atingir seu equilíbrio térmico, podendo operar a vazio ou se manter em repouso

2.12. TIPOS DE CONJUGADO DA CARGA

É o conjugado resistente da carga, que depende do tipo de carga a ser acionada pelo motor. Podem ser classificados como:

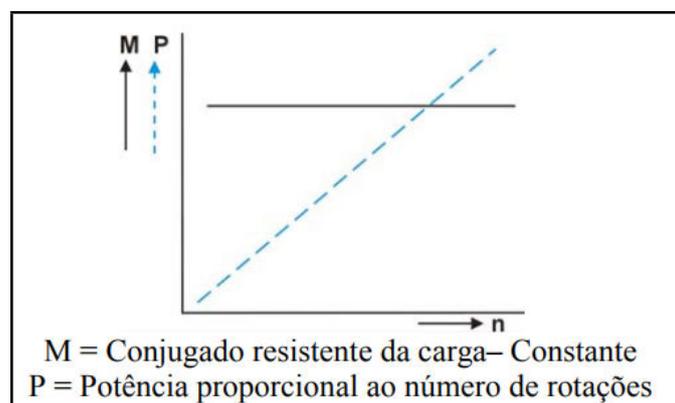
2.12.1. Conjugado constante:

Máquinas com esse tipo de conjugado apresentam um conjugado resistente constante independente de qualquer variação de velocidade da máquina, como é mostrado a Figura (2.21).

Exemplos de máquinas com conjugado constante:

- Compressores a pistão;
- Talhas;
- Guindastes;
- Bombas a pistão;
- Britadeiras;
- Transportadores contínuos.

Figura 2.21 – Conjugado resistente de uma carga com conjugado constante em função da velocidade da máquina.



Fonte: Autor.

A potência cresce de forma linear devido a mesma ser oriunda do produto entre o conjugado, uma constante, e a velocidade que por sua vez cresce linearmente.

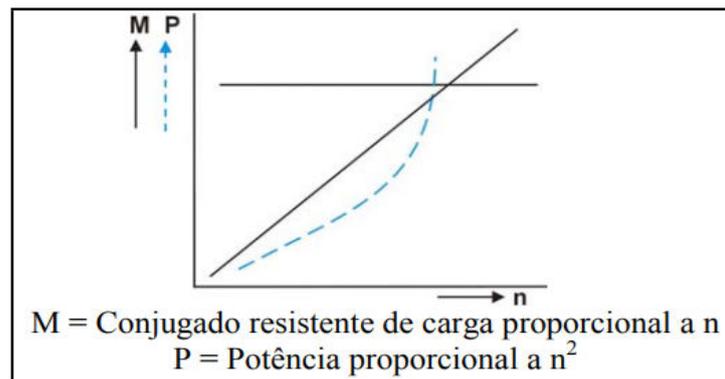
2.12.2. Conjugado linear:

Máquinas com esse tipo de conjugado apresentam um conjugado linearmente proporcional à variação de velocidade da máquina, como é mostrado a Figura (2.22).

Exemplos de máquinas com conjugado linear:

- Calandra com atrito viscoso (para calandrar papel);
- Bombas de vácuo.

Figura 2.22 – Conjugado resistente de uma carga com conjugado linear em função da velocidade da máquina.



Fonte: Autor

A potência cresce de forma parabólica devido a mesma ser oriunda do produto entre o conjugado, uma curva linear, e a velocidade que por sua vez cresce linearmente também.

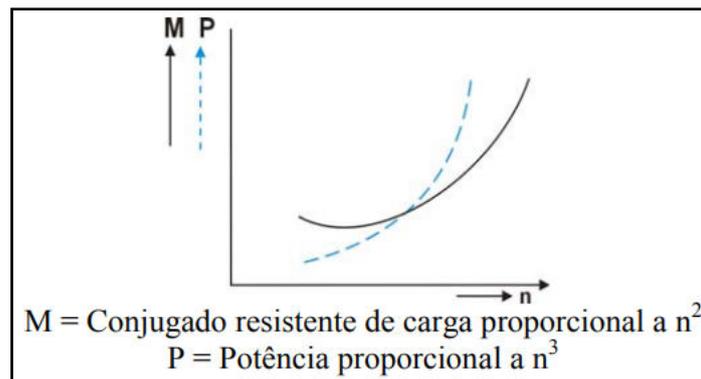
2.12.3. Conjugado quadrático:

Máquinas com esse tipo de conjugado apresentam um conjugado quadraticamente proporcional à variação de velocidade da máquina, como é mostrado a Figura (2.23).

Exemplos de máquinas com conjugado quadrático:

- Bombas centrífugas;
- Ventiladores;
- Misturadores centrífugos.

Figura 2.23 – Conjugado resistente de uma carga com conjugado quadrático em função da velocidade da máquina.



Fonte: Autor.

A potência cresce de forma cúbica devido a mesma ser oriunda do produto entre o conjugado, uma curva parabólica, e a velocidade que por sua vez cresce linearmente.

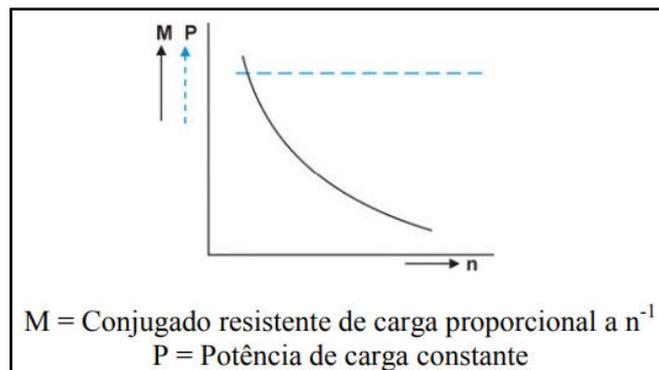
2.12.4. Conjugado hiperbólico:

Máquinas com esse tipo de conjugado apresentam um conjugado hiperbolicamente proporcional à variação de velocidade da máquina, como é mostrado a Figura (2.24).

Exemplos de máquinas com conjugado hiperbólico:

- Bobinadeira de papel;
- Bobinadeira de pano;
- Descascador de toras;
- Tornos;
- Bobinadeiras de fios.

Figura 2.24 – Conjugado resistente de uma carga com conjugado hiperbólico em função da velocidade da máquina.



Fonte: Autor

Devido a assíntota formada no eixo vertical pela curva do conjugado, teoricamente pode se afirmar que para uma velocidade igual a zero, o conjugado seria infinito, porém fisicamente tal suposição não teria sentido.

Na prática é considerado que a máquina opera apenas em um intervalo de velocidade, tal intervalo tende a ser um ponto na curva, logo a potência é o resultado do produto de dois valores constantes (velocidade e conjugado), o que o torna uma constante.

2.12.5. Conjugado não definido:

É qualquer curva de conjugado que não seja uma forma conhecida, constante, linear, quadrática ou hiperbólica.

As máquinas que apresentam esse tipo de conjugado devem ter sua análise gráfica realizada através de técnicas de integração, ou considerando torque constante, adotando o maior valor registrado na curva de conjugado por velocidade.

3. MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM MOTORES DE INDUÇÃO

O conceito de eficiência em um motor de indução é a associação entre a potência mecânica fornecida na ponta do eixo do motor e a potência elétrica entregue nos terminais elétricos da máquina.

A dificuldade em trabalhar esse conceito consiste na medição da potência de saída (mecânica), que é de difícil aquisição. Então surge a necessidade da criação de modelos matemáticos que representam com fidelidade os dados apresentados na realidade.

Este capítulo apresenta resumidamente alguns métodos utilizados para diagnosticar a eficiência energética de um motor de indução, selecionando dentre os diversos existentes, os menos invasivos.

3.1. MÉTODO DE HIRZEL DAS PERDAS SEGREGADAS (E1 DO PADRÃO IEEE 112-1996 MODIFICADO)

O método consiste em realizar dois ensaios distintos, um com o motor a vazio para se obter perdas magnéticas e mecânicas e outro ensaio com o motor acoplado à carga motriz.

O método Hirzel é minimamente invasivo, visto que existe apenas a necessidade de desacoplar a carga do motor, quando comparado ao método E1 da IEEE, que requer uma fonte de tensão variável. Em contrapartida o método Hirzel só fornece a eficiência para o ponto de operação da carga motriz, diferente do método E1 que fornece uma curva de eficiência.

O método E1 possui um erro de 1%, o método Hirzel mesmo sendo bem mais simples apresenta um erro de apenas 2%.

3.2. MÉTODO DA ONTÁRIO HIDRO DE PERDAS SEGREGADAS

Bastante similar ao método Hirzel, porém não se faz necessário o desacoplamento da carga para o ensaio a vazio, já que este método adota que 3,5% da potência de entrada do motor está associado as perdas mecânicas e magnéticas.

Os dados estimados foram obtidos através de experimentos. Vale ressaltar que os motores usados nos experimentos para aquisição de dados eram novos, logo não possuíam perdas por desgaste mecânico ou qualquer outra perda de natureza associada ao uso do motor.

O método da Ontario Hidro possui um erro de 3%, ressaltando que mesmo com esse método ainda é necessário medir as resistências das bobinas do estator, logo é preciso desconectar o motor da rede.

3.3. MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE F1 DO PADRÃO IEEE 112-1996

Este método é bastante similar ao método E1, no qual também se faz necessário desacoplar a carga e o uso de uma fonte de tensão variável.

São realizados quatro testes, três com o rotor travado, que pode ser destrutivo para o motor e um com o motor a vazio com uma baixa tensão, para se calcular as impedâncias (estatística e rotórica).

Consiste em um dos métodos mais precisos.

3.4. MÉTODO PADRÃO DE ESCORREGAMENTO

Tem como principal característica sua simplicidade e um procedimento minimamente invasivo, todavia pode apresentar um erro de até 40%.

Para realizar o procedimento são necessários apenas quatro dados, potência nominal, escorregamento nominal, potência de entrada e escorregamento da máquina no ponto de operação da carga motriz.

No qual, a eficiência é encontrada relacionando as variáveis da seguinte maneira.

$$\eta = \frac{746 \cdot P_{NOMINAL} \cdot S_{ATUAL}}{P_{ENTRADA} \cdot S_{NOMINAL}} \quad (3.01)$$

Onde o S_{ATUAL} é o escorregamento em uso.

3.5. MÉTODO ONTÁRIO DO ESCORREGAMENTO COMPENSADO

Consiste em um aperfeiçoamento do método padrão de escorregamento, no qual passa a se considerar a tensão nominal e a tensão de entrada em uso, reduzindo assim o erro de 40% para 14%.

$$\eta = \frac{746 \cdot P_{NOMINAL} \cdot S_{ATUAL} \cdot V_{ATUAL}^2}{P_{ENTRADA} \cdot S_{NOMINAL} \cdot V_{NOMINAL}^2} \quad (3.02)$$

3.6. MÉTODO DA CORRENTE

Tem como principal característica sua eficácia devido a sua simplicidade, facilidade de aquisição de dados, seu procedimento minimamente invasivo e sua margem de erro relativamente baixa, quando comparado ao método padrão do escorregamento.

O método baseia-se na proporção entre a corrente estatórica e a potência mecânica na ponta do eixo.

Para realizar o método se faz necessário realizar a medição da corrente de entrada do motor e da potência ativa (wattímetro), e a corrente e potência nominal do motor, ambos são dados de placa.

Para se efetuar o método e encontrar a eficiência do motor realiza-se a seguinte relação entre os dados encontrados.

$$\eta = \frac{I_{ATUAL} \cdot P_{NOMINAL} \cdot 746}{P_{ENTRADA} \cdot I_{NOMINAL}} \quad (3.03)$$

3.6.1. BD Motor

Método desenvolvido pela Eletrobras, consiste em um software que utiliza um banco de dados com detalhes construtivos de diversas marcas.

Ao ser alimentado com dados de potência ativa e corrente medidas, o software realiza o diagnóstico do motor, no ponto de carga no qual o motor se encontra.

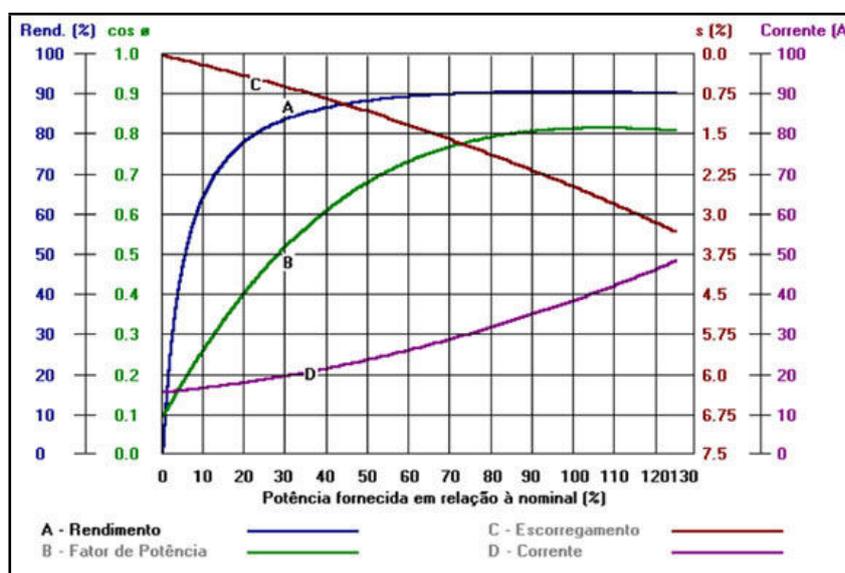
4. METODOLOGIA DE ANÁLISE ENERGÉTICA DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS - ELETROBRAS

Neste capítulo será feita uma explanação acerca da metodologia empregada para análise da eficiência energética em MIT's do tipo gaiola de esquilo, sem contemplar a partida do motor e considerando cargas constantes.

4.1. MÉTODO ELETROBRAS

O método baseia-se nas curvas de desempenho do motor, um exemplo é mostrado na Figura 4.1, e em valores de corrente e potência levantados em campo.

Figura 4.1 – Curvas de desempenho do motor.



Fonte: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662004000100020>

De acordo com a curva exemplificada na Figura 4.1, em condições com um baixo carregamento, razão entre a potência nominal na ponta do eixo e a potência requerida, o motor apresenta baixo fator de potência e baixo rendimento.

A partir de 75% de carregamento, o motor começa a manter um valor praticamente constante de rendimento, um fator de potência próximo do nominal e uma corrente ainda abaixo da nominal, o que causaria um menor *stress* no motor e componentes de acionamento e uma maior capacidade de resfriamento.

Portanto, diz-se que os motores trifásicos com baixo carregamento não estão operando com uma eficiência energética adequada. Nesse mesmo grupo encaixam-se, motores antigos, que já foram rebobinados várias vezes, com avarias em suas aletas ou com a carcaça deteriorada e motores que foram fabricados para possuir baixa eficiência energética, no geral, motores antigos.

O método consiste em estudar os motores de uma determinada instalação quanto ao seu estado de conservação, sua eficiência energética e seu carregamento, para efetuar um estudo técnico e financeiro a respeito de sua troca por um motor mais adequado de alto rendimento.

4.2. MOTORES DE “ALTO RENDIMENTO PLUS”

Serão apresentados alguns detalhes construtivos e vantagens dessa linha de motores em comparação com motores padrão, *standard*, que apesar de não serem mais fabricados ainda existem muitos em operação.

4.2.1. Características construtivas

Os motores de alto rendimento *Plus* são motores projetados para fornecer a mesma potência útil (na ponta do eixo) que outros tipos de motores, porém consumirem menos energia elétrica da rede.

Construtivamente esses motores possuem as seguintes características diferenciadas:

- Chapas Magnéticas de melhor qualidade (aço silício), que incrementa o rendimento e reduz à corrente magnetizante.
- Maior volume de cobre, que reduz a temperatura de operação.
- Enrolamentos Especiais, que reduzem as perdas suplementares.
- Rotores Tratados Termicamente, que reduzem as perdas suplementares.

- Altos fatores de enchimento das ranhuras, que provê melhor dissipação do calor gerado.
- Ranhuras do rotor e anéis de curto circuito dimensionados para reduzir as perdas Joule.

Pelas características de projeto acima indicadas, os motores Alto rendimento *PLUS* trabalham com temperaturas mais baixas, conferindo então, maior capacidade a sobrecarga. Por isso, toda esta linha possui fator de serviço igual à 1.15.

O rendimento, garantido, está estampado na placa de identificação do motor.

4.2.2. Vantagens do motor de alto rendimento plus da WEG

A primeira linha de motores Alto Rendimento da WEG seguia um modelo de projeto usado para motores exportados, principalmente para o Canadá, no qual a norma vigente é a NEMA (Americana), a padronização da potência/polaridade x carcaça não era a adotada no mercado nacional.

A linha Alto rendimento *PLUS* obedece à padronização da potência/polaridade x carcaça conforme a norma ABNT-NBR 8441. Isto facilita a troca/reposição de motores normalizados pelos de Alto Rendimento *PLUS*; isto é, pode-se retirar um motor normalizado qualquer e colocar um motor *AR PLUS* sem qualquer problema de acoplamento. Esta linha apresenta, também, menor custo e melhores rendimentos que a linha anterior, o que permite retorno de investimento mais rápido.

Atentando-se que características como: número de polos magnéticos, tensão nominal e frequência nominal devem ser mantidas no novo motor.

4.3. DIAGNÓSTICO E RECOMENDAÇÕES PARA A OTIMIZAÇÃO DO USO DE MOTORES ELÉTRICOS NA INDÚSTRIA

O diagnóstico energético em motores elétricos deve seguir os seguintes passos:

- Identificar onde se encontram as possíveis causas de desperdício;
- Quantificar o desperdício e analisar a viabilidade técnica e econômica de redução;
- Modificar a situação de desperdício;
- Acompanhar os resultados obtidos;
- Como identificar as causas de desperdício por sobredimensionamento.

Na maior parte dos casos, a simples observação do modo de operação dos motores, permite identificar qual a forma mais apropriada para proceder à avaliação.

Assim, para a verificação das condições de carga, em aplicações de carga contínua e praticamente constante, a simples medição de tensões e correntes de cada fase (amperímetro de alicate), ou a medição da rotação do eixo (tacômetro) ou potência de entrada (wattímetro), são suficientes para a análise, junto aos dados de placa, e os dados de catálogo eletrônico do fabricante ou *software* de análise de eficiência (Ex.: BDMotor da Procel).

Nos casos de aplicações com carga variável ou intermitente, é aconselhável (ou imprescindível) o uso de um analisador de energia, que permite o registro para posterior análise dos principais parâmetros elétricos (tensões e correntes de cada fase, potência, fator de potência), ao longo de um determinado período de tempo.

4.4. PROCEDIMENTO MATEMÁTICO

Após realizar o levantamento das correntes de linha do motor, calcula-se a corrente média que consiste em realizar a média aritmética dos três valores medidos.

$$I_{MÉDIA} (A) = \frac{I_R + I_S + I_T}{3} \quad (4-1)$$

De posse da corrente média, busca-se na curva de desempenho do motor o seu carregamento percentual, seu fator de potência e seu rendimento, para a condição de trabalho do motor.

Logo após calcula-se a tensão de linha média de alimentação do motor, de forma análoga ao cálculo da corrente média.

$$U_{MÉDIO} (V) = \frac{U_{RS} + U_{RT} + U_{ST}}{3} \quad (4-2)$$

O passo seguinte a ser calculado é a potência elétrica requisitada da rede para o carregamento atual, que pode ser verificado com um wattímetro, mas considerando-se que só será utilizado um alicate amperímetro, a potência solicitada é encontrada através da seguinte relação matemática.

$$P_{ENTRADA} (kW) = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{MÉDIO} \cdot I_{MÉDIA} \cdot \cos\phi}{1000} \quad (4-3)$$

Então encontra-se a potência na ponta do eixo do motor.

$$P_{SAIDA} (kW) = P_{ENTRADA} \cdot \eta \quad (4-4)$$

Converte-se então a potência encontrada na ponta do eixo para CV.

$$P_{SAIDA}' (CV) = \frac{P_{SAIDA}}{0,735} \quad (4-5)$$

Após realizar essa sequência de cálculos é então encontrada a verdadeira carga a qual o motor está submetido, sem necessidade de utilizar uma fonte variável ou desacoplar a carga do motor (vale ressaltar que esta carga não depende da potência nominal empregada).

Em seguida são estudados novos motores de alto rendimento que consigam bancar a carga encontrada, ressaltando que o método não considera a partida do motor.

Depois de escolher possíveis motores para substituir o atual deve-se analisar as suas curvas de desempenho para, com base no carregamento estimado, determinar corrente, fator de potência e rendimento.

Então executa-se a sequência de cálculos novamente (com exceção da equação 4-1), para cada possível novo motor, para então encontrar a diferença de potência solicitada da rede.

Para facilitar esse passo a passo, foi desenvolvida um programa no MATLAB, que será apresentado no capítulo seguinte.

4.5. ANÁLISE FINANCEIRA

Com posse da potência elétrica reduzida com a troca do motor, da quantidade de horas que o motor fica ligado por mês e do preço da tarifa de energia, pode ser feita a conversão de potência para energia e assim ser calculada a economia financeira para o usuário e o *payback*. Da seguinte forma.

$$Economia(kW) = P_{ENTRADAMOTORANTIGO} - P_{ENTRADAMOTORNOVO} \quad (4.6)$$

$$Economia'(kWh) = Economia.(Horasdefuncionamentonoano) \quad (4.7)$$

$$Economia(R\$) = Economia'. Tarifa de energia \quad (4.8)$$

A economia calculada é anual e as horas de funcionamento devem ser segregadas entre horas fora-ponta e horas-ponta, caso exista tarifação diferenciada.

O cálculo não contempla taxas de juros na tarifação, fato este que pode aumentar o retorno financeiro e diminuir o tempo de *payback*.

Para uma avaliação econômica mais apurada, deve-se atentar para:

- Os custos com mão-de-obra para substituição do motor;
- Os custos decorrentes de máquina parada – perda de produção;
- O custo de aquisição do novo motor;
- O custo com eventuais adaptações necessárias à instalação do novo motor.

Deve atentar-se para:

- O novo motor é capaz de acionar a carga adequadamente, pois o método só contempla regime permanente, desprezando a partida;
- A medição com Wattímetro digital ou com analisador de energia digital leva a uma determinação mais exata da potência consumida da rede pelo motor originalmente instalado – motor *standard*;
- A possível economia decorrente da redução de demanda contratada não foi considerada;
- Deve ser considerado o custo temporal do dinheiro por ocasião de empréstimo ou uso de recursos próprios pela própria Empresa.

Diante da simplicidade do método ele pode vir a se tornar o mais usual, barato e de fácil implantação em rotinas de manutenção, pois requer pouco ou nenhum treinamento, em algumas circunstâncias o levantamento dos dados em campo pode ser incorporado a manutenção preditiva, caso já exista.

Apesar do baixo investimento inicial necessário para realizar o levantamento em campo (aquisição de um alicate amperímetro e wattímetro) e aplicar a metodologia, o retorno financeiro é bastante significativo.

5. RESULTADOS

A interface desenvolvida no MATLAB realiza uma análise minuciosa do motor no ponto de operação no qual ele funciona, de acordo com o banco de dados robusto baseado no carregamento percentual do motor.

O fabricante realiza a aquisição dos dados do motor de acordo com a carga imposta, refletindo os resultados das curvas de performance do motor.

A interface foi desenvolvida para ser apresentada de forma intuitiva, conforme mostrado na Figura 5.1

Figura 5.1 – Interface do software desenvolvido – Diagnóstico energético aplicado a carga motriz.

The screenshot shows a MATLAB software interface for motor energy diagnosis. The title bar reads 'untitled'. The main window title is 'DIAGNÓSTICO ENERGÉTICO APLICADO À CARGA MOTRIZ'. The interface is divided into several sections:

- MOTOR 01:** Includes 'TIPO DE MOTOR' (STANDARD or ALTO RENDIMENTO), 'Nº DE PÓLOS DO MOTOR' (I, IV, VI, VIII), 'SELEÇÃO DE MÉTODO' (MÉTODO DA CORRENTE or MÉTODO DA POTÊNCIA), 'TENSÃO DA LINHA' (220 VCA or 380 VCA), and 'POTÊNCIA DO MOTOR' (5.0 CV to 100 CV).
- CALCULADORA:** A section for entering measured current and voltage values (IL1, VRS, IL2, VST, IL3, VRT) and a 'CALCULAR' button.
- MOTOR 02:** Similar to MOTOR 01, but with a 'CALCULAR' button.
- DADOS:** A table for recording results with columns for Carreg. (%), Corrente (A), F. de Pot., REND., P. IN (kW), and P. OUT (CV).
- ANÁLISE FINANCEIRA:** A section for financial analysis with fields for 'FUNC. HORA-PONTA', 'TARIFA HORA-PONTA', 'INVESTIMENTO', and various economic indicators like 'ECONOMIA DE POTENCIA (kW)', 'ECON. HORA PONTA (kWh/ANO)', 'ECON. FORA PONTA (R\$/kWh)', 'ECON. HORA-PONTA (R\$/ANO)', 'ECON. FORA PONTA (R\$/kWh)', 'ECON. TOTAL (R\$/ANO)', 'PAYBACK (MESES)', and 'REDUÇÃO DE CO2 EMITIDO (kg)'. It also includes a small image of a motor.

At the bottom, there is a 'SELEÇÃO' section with radio buttons for 'MOTOR 01' and 'MOTOR 02', and an 'EXIBIR' button. A note at the bottom right states '*Dados para tensão de linha de 220V'.

Fonte: Autor

O processo se dá com a seleção dos dados do motor instalado, MOTOR 01, no qual escolhe-se:

- O modelo, quanto a standard ou alto rendimento;
- O número de polos, II, IV, VI ou VIII;
- A tensão de linha a qual o motor está submetido, 220 V ou 380 V;
- A potência do motor, variando de 5 CV a 100 CV;

Depois é selecionado o método de análise do motor, método da corrente, que leva em consideração a média das correntes de linha e das tensões de linha, ou da potência ativa medida.

Após a seleção do tipo de motor e do método a ser adotado, deve-se inserir os valores medidos, corrente e tensão, caso esteja selecionado o método da corrente ou a potência se o método selecionado for o da potência. Para inserir os dados de tensão e corrente medidos existem duas maneiras, pode-se inserir a média dos valores ou os valores por fase e calcular a média na própria interface.

O próximo passo é realizado pelo software que realiza o levantamento de dados complementares, tais como, FP e rendimento, de acordo com o ponto de operação do motor.

Então o operador pode simular a troca do motor existente por um motor novo de alto rendimento, MOTOR 02, selecionando a potência. É necessário ressaltar que a tensão e o número de polos não se alteram.

É possível realizar um levantamento dos dados de um motor para diferentes carregamentos, como mostrado na Figura 5.2, onde se mostra os dados de um motor de 100 CV, 2 polos, 380 V operando com 65 A e o mesmo motor operando com 120 A.

Figura 5.2 – Dados de um motor de acordo com o percentual de carregamento.

Parâmetro	Motor Operando com 65 A	Motor Operando com 120 A
MÉTODO DA CORRENTE	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
MÉTODO DA POTÊNCIA	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
MÉDIA VL (V)	380	380
MÉDIA IL (A)	65	120
POTÊNCIA ATIVA 3~ (kW)		
CARREGAMENTO (%)	40.0223	90.5847
FATOR DE POTÊNCIA	0.790111	0.910053
RENDIMENTO (%)	86.8873	92.49
POT. DE SAÍDA (CV)	39.9602	90.4507
POT. DE SAÍDA (kW)	29.3707	66.4813
CORRENTE (A)	65	120
POT. DE ENTR. (kW)	33.8032	71.8794

Fonte: Autor

Também é possível realizar uma análise econômica simples, na qual insere-se o tempo de operação do motor na hora ponta e fora ponta, o custo do kWh em cada horário e o valor do investimento para instalar o novo motor. Conforme mostrado na Figura 5.2, uma simulação de economia decorrente da troca de um motor *standard* de 100 CV com 2 polos com um carregamento de aproximadamente 60% na ponta do eixo, por um motor de alto rendimento de 60 CV com 100% de carregamento, e no segundo cenário de simulação utiliza-se um motor de 75 CV com 80% de carregamento, respeitando sempre o número de polos e a tensão de alimentação.

Figura 5.3 – Simulação de troca de motor com estimativa de economia.

The image displays a software interface for simulating motor replacement and estimating economic savings. It is organized into three main sections, each representing a different motor configuration (MOTOR 01, MOTOR 02, and MOTOR 02).

MOTOR 01: Includes a 'TIPO DE MOTOR' section with radio buttons for 'STANDARD' and 'ALTO RENDIMENTO'. A 'CALCULADORA' section prompts for current and voltage values (IL1, VRS, IL2, VST, IL3, VRT) and has a 'CALCULAR' button. A 'SELEÇÃO DE MÉTODO' section offers 'MÉTODO DA CORRENTE' and 'MÉTODO DA POTÊNCIA'. A 'TENSÃO DA LINHA' section has radio buttons for 220 VCA and 380 VCA. A 'POTÊNCIA DO MOTOR' section has radio buttons for 5.0 CV, 7.5 CV, 10 CV, 15 CV, 20 CV, 25 CV, 30 CV, 40 CV, 50 CV, 60 CV, 75 CV, and 100 CV. A 'CALCULAR' button is at the bottom.

MOTOR 02 (Left): Shows calculated values: CARREG. ESTIM. (%) 98.1573, CORRENTE ESTIM. (A) 81.3204, FATOR DE POTÊNCIA 0.870014, RENDIMENTO (%) 92.8201, POT. DE SAÍDA (CV) 58.9009, POT. DE SAÍDA (kW) 43.2922, POT. DE ENTR. (kW) 46.6409. A 'CALCULAR' button is at the bottom.

MOTOR 02 (Right): Shows calculated values: CARREG. ESTIM. (%) 78.5259, CORRENTE ESTIM. (A) 80.7234, FATOR DE POTÊNCIA 0.880005, RENDIMENTO (%) 92.44, POT. DE SAÍDA (CV) 58.8978, POT. DE SAÍDA (kW) 43.2899, POT. DE ENTR. (kW) 46.8302. A 'CALCULAR' button is at the bottom.

ANÁLISE FINANCEIRA (Left): A table for financial analysis with columns for 'HORAS/ANO' and 'RS'. It includes rows for 'ECONOMIA DE POTENCIA (kW)', 'ECON. FORA PONTA (KWh/ANO)', 'ECON. FORA PONTA (KWh/ANO)', 'ECON. FORA PONTA (R\$/ANO)', 'ECON. FORA PONTA (R\$/ANO)', 'ECON. TOTAL (R\$/ANO)', 'PAYBACK (MESES)', and 'REDUÇÃO DE CO2 EMITIDO (kg)'. A 'CALCULAR' button is at the bottom.

ANÁLISE FINANCEIRA (Right): A similar table to the left one, also including a small image of a motor. A 'CALCULAR' button is at the bottom.

Fonte: Autor

A qualquer momento é possível acessar a planilha do banco de dados correspondente aos motores envolvidos no processo, bastando para tanto, fazer a seleção na interface.

Por fim o software mostra a quantidade de dióxido de carbono que deixará de ser emitido para a atmosfera, por conta da troca de um motor antigo e de baixa eficiência por uma máquina nova e mais eficiente.

Devido à dificuldade de se trabalhar com o MATLAB, que não é um software livre e requer um computador com grande poder de processamento e devido ao extenso banco de dados que foi utilizado para criar a ferramenta. Foi desenvolvido um executável, que utiliza apenas uma extensão livre do MATLAB, o MCR_R2014a, um compilador bastante leve, que é baixado via *web* automaticamente pelo executável, ao instalar o programa no computador.

6. CONCLUSÃO

6.1. DISCUSSÕES

Dados práticos apontam que quando o carregamento do motor está abaixo de 50% a substituição do mesmo por um motor de potência adequada é sempre financeiramente viável, devido seu regime de trabalho com baixa eficiência energética.

A ferramenta computacional é extremamente aplicável devido a grande faixa de motores que ele contempla.

O software foi desenvolvido para os motores com carcaça de modelo 100L e 280 S/M, motores de 2, 4, 6 e 8 polos em 220/380 V, de 5 cv a 150 cv, *standard* ou alto rendimento.

O trabalho pode ser replicado para motores a prova de fogo CEPEL, motofreio, bomba monobloco JM, bomba monobloco JP, HGF – linha H - baixa e alta-tensão – fechado, HGA – linha H - baixa e alta-tensão – aberto.

Este software pode ser uma ferramenta extremamente útil para engenheiros e técnicos em um parque industrial, onde as cargas na sua maioria são motores de indução trifásicos, portanto é imperativo um estudo de eficiência energética.

O trabalho pode ser aproveitado por professores e alunos que pretendem abordar o tema de eficiência energética aplicado à carga motriz, em cursos de nível médio (técnico) e/ou graduação.

A grande vantagem do uso do método abordado no presente trabalho é o fato de não ser invasivo, não sendo necessário fazer nenhum desligamento no motor ou desacoplamento de carga, portanto não interrompe o processo produtivo.

A análise financeira não é fiel, pois não considera taxas de juros nem inflação, é uma análise bastante simples que serve apenas como uma referência. Para uma avaliação econômica mais apurada, deve-se atentar para:

- Os custos com mão-de-obra para substituição do motor;
- Os custos decorrentes de máquina parada – perda de produção;
- O custo de aquisição do novo motor;
- O custo com eventuais adaptações necessárias à instalação do novo motor;

- Se o novo motor é capaz de acionar a carga adequadamente;
- A medição com Wattímetro digital ou com analisador de energia digital leva a uma determinação mais exata da potência consumida da rede pelo motor originalmente instalado – motor *standard* ou de alto rendimento usado há anos;
- A possível economia decorrente da redução de demanda contratada não foi considerada;
- Deve ser considerado o custo temporal do dinheiro por ocasião de empréstimo ou uso de recursos próprios pela própria Empresa.

O banco de dados é de motores com tensão nominal de 220V, porém foi feito também para motores com tensão nominal de 380V e pode ser expandido para 440V.

Apesar de o software utilizar um banco de dados de motores da WEG, mesmo sendo utilizado para motores de outro fabricante seria obtido um resultado conservador e coerente.

6.2. TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é interessante a conversão do software para um aplicativo de celular ou computador, porém com um banco de dados mais adequado, retirado diretamente do catálogo eletrônico do fabricante, substituindo o banco de dados formado no Excel, utilizando alguma ferramenta em JAVA.

Tal ação pode tornar a ferramenta mais leve e precisa, já que os dados foram coletados do catálogo eletrônico de forma manual com maior susceptibilidade a erros, seja de natureza operacional ao criar as planilhas ou no momento de interpolar os dados nas planilhas.

E a ampliação do software desenvolvido para considerar cargas flutuantes (variantes no tempo).

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Cássio Tersandro de Castro. **Análise de métodos para determinação da eficiência de motores trifásicos de indução**. UFC, 2009.
- GARCIA, Agenor Gomes Pinto. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. UFRJ, 2003.
- MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas de corrente alternada**. 5. Ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987.
- KOSOW, Irving L., **Máquinas elétricas e transformadores**. 15. Ed. São Paulo: Globo, 2007.
- FITZGERALD, E. A.; Charles KINGSLEY, Jr.; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas com introdução à eletrônica de potência**. 6. Ed. Porto Alegre: Bookman Companhia Editora, 2007.
- BIM, Edson. **Máquinas elétricas e acionamentos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Campus Elsevier, 2012.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. Ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2015.
- CHAPMAN, Stephen J. **Programação em MATLAB para engenheiros**. 1. Ed. São Paulo: Thomson Learning, 2003.
- MACIEL, Ednilson Soares. **Transformadores e motores de indução**. 22. Ed. Curitiba: Base Editorial, 2010.
- CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G.. **Ciência e engenharia de materiais uma introdução**. 8. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012

ANEEL. Troque o seu motor.

Disponível em <<http://www.troqueseumotor.com.br/downloads.html>>. Acesso em: 02 de maio de 2018.

GOVERNO DO BRASIL. Matriz Energética.

Disponível em <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2010/11/matriz-energetica>>. Acesso em: 02 de maio de 2018.

FOLHA DE SÃO PAULO. Desperdício consome 10% da energia elétrica no país, diz associação.

Disponível em <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2015/02/1586778-desperdicio-consome-10-da-energia-eletrica-no-pais-diz-associacao.shtml>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

ELETROBRAS. Relatório anual e de sustentabilidade 2015.

Disponível em <http://eletrobras.com/pt/SobreaEletrobras/Relatorio_Anuar_Sustentabilidade/2015/Relatorio-Anual-e-de-Sustentabilidade-Eletrobras-2015.pdf>. Acesso em 02 de maio de 2018.

ELETROBRAS. Motor elétrico premium.

Disponível em <<https://www.procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/motor-premium-2016.pdf>>. Acesso em 02 de maio de 2018

PROCEL INFO. Reportagens – Panorama nacional.

Disponível em <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7B8D1AC2E8-F790-4B7E-8DDD-CAF4CDD2BC34%7D¶ms=itemID=%7B5CE07750-F1F4-493E-93A9-81E36FD2F3DF%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

PROCEL INFO. Lei de eficiência energética.

Disponível em <<http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/lei.pdf>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

PROCEL INFO. **Indústria e comércio.**

Disponível em <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7b74460477-DD43-4E04-8454-47260EAD3D01%7d>>. Acesso em: 02 de maio de 2018.

ABESCO. **Desperdício de energia gera perdas de R\$ 12,6 bilhões.**

Disponível em <<http://www.abesco.com.br/pt/novidade/desperdicio-de-energia-gera-perdas-de-r-126-bilhoes/>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

TOLMASQUIM, Maurício. **As origens da crise energética brasileira.**

Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1414-753X2000000100012&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 02 maio de 2018.

JACOBI, Pedro R; CIBIM, Juliana; LEÃO, Renata de S. **Crise hídrica na macrometrópole paulista e resposta da sociedade civil.**

Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142015000200027&script=sci_arttext&tlng=pt>. Acesso em: 02 de maio de 2018.

TOLMASQUIM; MAURÍCIO; GUERREIRO; GORINI. **Matriz energética brasileira: uma prospectiva.**

Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0101-33002007000300003&script=sci_arttext>. Acesso em: 02 de maio de 2018.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia e meio-ambiente no Brasil.**

Disponível em <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a02v2159>>. Acesso em: 02 de maio de 2018.

WEG. **Catálogo de motores WEG – Linha W21.** Disponível em

<<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-w21-three-phase-motor-indian-market-013-brochure-english.pdf>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

WEG. **Vista explodida de motor elétrico WEG.**

Disponível em <<http://www.sotofilhos.com.br/biblioteca/Noticias/Vista%20explodida%20motor%20eletrico%20WEG.html>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

SABER ELÉTRICA. **Como inverter a rotação dos motores elétricos.**

Disponível em <<https://www.sabereletrica.com.br/inverter-rotacao-motores-eletricos/>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

O ENGENHEIRO ELETRICISTA. **Princípio de funcionamento da máquina de indução trifásica.**

Disponível em <<http://oengeletricista.blogspot.com.br/2013/01/principio-de-funcionamento-da-maquina.html>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

SEAN AUTOMAÇÃO. **Comandos elétricos.**

Disponível em

<<http://www.sean.com.br/cursos/comandos-eletricos-basico/apostila/>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

TECÉM. **Motores elétricos – classe de isolamento, regime de serviço e classe de proteção.**

Disponível em <http://www.tecem.com.br/wp-content/uploads/2015/02/EL11-MOTORES-ELETRICOS-Classe-de-Isolamento_Regime-de-Servico-e-Classe-de-Protecao.pdf>. Acesso em 02 de maio de 2018.

BEZERRA MOTORES ELÉTRICOS. **Causas de queimas em motores elétricos.**

Disponível em

<<http://bezerramotors.com.br/queimas-de-motores-eletricos/causas-de-queima-de-motores-eletricos/>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

GME – GREAT MAGTECH ELECTRIC. **Magnético estator.**

Disponível em <<http://pt.greatmagtech.org/magnetic-assembly/magnetic-components/magnetic-stator.html>>. Acesso em 02 de maio de 2018.

RESEARCH GATE. **Realidade aumentada para auxiliar o aprendizado de motor elétrico.**

Disponível em <https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Vista-em-corte-de-um-MIT-O-principio-de-funcionamento-do-MIT-esta-ilustrado-no_fig1_272364115>. Acesso em 02 de maio de 2018.