

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ÉRICO MACEDO

**UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA DE MÁQUINAS ELÉTRICAS NO SETOR INDUSTRIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

ÉRICO MACEDO

**UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DA
EFICIÊNCIA DE MÁQUINAS ELÉTRICAS NO SETOR INDUSTRIAL**

Trabalho de diplomação do curso de superior de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Elétrica – DAELE Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedtel.

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Favoreto
Castoldi.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Érico Macedo

Uma proposta de metodologia da avaliação da eficiência de máquinas elétricas no setor industrial

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 19:00hs do dia 13/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedel - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Coorientador)

Engenheiro(a) Oswaldo Luiz Borelli Junior - (Membro)

Prof(a). Me(a). Demerval Mizuyama - (Membro)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por sempre me dar forças, perseverança e paciência para a conclusão deste trabalho.

In memoriam a meu pai Silvério Anísio Macedo, o maior incentivador dos meus estudos, meu espelho, o homem que me ensinou a ser honesto, digno e responsável. Mostrou com sua garra e sua fé a nunca desistir nas dificuldades por mais difíceis que elas sejam. Um homem quem não poupou esforços para garantir o bem estar da minha família.

A minha mãe Tânia Maria Dias, minha irmã Laís Macedo Frontelli e ao meu cunhado Márcio Henrique Frontelli por toda luta para eu poder chegar até esta fase dos meus estudos, que sempre me orientaram a seguir em frente apesar de todos os obstáculos encontrados.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alessandro Goedel, pelo apoio e conselhos, por se mostrar sempre disponível e atencioso, pelo incentivo e orientação do projeto, minha sincera gratidão.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Marcelo Favoreto Castoldi, pelo acompanhamento e diversas contribuições na elaboração do projeto.

Agradecemos também a empresa Carbonífera do Cambuí LTDA e ao Oswaldo Borelli Júnior, por abrir as portas, disponibilizando dados para a execução deste trabalho de conclusão de curso.

Aos meus amigos da famosa República Duff, irmãos de alma a quem devo infinitamente por me apoiarem nos momentos difíceis e compartilharem os felizes.

Ao suporte financeiro cedido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Processos n° 474290/2008-5, 473576/2011-2, 552269/2011-5) e Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná (Processo no 06/56093-3).

RESUMO

MACEDO, Érico. **Uma proposta de metodologia de avaliação da eficiência de máquinas elétricas no setor industrial.** 2016. 55 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

A eficiência energética vem sendo um tema muito abordado atualmente, em especial na operação dos motores de indução trifásicos, os quais são os maiores consumidores de energia. Assim, faz-se necessário o desenvolvimento de uma ferramenta para a avaliação da eficiência desta máquina de indução direcionada ao setor industrial, visando auxiliar na economia de energia. Embora o cálculo da eficiência pareça simples, o desacoplamento mecânico dos motores para efetuar as medições das grandezas mecânicas para a estimativa da eficiência torna-se inviável economicamente. No entanto esta avaliação pode ser feita por meio de métodos pouco invasivos abordados na literatura, por meio da coleta de grandezas do motor elétrico trifásico em pleno funcionamento. Assim, apresenta-se uma proposta de metodologia para avaliação do rendimento do mesmo e assim apontar uma possível troca do motor que visa a eficiência de energia e econômica do processo.

Palavras Chave: Eficiência energética, Motor de indução trifásico, Avaliação da eficiência energética.

ABSTRACT

MACEDO, Érico. **A proposal methodology for efficiency assessment of electrical machinery in the industrial sector.** 2016. 55 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Energy efficiency has been a hot topic nowadays, especially in the operation of induction motors, which are the largest energy consumers. So it is natural to develop a tool for assessing the efficiency of induction machine directed to the industrial sector seeking to support energy savings. Although the calculation of efficiency sounds simple, the mechanical decoupling of the motors to make the measurements becomes economically impracticable. However, this assessment can be done through noninvasive methods discussed in the literature, by collecting three-phase electric motor parameters in full operation. Thus, a methodology proposal is presented for its performance evaluation and then point solutions aimed at energy, and economic efficiency in the process.

Keywords: Energy efficiency, three-phase induction motor, Evaluation of the energy efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Diagrama de objetivos do trabalho.	13
Figura 2 - Estrutura física de um motor de indução trifásico.	15
Figura 3- Circuito equivalente motor de indução trifásico.	17
Figura 4 - Características de conjugado versus velocidade para o motor.	19
Figura 5 - Curvas de eficiência de três motores de indução.	20
Figura 6 - Rendimento versus Torque em relação a nominal (motor 1 cv).	21
Figura 7 - Perdas no motor de indução.	22
Figura 8 - Circuito equivalente simplificado do motor	29
Figura 9 - Dados utilizados pelo software.	33
Figura 10 - Organização dos dados obtidos	34
Figura 11 - Modelo da Estimativa de eficiência.	35
Figura 12 - Fluxograma sintetizado do software.	36
Figura 13 - Estimador de eficiência energética	37
Figura 14 - Diagrama unifilar da planta de beneficiamento de carvão da Carbonífera do Cambuí LTDA.	39
Figura 15 - Medição de tensão no CCM.	41
Figura 16 - Medição de corrente no CCM.	41
Figura 17 - Consumo diário em kWh/dia de cada motor atual.	45
Figura 18 - Consumo diário em kWh/dia de cada motor proposto.	47
Figura 19 - Consumo de kWh/Dia dos motores atuais em relação aos motores propostos.	48
Figura 20 - Gastos dos atuais versus motores propostos.	51
Figura 21 - Economia financeira após troca de todos os motores atuais.	51
Figura 22 - Correia transportadora 4 com motor pós troca	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais componentes do MIT.	16
Tabela 2 - Valores assumidos para perdas suplementares.	25
Tabela 3 - Características dos métodos do escorregamento.	32
Tabela 4 - Características dos métodos da corrente.	32
Tabela 5 - Relação dos motores na planta de britagem do carvão	40
Tabela 6 - Relação das tensões dos motores medidos em campo	42
Tabela 7 - Relação das correntes dos motores medidos em campo.	42
Tabela 8 - Relação das rotações dos motores medidos em campo	43
Tabela 9 - Resultados dos rendimentos obtidos na planta de britagem do carvão	44
Tabela 10 - Motores com rendimento mínimo de 75%	46
Tabela 11 - Relação dos motores atuais e os motores propostos pelo programa.	47
Tabela 12 - Análise de economia energética da planta de britagem	49
Tabela 13 - Análise de gastos com os motores atuais	50
Tabela 14 - Análise de gastos com os motores propostos	50
Tabela 15 - Características dos motor atual e do motor pós troca.	52
Tabela 16 - Grandezas medidas motor atual versus motor pós troca.	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 ASPECTOS GERAIS.....	10
1.2 JUSTIFICATIVA	11
1.3 OBJETIVO	12
1.3.1 Objetivo geral	12
1.3.2 Objetivos específicos.....	12
1.3 PROPOSTA DO TRABALHO	13
2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS	14
2.1 MOTORES NA INDÚSTRIA.....	14
2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MIT	15
2.2.1 Características básicas do MIT.....	15
2.2.2 Princípio de funcionamento do MIT	16
2.2.3 Eficiência do MIT.....	19
2.3 PERDAS NO MIT	21
2.3.1 Perdas por efeito Joule.....	22
2.3.2 Perdas no núcleo.....	23
2.3.3 Perdas mecânicas.....	24
2.3.4 Perdas suplementares.....	24
2.4 CAUSAS DE BAIXA EFICIÊNCIA NO MIT	25
3 MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DO MIT	27
3.1 MÉTODO DO VALOR NOMINAL.....	27
3.2 MÉTODO DO ESCORREGAMENTO	27
3.3 MÉTODO DA CORRENTE	28
3.4 MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE	29
3.5 MÉTODO DAS PERDAS SEGREGADAS	29
3.6 MÉTODO DO TORQUE NO ENTREFERRO.....	30
3.7 ESCOLHA DA METODOLOGIA UTILIZADA.....	30
4 ESTIMADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES DE INDUÇÃO	31
4.1 MÉTODOS UTILIZADOS PARA A ESTIMATIVA DE EFICIÊNCIA.....	31
4.2 ESTIMADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	33
5 EQUIPAMENTOS E MÉTODO DE MEDIÇÃO	38
5.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA	38

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	38
5.3 MÉTODO DE MEDIÇÃO	40
5.3.1 Realização das medidas em campo	40
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6.1 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DOS MOTORES	44
6.2 CONSUMO DE ENERGIA DOS MIT PROPOSTOS	46
6.3 ANÁLISE DE CONSUMO ENERGÉTICO ENTRE OS MIT ATUAIS E OS MIT PROPOSTOS	48
6.4 ANÁLISE ECONÔMICA ENTRE OS MIT ATUAIS E OS MIT PROPOSTOS	49
6.5 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL: ESTUDO DE CASO.....	52
7 CONCLUSÃO.....	54
7.1 TRABALHOS FUTUROS	54
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 ASPECTOS GERAIS

O Motor de Indução Trifásico (MIT), possui diversos benefícios devido ao seu baixo custo, facilidade de transporte, limpeza, facilidade de comando, construção simples, versatilidade e robustez, o que faz ser a máquina mais utilizada no setor industrial (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Sistemas acionados a motor trifásico contribuem com um total de 70% da energia consumida no ramo industrial. Em geral grande parte destes motores operam abaixo de sua eficiência nominal, que resulta em desperdício de energia (DONA; MANJUSHA; ANTO, 2013).

A economia de energia e a eficiência energética vem sendo muito abordada na literatura, já que a indústria busca reduzir gastos e otimizar processos pensando em evitar o investimento com a geração de energia, podendo utilizar estes recursos em outras áreas. A conservação de energia elétrica tornou-se umas das saídas de modo a impedir os frequentes “apagões” e racionamentos do sistema elétrico (ELETROBRÁS, 1998).

Com a crise de abastecimento de energia, políticas públicas foram criadas a fim de incentivarem os índices de eficiência energética. Então, o Congresso aprovou a Lei de Eficiência Energética (Lei 10.295/2001), estabelecendo níveis máximos de consumo de energia para aparelhos elétricos fabricados ou comercializados no país (Decreto nº 4.059, 2001).

Como uma das formas de economia, programas de etiquetagem energética estão sendo adotados com o objetivo de aumentar a eficiência energética de equipamentos industriais e domésticos. Em nível nacional a etiquetagem é feita pela PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Este programa começa atribuindo padrões mínimos de desempenho, ligado a um processo padronizado para a avaliação da eficiência destes equipamentos, só então recebe depois de experimentado e classificado a etiqueta referente ao seu nível de eficiência. Como dito anteriormente estudos mostram que no Brasil, os motores de indução trifásicos estão diretamente ligados a cerca de 62% do consumo industrial e aproximadamente 23% do consumo geral de energia elétrica (ELETROBRÁS, 2016).

A busca da otimização do uso de energia elétrica, diminuindo custos e reduzindo o impacto ambiental torna-se cada vez mais frequente. Existem diferentes métodos para medir a eficiência de motores de indução, que são baseados em dinamômetros, máquinas duplicadas e

a partir do circuito equivalente. Entretanto, a aplicação de tais metodologias em motores operando na indústria é inviabilizada já que a interrupção do funcionamento da máquina se faz necessário (IEEE std. 112, 2004).

As avaliações de eficiência em motores podem ser implementadas através da coleta de dados, já que nas plantas industriais, parâmetros como tensão e corrente estão prontamente disponíveis a partir dos Centro de Controle de Motores (CCMs). Há ainda outros métodos de avaliação da eficiência os quais exigem a velocidade do rotor e o torque no eixo. Os métodos não-intrusivos os quais dependem basicamente da tensão e da corrente, do motor em operação como o método da corrente e o método do escorregamento, estão sendo muito abordados nesses últimos anos (LU; HABETLER; HARLEY, 2006).

Assim, a proposta deste trabalho consiste em apresentar uma ferramenta computacional alternativa para a avaliação da eficiência energética de motores.

1.2 JUSTIFICATIVA

Os maiores consumidores de energia elétrica e principais conversores de energia elétrica em mecânica motriz são os motores elétricos de indução. O motor de indução trifásico é o mais vendido e instalado no setor industrial, já que suas características principais são o baixo custo de aquisição e robustez (GOEDTEL et al, 2007).

No setor industrial o MIT é amplamente utilizado, o que aumenta sua significância no panorama energético, fazendo-o um elemento relevante para estudo. Pesquisas atuais estão relacionadas ao dimensionamento adequado, melhoria da eficiência energética, técnicas de controle preciso, manutenção preditiva e qualidade de energia (SUETAKE et al, 2011).

A ação inicial no sentido de melhoria da eficiência energética é estimar a eficiência dos motores e calcular a economia que pode ser feita através da substituição para a necessidade de carga do equipamento (GARCIA, 2003). Porém, a maior desvantagem para estimar a eficiência da máquina de indução consiste na obtenção das grandezas mecânicas, visto que a mesma está em operação.

Muitos métodos para estimar a eficiência de motores elétricos estão descritos no padrão IEEE 112, mas não podem ser utilizados para avaliações em campo. Foram então desenvolvidos métodos pouco invasivos para estimar o rendimento dos motores elétricos, sem a necessidade de remoção, de baixo custo e que torna apropriados para aplicações industriais (BRANDT, 2011).

Mais especificamente, a proposta deste trabalho é implementar uma metodologia da avaliação da eficiência de máquinas elétricas, coletando dados de placa e grandezas elétricas de operação dos MIT na indústria e através de uma árvore de decisões analisar situações de baixa eficiência energética dos motores e sugerir uma opção viável economicamente.

1.3 OBJETIVO

Nesta seção são apresentados o objetivo geral desta proposta de trabalho de conclusão de curso (TCC) bem como a descrição das especificidades dos aspectos metodológicos, elencando os objetivos específicos deste trabalho.

1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em implementar uma avaliação da eficiência de máquinas elétricas na indústria, através de dados de placa e grandezas elétricas obtidos no regime permanente do MIT. Assim, busca-se indicar quais destes motores estão com baixa eficiência e propor a substituição visando economia energética e financeira.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho serão:

- Mapear uma planta industrial coletando os dados de placa dos motores;
- Medir as grandezas elétricas de tensão, corrente, rotação e fator de potência dos motores;
- Criar um algoritmo para analisar os motores com baixa eficiência, por meio de métodos pouco invasivos;
- Apontar quais motores estão com baixa eficiência na planta industrial;
- Sugerir uma possível substituição do motor, com o objetivo de aumentar a eficiência energética e a consequente economia de energia elétrica;
- Verificar à longo prazo quais as vantagens econômicas da possível substituição.

1.3 PROPOSTA DO TRABALHO

O presente projeto, tem por finalidade avaliar a eficiência energética de máquinas elétricas no setor industrial, propondo a troca do motor para melhorar a eficiência energética por meio de métodos pouco invasivos. O algoritmo será implementado no software MATLAB com a finalidade de calcular a eficiência dos motores, avaliando quais estão operando com rendimento abaixo do nominal. Ainda, objetiva-se apontar quais motores poderiam ser substituídos e qual o ganho de economia energética e financeira desta substituição ao longo dos anos. A Figura 1 mostra de forma resumida o fluxograma para realizar avaliação da eficiência energética.

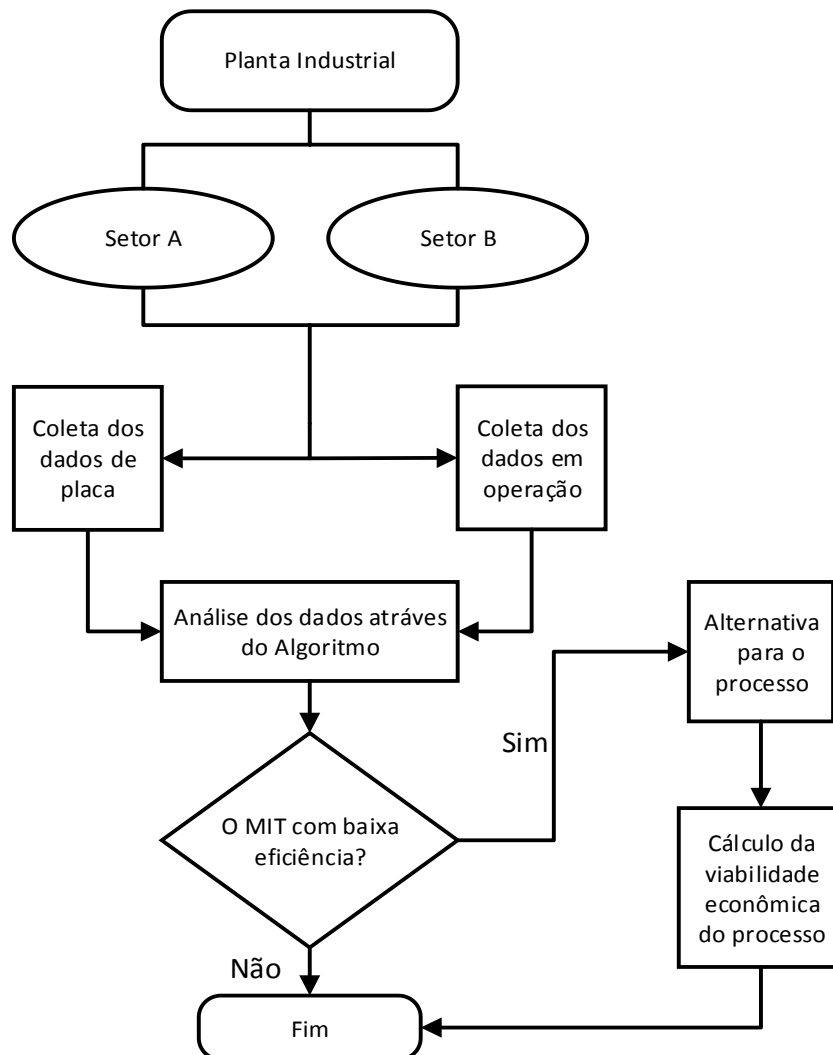


Figura 1- Diagrama de objetivos do trabalho.
Fonte: Autoria própria.

Inicialmente serão levantados os dados dos motores na planta industrial. A partir desta verificação serão coletados os dados de placa e quatro dados de operação do motor: corrente, tensão, velocidade e fator de potência dos setores da indústria. Com as grandezas obtidas dos motores, o algoritmo por meio de métodos não invasivos, fará a avaliação da eficiência dos motores em cada setor. Por meio da árvore de decisão propõe-se alternativas para a melhoria do rendimento. Também será calculado a economicidade do processo, objetivando apontar se a alternativa para eficiência energética do motor é viável financeiramente.

2 MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

Neste Capítulo serão abordados os fundamentos teóricos que serão utilizados na proposta apresentada neste trabalho. Para tal, apresenta-se uma breve revisão sobre motores na indústria, considerações sobre o MIT, perdas, causas de baixa eficiência nestes motores e métodos para o cálculo da sua eficiência.

2.1 MOTORES NA INDÚSTRIA

O MIT consiste em uma máquina assíncrona, onde circula pelo estator correntes trifásicas alternadas. No rotor, por sua vez, circulam correntes por indução como em um transformador a partir do estator. O rotor de gaiola é o mais comum entre motores de indução. Este rotor possui um enrolamento que é constituído por barras condutoras encaixadas em ranhuras no ferro do rotor e curto-circuitadas por anéis condutores (FITZGERALD; KINGSLEY; UMANS, 2006).

Este tipo de motor é o mais utilizado, pois possui uma variedade de aplicações onde necessita-se converter energia elétrica em energia mecânica. Na indústria os motores elétricos são uma parte fundamental devido a sua robustez face as máquinas de corrente contínua, simplicidade de manutenção e custo (BRANDT, 2011). Pelo fato dos sistemas atuais de distribuição de energia elétrica serem de corrente alternada o motor de indução transformou-se no tipo de motor mais comum na indústria.

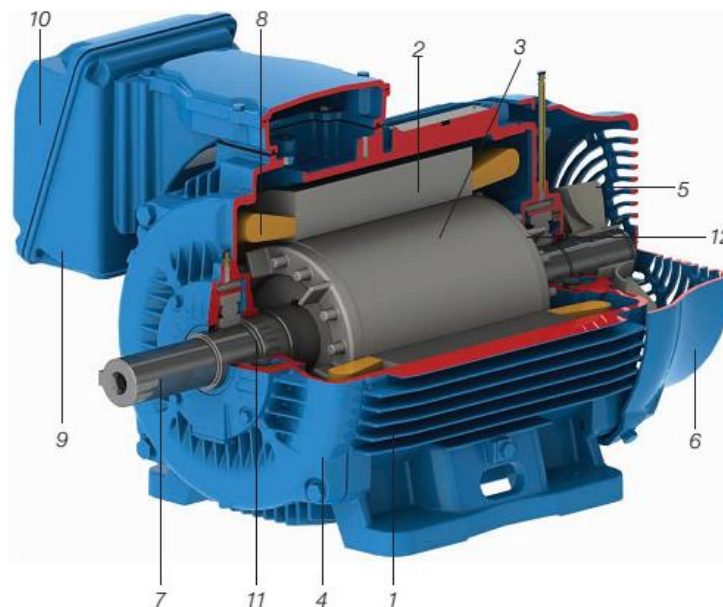
A atividade industrial no Brasil é responsável por consumir cerca de 36,5% da energia elétrica fornecida pelas empresas geradoras de eletricidade. A partir deste dado pode-se inferir que o sistema motriz gasta 62% da energia elétrica consumida na planta onde estão instalados (ELETROBRÁS, 2016).

2.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MIT

Uma máquina de indução é um sistema de conversão eletromecânica de energia, convertendo energia elétrica em mecânica motriz através do acoplamento eletromagnético. Simplificando os aspectos construtivos do MIT, tem-se a parte fixa denominada estator e a parte móvel ou rotativa denominada rotor (ANDRADE, 2009).

2.2.1 Características básicas do MIT

A característica básica do motor de indução trifásico é funcionar com uma velocidade um pouco abaixo da velocidade síncrona. Esta velocidade é definida pelo número de polos e pela frequência de alimentação. Basicamente o desempenho do motor de indução depende do formato das barras da gaiola, que podem utilizar materiais de diferentes condutividades e ter várias configurações (Figura 2).



**Figura 2 - Estrutura física de um motor de indução trifásico.
Fonte: WEG motores (2016).**

O Tabela 1 mostra as características do motor de indução trifásico segundo as referências da Figura 1.

Tabela 1 - Principais componentes do MIT.

Fonte: Adaptado de WEG (2016).

Ref.	Descrição	Característica
Rotor		Parte girante do motor, que transmite o movimento à carga, constituído de:
7	Eixo	Transmite a potência mecânica produzida pelo motor.
3	Núcleo de chapas	Chapas de aço com características semelhantes a do estator, completa o circuito magnético do estator.
12	Barras e anéis de curto-circuito	Em alumínio, são as "bobinas" do rotor. Fechadas em ambos os lados por anéis chamados de curto circuito, formam a gaiola de esquilo. Nela circulam as correntes do rotor e onde é desenvolvida a força motriz.
Estator		Parte estática do motor, constituído de:
1	Carcaça	É a estrutura suporte do conjunto de construção robusta em ferro fundido, aço ou alumínio injetado, resistente à corrosão e normalmente com aletas.
2	Núcleo de chapas	Chapas de aço, em ferrosilício, isoladas e prensadas, destinadas a fazer circular o campo magnético do estator.
8	Enrolamento trifásico	Três conjuntos iguais de bobinas, uma para cada fase, formando um sistema trifásico equilibrado à rede de alimentação.

Outras partes do motor de indução trifásico conforme referência da Figura 1:

- Tampa (4);
- Ventilador (5);
- Tampa defletora (6);
- Caixa de ligação (9);
- Terminais (10);
- Rolamento dianteiro (11).

2.2.2 Princípio de funcionamento do MIT

Segundo Facco (2006), quando uma bobina é percorrida por uma corrente elétrica, cria-se um campo magnético dirigido conforme o eixo da bobina e de valor proporcional ao da bobina. O MIT é alimentado por correntes trifásicas e estas criam um campo girante no estator. Este campo girante induz tensões nas barras do rotor as quais fazem circular correntes e consequentemente, um campo no rotor com a polaridade oposta à do campo girante. Assim, como campos opostos se atraem e o campo do estator é rotativo, o rotor tende a acompanhar a

rotação deste campo. Desenvolve-se então, no rotor um conjugado motor que faz com que ele gire e acione a carga.

A velocidade síncrona (n_s) da máquina é definida pela velocidade de rotação do campo girante, a qual depende do número de pólos (p) do motor e da frequência da rede (f), em ciclos por segundo (Hertz) de acordo com a equação (1).

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (1)$$

Complementando a descrição das características da máquina de indução, a sua representação em termos de um circuito elétrico é apresentada na Figura 3. O motor de indução baseia-se na indução efetuada pelo circuito do estator de tensões e circulação de correntes no circuito do rotor (ação transformação). A semelhança entre o circuito equivalente de um transformador deve-se ao fato das tensões e das correntes no circuito do rotor serem resultado de uma ação transformação, pois a potência é fornecida somente ao circuito de estator do motor (CHAPMAN, 2013).

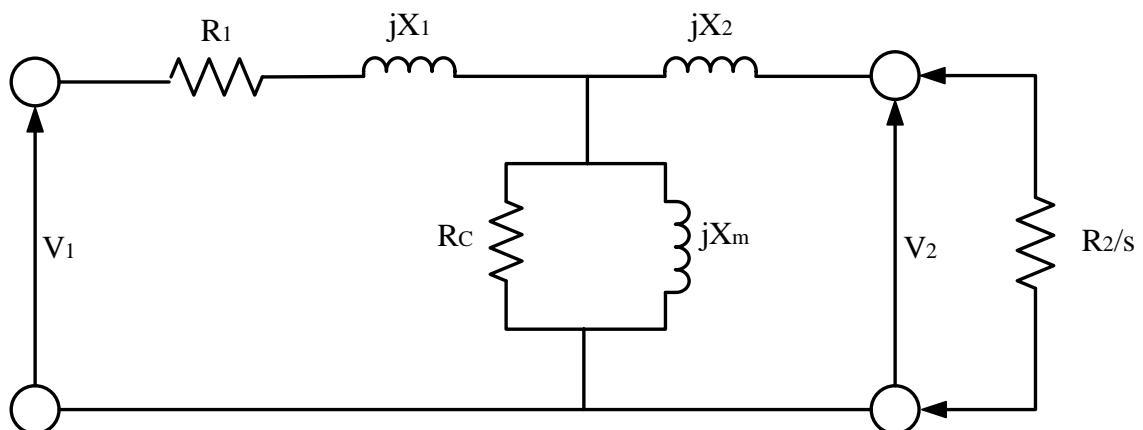


Figura 3- Circuito equivalente motor de indução trifásico.
Fonte: Autoria própria.

onde:

- R_1 é a resistência do estator;
- V_1 é a tensão estatórica;
- jX_1 é a reatância estatórica;
- R_c é a resistência de magnetização;
- jX_m é a reatância de magnetização;
- jX_2 é a reatância rotórica;
- V_2 é a tensão rotórica;
- R_2/s resistência rotórica com escorregamento, referida ao estator.

O conceito de escorregamento do rotor no motor de indução está relacionado à tensão induzida nas barras do rotor que depende da velocidade do mesmo em relação aos campos magnéticos. Velocidade de escorregamento é um termo comumente utilizado para definir o movimento relativo do rotor e dos campos magnéticos. Assim, a velocidade de escorregamento da máquina (n_{esc}) é definido pela diferença entre (n_{sinc}) velocidade dos campos magnéticos e (n_m) velocidade mecânica do eixo do rotor como demonstrado na equação (2).

$$n_{esc} = n_{sinc} - n_m \quad (2)$$

onde:

- n_{esc} é a velocidade de escorregamento da máquina;
- n_{sinc} é a velocidade dos campos magnéticos;
- n_m é a velocidade mecânica do eixo do rotor.

Outro termo usado para descrever o movimento relativo é o escorregamento (s), que é a velocidade relativa expressa em porcentagem.

$$s = \frac{n_{sinc} - n_m}{n_{sinc}} (\times 100) \quad (3)$$

onde s é o escorregamento da máquina;

De acordo com a Figura 4, que ilustra uma curva típica de torque induzido (τ_{ind}) versus velocidade em rotações por minuto (n_m) de um MIT, mostra que o torque nominal é obtido a uma determinada velocidade. Nota-se que em operação normal, a velocidade de um motor de indução varia em uma pequena porcentagem nas proximidades da velocidade nominal. É importante ressaltar que a operação com um alto valor de velocidade leva a um aumento de perdas no rotor (ANDRADE, 2009).

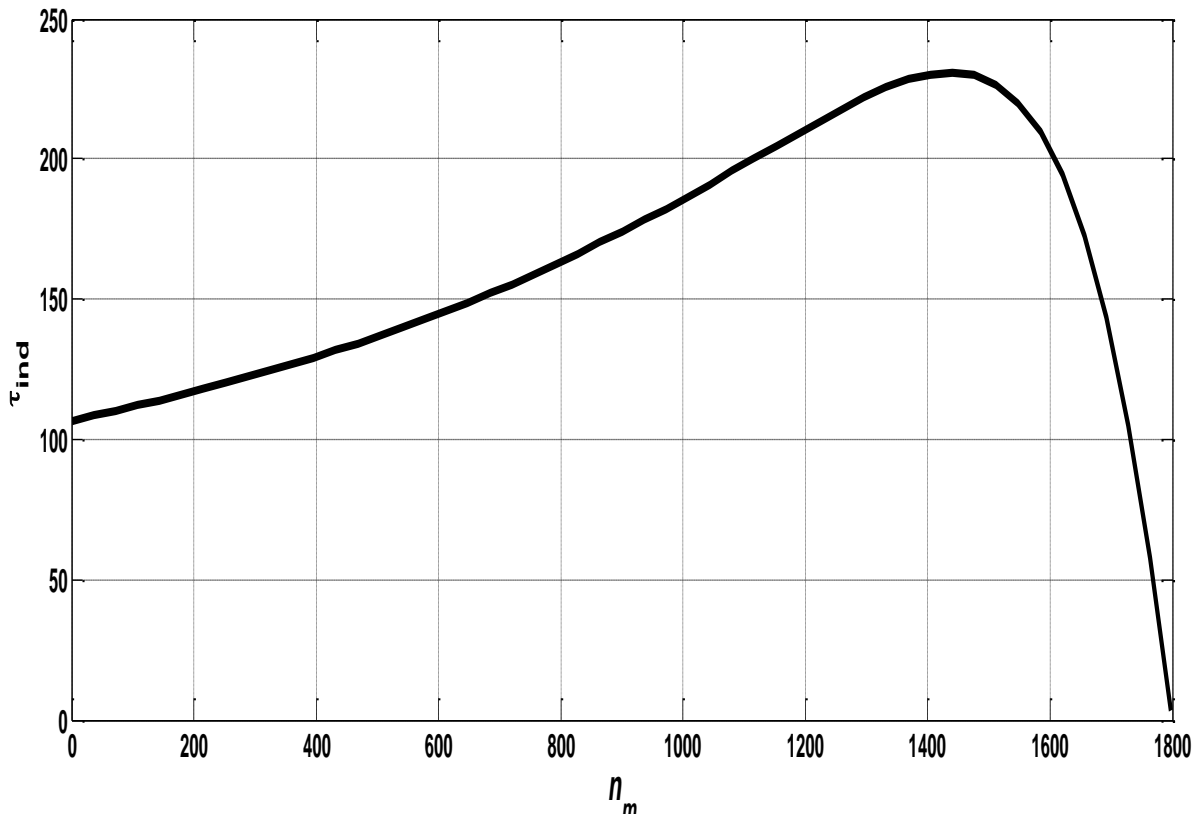


Figura 4 - Características de conjugado versus velocidade para o motor.
Fonte: Adaptado Chapman (2013).

2.2.3 Eficiência do MIT

A máquina de indução é caracterizada pela sua simplicidade de operação e construção. Entretanto pode ser observado que no processo de conversão eletromecânica de energia existem perdas associadas a cada fase do processo. Assim apenas uma percentagem de potência elétrica entregue ao motor transforma-se em torque mecânico (ANDRADE, 2009). A definição de eficiência é dada pela relação entre potência de saída e potência de entrada conforme a equação (4) abaixo:

$$\eta = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (4)$$

onde:

- η é o rendimento da máquina;
- $P_{saída}$ é a potência de saída da máquina;
- $P_{entrada}$ é a potência de entrada da máquina.

Ao longo de sua vida útil o motor elétrico perde em torno de 3 a 4% de seu rendimento. Existem vários fatores associados a esta redução como: manutenção ineficiente,

limpeza e lubrificação, esforços elétricos e mecânicos, consertos repetitivos ao longo da vida do motor e instalação de motores em diferentes condições de ambiente. As curvas de desempenho servem para a correção do rendimento do motor em função do carregamento. Em geral para uma carga de 75% da nominal o motor opera com a eficiência próxima de seu valor máximo (BORTONI et al., 2013). A Figura 5 mostra a relação da eficiência com a carga para três motores de indução com diferentes potências nominais.

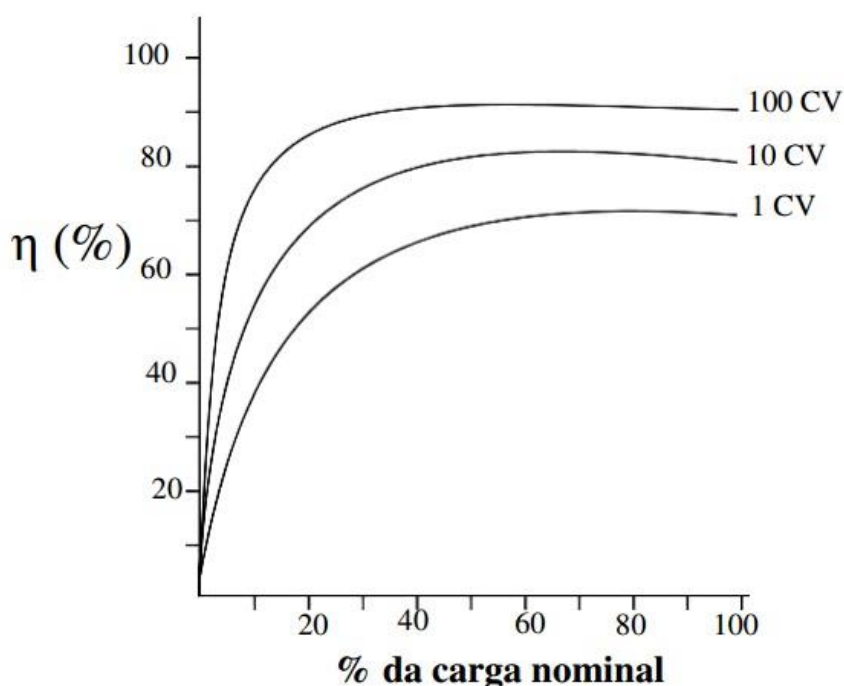


Figura 5 - Curvas de eficiência de três motores de indução.
Fonte: Adaptado Andrade (2009).

Como citado acima, para valores acima de 60% da carga nominal o motor opera de forma eficiente, e apresenta uma diminuição da eficiência quando opera à 40% da carga nominal. Pode-se notar que quanto maior a potência do motor, maior será sua eficiência e sua faixa de alto rendimento será mais ampla (ANDRADE, 2009).

A partir destas considerações sobre eficiência foi feito o levantamento das curvas laboratorialmente dos motores de 1 e 2 CV da linha alto rendimento da WEG motores a fim de comparar o rendimento com os dados de catálogo. A Figura 6 mostra a curva encontrada do motor de 1 CV.

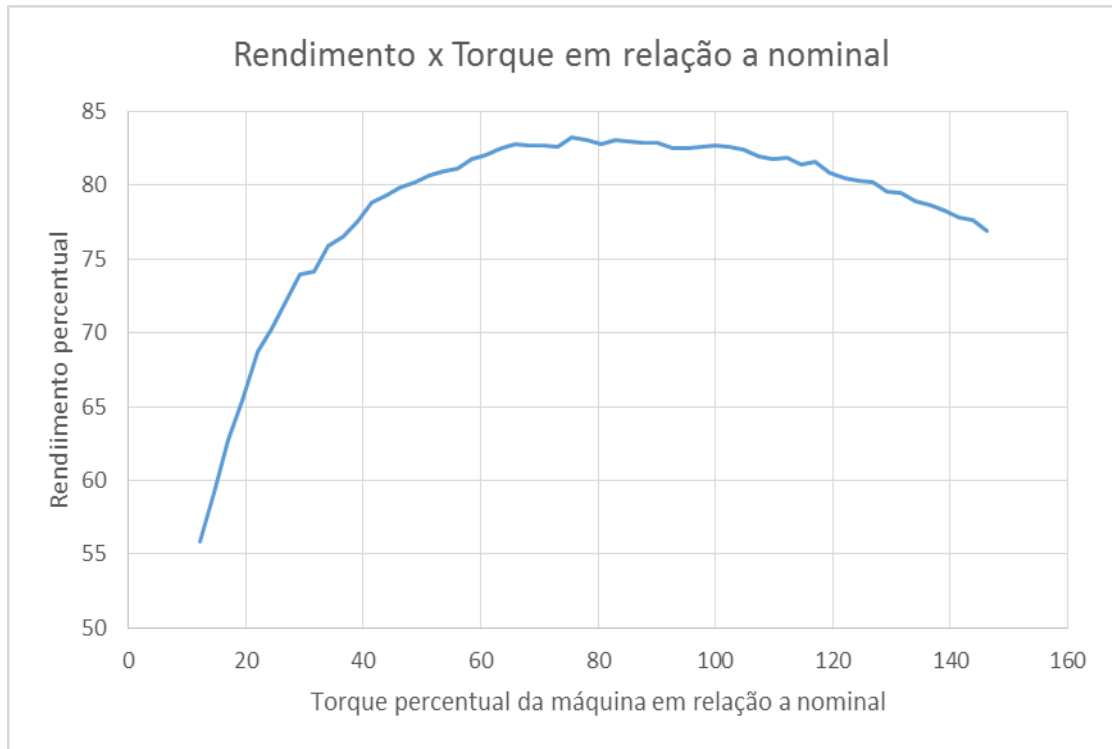


Figura 6 - Rendimento versus Torque em relação a nominal (motor 1 cv).
Fonte: Autoria própria (2015).

Como pode-se observar na Figura 6 os resultados extraídos do laboratório foram satisfatórios já que o rendimento encontrado para o motor de 1 CV ficou próximo do datasheet disponibilizado pelo fabricante que seria de 82%.

2.3 PERDAS NO MIT

Esta seção trata das perdas de potência que ocorrem na operação de um motor de indução trifásico. As perdas totais do motor são de grande interesse, uma vez que pela definição das perdas totais é possível determinar a sua eficiência. Na Figura 7 mostra-se a distribuição de potência entregue nos terminais, bem como as perdas relacionadas a cada processo. No diagrama, as setas são um indicativo das quantidades de cada uma das perdas da máquina, onde pode-se visualizar quatro tipos de perdas no MIT.

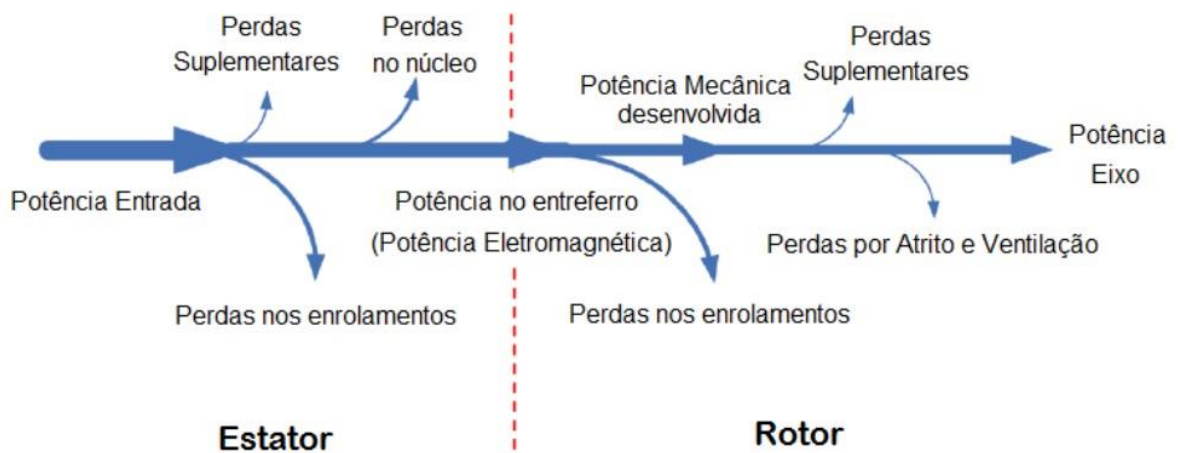


Figura 7 - Perdas no motor de indução.
Fonte: Adaptado LU, HABETLER, HARLEY, (2008).

Estas perdas podem ser classificadas da seguinte maneira:

- Perdas por efeito Joule P_j ,
- Perdas no núcleo P_{fe} ;
- Perdas mecânicas por atrito, incluindo ventilação;
- Perdas suplementares – perdas por pulsação do fluxo magnético nas ranhuras, perdas devidas a harmônicos superior do campo magnético, perdas por imperfeições e tolerâncias construtivas.

2.3.1 Perdas por efeito Joule

Estas perdas, devido as resistências estão presentes no rotor e no estator do MIT. O efeito joule se dá por conta da dissipação de calor nos enrolamentos da máquina de indução devido a circulação de corrente elétrica. A partir das equações (5) e (6) pode-se calcular as perdas resistivas. Verifica-se que as perdas por efeito Joule no estator são calculadas diretamente a partir da resistência dos condutores R_s , e da corrente que passa por eles. Já as perdas por efeito joule no rotor são calculadas a partir da potência ativa que passa pelo entreferro, P_g , da máquina (ANDRADE, 2009).

$$P_{js} = 3I^2R_s \quad (5)$$

$$P_{jr} = sP_g \quad (6)$$

onde:

- P_{js} são as perdas resistivas no estator;
- I é a corrente que passa pelos condutores do estator;
- R_s é a resistência dos condutores do estator;
- P_{jr} são as perdas resistivas no rotor;
- s é o escorregamento do motor;
- P_g é a potência ativa que passa pelo entreferro da máquina.

2.3.2 Perdas no núcleo

As perdas no núcleo estão relacionadas com as perdas causadas por correntes parasitas e pela histerese magnética. Perdas por histerese e corrente parasita ocorrem principalmente no núcleo do estator, pois é nele que o campo magnético girante se movimenta na velocidade síncrona. No núcleo do rotor, por sua vez, gira quase na velocidade síncrona, então é no rotor que acontecem menores perdas por histerese e corrente parasita (ELETROBRÁS, 2009).

Segundo Andrade, 2009 as perdas no núcleo podem ser divididas em três componentes segunda a equação (7):

$$P_{fe} = P_{hist} + P_{class} + P_{exc} \quad (7)$$

onde:

- P_{fe} são as perdas magnéticas;
- P_{hist} são as perdas por histerese;
- P_{class} são as perdas clássicas, causadas pela natureza condutora dos materiais ferromagnéticos que, quando submetidos a campos variantes no tempo, provocam o aparecimento de uma tensão induzida, o que influi no aparecimento de correntes “parasitas” circulando pelo núcleo;
- P_{exc} são as perdas que representam a parcela de perdas produzidas por correntes parasitas e que não eram calculadas pelo método clássico.

Vale ressaltar que o padrão IEEE 112 não separa os tipos de perdas, pois parte de um teste vazio para determinar as perdas no núcleo e a mecânica em conjunto. Observando o circuito equivalente do MIT, verifica-se que em um teste a vazio o escorregamento da máquina é praticamente nulo, o que elimina as perdas resistivas no rotor e reduz as perdas no núcleo, mecânicas e resistivas no estator (ANDRADE, 2009).

2.3.3 Perdas mecânicas

Perdas mecânicas estão relacionadas diretamente com as perdas por atrito e ventilação. A sua redução pouco interfere na eficiência do motor e podem ser diminuídas através de rolamentos de baixas perdas com melhor lubrificação (ELETROBRÁS, 2009).

A determinação das perdas mecânicas descrito no padrão IEEE 112, leva em consideração as perdas no núcleo com ensaio a vazio do motor. Essas perdas são determinadas pelos fabricantes das máquinas.

2.3.4 Perdas suplementares

Possui esta denominação devido ao fato de englobarem as perdas não citadas anteriormente. As perdas suplementares são de essencial importância para o efetivo alto rendimento do motor. Assim pode-se citar alguns exemplos de perdas suplementares tais como: perdas por pulsação do fluxo magnético nas ranhuras, perdas por harmônicos superior do campo magnético, perdas por imperfeições e tolerâncias construtivas (ELETROBRÁS, 2009).

Segundo a norma IEEE 112, os métodos para medição de perdas suplementares são divididos pelo tipo de medição direta e indireta.

- Medição indireta – as perdas suplementares são calculadas a partir da subtração do valor das perdas totais da soma das demais perdas quando conhecidas, restando as perdas adicionais.
- Medição direta – faz o cálculo das perdas suplementares a partir de testes e equações, sendo a soma desses dois componentes as perdas totais adicionais.
- Medida assumida – se não houver a possibilidade da implementação dos métodos previstos o padrão IEEE adota os valores fixos para o cálculo das perdas suplementares conforme apresentado no Tabela 2.

Tabela 2 - Valores assumidos para perdas suplementares.**Fonte: Adaptado IEEE std 112 (2016).**

Potência nominal		Perdas suplementares (% da carga nominal)
1 – 125 HP	1 – 90 kW	1,8 %
126 – 500 HP	91 – 375 kW	1,5 %
501- 2499 HP	376 – 1850 kW	1,2 %
A partir de 2500 HP	A partir de 1851 kW	0,9 %

2.4 CAUSAS DE BAIXA EFICIÊNCIA NO MIT

O desempenho dos motores de indução são influenciados pela operação do mesmo em carga. Com isso podem-se definir as cinco principais causas de operação de baixo rendimento:

- 1) Motor sobredimensionado – Em plantas industriais é muito comum encontrar motores operando fora da sua faixa ideal de carga. Os mesmos operam com carga baixa e normalmente menores que 50% da sua capacidade nominal (GARCIA, 2003).
- 2) Motor rebobinado – É um defeito que ocorre quando duas bobinas de diferentes fases, ou entre uma bobina ou núcleo perdem o material isolante das espiras causando um curto-circuito. Então recupera-se o motor através do processo de rebobinamento, o qual consiste na substituição das bobinas e isolamento danificadas por outras. Porém esta técnica precisa ser de um alto rigor técnico, para que o motor retome as características originais (BORTONI, 1999).
- 3) Instalação – Condições como fixação, alinhamento, vibração, temperatura e tipo de ambiente afetam o desempenho dos motores apesar de serem máquinas robustas.
- 4) Alimentação elétrica – Pode-se destacar dois problemas principais: desequilíbrio entre fases e harmônicos. Os desequilíbrios da rede podem ser da distribuidora ou da diferença de indutância entre os cabos que alimentam o motor. Harmônicos são as distorções na forma de onda senoidal, causadas por componentes com frequência diferente da fundamental da rede de alimentação, provocados por equipamentos eletrônicos.
- 5) Manutenção – O rendimento do motor também é influenciado pela manutenção. Uma inspeção periódica quanto a níveis de isolamento, elevação de temperatura, desgastes

excessivos nos enrolamentos do estator, correta lubrificação dos rolamentos e eventuais exames no ventilador, para verificar o correto direcionamento do fluxo de ar são fundamentais para garantir a operação adequado do motor e conseqüentemente seu bom rendimento.

3 MÉTODOS PARA O CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DO MIT

Devido ao motor de indução trifásico ser largamente utilizado na indústria, seu consumo de energia elétrica torna-se um fator determinante para estudos de eficiência energética. Sabe-se que a eficiência da máquina pode ser calculada através da Equação (4) vista anteriormente, porém as grandezas a serem medidas para este cálculo são difíceis de serem acessadas.

O grau de dificuldade para a estimar a eficiência de um MIT passa a ser maior já que estão acoplados a carga e em plena operação, o que inviabiliza o seu desacoplamento do equipamento para medições e pelo alto custo do mesmo.

Neste sentido faz-se necessário o estudo dos métodos chamados de não-invasivos para a determinação indireta da eficiência dos motores de indução trifásicos em plena operação. Esta seção tem por objetivo principal abordar os métodos existentes no meio acadêmico para a estimativa da eficiência dos MIT.

3.1 MÉTODO DO VALOR NOMINAL

O método do valor nominal pode ser considerado pouco invasivo, pois a eficiência é estimada através dos parâmetros de placa do motor. Neste método é assumido que o rendimento do motor é constante e igual ao valor nominal. Entretanto, o rendimento varia de acordo com a carga acoplada no eixo, com a alimentação elétrica imposta, entre outras variáveis. (LU, HABETLER, HARLEY, 2006).

3.2 MÉTODO DO ESCORREGAMENTO

Segundo Bin Lu, Habetler e Harley, 2006 o método do escorregamento baseia-se na medida da velocidade do rotor e sua principal vantagem é a simplicidade.

- 1) Método padrão do escorregamento: assume-se que a percentagem de carga é proporcional ao escorregamento do motor em plena carga, então a eficiência é uma aproximação utilizando a equação (8).

$$\eta = \frac{slip}{slip_{nom}} \cdot \frac{P_{saida,nom}}{P_{entrada}} \quad (8)$$

onde:

- $slip$ é o escorregamento medido da máquina;
- $slip_{nom}$ é o escorregamento nominal da máquina;
- $P_{saída,nom}$ é a potência de saída nominal da máquina;
- $P_{entrada}$ é a potência de entrada da máquina.

2) Método modificado Ontario Hydro do escorregamento: como mostrada na equação (9), o método padrão do escorregamento é melhorado corrigindo a variação de tensão nominal em relação a tensão medida (LU, HABETLER, HARLEY, 2006).

$$\eta = \frac{slip}{slip_{nom}} \cdot \frac{P_{saída,nom}}{P_{entrada}} \cdot \left(\frac{V}{V_{nom}}\right)^2 \quad (9)$$

onde:

- V é a tensão medida da máquina;
- V_{nom} é a tensão nominal da máquina.

3) Método limite superior do escorregamento: estabelece um valor limite máximo para a eficiência de um motor partindo apenas do escorregamento conforme a equação (10).

$$\eta \leq (1 - slip) \quad (10)$$

3.3 MÉTODO DA CORRENTE

Neste método, a eficiência do motor é aproximada usando a equação (11), assumindo que a percentagem de carga é proporcional a razão da corrente medida para plena carga. Em (12) tem-se o método melhorado utilizando correntes do teste em vazio, o que aumenta a invasão do sistema, já que precisa-se desacoplar o motor da carga, porém alguns fabricantes fornecem os dados de corrente a vazio de seus motores (DONA; MANJUSHA; ANTO, 2013).

$$\eta = \frac{I}{I_{nom}} \cdot \frac{P_{saída,nom}}{P_{entrada}} \quad (11)$$

$$\eta = \frac{I - I_{vazio}}{I_{nom} - I_{vazio}} \cdot \frac{P_{saída,nom}}{P_{entrada}} \quad (12)$$

onde:

- I é a corrente medida da máquina;
- I_{nom} é a corrente nominal da máquina;
- I_{vazio} é a corrente da máquina operando sem carga.

3.4 MÉTODO DO CIRCUITO EQUIVALENTE

Neste método é utilizado um circuito equivalente simplificado de um motor de indução conforme Figura 7. Neste método tem-se a estimativa da eficiência com os valores das impedâncias. As seis impedâncias que são R_1 resistência do estator, reatância de dispersão do estator X_1 , reatância de dispersão de magnetização X_m , perda no cobre R_c , reatância de dispersão do rotor referenciado ao estator X_2 e R_2/s é a resistência do rotor referenciado ao estator (DONA; MANJUSHA; ANTO, 2013).

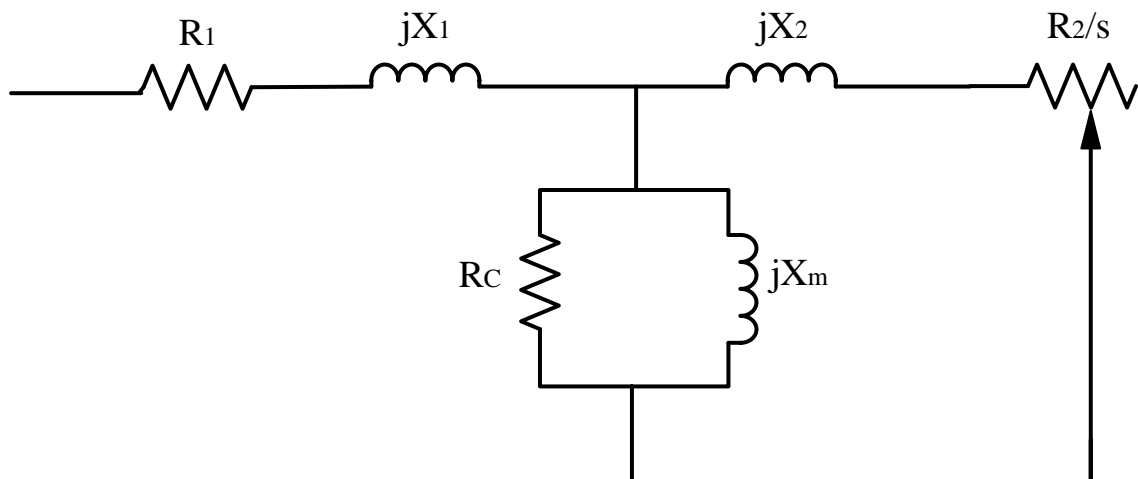


Figura 8 - Circuito equivalente simplificado do motor.
Fonte: Autoria própria.

3.5 MÉTODO DAS PERDAS SEGREGADAS

Os métodos de perdas segregadas são simples, pois estimam cada perda (k) do motor de indução separadamente. As principais perdas no enrolamento são as seguintes: perdas no enrolamento do estator, no enrolamento do rotor, perdas no núcleo, perdas adicionais e perdas mecânicas. O mesmo é um método que possui boa exatidão, embora sejam complicados e invasivos, pode ser calculado através da equação (13) (LU, HABETLER, HARLEY, 2006).

$$\eta = 1 - \frac{\sum k}{P_{entrada}} \quad (13)$$

onde $\sum k$ é a somatória de todas as perdas da máquina.

3.6 MÉTODO DO TORQUE NO ENTREFERRO

O método do torque no entreferro é pouco invasivo e estima a eficiência do motor através da medida indireta do torque eletromagnético. O rendimento pode ser definido conforme (14) em termos de (T_{ag}) torque eletromagnético, (ω_r) velocidade no rotor, (W_{fw}) perdas por atrito e ventilação e (W_{LLr}) perdas de carga do estator e do rotor (LU, HABETLER, HARLEY, 2006).

$$\eta = \frac{T_{ag} \cdot \omega_r - W_{fw} - W_{LLr}}{P_{entrada}} \quad (14)$$

onde:

- T_{ag} é o torque eletromagnético da máquina;
- ω_r é a velocidade no rotor;
- W_{fw} são as perdas por atrito e ventilação da máquina;
- W_{LLr} são as perdas de carga do estator e do rotor da máquina.

3.7 ESCOLHA DA METODOLOGIA UTILIZADA

Analisando todas as metodologias para a estimação da eficiência energética presentes neste trabalho pode-se abordar apenas os métodos descritos nos subcapítulos 3.2 e 3.3, já que um dos principais objetivos da ferramenta computacional, será a estimativa de eficiência energética utilizando grandezas, tensão, corrente, rotação e fator de potência.

Nos outros métodos citados neste capítulo, faz-se necessário utilizar dados não convencionais de um motor de indução trifásico, que inviabilizaria a proposta, pelo fato destes dados terem de desacoplar o motor a carga, que acarretaria perda financeira para a empresa.

4 ESTIMADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES DE INDUÇÃO

Neste Capítulo são apresentadas as etapas de desenvolvimento do estimador de eficiência energética. Inicialmente são demonstrados os dois métodos utilizados neste trabalho para o cálculo do rendimento dos motores de indução trifásicos, posteriormente é apresentado o modelo computacional do software, desenvolvido neste trabalho, e suas etapas a serem seguidas pelo usuário para o cálculo do rendimento dos MIT.

4.1 MÉTODOS UTILIZADOS PARA A ESTIMATIVA DE EFICIÊNCIA

No presente trabalho os dois métodos utilizados para a estimativa de eficiência energética são:

- Método modificado Ontário Hydro do escorregamento;
- Método da corrente à vazio.

Os dois métodos foram citados no Capítulo 3, onde foi apresentada a análise de como são estimados.

No método do escorregamento sabe-se que o torque desenvolvido pela máquina depende da corrente do rotor e do escorregamento, sendo que a variação do escorregamento também influencia no valor da corrente do rotor. Durante a partida o rotor está parado, quando começa a acelerar, provoca uma redução no escorregamento, causando neste momento um aumento hipotético na resistência do rotor. Entretanto, como os demais componentes do circuito não se alteram, a impedância total do circuito ainda é pequena o que resulta em uma pequena redução da corrente do rotor. Neste momento o torque da máquina cresce com a redução de (s) , até o ponto que a resistência do rotor passa a ter grande influência sobre a corrente do rotor. A partir deste ponto $(R2/s)$ passa a ser muitas vezes superior aos demais parâmetros do motor, e a corrente (I_2) passa a ser inversamente proporcional e a esta resistência. Assim, este termo que passa a ser o fator dominante para o torque desenvolvido pela máquina (ANDRADE,2009).

O método aqui tratado utiliza esta relação linear entre escorregamento e torque desenvolvido pela máquina. É importante destacar que a eficiência da máquina de indução é dada pela relação entre as potência de saída e entrada da máquina, conforme Equação 8.

Na Tabela 3 tem-se as variações dos métodos de escorregamento com suas respectivas características de invasão e precisão.

Tabela 3 - Características dos métodos do escorregamento.
Fonte: Andrade (2009).

Métodos	Precisão	Invasão		
		Teste a Vazio (S/N)	Resistencia do Estator (S/N)	Velocidade (S/N)
Método Padrão de Escorregamento	$\pm 40\%$	Não	Não	Sim
Método Modificado Ontário Hydro do Escorregamento	$\pm 14\%$	Não	Não	Sim
Método do Limite Superior de Escorregamento	$\pm 40\%$	Não	Não	Sim

O método da corrente é de relativa simplicidade na sua implementação, já que requer apenas medições da potência ativa e estimação da potência de entrada. Os demais dados são obtidos da placa do motor. Parte-se do princípio de que a potência de saída é proporcional à corrente da máquina. Assim, o cálculo da eficiência é dado pela Equação (11).

Esta metodologia possui a vantagem de que a corrente não é influenciada pela temperatura e varia linearmente com a variação de tensão. Vale ressaltar que como a curva de corrente versus a carga não é linear, o método pode ser melhorado utilizando valores de correntes do teste a vazio mostrado na Equação (12), o que aumenta a invasão do sistema (ANDRADE, 2009). Na Tabela 4 tem-se as características do método da corrente.

Tabela 4 - Características dos métodos da corrente.
Fonte: Andrade (2009).

Métodos	Precisão	Invasão		
		Teste a Vazio (S/N)	Resistencia do Estator (S/N)	Velocidade (S/N)
Método da Corrente padrão	$\pm 10\%$	Não	Não	Não
Método da Corrente à Vazio	$\pm 10\%$	Não	Não	Não

Comparando-se os dois métodos de eficiência propostos no trabalho, ambos são precisos e seus resultados são bem próximos. Uma das desvantagens do método modificado Ontário Hydro do escorregamento seria a invasão do sistema para a medição da velocidade do motor, entretanto, essa medida pode ser retirada com certa facilidade da planta industrial.

4.2 ESTIMADOR DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma ferramenta de gestão baseada numa plataforma computacional para estimar a eficiência energética, por meio de métodos pouco invasivos e determinar a economia financeira para um determinado período de tempo. Como explicado no Capítulo anterior, foram utilizados dois métodos para estipular a eficiência energética descritos a seguir:

- Método modificado Ontario Hydro do escorregamento;
- Método da corrente à vazio.

A Figura 9 ilustra como foi a divisão dos dados do motor que o programa utiliza para o cálculo dos métodos.



Figura 9 - Dados utilizados pelo software.

Fonte: Autoria Própria (2016).

Os dados de placa são obtidos diretamente do motor. Desta forma tem-se as seguintes informações relevantes da placa do MIT, potência nominal, número de pólos e tensão nominal. A partir destes dados o software busca no banco de dados que terá informações de motores da linha W22 IR2 da fabricante WEG. A faixa de potência em CV para o usuário selecionar vai de 0,16 CV à 750 CV. Os dados aferidos da máquina de indução em questão são quatro grandezas, corrente, tensão, rotação e fator de potência. A Figura 10 exemplifica como é a organização dos dados do software.

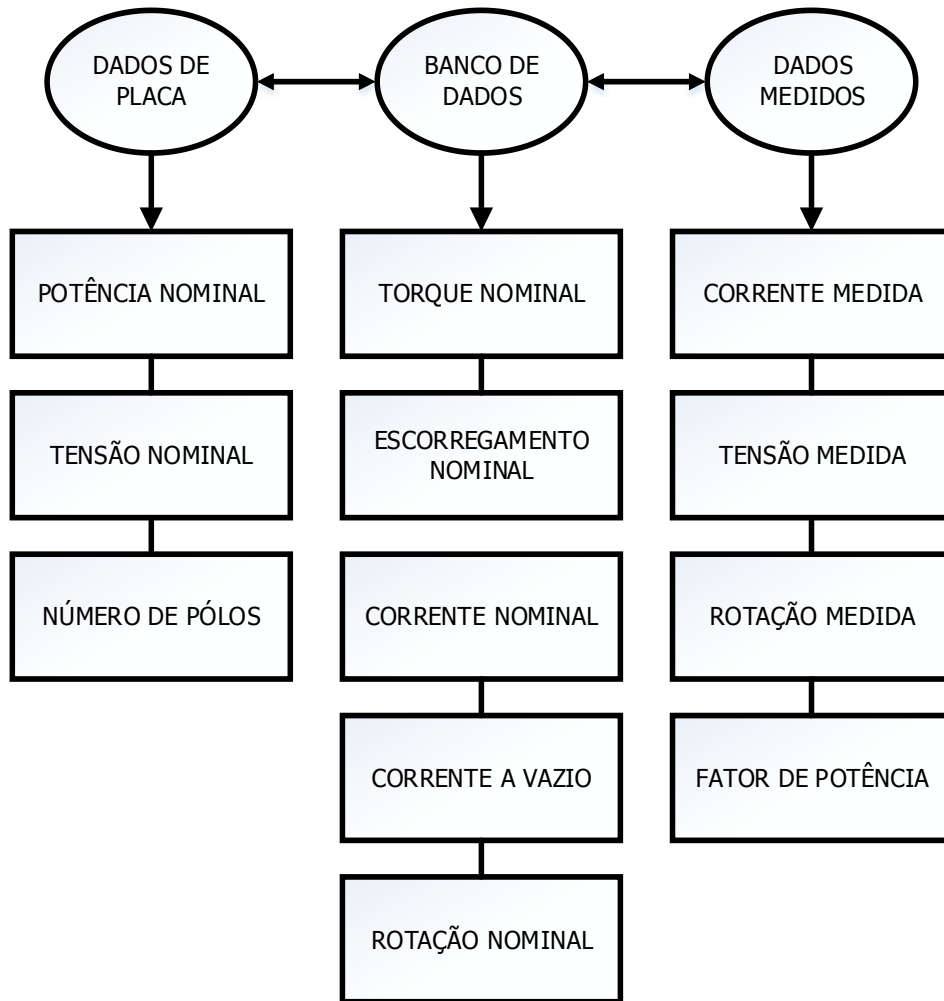


Figura 10 - Organização dos dados obtidos

Fonte: Autoria própria (2016).

Após a coleta de dados de placa e os dados medidos, o software fará a estimativa da eficiência utilizando os métodos modificado Ontario Hydro do escorregamento e o método da corrente à vazio. A Figura 11 ilustra por meio de um diagrama como o software calcula os valores de eficiência.

Por meio dos dados de placa a ferramenta computacional terá as referências para a busca no banco de dados, estas informações aliadas com os dados medidos do motor serão usadas nas Equações (9) e (12) apresentadas no Capítulo 3.

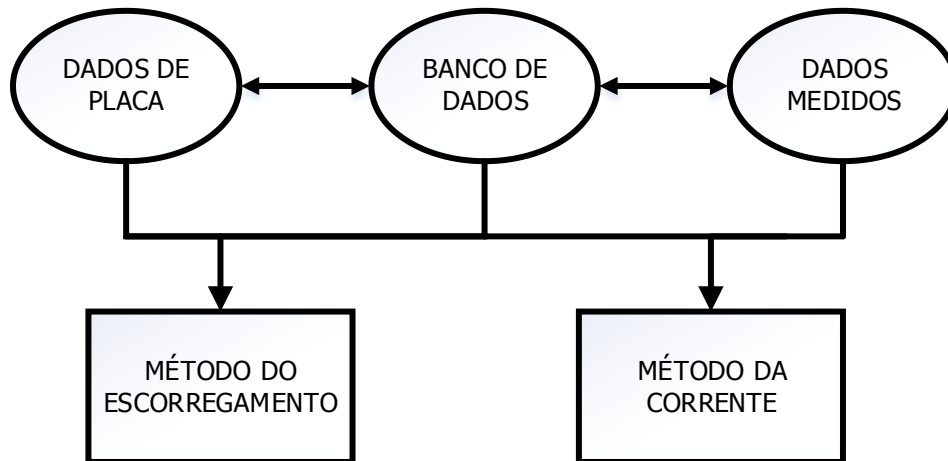


Figura 11 - Modelo da Estimativa de eficiência.

Fonte: Autoria própria (2016).

Então o programa avalia o MIT fazendo a comparação das duas metodologias utilizadas em relação ao rendimento mínimo pretendido pelo usuário, assim obtendo a resposta de “dimensionamento inadequado” ou “motor dimensionado conforme a carga”. Para a resposta “dimensionamento inadequado” o software seleciona um motor adequado para a determinada carga, estimando o torque utilizando os dados já coletados.

Posteriormente, se o motor é constatado abaixo do rendimento mínimo pretendido, o programa representa por meio gráfico a comparação entre motor atual e motor designado com relação a economicidade, ou seja, estabelece quanto o usuário deverá economizar optando pela troca do mesmo em curto, médio e longo prazo.

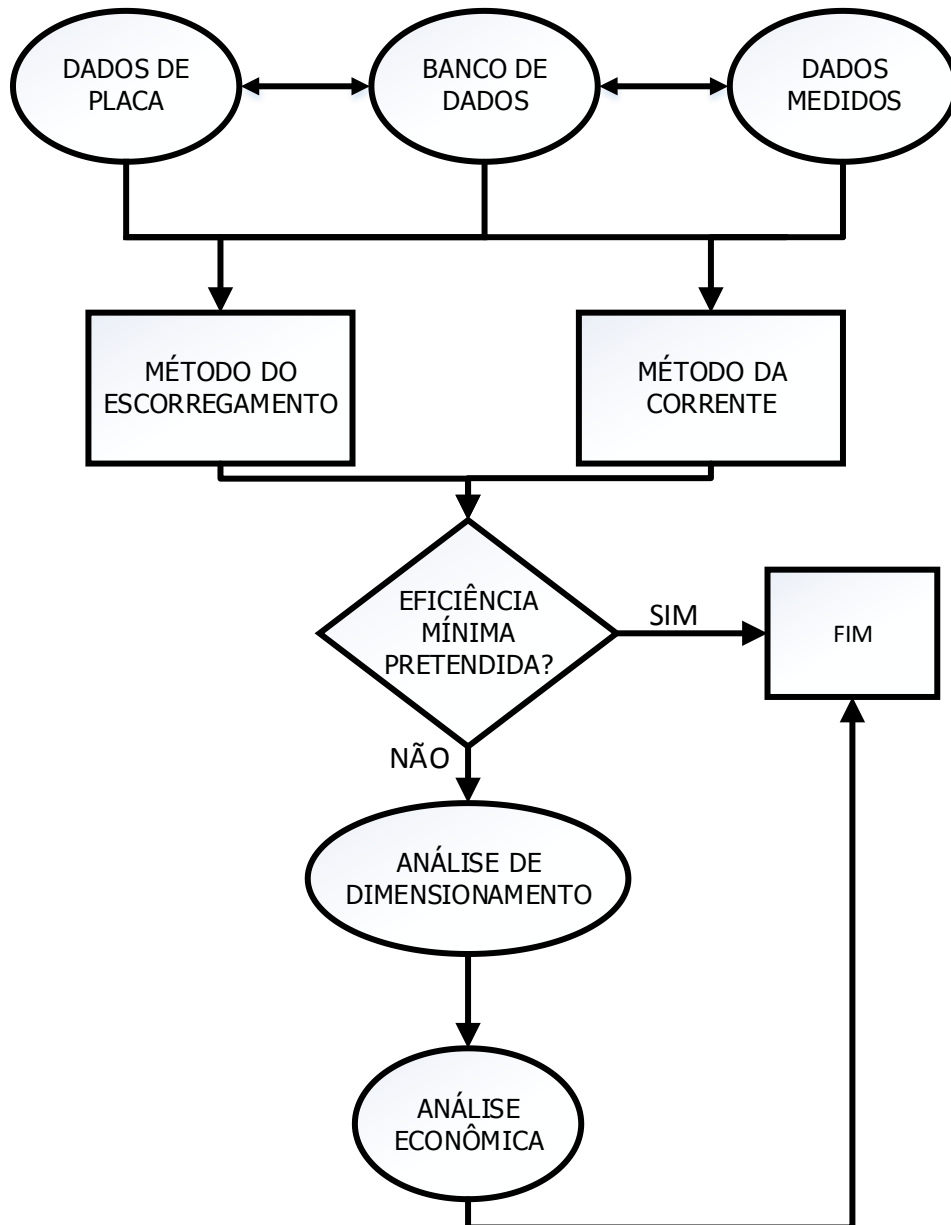


Figura 12 - Fluxograma sintetizado do software.

Fonte: Autoria própria (2016).

Com a exemplificação usada para o estimador de eficiência energética, o desenvolvimento da ferramenta proposta neste trabalho utilizou foi via MATLAB/GUI. O guia de interface ao usuário (GUI), recurso do MATLAB, foi escolhida para facilitar o entendimento junto ao usuário. Na Figura 13 pode-se observar a interface do usuário do estimador de eficiência energética.

Figura 13 - Estimador de eficiência energética

Fonte: Autoria própria (2016).

Neste capítulo são descritos os aspectos metodológicos da implementação do estimador de eficiência energética. Assim, neste Capítulo, foram apresentados os detalhes do método modificado de Ontario Hydro de escorregamento e o método da corrente à vazio para estimativa do rendimento de motores elétricos trifásicos bem como a interface do programa com o usuário para a aferição dos resultados energético e financeiro.

5 EQUIPAMENTOS E MÉTODO DE MEDIÇÃO

Neste Capítulo aborda-se uma breve descrição da empresa Carbonífera do Cambuí LTDA e como foram feitas as medições na área. A referida empresa disponibilizou a planta de britagem do carvão mineral para medições dos motores. Assim foi possível obter os dados de operação das cargas eletromotrizes, para o presente trabalho, com o objetivo de extrair as grandezas de tensão, corrente, rotação e fator de potência dos motores em máximo regime de carga, com o objetivo de aplicar o estimador de eficiência energética proposto neste trabalho e apresentar dados de auxílio a gestão relativos à eficiência das máquinas do referido setor.

5.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

Carbonífera do Cambuí LTDA está situada no norte do Paraná na cidade de Figueira distante 315 km da capital do estado. Fazendo a extração de carvão mineral em uma mina subterrânea com capacidade de extração de 10000 toneladas mensais que são em sua maioria utilizados na usina termoeletrica de Figueira onde este carvão é transformado em energia elétrica. A usina é da COPEL (Companhia Paranaense de eletricidade) com capacidade instalada de 18 MW e atualmente é operada pela Cambuí Usina.

A empresa possui 315 funcionários diretos na mineração e operação da usina e responde por 70% do PIB municipal.

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para esse trabalho foram realizadas medições utilizando os seguintes aparelhos:

- Alicates multímetro marca Fluke 323, digital, medição de tensão CA-CC 600 V, medição de corrente CA-CC 400 A, corrente e tensão CA true rms;
- Tacômetro Foto/contato marca Minipa, medição por contato 0,5 a 20000 rpm e medição por foto 2,5 a 100000;
- Alicates wattímetro ET-4080 marca Minipa true rms AC.

Na Figura 14 pode-se observar o diagrama unifilar da área levantada da empresa Carbonífera do Cambuí LTDA afim de obter os dados durante a operação dos motores. A planta possui um transformador trifásico de potência 750 kVA para a alimentação de três áreas, o DG (Disjuntor Geral) para a proteção do trafo e a distribuição é feita através de três QGF (Quadro Geral de Força).

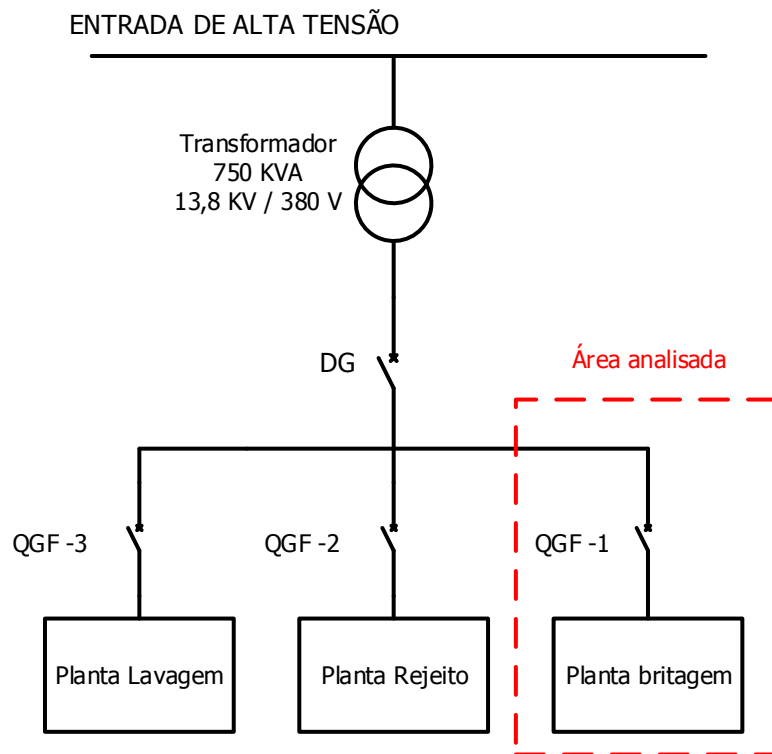


Figura 14 - Diagrama unifilar da planta de beneficiamento de carvão da Carbonífera do Cambuí LTDA.

Fonte: Autoria própria (2016).

A área levantada possui quatorze motores de variadas potências e três acionamentos possíveis, soft start, inversor de frequência e partida direta. A análise da área foi acordado no início das atividades do TCC, com o objetivo de mapear todas as máquinas do setor, pode-se assim desenvolver uma metodologia capaz de proporcionar, por meio de medidas de relativa facilidade de aquisição, um meio para o cálculo da eficiência energética da planta. A Tabela 5 ilustra a aplicação dos motores, valores nominais de potência, tensão, corrente e pólos dos motores da planta de britagem do carvão.

Tabela 5 - Relação dos motores na planta de britagem do carvão

Motor	Aplicação dos motores	Potência(CV)	Tensão (V)	Corrente (A)	Pólos
M1	Correia Transportadora 1	30	380	42,8	4
M2	Correia Transportadora 2	7,5	380	11,7	4
M3	Correia Transportadora 3	7,5	380	11,7	4
M4	Correia Transportadora 4	7,5	380	11,7	4
M5	Correia Transportadora 5	7,5	380	11,7	4
M6	Correia Transportadora 6	7,5	380	11,7	4
M7	Correia Transportadora 7	10	380	14,9	4
M8	Correia Transportadora 8	10	380	14,9	4
M9	Peneira Vibratória	10	380	14,5	4
M10	Peneira Vibratória	5	380	8,19	8
M11	Peneira Vibratória	5	380	8,19	8
M12	Britador	15	380	21,5	4
M13	Britador	15	380	21,5	4
M14	Britador de Mandíbula	30	380	42,8	4

Por meio de cálculos utilizando os valores nominais e os valores medidos dos motores de indução trifásicos foram feitas as análises do rendimento proporcional as cargas acionadas pelos referidos motores.

5.3 MÉTODO DE MEDIÇÃO

Na presente pesquisa foram obtidos os dados de funcionamento dos MIT, através das medições da tensão de alimentação, corrente elétrica e rotação, sendo estes comparados com os valores do fabricante de motores elétricos WEG. Todas as medições foram realizadas com o motor em operação em máxima carga.

Esta é uma parte relevante do trabalho, já que as medições realizadas com os motores em plena carga afetaram diretamente as estimativas de eficiência energética. Isso se explica pois os dois métodos para o cálculo de rendimentos dos motores de indução utiliza estes dados medidos como já explicado no Capítulo 3, por meio das Equações (9) e (12).

5.3.1 Realização das medidas em campo

Em todas as medições realizadas foram utilizados equipamentos de segurança tais como: botas de proteção de classe 1kV, óculos de segurança, protetor auricular, capacete de segurança e luvas de borracha isolante como norma da empresa para a determinada área.

Os dados de corrente e tensão dos motores trifásicos foram retirados dos centros de comando de motores (CCM), devido a maior facilidade de acesso e não havendo a necessidade de interrupções no funcionamento do equipamento em análise como ilustra a Figura 15 e 16.



Figura 15 – Medição de tensão no CCM.
Fonte: autoria própria



Figura 16 - Medição de corrente no CCM.
Fonte: autoria própria

As medidas de rotação dos MIT do referido setor devem ser precisas, devido ao método modificado Ontário Hydro do escorregamento, que necessita da velocidade medida do motor, exigiu que alguns equipamentos precisaram ser interrompidos de seu processo, pois a medição de velocidade de uma máquina de indução requer o acesso ao eixo do motor, para assim utilizar o tacômetro para a realização das medidas. As Tabelas 6, Tabela 7 e Tabela 8 mostram a relação de todos dados obtidos das medições em campo.

A Tabela 6 exibe os valores medidos das tensões de linha em V [Volts] de cada motor da planta de britagem do carvão. A Tabela 7, por sua vez, contém as correntes de linha medidas em A [Amperes] dos quatorze motores da planta de britagem do carvão. Finalmente a Tabela 8 ilustra os valores medidos de rotação em rotações por minuto e fator de potência da planta de britagem do carvão.

Tabela 6 - Relação das tensões dos motores medidos em campo

Motor	Aplicação dos motores	Potência [CV]	Tensão 1 [V]	Tensão 2 [V]	Tensão 3 [V]
M1	Correia transportadora 1	30	370,5	368,5	368,3
M2	Correia transportadora 2	7,5	366,5	369,0	369,2
M3	Correia transportadora 3	7,5	368,1	368,3	368,1
M4	Correia transportadora 4	7,5	367,2	364,3	368,5
M5	Correia transportadora 5	7,5	369,5	368,3	367,1
M6	Correia transportadora 6	7,5	366,4	367,2	365,2
M7	Correia transportadora 7	10	369,3	368,7	366,3
M8	Correia transportadora 8	10	367,7	366,4	365,3
M9	Peneira vibratória 1	10	368,0	368,4	368,5
M10	Peneira vibratória 2	5	369,4	370,9	365,3
M11	Peneira vibratória 3	5	370,8	369,5	369,1
M12	Britador duplo rolo 1	15	368,5	367,0	369,7
M13	Britador duplo rolo 2	15	369,0	368,7	367,4
M14	Britador de mandíbula	30	368,6	369,7	366,5

Tabela 7 - Relação das correntes dos motores medidos em campo

Motor	Aplicação dos motores	Potência [CV]	Corrente 1 [A]	Corrente 2 [A]	Corrente 3 [A]
M1	Correia transportadora 1	30	27,2	28,1	28,0
M2	Correia transportadora 2	7,5	7,6	8,2	7,3
M3	Correia transportadora 3	7,5	6,9	6,5	6,6
M4	Correia transportadora 4	7,5	6,4	6,0	6,7
M5	Correia transportadora 5	7,5	7,2	6,7	6,2
M6	Correia transportadora 6	7,5	6,6	6,7	6,2

Tabela 7 - Relação das correntes dos motores medidos em campo

Motor	Aplicação dos motores	Potência [CV]	Corrente 1 [A]	Corrente 2 [A]	Corrente 3 [A]
M7	Correia transportadora 7	10	8,0	7,3	7,0
M8	Correia transportadora 8	10	11,6	11,3	12,2
M9	Peneira vibratória 1	10	8,8	8,4	8,7
M10	Peneira vibratória 2	5	6,7	6,9	6,7
M11	Peneira vibratória 3	5	6,7	6,2	6,1
M12	Britador duplo rolo 1	15	11,7	11,5	11,0
M13	Britador duplo rolo 2	15	11,3	10,5	12
M14	Britador de mandíbula	30	18,2	17,8	17,4

Tabela 8 - Relação das rotações dos motores medidos em campo

Motor	Aplicação dos motores	Potência [CV]	Pólos	Rotação [RPM]	Fator de potência
M1	Correia transportadora 1	30	4	1785	0,77
M2	Correia transportadora 2	7,5	4	1785	0,37
M3	Correia transportadora 3	7,5	4	1787	0,20
M4	Correia transportadora 4	7,5	4	1785	0,25
M5	Correia transportadora 5	7,5	4	1785	0,62
M6	Correia transportadora 6	7,5	4	1790	0,30
M7	Correia transportadora 7	10	4	1790	0,45
M8	Correia transportadora 8	10	4	1772	0,67
M9	Peneira vibratória 1	10	4	1785	0,67
M10	Peneira vibratória 2	5	8	888	0,26
M11	Peneira vibratória 3	5	8	890	0,25
M12	Britador duplo rolo 1	15	4	1783	0,75
M13	Britador duplo rolo 2	15	4	1782	0,60
M14	Britador de mandíbula	30	4	1790	0,40

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho apresentam valores determinados pelo software intitulado de Estimativa de Eficiência Energética. Foi feita a análise dos motores elétricos de indução, levantados junto a Carbonífera do Cambuí LTDA do setor da britagem do carvão. Este setor foi designado, pois possui a maior perspectiva de conservação de energia. Este fato ocorre nesta planta, pois encontram-se os motores mais antigos em operação.

Então, este Capítulo tem por objetivo destacar as possibilidades de economia energética e financeira com os valores encontrados por meio da ferramenta computacional, utilizando gráficos e fazendo um comparativo entre os motores atuais da planta com os motores propostos pelo programa.

6.1 ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DOS MOTORES

Por meio dos dados de placa e dados medidos em operação dos quatorze motores presentes na planta de britagem de carvão, foi realizada a análise dos rendimentos utilizando a ferramenta computacional proposta no trabalho. A Tabela 9 ilustra os valores de rendimento encontrados pelos dois métodos citados no Capítulo 4.

Tabela 9 - Resultados dos rendimentos obtidos na planta de britagem do carvão

Motor	Aplicação dos Motores	Tipo de acionamento	Método da corrente à vazio [%]	Método modificado Ontario Hydro do escorregamento [%]
M1	Correia transportadora 1	Soft start	71,50	65,45
M2	Correia transportadora 2	Soft start	98,61	67,24
M3	Correia transportadora 3	Soft start	63,55	129,93
M4	Correia transportadora 4	Soft start	42,09	152,73
M5	Correia transportadora 5	Soft start	30,57	46,02
M6	Correia transportadora 6	Soft start	28,16	67,66
M7	Correia transportadora 7	Soft start	41,11	77,25
M8	Correia transportadora 8	Soft start	94,81	95,26
M9	Peneira vibratória 1	Soft start	45,00	71,35
M10	Peneira vibratória 2	Partida Direta	135,84	93,43
M11	Peneira vibratória 3	Partida Direta	126,66	83,51
M12	Britador duplo rolo 1	Soft start	27,46	83,51
M13	Britador duplo rolo 2	Soft start	40,01	102,08
M14	Britador de mandíbula	Soft start	35,33	131,10

Por meio dos dados de rendimento da Tabela 9 pode-se calcular o consumo em kWh/dia dos motores em operação da planta de britagem do carvão, considerando que os motores de indução trifásicos trabalham 16 horas diárias. A Equação (15) demonstra como será calculado o consumo diário de energia elétrica de cada motor. Considera-se 1 CV igual a 0,746 kW, pois os motores analisados são da linha W22 R2 da fabricante WEG.

$$C = P \times 0,746 \times Rend \times h \quad (15)$$

onde:

- C – consumo do motor em um dia, em (kWh/dia);
- P – Potência nominal do motor, em kW;
- $Rend$ – Rendimento estimado do motor em operação;
- h - horas de operação do motor em um dia.

Vale destacar que para o cálculo do consumo diário de cada motor, utilizou-se o menor rendimento estimado pelos dois métodos, assim objetivando o pior caso de mal dimensionamento dos mesmos.

Pelo gráfico apresentado na Figura 17, observa-se o consumo de energia elétrica de cada motor em um dia, é importante ressaltar que os motores M1 e M14, como os de maior consumo na planta de britagem. Cada motor consome respectivamente 234,36 kWh/dia e 126,50 kWh/dia, sendo que o motor M8 foi que apresentou melhor eficiência energética entre os motores analisados.

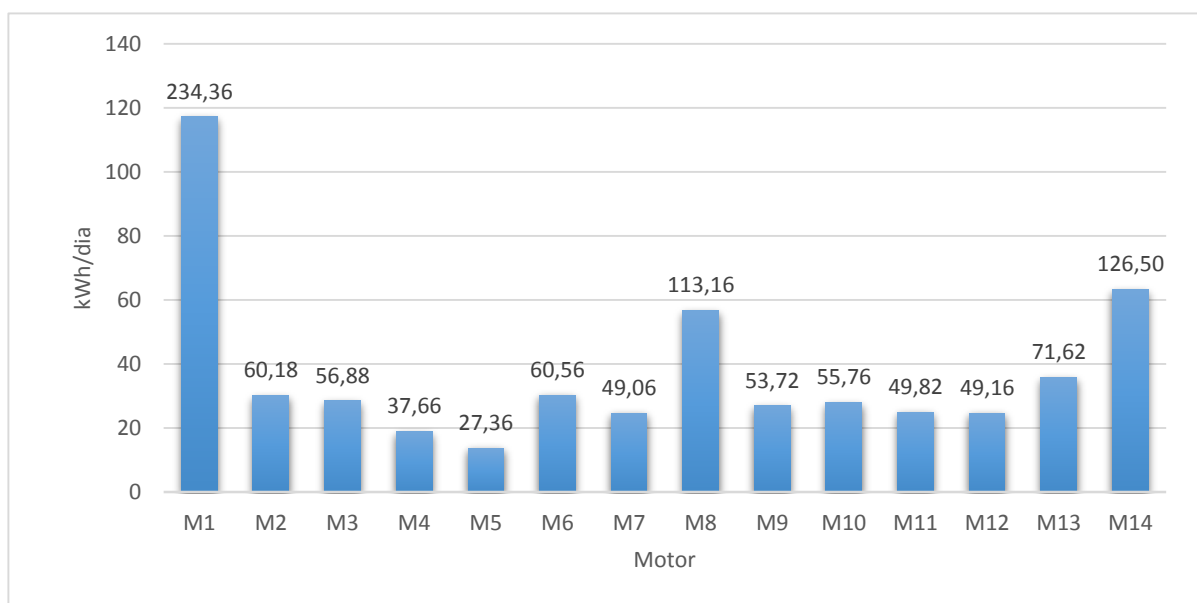


Figura 17 - Consumo diário em kWh/dia de cada motor atual.
Fonte: Autoria própria (2016).

6.2 CONSUMO DE ENERGIA DOS MIT PROPOSTOS

Após levantamento feito na planta de britagem do carvão e a obtenção dos dados medidos presentes nas Tabelas (6), (7) e (8), todas as análises foram feitas por meio do programa proposto no trabalho. Sendo assim os resultados de eficiência foram gerados via software. A Tabela 9 ilustra os resultados de rendimento em plena carga obtidos dos motores.

O órgão federal responsável pelo programa de conservação de energia elétrica no país (PROCEL), cita que o carregamento de um motor bem dimensionado deve se situar acima de 75% da potência nominal.

Nota-se pela Tabela 9 que dos quatorze motores analisados pela ferramenta para estimar a eficiência energética apenas três motores apresentaram carregamento entre a faixa esperada. Os sistemas da correia transportadora 8, peneira vibratória 2 e peneira vibratória 3 se encaixam no rendimento mínimo adequado pelos dois métodos testados, como ilustra a Tabela 10.

Tabela 10 - Motores com rendimento mínimo de 75%

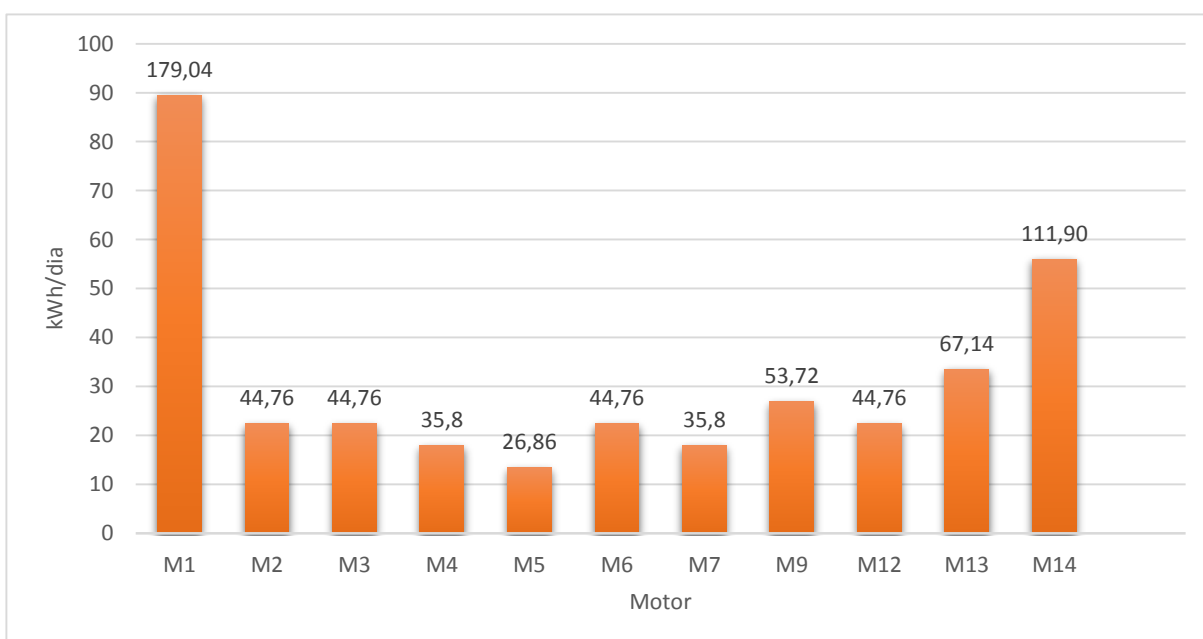
Motor	Aplicação dos motores	Método da corrente à vazio [%]	Método modificado Ontario Hydro do escorregamento [%]
M8	Correia transportadora 8	94,81	95,26
M10	Peneira vibratória 2	114,70	81,40
M11	Peneira vibratória 3	126,66	83,51

Com isso os motores que apresentaram rendimento abaixo de 75% em um dos métodos de eficiência energética, ou seja, mesmo que o carregamento da máquina de indução atinja o valor mínimo por uma metodologia, o software ainda sim indicará dimensionamento inadequado. Foram redimensionados doze MIT, assim propondo um motor adequado para cada carga. A Tabela 11 mostra a comparação das potências nominais entre os motores atuais que podem estar com dimensionamento inadequado e os motores sugeridos pela ferramenta computacional.

Tabela 11 - Relação dos motores atuais e os motores propostos pelo programa.

Motor	Aplicação dos motores	Motores atuais potência nominal [CV]	Motores propostos potência nominal [CV]
M1	Correia transportadora 1	30	20
M2	Correia transportadora 2	7,5	5
M3	Correia transportadora 3	7,5	5
M4	Correia transportadora 4	7,5	4
M5	Correia transportadora 5	7,5	3
M6	Correia transportadora 6	7,5	5
M7	Correia transportadora 7	10	4
M9	Peneira vibratória 1	10	4
M12	Britador duplo rolo 1	15	5
M13	Britador duplo rolo 2	15	7,5
M14	Britador de mandíbula	30	12,5

Com esta relação da Tabela 11, pode-se determinar a energia em kWh/dia que os motores propostos gastariam se conectados a carga com regime de operação de 16 horas por dia utilizando a Equação (15). Nota-se que dos quatorze MIT iniciais, onze foram redimensionados. A Figura 18 ilustra a quantidade de kWh/dia de cada motor proposto. O consumo diário de energia elétrica de cada motor redimensionado é calculado supondo que cada motor opere com seu respectivo rendimento mínimo determinado pela ANEEL de 75%, pois a estimativa de torque é feita pela corrente, logo o novo motor proposto pode ainda não atingir seu valor nominal de potência.

**Figura 18 - Consumo diário em kWh/dia de cada motor proposto.**

Fonte: Autoria própria (2016).

6.3 ANÁLISE DE CONSUMO ENERGÉTICO ENTRE OS MIT ATUAIS E OS MIT PROPOSTOS

Agora tem-se o comparativo entre os resultados obtidos com o estimador de eficiência energética. Então pode-se fazer a relação entre o consumo de kWh/dia dos motores atuais com os motores propostos, com o objetivo de saber a economia de kWh/dia que a empresa Carbonífera do Cambuí terá caso venha optar pela troca dos motores.

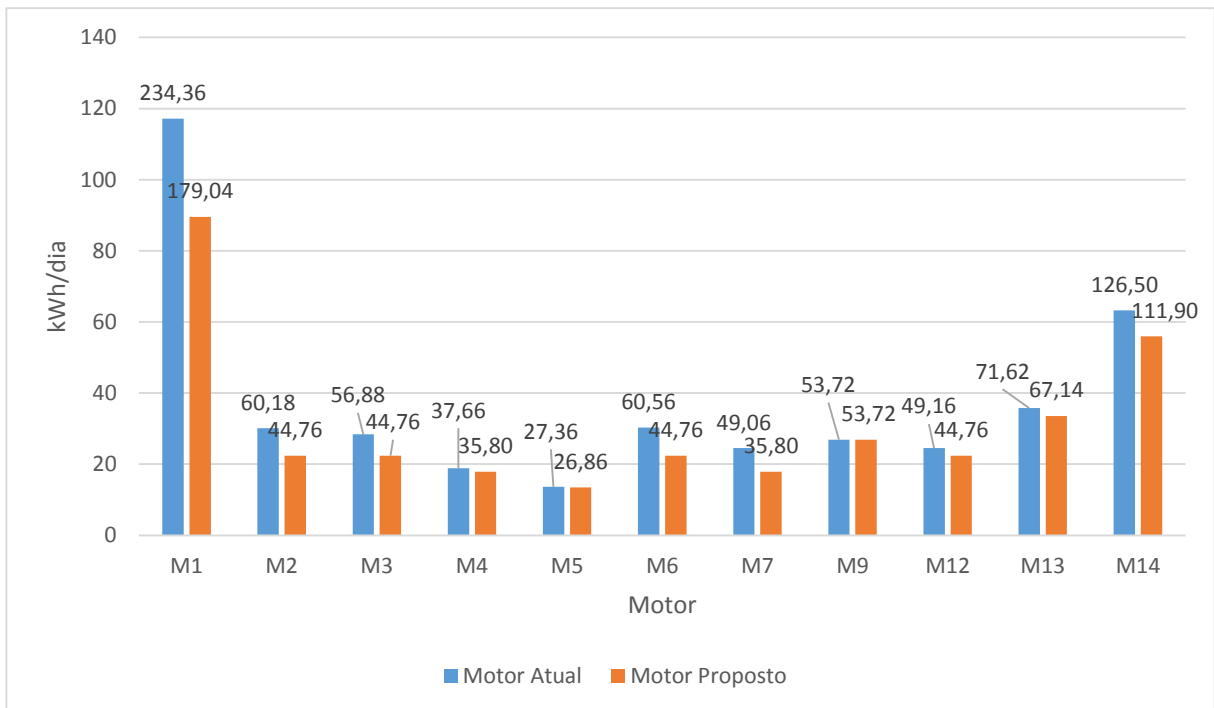


Figura 19 - Consumo de kWh/Dia dos motores atuais em relação aos motores propostos.
Fonte: Autoria própria (2016).

A Figura 19 mostra o potencial de economia energética que pode ser alcançado com os motores propostos pela ferramenta computacional. Por meio da Tabela 12 pode-se observar quantos kWh/dia poderão ser economizados.

Tabela 12 - Análise de economia energética da planta de britagem

Motor atual potência [CV]	Motor atual [kWh/dia]	Motor proposto potência [CV]	Motor proposto [kWh/dia]	Economia em [kWh/dia]
30	234,36	20	179,04	55,32
7.5	60,18	5	44,76	15,42
7.5	56,88	5	44,76	12,12
7.5	37,66	4	35,80	1,86
7.5	27,36	3	26,86	0,50
7.5	60,56	5	44,76	15,80
10	49,06	4	35,80	13,26
10	53,72	4	53,72	0
15	49,16	5	44,76	4,4
15	71,62	7,5	67,14	4,50
30	126,50	12,5	111,90	14,6
Total	827,08		689,30	137,78

Logo o potencial de economia energética da área estudada é de 137,78 kWh/dia (aproximadamente 16% do kWh/dia gasto pelos motores atuais). É importante ressaltar que a análise foi feita com máxima carga nos motores, apesar de todos os equipamentos terem carregamento variável.

6.4 ANÁLISE ECONÔMICA ENTRE OS MIT ATUAIS E OS MIT PROPOSTOS

Com os dados de kWh/dia apresentados no Seção 6.3, pode-se estimar a economia financeira gerada pela substituição dos motores propostos pelo software estimador de eficiência energética.

Nos cálculos financeiros apresentados considera-se o valor do kWh segundo a resolução da COPEL (Companhia Paranaense de Energia), de 24 de junho de 2015, tarifa horária azul - subgrupo A4 onde o R\$/kWh é (0,53665) com ICMS e PIS/CONFINS. Na Tabela 13 observa-se o gasto dos motores atuais em diferentes períodos de tempo: um mês; um ano; cinco anos.

Tabela 13 - Análise de gastos com os motores atuais

Motor atual potência [CV]	1 mês [R\$]	1 ano [R\$]	5 anos [R\$]
30	3.773,08	45.276,95	226.384,70
7.5	968,86	11.626,41	58.132,07
7.5	915,73	10.988,87	54.944,37
7.5	606,30	7.275,69	36.378,43
7.5	440,48	5.285,78	26.428,94
7.5	974,98	11.699,83	58.499,14
10	789,84	9.478,10	47.390,49
10	864,86	10.378,38	51.891,91
15	791,45	9.497,42	47.487,09
15	1.153,04	13.836,55	69.182,77
30	2.036,59	24.439,04	122.195,20
Total	13.315,25	159.783,90	798.915,10

Após análise dos gastos com os motores atuais, foi feita uma comparação com os gastos dos MIT propostos, para poder mensurar a economia financeira que a empresa teria caso viesse a substituí-los. A Tabela 14 ilustra o gasto dos motores atuais em diferentes períodos de tempo: um mês; um ano; cinco anos.

Tabela 14 - Análise de gastos com os motores propostos

Motor atual potência [CV]	1 mês [R\$]	1 ano [R\$]	5 anos [R\$]
20	2.882,45	34.589,45	172.947,30
5	720,61	8.647,36	43.236,82
5	720,61	8.647,36	43.236,82
4	576,36	6.916,34	34.581,73
3	432,43	5.189,19	25.945,95
5	720,61	8.647,36	43.236,82
4	576,36	6.916,34	34.581,73
4	864,86	10.378,38	51.891,91
5	720,61	8.647,36	43.236,82
7,5	1.080,92	12.971,05	64.855,23
12,5	1.801,53	21.618,41	108.092,0
Total	11.097,39	133.168,60	665.843,10

Comparando-se os resultados obtidos pelas Tabelas 13 e 14, observa-se um percentual de economia financeira de 16,66%, analisando os períodos de tempo de 1 mês; 1 ano e 5 anos. Caso a Carbonífera do Cambuí opte pela substituição de todos os motores ela teria uma economia em um mês de R\$ 2.218,19, em 1 ano a economia seria de R\$ 26.618,28 e em 5 anos o valor seria de R\$ 133.091,34. As Figuras 20 e 21 ajudam na verificação da economia financeira citada.

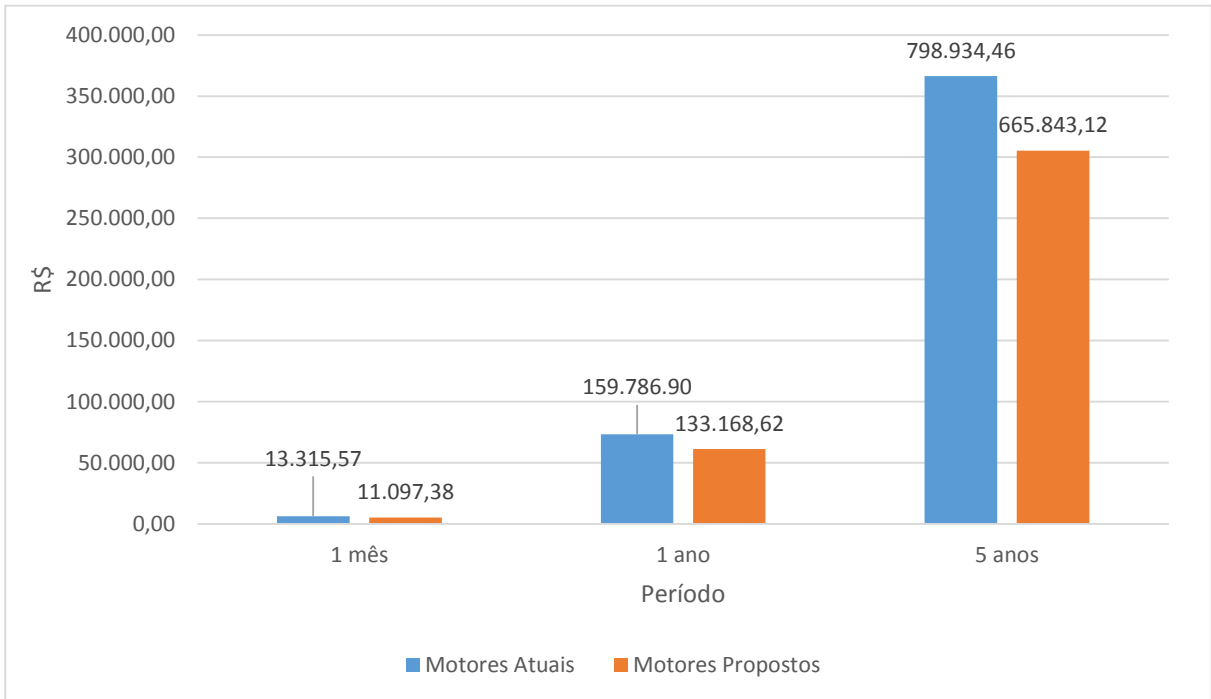


Figura 20 - Gastos dos atuais versus motores propostos.

Fonte: Autoria própria (2016).

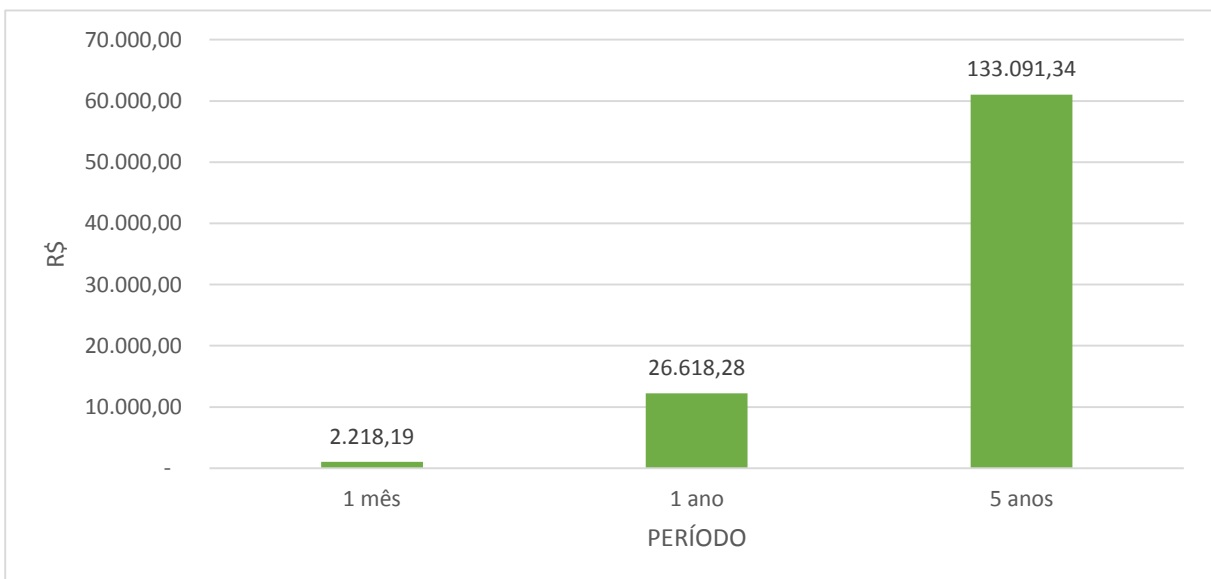


Figura 21 - Economia financeira após troca de todos os motores atuais.

Fonte: Autoria própria (2016).

6.5 VALIDAÇÃO DA FERRAMENTA COMPUTACIONAL: ESTUDO DE CASO

Para a validação do estimador de eficiência energética proposto neste trabalho foi realizada a troca de um dos motores junto a Carbonífera do Cambuí LTDA, na planta de britagem do carvão, no intuito de mostrar se o motor indicado pelo software para a determinada carga, acionará o equipamento sem a ocorrência de nenhuma falha e consequentemente estipular a economia energética e financeira.

O motor escolhido para a troca foi o (M4), correia transportadora 4, em que apresentou baixo rendimento no método da corrente à vazio. O MIT proposto para a carga em questão é o motor de 4 CV, 4 pólos. Porém a correia transportadora 4 é acionada por meio de uma caixa redutora, onde o acoplamento junto a mesma deve ser feito com um motor com a carcaça correspondente ao motor de 7,5 CV (Carcaça Padrão 112M). A empresa disponibilizou uma máquina de indução com a carcaça correspondente e com um torque proporcional ao motor proposto. A Tabela 15 ilustra as características do motor atual e do motor pós troca.

Tabela 15 - Características dos motor atual e do motor pós troca

Potência [CV]	Pólos	Corrente [A]	Tensão [V]	Acionamento	Carcaça
7,5	4	11,7	380	soft start	112M
4	6	7,02	380	soft start	112M

A Figura 22 exibe a correia transportadora 4 com o motor pós troca, com o mesmo em plena operação.



Figura 22 - Correia transportadora 4 com motor pós troca

Após a troca deve-se levar em consideração as grandezas medidas de tensão, corrente, rotação e fator de potência do motor pós troca em comparação com o antigo motor. Na Tabela 16 é apresentado o comparativo entre as grandezas medidas do motor atual e do motor pós troca.

Tabela 16 - Grandezas medidas motor atual versus motor pós troca.

	Potência [CV]	Tensão [V]	Corrente [A]	Rotação [RPM]	Fator de potência
Motor atual	7,5	368,5	6,7	1785	0,25
Motor pós troca	4	367,2	4,2	1183	0,27

Com os valores presentes na Tabela 16 pode-se calcular o quanto esse motor economizará ao longo de 5 anos; 10 anos e 15 anos. O cálculo de economicidade pode ser feito por meio da Equação (16) a seguir:

$$EconomiaAtual = P_{nom}CH\left(\frac{n_{est}}{100}\right) \quad (16)$$

onde:

- P_{nom} – Potência nominal do motor, em kW;
- C - Custo anual da energia, em R\$/kWh;
- H – Número de horas em funcionamento anual;
- n_{est} – Eficiência estimada do motor.

Exemplificando a aplicação da Equação (16), considerando os valores apresentados na Tabela 16, pode-se calcular o rendimento do motor pós troca, considerando a máquina de indução operando 5760 horas/ano (16 horas dia) e cujas eficiências estimadas pela software de 42,09 % para o motor atual e 50,10% para o motor pós troca. Considerando um custo de energia de R\$ 0,53/kWh, tem-se uma economia anual de R\$ 1.309,00.

É importante ressaltar que o motor pós troca não atingiu seu rendimento nominal, isto se deve pelo fato do cálculo do torque estimado ser em função a corrente medida do motor, o que ocasiona um erro elevado. Outro ponto a ser discutido é o motor estar acoplado a uma caixa redutora, que eleva o torque da máquina acoplada.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs uma ferramenta computacional voltada para o setor industrial, capaz de estimar a eficiência energética e economia financeira dos motores de indução trifásicos em operação. O software proposto estima a eficiência energética do MIT utilizando o método modificado de Ontario Hydro do escorregamento e o método da corrente à vazio.

Para a validação do estimador de eficiência energética, foi analisada a planta de britagem de carvão da Carbonífera do Cambuí LTDA. Comparando os valores obtidos na Figura 20 e 21, nota-se que existe um grande potencial de economia energética e financeira da planta de britagem, efetuando a troca de todos os motores acarretaria em uma economia financeira de aproximadamente R\$ 12.209,49 por ano se comparado ao valor pago atualmente do kWh. Deve se levar em consideração que para a troca dos motores haverá um investimento inicial, o que deverá influenciar neste valor de economia.

É importante deixar claro que os resultados dos rendimentos estimados por meio do software proposto no trabalho variam muito. Assim descrição de cada um dos métodos feita no Capítulo 4 já antecipava uma baixa precisão dos mesmos, causada principalmente pela simplicidade de seu cálculo, que depende excessivamente de dados de placa do MIT. Os mesmos, por sua vez pode apresentar erros na faixa de 20% conforme a literatura e consequentemente propagando os erros médios das metodologias impostas. Devido a proposta do trabalho em estimar a eficiência do motor em operação, somente com os dados de tensão, corrente, rotação e fator de potência, a utilização dos outros métodos de estimação de eficiência energética citados tornam-se inviável por questões econômicas.

Constata-se que o diagnóstico energético da planta para a validação do estimador de eficiência energética pode proporcionar a redução de custos em energia elétrica, tanto pela redução de demanda, como pela redução do consumo. Sendo a máquina de indução trifásica um equipamento muito utilizado no setor industrial, o mesmo é passível de substituições.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

- Levar em consideração o torque de aceleração do motor de indução.
- Estudo dos tipos de partida de motores de indução trifásicos presentes no mercado para a implementação no programa.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Cássio. **Análise de métodos para determinação da eficiência de motores trifásicos de indução**. 2009. 128 p. Dissertação – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.
- BORTONI, E.C; NOGUEIRA, L.A.H; CARDOSO, R.B; HADDAD; SOUZA, E.P; DIAS, M.V.X; YAMACHITA, R.A. **Assessment of the achieved savings from induction motors energy efficiency labeling in Brazil**. 2013. 7 f. IEEE Energy Conversion and Management, v.75, 2013.
- BORTONI, E. C. **Análise do Reparo de Motores de Indução Trifásicos. Trabalho apresentado no XV SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**. Foz do Iguaçu, PR, outubro de 1999. Disponível em: <http://www.itaipu.gov.br/xvsnptee/xvsnptee/stc/stc04.pdf>. Acessado em: 02 outubro de 2012.
- BRANDT, Rodrigo. **Análise de métodos de baixa intrusividade para estimativa da eficiência de motores trifásicos de indução**. 2011. 143 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- CHAPMAN, J. STEVEN. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013.
- DONA, Sebastian; MANJUSHA, V.A; ANTO, Robins. **Energy Management of Induction Motors Using Non-Intrusive Methods**. 2013. 6 f. IEEE International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC), 2013.
- ELETROBRÁS. **Eletrobrás – Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**, 1998. Disponível em: <http://www.eletrabras.gov.br/procel.asp>; acessado em 02 de Julho de 2015
- ELETROBRÁS, Procel Indústria – **Motor elétrico guia básico**. Rio de Janeiro: Eletrobrás.194 p. 2009.
- ELETROBRÁS, Procel Indústria – **Motor elétrico premium**. Rio de Janeiro: Eletrobrás.68 p. 2016.
- FACCO, José H. **Ações de conservação de energia aplicadas a uma planta industrial composta por motores de indução**. 2006. 144 p. Dissertação – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. **Máquinas Elétricas**. Porto Alegre, RS: ARTMED-BOOKMAN, 2006.
- GARCIA, Agenor. **Impacto da lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria**. 2003. 127 p. Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

GOEDTEL, A.; SILVA, Ivan Nunes da; SERNI, Paulo J A. **Load Torque Identification in Induction Motor Using Neural Networks Technique**. 2007, p 35-45. *Electric Power Systems Research*, vol. 77, 2007.

IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors e Generators, 2004.

LU, Bin; HABETLER, Thomas; HARLEY, Ronald. **A Survey of Efficiency-Estimation Methods for In-Service Induction Motors**. 2006. 10 f. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 42, 2006.

LU, Bin; HABETLER, Thomas; HARLEY, Ronald. **A Nonintrusive and In-Service Motor-Efficiency Estimation Method Using Air-Gag Torque With Considerations of Condition Monitoring**. 2008. 9 f. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, 2008.

MME. **Brasil. Decreto 4.059 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei nº 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso racional de Energia e de outras providências**. D.O.U., Brasília, DF, 20 de dezembro de 2001. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/>. Acesso em: 02 de Julho de 2015.

PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso – Classe industrial**. Disponível em: <http://www.eletróbras.gov.br/procel> Acesso em: 03 de julho de 2015.

SUETAKE, Marcelo; SILVA, Ivan N. da; GOEDTEL, Alessandro. **Embedded DSP-Based Compact Fuzzy System and Its Application for Induction-Motor V/f Speed Control**. 2011. 7 f. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 58, 2011.

WEG, **Considerações sobre redimensionamento de motores elétricos de indução**. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-consideracoes-sobre-redimensionamento-de-motores-eletricos-de-inducao-artigo-tecnico-portugues-br.pdf> Acesso em: 03 de julho de 2015.