



Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Mestrado-Doutorado

**SISTEMA TOTALMENTE NÃO-INVASIVO PARA
DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE
ROTAÇÃO DO EIXO, TORQUE E RENDIMENTO
EM MOTORES DE INDUÇÃO EM OPERAÇÃO**

Por

JULIO CESAR DA SILVA

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do grau de mestre*

JULIO CESAR DA SILVA

SISTEMA TOTALMENTE NÃO-INVASIVO PARA
DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO
DO EIXO, TORQUE E RENDIMENTO EM MOTORES
DE INDUÇÃO EM OPERAÇÃO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586s Silva, Julio Cesar da.

Sistema totalmente não-invasivo para determinação da velocidade de rotação do eixo, torque e rendimento em motores de indução em operação / Julio Cesar da Silva.
- João Pessoa, 2018.

111 f.

Orientação: Abel Cavalcante Lima Filho.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Motor de indução. 2. Análise sonora. 3. Velocidade.
4. Torque. 5. Eficiência. I. Lima Filho, Abel
Cavalcante. II. Título.

UFPB/BC

**SISTEMA TOTALMENTE NÃO-INVASIVO PARA
DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO EIXO,
TORQUE E RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO EM
OPERAÇÃO**

por

Julio Cesar da Silva

Dissertação aprovada em 26 de julho de 2018



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
Orientador – UFPB



Prof. ISAAC SAORES DE FREITAS
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. ALISSON VASCONCELOS DE BRITO
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, por sempre estar presente na minha vida, a minha mãe, Maria Aparecida da Silva, por todos os ensinamentos, conselhos e amor. A toda a minha família pelo incentivo constante e confiança em mim depositada, a minha namorada Anne Louise pelo carinho.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Abel Cavalcante Lima Filho por toda a ajuda, ensinamentos, atenção e incentivos. Ao professor Francisco Antônio Belo pelos ensinamentos, conselhos e ajuda. Ao professor Marcéu Oliveira Adissi, por sempre estar disposto a ajudar e por seus valorosos ensinamentos. Ao professor Alisson Vasconcelos de Brito e ao professor Isaac Soares de Freitas pela disposição na avaliação e contribuição para este trabalho.

A toda a minha família por estar sempre unida e me incentivando a trilhar os caminhos do conhecimento. Em especial a meu irmão José Neto, por todo o apoio e companheirismo, a minha tia Francisca Dias, pela ajuda e incentivos constantes.

Aos meus amigos e companheiros de pesquisa do laboratório GPICEEMA, por toda a ajuda e empenho na construção desta dissertação, em especial a José Anselmo, pelos valorosos ensinamentos, companheirismo e ajuda. Agradeço também a Thyago Leite, Hugo Pimentel, Tássio Borges, Frank César, Pedro Granville, Manoel Brasileiro, Filipe Vidal, Diógenes Montenegro e Jobson Francisco da Silva.

Aos companheiros de pós-graduação, Anderson Fortes, Caio Lira, Daniel Lira, Eduardo Mendes, Elves de Sousa, Everton Tavares, José Fabrício, Kerolayne Santos, Marcelo Martins, Marciano Marinho, Nayara Formiga, Rennan Jackson, Rômulo, Vinicius Mafra.

Meus sinceros agradecimentos a Fábio Araújo de Lima, pela amizade, companheirismo e por estar sempre disposto a ajudar. A Edleusom Saraiva pelo acolhimento em João Pessoa, pela amizade e ajuda.

A todos os funcionários e professores da Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPB, aos técnicos administrativos da coordenação do programa, Monica Rodrigues e Noaldo Sales pela paciência e ajuda.

A todos que contribuíram para a realização deste trabalho e a CAPES pelo suporte financeiro.

SISTEMA TOTALMENTE NÃO-INVASIVO PARA DETERMINAÇÃO DA VELOCIDADE DE ROTAÇÃO DO EIXO, TORQUE E RENDIMENTO EM MOTORES DE INDUÇÃO EM OPERAÇÃO

RESUMO

Os motores de indução trifásicos (MIT) são considerados a espinha dorsal da indústria estando presentes em praticamente todos os processos de produção e respondendo por dois terços do consumo de energia elétrica em ambiente industrial. Monitorar as grandezas do motor de indução trifásico como: torque, velocidade e eficiência são essenciais para manter um processo produtivo operante. Com um valor preciso da velocidade é possível ter maior controle sobre o processo no qual o MIT está inserido, já o monitoramento do torque possibilita evitar quebras de eixos e paradas na planta, além de reduzir custos com manutenção, o monitoramento da eficiência por sua vez, permite fazer um balanço energético do motor de indução trifásico, reduzindo o desperdício de energia elétrica. Entretanto, os equipamentos utilizados para fazer tais levantamentos são custosos e muitas vezes inviáveis devido às dificuldades de acoplá-los ao eixo do MIT, o que confere grande invasão ao motor. No presente trabalho, um novo sistema totalmente não invasivo baseado na análise do som emitido pelo MIT em funcionamento foi desenvolvido, permitindo estimar a velocidade, torque e eficiência. O torque no entreferro, devido seu baixo índice de invasão ao motor, foi utilizado como método de comparação, onde se estimou o torque e a eficiência. Para validar o novo método, foi utilizada uma bancada de torque controlável onde os valores de velocidade, torque e eficiência puderam ser medidos diretamente a partir do eixo do MIT. Os softwares Labview e Matlab foram utilizados para a aquisição dos sinais e para o processamento dos dados, respectivamente. Após a análise dos dados coletados, foi possível comparar os métodos implementados e validar o novo método proposto.

Palavras-chave: Motor de indução. Análise sonora. Velocidade. Torque. Eficiência.

A NON-INVASIVE SYSTEM TO DETERMINE SHAFT ANGULAR SPEED, TORQUE, AND EFFICIENCY ON OPERATING INDUCTION MOTORS

ABSTRACT

Three-phase induction motors (TIM) are considered the core of the plants, being present in almost every production process and being responsible for two-thirds of the electric energy consumption in the industrial environment. Monitoring the magnitudes of three-phase induction motors, such as torque, speed, and efficiency are essential to maintaining an operating productive process. Having a precise speed value permits to get a greater control over the process in which the TIM is located. Torque monitoring allows avoiding shaft breaks and stops, besides reducing maintenance costs. Efficiency monitoring allows establishing an energy balance of the three-phase induction motor, reducing electric energy waste. However, the equipment utilized to perform these evaluations is expensive and a lot of times it is unfeasible due to difficulties to couple them to the TIM, which results in a great invasiveness of the motor. In the present work, a new non-invasive system based on the analysis of the sound from the operating TIM was developed, allowing to estimate speed, torque and efficiency. The air gap torque, due to its low rate of invasiveness of the motor, was utilized as a comparison method, from which torque and efficiency were estimated. In order to validate the new method, it was utilized an automated torque test bench in which speed values, torque, and efficiency were measured directly from the TIM shaft. The programs Labview™ and Matlab were used to acquire the signals and to process the data, respectively. After the analysis of the collected data, it was possible to compare the implemented methods and to validate the proposed method.

Keywords: three-phase induction motor. Sound analysis. Speed. Torque. Efficiency.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1- MOTIVAÇÃO	3
1.2- ESTADO DA ARTE.....	5
1.3- OBJETIVOS	11
1.3.1- Objetivo Geral.....	11
1.3.2- Objetivos específicos.....	12
1.4- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	12
CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1-MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	14
2.1.1- Princípio de funcionamento	15
2.2- CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS	17
2.2.1- Estator	17
2.2.2- Rotor.....	18
2.2.3- componentes do MIT	19
2.3- RELAÇÃO TORQUE VERSUS VELOCIDADE.....	20
2.4- ESCORREGAMENTO.....	22
2.5- PERDAS NO MOTOR DE INDUÇÃO.....	23
2.6- PLACA DE IDENTIFICAÇÃO.....	26
2.7- EVOLUÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS	27
2.8- ANÁLISE DO SINAL SONORO USANDO FFT	29
CAPÍTULO 3 - MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO	38
3.1- MEDIÇÃO DIRETA DO TORQUE EM EIXO ROTATIVO	38
3.2- MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DO TORQUE.....	39
3.2.1- Método indireto de medição do torque a partir da carga do motor	40

3.2.2- Método do escorregamento	40
3.2.3- Método da corrente elétrica.....	41
3.2.4- Método das perdas segregadas	42
3.3- MÉTODO DO TORQUE NO ENTREFERRO	42
3.4- OBTENÇÃO DA VELOCIDADE EM MITS	48
3.4.1- Medição direta da velocidade no eixo.....	49
3.4.2- Estimação da velocidade no eixo a partir da harmônica nas ranhuras	49
3.4.3- Estimação da velocidade pelo método do torque no entreferro	51
3.4.4- Estimação da eficiência a partir do torque no entreferro	54
3.5- EFICIÊNCIA A PARTIR DA ANÁLISE SONORA DO MIT	54
3.5.1- Estimação da velocidade a partir da análise sonora do MIT	55
3.5.2- Estimação do torque a partir da análise sonora do MIT.....	58
3.5.3- Estimação da eficiência através da análise sonora do MIT.....	61
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	63
4.1- BANCADA DE TORQUE CONTROLÁVEL	63
4.1.1- Acionamento do motor de indução	65
4.1.2- Motor CC	67
4.1.3- Sistemas de medição	70
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS	75
5.1- RESULTADO DA MEDIÇÃO TORQUÍMETRO HBM T40B.....	75
5.2 - PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	78
5.3- ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE NO EIXO.....	78
5.4- ESTIMAÇÃO DO TORQUE NO EIXO	80
5.5- ESTIMAÇÃO DA EFICIÊNCIA.....	83
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO.....	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
APÊNDICE.....	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -Classificação dos tipos de motores de indução trifásicos	15
Figura 2.2 -Enrolamento do motor trifásico e o gráfico da corrente e tensão alternada de um circuito trifásico (Fonte: FRANCHI, 2008)	16
Figura 2.3 -Campo magnético girante trifásico no estator (SENA, 2011)	17
Figura 2.4 -Estator e enrolamentos de um MIT (LYRA, 2014).....	18
Figura 2.5 -Rotor do tipo gaiola de esquilo de um MIT (Fonte: CHAPMAN,2013).....	19
Figura 2.6 -Componentes do motor de indução trifásico (WEG, 2016)	19
Figura 2.7 -Curva torque versus velocidade de um MIT típico (CHAPMAN, 2013)....	21
Figura 2.8 -Curva torque velocidade, para diferentes categorias (Fonte: Weg, 2016)...	22
Figura 2.9 -Diagrama das perdas no motor de indução (Adaptado, LU et al.,2008)	24
Figura 2.10 -Placa de identificação de um motor de indução trifásico, seguindo a NBR-17094-1(Fonte: Weg, 2016)	27
Figura 2.11 -Rendimento dos motores elétricos ao longo dos anos	28
Figura 2.12 -Evolução do motor trifásico, relação peso potência (Fonte: SENS,2001) 28	
Figura 2.13 -Representação de um sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência (Fonte: COSTA; MATHIAS, 2008).....	29
Figura 2.14 -Passagens de domínios usando a Transformada de Fourier e sua inversa. Adaptado (HAYKIN; MOHER, 2009).....	30
Figura 2.15 - Número de operações em função do tamanho da amostra, comparação entre a DFT padrão e a FFT (CHAPRA; CANALE, 2011)	31
Figura 2.16 -Processo de decimação no tempo	33
Figura 2.17 - Fluxograma de uma FFT por decimação no tempo (a) FFT de uma DFT de oito pontos (b) gráfico de fluxo de uma computação butterfly simplificada.....	35
Figura 2.18 -Sinais e as etapas de janelamento: em a) Sinais $f_1(t)$ e $f_2(t)$ originais , b) Janela Gaussiana, c) Sinal Janelado, Fonte: (NÓBREGA SOBRINHO, 2015)	36
Figura 3.1 -Indicação da posição do entreferro dentro do motor de indução.....	43

Figura 3.2- Representação do offset da integração do fluxo magnético	47
Figura 3.3- Sinal sem e com compensação de offset, fonte (ADISSI, 2015).....	47
Figura 3.4- Representação de um encoder a esquerda e dos principais elementos que o compõem a direita	49
Figura 3.5- Relação linearizada entre o torque e a velocidade angular.....	52
Figura 3.6- Esquema para estimar a velocidade a partir do torque no entreferro, (Fonte :ADISSI, 2015).....	53
Figura 3.7- Sinal sonoro emitido pelo MIT.....	57
Figura 3.8- Espectro do sinal sonoro do MIT com frequência de alimentação a 60 Hz	57
Figura 3.9- Relação torque <i>versus</i> velocidade no eixo do motor	59
Figura 3.10- Sequência para estimar o torque através da análise sonora do MIT	60
Figura 3.11- Curvas características do MIT W22 PLUS (Fonte: WEG, 2018)	62
Figura 4.1- Representação global da bancada de torque controlável. (Fonte: Autor)....	64
Figura 4.2- Ilustração dos principais componentes da bancada de torque controlável .	65
Figura 4.3- Motor elétrico de indução trifásico WEG W22 PLUS 5 cv.	66
Figura 4.4- Modelo do Inversor de frequência WEG CFW 700 utilizado na bancada ..	66
Figura 4.5- Quadro de comando da bancada parte externa e interna.	67
Figura 4.6- Motor de corrente contínua VARIMOT 132S.....	68
Figura 4.7- Sistema de acionamento do motor CC, varivolt e circuito retificador	68
Figura 4.8- Circuito elétrico de acionamento do motor CC. (Fonte: Addissi, 2015).....	69
Figura 4.9- Resistores elétricos aletados conectados a armadura	69
Figura 4.10- Componentes do sistema de conversão: a) Transformador de corrente; b) Transformador de potência; c) Sensor de corrente (efeito Hall)	70
Figura 4.11- Torquímetro a) modelo HBM-T40B-200 b) Escala no modo de frequência	71
Figura 4.12- Tacômetro digital a) Modelo MDT-2238B b) Modo de operação óptico .	72
Figura 4.13- Conversor analógico digital NI USB- 6215.....	73
Figura 4.14- Sistema embarcado utilizado para aquisição do som	73
Figura 4.15- Curva de resposta em frequência do microfone CMA-4555PF-W	74
Figura 5.1- Amostras de torque para um valor verdadeiro convencional de 21 Nm.....	76
Figura 5.2- Histograma com a distribuição normal das amostras	77
Figura 5.3- Valor medido vs valor estimado e o erro relativo entre as duas medições.	79
Figura 5.4- Regressão linear da velocidade medida vs velocidade estimada.....	80
Figura 5.5- Torque medido e torque estimado usando Air Gap Torque (AGT).....	81

Figura 5.6- Torque medido e torque estimado pelo método da análise sonora.....	82
Figura 5.7- Comparação entre os valores medidos e os dois valores estimados.....	83
Figura 5.8- Curvas de eficiência, medida, estimada (AGT) e estimada (som)	84
Figura A.1- Regressão linear simples, torque medido vs torque estimado (AGT).....	92
Figura A.2- Índice de correlação $r = 0,999$	92
Figura A.3- Regressão linear simples, torque medido vs torque estimado (som).....	93
Figura A.4- Índice de correlação $r = 0,997$	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1- Valores das perdas suplementares segundo IEEE Standard 112	26
Tabela 2-2- Ilustração do processo de bit reverse	34
Tabela 3-1- Perdas adicionais e perdas mecânicas, Fonte: (ADISSI, 2015)	46
Tabela 5-1- Dados coletados	75
Tabela 5-2- Dados estatísticos das 90 medições. Fonte Própria.....	77
Tabela A.1- Torque medido e estimado (AGT).....	91
Tabela A.2- Torque medido e estimado pelo som.....	92

LISTA DE SIGLAS

AGT	Abreviatura do inglês <i>Air Gap Torque</i> [=Torque no entreferro]
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DAQ	<i>Data acquisition</i>
DFT	Abreviatura do inglês Discrete Fourier Transform [=Transformada Discreta de Fourier]
FFT	Abreviatura do inglês <i>Fast Fourier Transform</i> [=Transformada Rápida de Fourier]
GPICEEMA	Grupo de Pesquisa em Instrumentação e Controle em Estudo de -- Energia e Meio Ambiente
GUM	Abreviatura do inglês <i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> [= Guia para a expressão da incerteza na medição]
IHM	Interface Humano Máquina
IEC	Abreviatura do inglês <i>International Electrotechnical Commission</i> [=Comissão Eletrotécnica Internacional]
IEEE	Abreviatura do inglês <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i> [= Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos]
JEC	Abreviatura do inglês <i>Japanese Electrotechnical Committee</i> [=Comitê Eletrotécnico Japonês]
LTDA	Limitada
MIT	Motor de Indução trifásico
MME	Ministério de Minas e Energia
NAGT	<i>Nonintrusive Air-gap Torque</i>
NBR	Norma Brasileira
NEMA	Abreviatura do inglês <i>National Electrical Manufacture Association</i> [=Associação Nacional de Fabricantes Elétricos]
PC	Abreviatura do inglês <i>Personal Computer</i> [=Computador Pessoal]

RF	Rádio Frequência
rpm	rotações por minuto
SEMMIT	Sistema Embarcado de Monitoramento de Motor de Indução Trifásico
STFT	Abreviatura do inglês <i>Short-Time Fourier Transform</i> [=Transformada de Fourier de Curta Duração]
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potência
UBM	Unidade de Bombeio Mecânico
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
USB	Abreviatura do inglês <i>Universal Serial Bus</i> [=barramento serial universal]
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
VVC	Valor verdadeiro Convencional
WAV	Abreviatura do inglês <i>Waveform audio format</i> [=Formato de áudio waveform]

LISTA DE SÍMBOLOS

λ	-	Fluxo magnético concatenado, Wb
η	-	Rendimento do motor, em %
V	-	tensão, em V
TWh	-	Terawatt- hora, em W
T	-	Torque no eixo, em Nm
s	-	Escorregamento,
R	-	Resistência, em Ω
P_{out}	-	Potência de saída, em W
P_{in}	-	Potência de entrada, W
p	-	Número de polos
P	-	Peso, em N
m	-	Coeficiente angular da reta
L	-	Comprimento do braço metálico
f	-	Frequência, em Hz
b	-	Constante da reta
a	-	Inclinação da reta
ω_n	-	Velocidade angular de rotação nominal no eixo, em rad/s
v_a, v_b, v_c	-	Tensões de fase de alimentação do motor, em V
s_n	-	Escorregamento nominal
n_s	-	Velocidade síncrona, em rpm
i_a, i_b, i_c	-	Correntes de linha de alimentação do motor, em A
f_{he}	-	Frequência das harmônicas das saliências do motor, em Hz
V_n	-	Tensão nominal, em V
T_e	-	Torque de entrada, em Nm
T_{agn}	-	Torque no entreferro nominal, em Nm
T_{ag0}	-	Torque no entreferro do motor com torque zero no eixo, em Nm

XVIII

T_{ag}	-	Torque no entreferro do motor, em Nm
P_n	-	Potência nominal do motor, em W
P_m	-	Potência mecânica desenvolvida, em W
P_{ag}	-	Potência do entreferro, em W
M_f	-	Média da diferença das harmônicas na frequência, em Hz
n_{sinc}	-	Velocidade síncrona, em rpm
L_{mec}	-	Perdas mecânicas do motor, em W
L_{LL}	-	Perdas suplementares, em W
L_{fe}	-	Perdas no núcleo de ferro do motor, em W
L_{cr}	-	Perdas no cobre do rotor, em W
L_{ce}	-	Perdas no cobre do estator, em W
L_{ar}	-	Perdas adicionais do rotor, em W
L_{ae}	-	Perdas adicionais do estator, em W
L_{ad}	-	Perdas adicionais, em W
$\hat{T}_{es}$	-	Torque estimado, em Nm
$\hat{\omega}$	-	Velocidade angular estimada no eixo, em rad/s
ω	-	Velocidade angular, em rad/s

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A matriz energética mundial vem ao longo dos anos enfrentando barreiras quando o assunto é geração e economia de energia, por um lado o aspecto recorrente é como gerar mais energia e atender a cadeia produtiva e por outro como incentivar o combate ao desperdício por meio de políticas públicas eficientes.

A indústria continua sendo o maior consumidor de energia elétrica no Brasil, sendo responsável por utilizar um terço da energia final destinada ao consumidor. Segundo dados do Ministério de Minas e Energia (MME) o setor industrial é responsável pelo consumo de 43,7% de toda a energia elétrica nacional, desse montante 68% é empregado no acionamento de máquinas operatrizes, responsável por gerar força motriz nas indústrias. Sendo assim é possível estimar que 30% da energia elétrica no Brasil é consumida por motores elétricos (MME, 2011).

Os Motores de Indução Trifásicos (MIT) são robustos, confiáveis e de fácil instalação, o que permitiu sua popularidade nos mais diversos setores, como petroquímico, naval, automobilístico, sucroalcooleiro, dentre vários outros segmentos (LIMA-FILHO, 2009). Com o advento dos semicondutores foi possível desenvolver tecnologias para o controle de velocidade dos MIT, aumentando sua empregabilidade em áreas que antes eram feitas através de motores de Corrente Contínua (CC) como: escadas rolantes, elevadores, extrusoras, dentre várias outras aplicações onde o controle de velocidade é essencial.

Pela sua eficácia em transformar energia elétrica em mecânica o motor elétrico de indução trifásico, representa a maior fatia de motores comercializados, passando a ser objeto de estudo tanto por fabricantes, que buscam um ponto de eficiência otimizado, quanto por pesquisadores que tentam relacionar suas grandezas elétricas e mecânicas à sua eficiência. Os motores submetidos a cargas geram torque, que aliada à velocidade acaba sendo a potência útil responsável pelo deslocamento de esteiras, acionamentos de britadeiras, dentre vários outros processos que envolvem movimentos dinâmicos.

A medição do torque estático em eixos pode ser obtida com métodos e técnicas bem definidas, por meio, por exemplo, de sensores como extensômetros, sensores ópticos, sensores piezoelétricos, entre outros. O problema recorrente diz respeito à estimação do torque sob condições dinâmicas de carga em eixos girantes, principalmente quando se pretende fazê-lo de forma não invasiva, já que em vários casos o eixo do motor se encontra em lugares de difícil acesso. Outro grande problema é como instalar sensores em eixos rotativos em alta velocidade, haja vista a dificuldade na alimentação elétrica e no recebimento e envio de dados. Alternativas para contornar esses problemas é a aplicação de técnicas por elementos passivos usando ímãs e sensores de efeito Hall (BORGES, 2015).

Relacionar grandezas elétricas com grandezas puramente mecânicas é a grande problemática para estimação da eficiência em MITs. As grandezas elétricas são de fácil medida podendo ser feitas por sensores Transformadores de Corrente TCs e sensores Transformadores de Potências TP para obtenção da potência de entrada, já a potência de saída é puramente mecânica e depende da estimação do torque no eixo e da velocidade angular, a multiplicação de ambas resulta na potência de saída. (ADISSI, 2015).

A estimação da velocidade em eixos de motores em operação é uma problemática quando se pretende implementar métodos de estimação da eficiência de forma *online*. Técnicas como a análise espectral da corrente, que utiliza as harmônicas geradas pela saliência do motor, podem ser empregadas na estimação da velocidade de forma não-invasiva, todavia demanda muito processamento além de não ser tão eficiente na presença de torque variável o que pode ocasionar perdas de informação. Uma das alternativas para contornar tal problema é utilizar técnicas conhecidas como *sensorless* (sem sensores) que permite a estimação da velocidade no eixo do motor sem a necessidade de acoplamento de quaisquer meios de medição mecânica, tal estratégia vem sendo bastante utilizada tendo em vista seu baixo custo e boa precisão (LYRA, 2014).

Quando se trata da estimação da eficiência em motores elétricos de indução um dos critérios a ser levado em consideração é o nível de invasão ao qual a máquina será submetida. Esta característica está ligada diretamente ao custo de equipamentos e custo operacional. Outro desafio é a avaliação da eficiência de forma *online*, embora existam métodos que cumpram esse papel, como o método da corrente, método do valor nominal e o método do deslizamento, muitas vezes a invasibilidade do motor é

sacrificada e a demanda de processamento de dados é alta impossibilitando em alguns casos sua implementação.

O método do torque no entreferro é bem aceito na comunidade científica, tendo em vista sua confiabilidade, baixo custo de operação e boa exatidão. Em seu trabalho (LU et al, 2008) propuseram melhorias na estimação da eficiência *online* de forma minimamente invasiva ao incluir no método do torque no entreferro a estimação do número de ranhuras, da resistência do estator e velocidade do motor (obtida através da análise da corrente de armadura), permitindo assim um baixo nível de invasão, conseguindo resultados de estimação com 2% de erro com carga nominal. Usando a metodologia do torque no entreferro (ADISSI, 2015) desenvolveu o Sistema Embarcado de Monitoramento de Motor de Indução Trifásico (SEMMIT) que permitiu monitorar de forma *online*, na indústria motores elétricos em serviço, de forma minimamente invasiva, parâmetros como eficiência energética, torque e velocidade.

Pelo fato de ser um método de pouco invasivo, com boa exatidão e ser possível de implementar de forma *online*, optou-se por utilizar no trabalho o método do torque no entreferro como método comparativo ao proposto nesse trabalho. A principal contribuição deste trabalho é a estimação da velocidade, do torque e da eficiência do MIT através da análise sonora do motor de forma não-invasiva. Não foi encontrado trabalhos na bibliografia que estimem torque e eficiência de motores de indução trifásicos através da análise sonora, portanto considera-se esse trabalho o primeiro a propor uma técnica para estimação da eficiência de motores sem qualquer tipo de invasão.

1.1- MOTIVAÇÃO

Pela sua versatilidade, robustez, confiabilidade e bom rendimento, os motores de indução trifásicos se tornaram indispensáveis, sendo o principal meio de força motriz utilizada. Com o advento dos semicondutores e do surgimento dos inversores de frequência o motor elétrico de Indução trifásico passou a ser inserido nos mais diversos setores, seja ele primário, extração e produção de matérias primas; secundário, transformação da matéria prima em bens e terciário que envolve o fornecimento de serviços a indústrias ou empresas. Percebe-se que os MITs estão inseridos nos mais diversos setores, todavia é na indústria que eles são mais empregados, sendo responsável por uma quantia significativa do consumo de energia elétrica.

É inegável as vantagens dos motores elétricos bem como sua presença nos mais diversos segmentos, uma estimativa revela que existam no mundo mais de 300 milhões de motores elétricos, que chegam a consumir aproximadamente 7.400 TWh por ano, o que corresponde a 40% da produção mundial de eletricidade (WEG, 2014).

Motores em serviço nas indústrias operam a 60% de sua carga nominal devido a instalações superdimensionadas ocasionando baixa eficiência e consequentemente contribuído para o desperdício de energia. Surge assim uma necessidade de desenvolver métodos de baixo custo para monitorar as condições dos motores, principalmente os de pequeno e médio porte, já que representam a maior parte em operação (LU et al 2008).

Com o monitoramento dos motores em serviço é possível acompanhar sua integridade, haja vista que um torque muito alto pode provocar danos aos sistemas de acoplamentos ligados aos mesmos.

Por estarem em lugares de difícil acesso na maioria das vezes, fica impossível fazer uma medição direta sem parar o processo no qual o motor está inserido, mesmo que tais medidas fossem pré-agendadas, seguindo o plano de manutenção, por exemplo. A medição direta apesar de sua boa precisão apresenta alguns empecilhos, tendo em vista a necessidade de acoplamento de sensores no eixo do motor, o que encarece o processo, além de ter alguns infortúnios como baixa imunidade a ruídos e difícil instalação.

Em vários centros de pesquisas espalhados pelo mundo, pesquisadores buscam metodologias para contornar o problema das medições invasivas, que embora apresentem um índice de precisão maior se comparado aos métodos de estimação, possuem grandes limitações ao serem aplicados em motores em operação. Uma das alternativas é o estudo de técnicas *sensorless* que buscam mínima invasão ao corpo do motor e que tenham uma boa exatidão.

O presente trabalho apresenta um sistema inovador que permite, por meio da análise sonora do motor, estimar grandezas como velocidade, torque e eficiência, o que possibilita ser amplamente utilizada sem a necessidade de fazer o desacoplamento de cargas ou parar algum processo no qual o motor esteja inserido.

1.2- ESTADO DA ARTE

Os motores elétricos tem uma parcela considerável de demanda energética atual, sendo o meio mais importante de acionamento de carga na indústria, representando aproximadamente 70% do consumo de eletricidade industrial (KOTAK, 2016).

A grande maioria dos motores industriais em serviço são motores de indução trifásicos (MIT). Para calcular a eficiência de tais motores e verificar se eles devem ser substituídos por outros mais eficientes, algumas vezes é necessário recorrer a métodos convencionais que geram invasão, que por consequência requer a intervenção na operação do motor para estimar sua eficiência (rendimento), o que acaba gerando paradas desnecessárias que podem interromper algum fluxo de trabalho (DA SILVA et al., 2015).

A eficiência energética ou rendimento é a razão entre a potência elétrica absorvida pelo motor (potência de entrada) e a potência mecânica fornecida ao eixo (potência de saída). Nos motores elétricos de indução a potência de entrada está relacionada com a potência elétrica que provem da rede de alimentação, portanto é de fácil medição, já a potência de saída é puramente mecânica e é entregue pelo eixo do motor a carga. Embora seja simples o conceito do cálculo da eficiência, o problema consiste em medir as grandezas distintas no processo, uma puramente elétrica e outra puramente mecânica. As grandezas elétricas são de fácil medição enquanto as mecânicas requerem equipamentos caros e de difícil instalação nos motores em serviço (ADISSI, 2015).

Com a preocupação global em meio à demanda energética e tendo o motor de indução como principal força motriz no mundo, surgiu à necessidade de patronizar a medição da eficiência. Algumas normas foram criadas com o intuito de estimular os fabricantes e outras entidades a adotarem ensaios padronizados. Tais normas têm como objetivo aplicar metodologias que tornem o processo de medição da eficiência possível, todavia a intrusividade no motor na maioria das vezes faz-se presente.

A norma IEEE Standard 122 criada *pelo Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) introduzido inicialmente em 1964, vem ao longo dos anos passando por revisões com o intuito de melhorar as técnicas e testes para obtenção de parâmetros e grandezas em MIT. A IEEE std 112 é base para as normas MG-1 e C390 da *National Electrical Manufacture Association* (NEMA), a primeira é utilizada nos Estados Unidos, já a segunda no Canadá.

A organização *International Electrotechnical Commission* (IEC), tem como principal objetivo promover cooperação internacional em todas as questões relativas à padronização nas áreas elétricas e eletrônicas. Dentre as normas desenvolvidas pela IEC encontra-se a norma 60034-2, que é amplamente adotada nos países europeus e é empregada no auxílio do cálculo da eficiência em motores elétricos. A primeira implantação da norma foi em 1974 e assim como a IEEE passou por revisões e atualizações com a mesma finalidade, melhorar a estimativa da eficiência de acordo com os avanços dos instrumentos de medição.

O padrão utilizado em alguns países asiáticos advém da *Japanese Electrotechnical Committee* (JEC). A norma JEC-37 se assemelha bastante ao método adotado na norma IEEE 112, mas é conhecida por superestimar a estimativa da eficiência, isso se deve ao fato de que alguns parâmetros não são levados em consideração, como estimativas de perdas e o uso de valores fixos para correções de temperatura de resistência, por exemplo.

Apesar da busca constante por novos métodos de estimativa da eficiência, as normas citadas acima ainda apresentam uma invasão considerável ao corpo do motor, o que acaba impedindo que as metodologias descritas nas mesmas sejam de fato aplicadas em campo, já que em muitos casos a parada dos elementos motrizes teriam impactos diretos na linha de produção, ocasionando possíveis prejuízos a cadeia produtiva. Outro fato pertinente é que por meio de tais métodos dificilmente se consegue obter o valor da eficiência em tempo real, todavia tais normas são de fundamental importância por serem referência para o estudo e desenvolvimento de novos métodos.

Tanto no meio acadêmico quanto no meio industrial, pesquisadores, buscam novos métodos para estimar a eficiência de modo que tenha o mínimo de invasão aos motores, aliada a uma boa exatidão. O nível de invasão é determinado pelo tipo de dados necessários para o método, equipamentos de medição necessários bem como o seu custo e a forma da coleta de dados. Já a exatidão está relacionada com a comparação de uma segunda fonte de medida da eficiência. Uma das mais confiáveis, entretanto de maior invasibilidade, são as medições diretas do torque e da velocidade, para medir a potência de saída, e das tensões e correntes, necessárias para medir a potência de entrada, tendo em mãos a potência de entrada e saída medidas é possível obter a eficiência do MIT (ADISSI, 2015).

Vários métodos de estimação da eficiência foram desenvolvidos ao longo dos anos. O método do escorregamento é o mais simples de todos necessitando apenas de um sensor de rotação no eixo (Shu et al, 1998).

O método do escorregamento consiste em obter a velocidade do motor, partindo do princípio de que, com o motor em operação, o torque é diretamente proporcional ao escorregamento, buscando linearizar parte da curva de torque por velocidade. A principal vantagem é a simplicidade do método, no entanto, o erro vem do fato de que a taxa de escorregamento representa a porcentagem de carga e a eficiência não é igual à porcentagem da carga (JACOB; JOSE; SEBASTIAN, 2014). O método do escorregamento passou por uma atualização, o método conhecido por Ontário Hidro do escorregamento compensado, em alusão a empresa canadense que sugeriu o método, passou a levar em consideração os efeitos da tensão nominal e a tensão medida na entrada da máquina em operação, tornando o método de estimação da eficiência mais preciso.

O método da corrente elétrica leva em consideração a medição de corrente e potência de entrada, tendo como referência de dados a placa de identificação do motor. Parte do princípio de que a potência de saída é proporcional à corrente de entrada da máquina (ANDRADE, 2009). O método apresenta baixa exatidão já que superestima a carga entre 10-20 % ao não levar em consideração a corrente de magnetização, todavia apresenta vantagens sobre o método do escorregamento, pois considera que os dados da placa de corrente são mais precisos que os de escorregamento, outra vantagem é por ser de baixa invasão (ANDRADE; MOREIRA; PONTES, 2009).

Outro método útil é o método do circuito equivalente que, como o próprio nome sugere, utiliza um circuito equivalente do motor e é baseado na estimativa dos valores de impedância. São levadas em consideração seis impedâncias, a resistência do estator, a reatância de vazamento do estator, a reatância de magnetização, resistência de perda do núcleo, reatância de vazamento do rotor e a resistência do estator (JACOB; JOSE; SEBASTIAN, 2014). O método do circuito equivalente vem sendo bastante estudado, devido aos avanços na melhoria de métodos de estimação de sistemas não lineares, a desvantagem é que não representam desequilíbrios de tensão e da não representação das perdas suplementares por um elemento de circuito, outro fato é que os valores das impedâncias podem mudar com a variação da velocidade. As vantagens do método acabam superando algumas desvantagens, uma das principais vantagens do método é

que a eficiência pode ser estimada com carga variável (ANDRADE, 2009; ADISSI, 2015).

A diversidade de métodos que se deriva do método do circuito equivalente é considerável, na IEEE STD 112 o método F1 que é utilizado para estimar a eficiência em motores, é um método de grande invasão que requer teste a vazio, testes com tensão induzida além de quatro testes para o cálculo das impedâncias, por tal motivo, dificilmente pode ser aplicado em campo.

O método ORHMF desenvolvido pela *Ontario Hydro* é pouco invasivo simplificando a técnica de circuito equivalente apenas alterando de paralelo para série as impedâncias que representam o núcleo, descartando o teste da tensão variável. Entretanto outros parâmetros devem ser estimados através dos testes sem carga e à plena carga com tensão nominal, além de medições durante o teste como, tensão de linha, potência de entrada, corrente de linha, fator de potência, resistência do estator e o escorregamento (LU; HABETLER; HARLEY, 2006).

O método ORMEL96 tem uma boa vantagem por ser um dos menos invasivos de todos, também utiliza um circuito equivalente com dois laços no rotor e utiliza apenas a medição de velocidade do motor, os demais dados são obtidos a partir das informações contidas na placa de identificação do motor ou valores padronizados. Uma resistência equivalente em série é utilizada no circuito do rotor representando as perdas suplementares (ANDRADE, 2009). As vantagens desse método é que ele é de fácil implementação, além de ter ganhos em economia e segurança, pode ser também uma boa alternativa para implementação da estimação da eficiência de forma online (LU, 2006). O método foi criado pelo laboratório *Oak Ridge National* em 1996 daí o nome do *software* ORMEL96.

Outro método interessante é o método *Motor Master* + desenvolvido pela US DOE que é um software destinado à análise de eficiência que pode usar até três métodos diferentes: escorregamento, corrente e potência de entrada, podendo ser escolhido de acordo com dados de referências disponíveis. Essa ferramenta de seleção e gerenciamento de motores inclui um banco de dados e informações de desempenho de mais de 20.000 motores de corrente alternada. Uma das problemáticas do método é que a placa de identificação e os dados do *Motor Master* + são dados genéricos de projeto e podem não ser suficientemente precisos para indicar com clareza parâmetros importantes como a velocidade. O método também conta com uma opção para motores de rebobinamento, reduzindo a eficiência em dois pontos, no geral apresenta baixa

precisão, mas alia a vantagem de ser pouco invasivo além de econômico e seguro (LU, 2006).

A Eletrobrás - Centrais Elétricas Brasileiras S.A , criada em 1962, responsável por coordenar empresas envolvidas na geração, transmissão e distribuição de energia do setor elétrico brasileiro, desenvolveu o software *BDMotor* para estimação da eficiência baseado nos métodos da corrente, potência e escorregamento. O sistema desenvolvido é similar ao Motor Master +, tem como diferencial uma base de dados de características de motores fabricados no Brasil que são utilizados para obter os dados de placa e interpolar as curvas de eficiência. “Os dados da corrente de entrada são utilizados para calcular a carga do motor e faz uma interpolação dos dados de eficiência do fabricante para o ponto de operação calculado. A principal vantagem é de ser um software livre e com fácil implementação” (ANDRADE, 2009).

LU, HABETLER e HARLEY (2005) em seu trabalho propuseram uma pesquisa na literatura a fim de fazer uma análise sobre os métodos mais adotados na estimação da eficiência em motores elétricos em serviço. Mais de vinte métodos de estimação da eficiência foram selecionados, estes por sua vez foram divididos em nove categorias baseadas em suas propriedades físicas. Deste montante, seis categorias de métodos foram avaliadas por serem mais apropriadas para uso em serviço, levando em consideração alguns fatores como, o nível de intrusão e a precisão média. Na pesquisa também foram avaliados os problemas mais recorrentes nos métodos de estimação da eficiência em motores elétricos. Dentre tais problemas a estimativa da velocidade do rotor e a estimativa da resistência do estator são os principais problemas mais recorrentes quando se pretende mensurar a eficiência de forma não intrusiva. Por fim, três métodos foram sugeridos para a estimação da eficiência em motores em serviço, que foram os métodos OHMEL96, OHME e o método do torque no entreferro ou *Air Gap Torque* (AGT), com erro percentual de 4%, 2-3%, e 0,5%, respectivamente.

O método do torque no entreferro ou *Air Gap Torque* (AGT) desenvolvido nos anos 90 ganhou bastante atenção na comunidade científica devido a sua simplicidade de implementação e boa precisão. O método foi inicialmente proposto por (OJO et al., 1990). De início o método AGT possuía alta invasividade, haja vista que necessitava de variáveis que só seriam possíveis após o desacoplamento da carga ao motor, como por exemplo, a medição direta da velocidade no eixo, medidas de resistência do estator e o teste sem carga. O levantamento dessas variáveis são as principais desvantagens do método, tornando-o de alta invasão.

Com o surgimento de novas técnicas de estimação da velocidade de rotação em eixos girantes conhecidas como *sensorless* (técnicas nas quais não são utilizados sensores de rotação em eixos) (BREEN et al., 1996) a implementação melhorada do método do torque no entreferro foi possível, reduzindo consideravelmente o seu nível de instrução. O método passou a ser denominado como *Nonintrusive Air-gap Torque* (NAGT). No NAGT são usados dados dos terminais do motor e informações da placa de identificação. Os dois grandes empecilhos da maioria dos métodos de estimação da eficiência para motores em serviço é como adquirir os valores da velocidade de rotação no eixo do motor e o valor da resistência do estator. Usando o NAGT tais problemas são contornados, a velocidade do rotor é estimada a partir da corrente de entrada do motor através da análise do espectro da corrente, usando a transformada rápida de Fourier FFT, outros dados são tratados como empíricos, como o teste sem carga, necessário para calcular a perda mecânica e perda do núcleo, já as perdas adicionais é calculada de acordo com a potência do motor como sugere a IEEE STD 112. (LU; HABETLER; HARLEY, 2008).

Em seu trabalho de dissertação SALOMON (2014) utilizou o método do torque no entreferro para estimar a eficiência em motores elétricos de indução. Outros métodos foram comparados com o método do torque no entreferro, a fim de se obter uma validação dos resultados. O trabalho propôs também uma nova contribuição para o método do torque no entreferro que é a estimação de uma resistência do estator modificada, utilizando a técnica de Otimização por Enxame de Partículas (PSO). Esta nova abordagem da resistência do estator modificada incluiu o efeito das perdas mecânicas do motor. Utilizando o torque fornecido pelas equações do método do torque no entreferro pôde ser considerada uma boa aproximação para o torque mecânico no eixo.

O método do torque no entreferro tem boa aceitação no meio científico, as melhorias propostas pela implementação do método não invasivo, como visto acima NAGT, possibilitou que o método fosse empregado de forma melhorada na estimação da eficiência em motores em serviço e com possíveis aplicações de forma *online* o que o torna um forte candidato em comparação a outros métodos.

A grande problemática em estimar a eficiência em motores de indução trifásicos dar-se pelo fato de que a grande maioria se encontra em operação nas indústrias, sendo inviável a parada dos mesmos para estimar seu rendimento. (ADISSI, 2015) “desenvolveu um sistema embarcado para monitoramento em tempo real de diversos

parâmetros mecânicos e elétricos de motores de indução trifásicos utilizando uma rede de sensores sem fio baseada no padrão IEEE 802.15.4, sendo possível o monitoramento de vários motores simultaneamente através de um nó servidor e análise através da estação base”. O método do torque no entreferro foi considerado o mais adequado, por ser um método de boa exatidão e baixa invasividade. Dados experimentais em laboratório foram obtidos através da construção de uma bancada de torque controlável sendo possível a variação de carga, a fim de levantar parâmetros como exatidão e repetitividade. O sistema foi implantado em motores em serviço em uma indústria paraibana de alimentos (Guaraves Alimentos LTDA). Através de testes experimentais em laboratório e em aplicações práticas na indústria constatou-se a eficácia do sistema embarcado desenvolvido, resultando em um produto de elevada relevância técnica e científica.

O estudo do espectro sonoro na análise e prevenção de falhas é bastante difundido e pode ser empregado nos mais diversos campos, inclusive na análise de falhas em motores a combustão (KEMALKAR; BAIRAGI, 2016), (SAMAT; TAHIR; ZURI, 2001) (KARUNAKAR; KUWADEKAR; AL BEGAIN, 2010). A análise sonora também pode ser empregada na análise de falhas em rolamentos (ELMALEEH; SAAD, 2008). Além de ser utilizado na análise de falhas mecânica em motores de indução (PRAINETR; SANTI WANGNIPPANTO, 2017).

O método desse trabalho é uma proposta totalmente não-invasiva, cuja estimativa da eficiência é realizada sem contato, através da aquisição do sinal do som do motor em funcionamento. Através do sinal do som se obtém a velocidade de rotação no eixo. Usando um mecanismo inverso do utilizado em (ADISSI, 2012) é estimado o torque e a potência de saída a partir da velocidade de rotação do eixo e dados constantes nos manuais dos fabricantes de motores.

1.3- OBJETIVOS

1.3.1- Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema totalmente não-invasivo para determinação da velocidade de rotação do eixo, torque e rendimento em motores de indução em operação.

1.3.2- Objetivos específicos

- Levantamento do estado da arte relacionado a técnicas de estimação da velocidade, torque e eficiência em MIT;
- Implementar o método do torque no entreferro para estimativa da eficiência em MIT, como método de comparação;
- Desenvolvimento e implementação de algoritmo para determinação da eficiência do motor a partir da velocidade de rotação do eixo, obtida através do processamento sonoro no domínio da frequência.
- Calibração e validação do sistema, a partir da bancada de testes.
- Fazer análise comparativa do método do entreferro, medição direta e o método desenvolvido nesse trabalho;

1.4- ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esta dissertação se encontra dividida em seis capítulos nomeados por: Introdução, fundamentação teórica, métodos de medição utilizados, materiais e métodos, resultados e conclusão.

No primeiro capítulo serão abordados assuntos pertinentes à contextualização do problema. Foi feito um estudo bibliográfico sobre os mais diversos métodos empregados na estimação da eficiência em motores de indução e os benefícios que os métodos não invasivos representam e traçaram-se os objetivos.

No segundo capítulo serão abordados tópicos relacionados a fundamentação teórica do trabalho, que envolve os conceitos da máquina de indução trifásica, estimação do torque e aspectos da transformada rápida de Fourier FFT.

Já no terceiro capítulo serão levantados os métodos que foram implementados na dissertação, necessários para o prosseguimento do trabalho e consequentemente necessário para obter os resultados.

No quarto capítulo serão abordados os materiais utilizados na realização dos experimentos. Apresentaram-se de forma detalhada os equipamentos utilizados na bancada de torque controlável, mostrando de forma expositiva o objeto de estudo no caso do MIT, o sistema de acionamento e controle e por fim o processamento dos dados.

O quinto capítulo serão apresentados os resultados do trabalho, obtidos através dos testes realizados na bancada de torque controlável, em condições constantes de velocidade e torque.

Já no ultimo capítulo, o sexto, serão apresentadas as conclusões do trabalho, são também expostos os desafios, além de sugestões para trabalhos futuros, que possam vir a contribuir com novas pesquisas.

Capítulo 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão abordados os aspectos relativos ao motor de indução trifásico, explorando os aspectos mecânicos, magnéticos e elétricos, analisando assim seu princípio de funcionamento, características construtivas, perdas, formas de acionamentos e a relação torque versus velocidade. Serão abordados também aspectos relacionados à Transformada de Fourier, dando ênfase ao método da Transformada Rápida de Fourier FFT e uma breve descrição do seu algoritmo, com aplicações em processamento de sinais sonoros.

2.1-MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica. Por ser robusto, relativo baixo custo, ter um bom rendimento e simplicidade de acionamento, o motor de indução é o mais utilizado de todos os tipos de motores elétricos. As máquinas de indução são designadas assim pelo fato de que uma tensão é induzida nos enrolamentos do rotor em vez de ser fornecida por meio de uma conexão física. O atributo que diferencia o motor de indução dos demais é que nele não há a necessidade de uma corrente de campo CC para fazer a máquina funcionar (CHAPMAN, 2013).

Se for estimada uma eficiência média de 80% no universo de motores em aplicações industriais, 15% da energia elétrica industrial são transformadas em perdas nos motores (FRANCHI, 2008).

Quanto à sua fonte de alimentação, os motores podem ser divididos em duas categorias: motor de corrente contínua CC e motor de corrente alternada CA. Os motores de corrente contínua são conhecidos por ser capaz de ter um controle de velocidade preciso, sendo empregados em serviços onde tal característica seja mais necessária. Mesmo com o surgimento da eletrônica de potência que contribuiu na criação de sistemas para retificação da corrente alternada em contínua e de grupos

conversores que melhoraram seu controle de velocidade, os motores de corrente contínua ainda são caros e possuem restrições de operação.

Os motores de corrente alternada são motores robustos que podem ser alimentados diretamente da rede elétrica sem a necessidade de retificação da energia o que permite sua empregabilidade nos mais diversos setores. Na figura 2.1 é possível verificar as principais categorias de motores de indução trifásicos. O motor síncrono funciona com uma velocidade fixa, ou seja, sem interferência no escorregamento, geralmente é utilizado para grandes potências ou quando há a necessidade de velocidade invariável. O motor de indução funciona com uma velocidade constante, podendo variar de acordo com a carga mecânica aplicada. Por suas qualidades o motor de indução é mais comercializado de todos e pode substituir em vários casos os motores de corrente contínua, isso se deve ao fato de que com a utilização do inversor de frequência é possível ter um controle de velocidade eficiente possibilitando reduzir gastos e prevenir falhar (WEG, 2016).

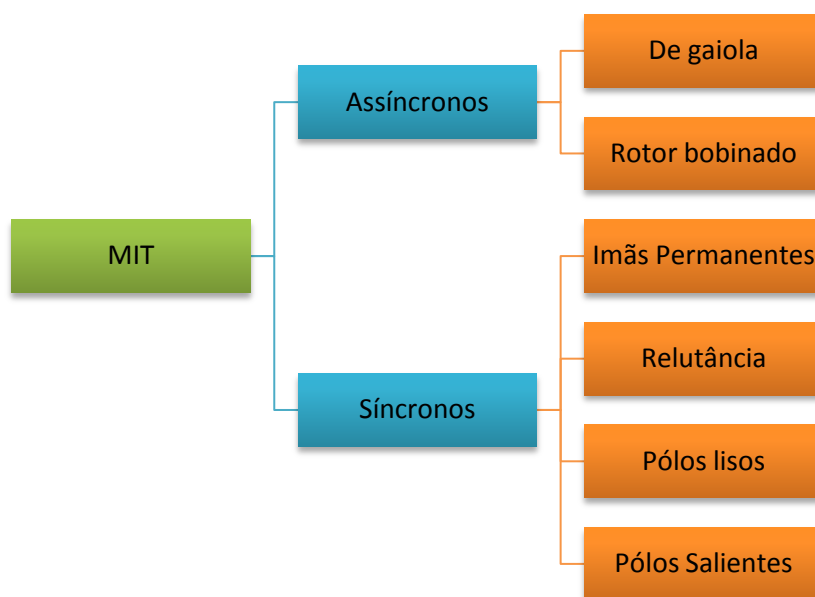


Figura 2.1-Classificação dos tipos de motores de indução trifásicos (Fonte:WEG, 2014)

2.1.1- Princípio de funcionamento

O princípio de funcionamento do motor de indução trifásico assim como outras classes de motores se baseia no princípio do campo magnético girante. Uma bobina ao ser percorrida por uma corrente elétrica cria um campo magnético que é proporcional à intensidade da corrente elétrica.

No MIT quando os três enrolamentos são percorridos por suas respectivas correntes senoidais, são criados ao redor de cada um, um campo magnético. O enrolamento se constitui de um par de polos norte e sul, cujos efeitos de ambos somados estabelecem o campo magnético. O fluxo magnético atravessa o rotor entre os pólos e se fecha através do núcleo do estator. A figura 2.2 representa um enrolamento trifásico espaçado entre si de 120° , ao ser alimentado por um sistema trifásico, advindo da rede elétrica, são gerados três campos magnéticos, sendo esses campos também espaçados em 120° . A soma gráfica dos três pontos é responsável por gerar o campo total resultante a cada instante (FRANCHI, 2008).

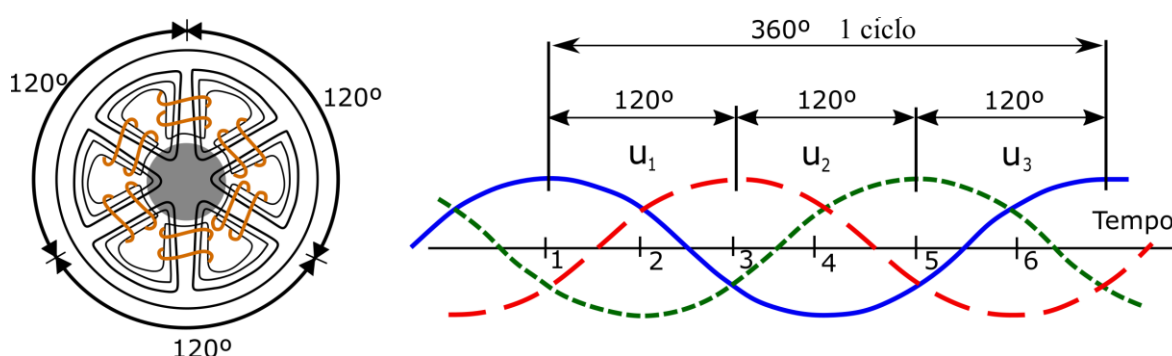


Figura 2.2-Enrolamento do motor trifásico e o gráfico da corrente e tensão alternada de um circuito trifásico (Fonte: FRANCHI, 2008)

A velocidade do campo magnético resultante está associada proporcionalmente à frequência da rede elétrica de alimentação e inversamente proporcional ao número de polos do motor, tal característica permite encontrar assim a velocidade síncrona do motor. Os enrolamentos trifásicos quando alimentados pelas correntes advindas da rede de alimentação trifásica cria um campo girante resultante, esse campo girante resultante induz tensões nas barras do rotor gerando assim correntes e consequentemente campo no rotor de polaridade oposta à do campo girante.

Pelo princípio do eletromagnetismo, campos opostos se atraem, já que o campo do estator é rotativo a tendência do rotor que está apoiado em rolamentos é acompanhar o campo girante desenvolvendo conjugado e fazendo com que o rotor gire. Para evitar perdas no fluxo magnético o espaço entre o estator e o rotor deve ser o mínimo possível, a esse espaço dar-se o nome de entreferro que é o espaço limiar entre a conversão da energia elétrica em magnética e posteriormente mecânica através do rotor.

A velocidade de rotação do campo estatórico depende do número de polos do motor e da frequência da rede de alimentação. Abaixo, na figura 2.3 uma ilustração da relação entre o defasamento das correntes, e o vetor campo magnético resultante do estator (SENA, 2011).

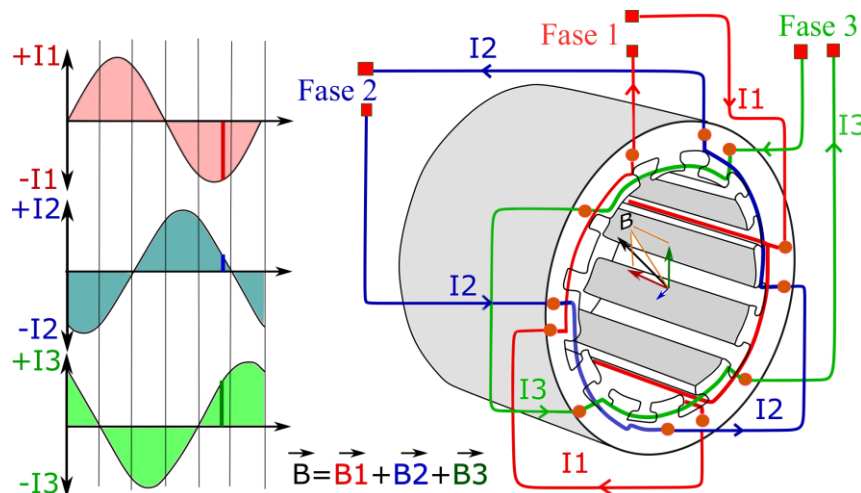


Figura 2.3-Campo magnético girante trifásico no estator (SENA, 2011)

A velocidade do campo magnético pode ser determinada pela relação matemática que diz que a velocidade síncrona do motor é diretamente proporcional à frequência e inversamente proporcional ao número de polos. Onde n_{sinc} é a velocidade síncrona dada em rotação por minuto (rpm), f é a frequência da rede elétrica dada em Hz e P o número de polos do motor.

$$n_s = \frac{120f}{P} \quad (2.1)$$

2.2- CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS

O motor elétrico de indução trifásico possui características construtivas interessantes, sendo basicamente constituído de duas partes principais o estator e o rotor. O estator compreende a parte fixa do motor onde há em seu interior enrolamentos responsáveis por gerar forças eletromagnéticas capazes de induzir movimento no rotor.

2.2.1- Estator

A construção do estator é um dos pontos chaves do funcionamento dos motores elétricos. O motor de indução tem fisicamente o mesmo estator de uma máquina

síncrona com uma construção de rotor diferente. O estator é composto por chapas finas de aço tratado termicamente para acentuar suas grandezas magnéticas ou de aço silício para reduzir ao máximo as perdas por correntes parasitas e histerese. As ranhuras internas presentes no mesmo são utilizadas para fixar os enrolamentos responsáveis por criar o campo magnético girante.

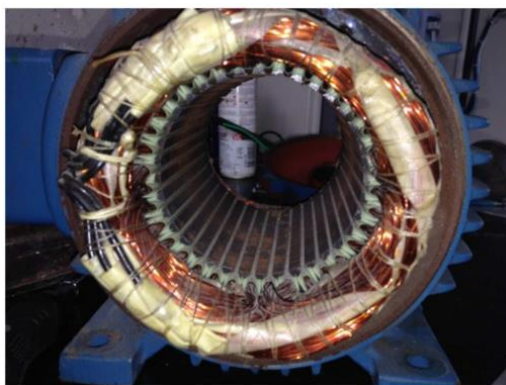


Figura 2.4-Estator e enrolamentos de um MIT (LYRA, 2014)

2.2.2- Rotor

O rotor é a parte livre para girar, responsável por fornecer energia mecânica necessária para o acionamento de cargas. Duas configurações são comumente utilizadas o rotor gaiola de esquilo e o rotor bobinado. Pela sua simplicidade de construção e manutenção o rotor do tipo gaiola de esquilo é o mais comercializado, o mesmo consiste em uma série de barras condutoras que estão encaixadas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto circuito em ambas as extremidades por grandes anéis de curto-circuito. Essa forma é conhecida como rotor de gaiola de esquilo porque, se os condutores fossem examinados isoladamente, seriam semelhantes aquelas rodas nas quais os esquilos ou hamsters correm ao se exercitarem (CHAPMAN, 2013).

O rotor em gaiola de esquilo é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas isoladas entre si, sobre o qual são inseridas barras de cobre, dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutores, que curto-circuitam as barras.

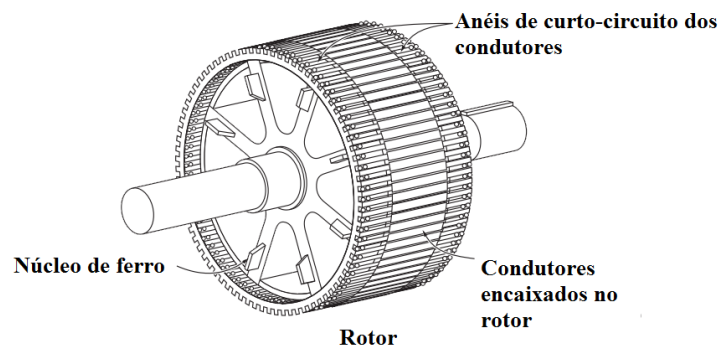


Figura 2.5-Rotor do tipo gaiola de esquilo de um MIT (Fonte: CHAPMAN,2013)

2.2.3- componentes do MIT

Além do estator e do rotor outras peças globais fazem parte do MIT, o que lhe permite ser transportado, fixado e receber a alimentação da rede elétrica. A seguir são mostrados os principais componentes de um motor de indução trifásico e suas principais características.

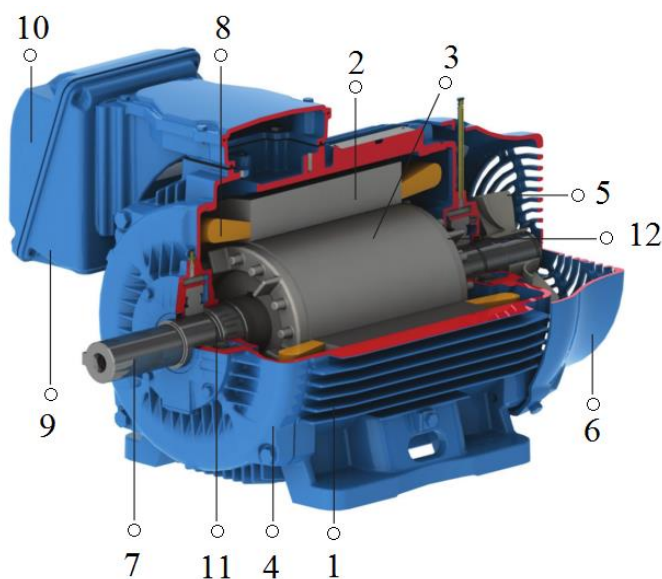


Figura 2.6-Componentes do motor de indução trifásico (WEG, 2016)

Componentes do estator:

- **(1) carcaça** – É o corpo do motor, a parte externa, estrutura geralmente feita de ferro fundido, aço ou alumínio injetado, materiais resistentes a corrosão e possui aletas para ajudar na dissipação do calor;
- **(2) Núcleo de chapas** – As chapas são geralmente de aço magnético permitindo criar campo magnético entre a bobina e o rotor;

- **(8) Enrolamento trifásico** – Composto por três conjuntos de bobinas, sendo uma para cada fase, formando um sistema trifásico responsável pela criação do campo girante, é alimentado pela rede de alimentação trifásica.

Componentes do rotor:

- **(7) Eixo** – Responsável por transmitir potência mecânica desenvolvida pelo motor;
- **(3) Núcleo de chapas** – Também feitas de aço magnético, responsável por criar campo magnético;
- **(13) Barras e anéis de curto-circuito** – Geralmente feitos de alumínio injetado sob pressão numa peça única, materiais como alumínio permite reduzir o peso do motor.

Outros componentes

- **(4) Tampa** – Responsável por proteger o motor além de ser ponto de apoio do eixo atrás de um em rolamento;
- **(5) Ventilador** – Responsável por refrigerar internamente o motor, é fixado na parte de trás, aproveitando assim o movimento de rotação do próprio eixo;
- **(6) Tampa defletora**- Responsável por proteger a parte traseira do motor
- **(9) Caixa de ligação**- É onde se encontra a parte de ligação elétrica do motor, permitindo receber alimentação da rede trifásica;
- **(10) Terminais**- São os terminais das bobinas do motor. Parte responsável por receber a alimentação da rede trifásica, permitindo o acionamento do motor, geralmente tem duas configurações de acionamento em estrela ou triângulo;
- **(11) Rolamento** – Responsável por apoiar o rotor permitindo que ele gire e oferecendo baixa resistência ao movimento de rotação.

2.3- RELAÇÃO TORQUE VERSUS VELOCIDADE

A relação torque versus velocidade é um parâmetro muito importante quando se pretende fazer o monitoramento de motores, prevenindo assim o rompimento de eixos e

evitando um possível travamento de eixo. É perceptível que a velocidade do motor varia à medida que a carga aumenta, o torque é muito pequeno quando o motor estiver operando com a velocidade síncrona. À medida que a carga aumenta a velocidade do motor vai proporcionalmente caindo, até o ponto que o torque atinge o valor máximo que o motor é capaz de desenvolver em rotação nominal. Se o torque aumentar além do ponto, a rotação do motor cai bruscamente, podendo chegar a travar o rotor o que pode ocasionar rupturas de eixos e danos severos ao motor.

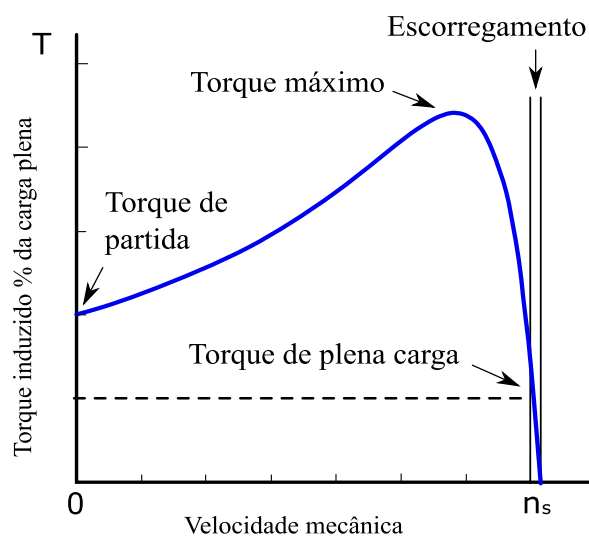


Figura 2.7-Curva torque versus velocidade de um MIT típico (CHAPMAN, 2013)

Embora o princípio seja o mesmo para todos os motores de indução trifásicos, a relação torque versus velocidade pode variar de acordo com o tipo de categoria do motor, que podem ser N, H e D sendo essas as mais comuns, cada uma desenvolvida para ser aplicada em distintas faixas de cargas e operações. Tais categorias seguem a norma ABNT NBR 17094 e a IEC 60034-1, A categoria N é para aplicações mais comuns, apresenta baixo escorregamento, baixo torque de partida e baixa corrente de partida, são aplicados para acionamento de cargas normais que não demandam um motor mais robusto. A categoria H por outro lado já é mais robusto, apresenta um baixo escorregamento, torque de partida alto e corrente de partida normal, é uma categoria de motor para acionamento de cargas mais pesadas, como britadeiras e esteiras. Já a categoria D apresenta um alto escorregamento, torque de partida alto e corrente de partida normal, são motores mais robustos que permitem receber grandes cargas em curto espaço de tempo, apresentando picos de cargas periódicos, São utilizados em

elevadores, prensas e outras aplicações que demandam grandes picos de carga (WEG, 2016).

As categorias dos motores de indução ajudam significativamente na hora de escolher o motor para determinada aplicação, entretanto, por falta de conhecimento técnico ou da ajuda de um profissional, algumas pequenas indústrias acabam fazendo instalações superdimensionadas comprando motores que possuem uma potência maior do que realmente deveria, de modo que um motor de menor potência seria suficiente para realizar o mesmo trabalho, o que economizaria energia elétrica e consequentemente redução do custo operacional da industrial.

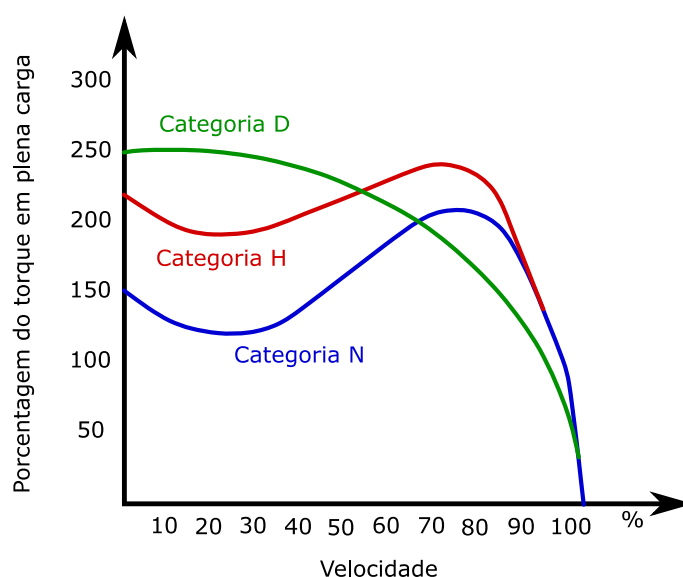


Figura 2.8-Curva torque velocidade, para diferentes categorias (Fonte: Weg, 2016)

2.4- ESCORREGAMENTO

Para obter o torque necessário para mover a carga, a diferença de velocidade terá que ser maior para que as correntes induzidas e os campos produzidos sejam maiores, sendo assim, à medida que a carga aumenta cai a rotação do motor, já quando o motor gira a vazio o rotor gira praticamente com a rotação síncrona.

Com a aplicação de carga o motor gira a uma velocidade diferente da velocidade síncrona, por tal motivo é conhecido também como motor assíncrono, o enrolamento do rotor corta as linhas de força magnéticas do campo e, pelas leis do eletromagnetismo, circulam correntes induzidas (FRANCHI, 2008).

Segundo WEG (2016) a diferença entre a velocidade do motor (n) e a velocidade síncrona (n_s) chama-se escorregamento (s), que pode ser expresso em rotações por

minuto (rpm), como fração da velocidade síncrona ou como porcentagem desta, como pode ser verificado na equação 2.2.

$$s(\%) = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (2.2)$$

2.5- PERDAS NO MOTOR DE INDUÇÃO

As perdas em um motor de indução podem ser separadas em: atrito, efeito joule, ventilação, correntes de Foucault e perdas adicionais, entre outras. Sendo assim, nem uma máquina é 100% eficiente devido sobre tudo a perdas que ocorrem nos processos de conversão de energia.

A medida das perdas esta ligada diretamente a estimação da eficiência do MIT, haja vista que se for possível mensurar todas as perdas obtendo assim sua perda total é possível também determinar a eficiência. O método das perdas segregadas calcula individualmente cada perda e depois as soma para obter a perda total o que permite estimar a eficiência (η) da máquina pela expressão abaixo, (ANDRADE; MOREIRA; PONTES, 2009).

$$\eta = 1 - \frac{PerdasTotais}{P_{entrada}} \quad (2.3)$$

Embora o método das perdas segregadas seja um método de boa precisão apresenta grande invasão ao motor além de ser de difícil implementação. A norma IEEE std-112 apresenta duas possibilidades para o cálculo das perdas, sendo o método E o método E1, o método E1 é mais utilizado por ser menos invasivo e utilizar alguns valores tabelados.

Nos motores de indução trifásicos as perdas ocorrem por diversos fatores, e podem ser divididas em quatro tipos, Perdas elétricas, perdas magnéticas, perdas mecânicas e perdas suplementares. Cada perda está associada às etapas de conversão de energia no motor elétrico de indução, ligadas diretamente a potência de entrada, potência no entreferro, potência desenvolvida e potência no eixo.

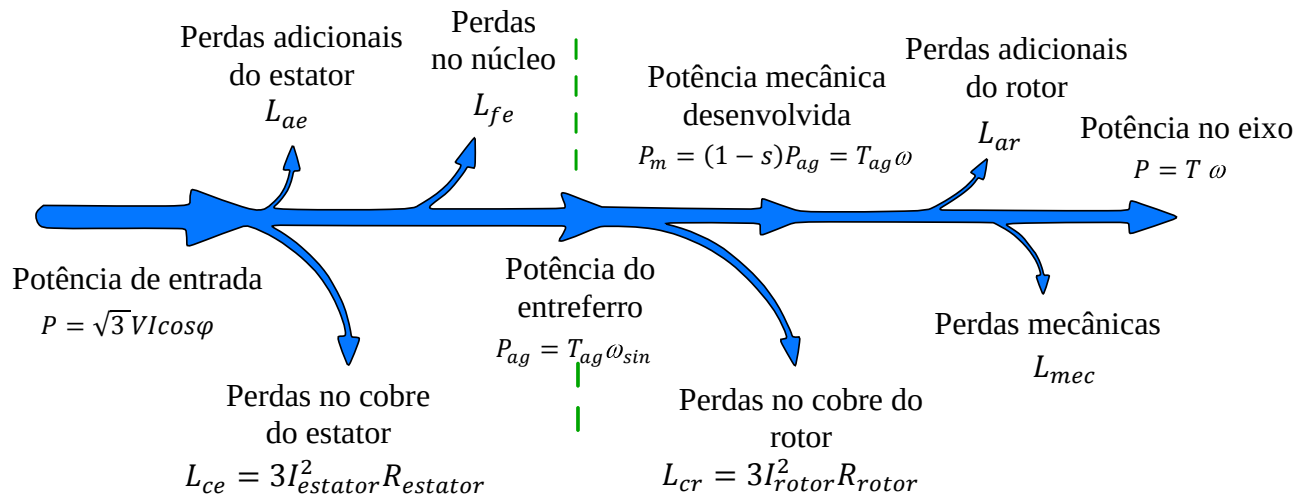


Figura 2.9-Diagrama das perdas e do fluxo de potência no motor de indução
(Adaptado, LU et al.,2008)

As **perdas no cobre do estator** L_{ce} , também chamadas em perdas resistivas são perdas ligadas ao enrolamento do motor devidas o aquecimento dos condutores através do efeito Joule, tais perdas estão presentes tanto no estator quanto no rotor, podem ser reduzidas aumentando a seção do estator e dos condutores do rotor e podem ser calculadas através da norma (IEEE std-112, 2004). Na equação 2.4 e 2.5 é possível verificar as perdas resistivas no estator e no rotor respectivamente.

$$L_{ce} = 3I^2 R_s \quad (2.4)$$

$$L_{cr} = sP_{ag} \quad (2.5)$$

L_{ce} São as perdas resistivas no estator, em (W);

I é a corrente no estator, em (A);

R_s É a resistência do estator, em (Ω);

L_{cr} São as perdas resistivas no rotor, em (W);

s escorregamento;

P_{ag} Potência no entreferro em (W).

Análogo às variáveis fundamentais, alguns testes a vazio precisam ser feitos para obter os dados necessários para o cálculo das perdas tanto no estator L_{ce} quanto no rotor L_{cr} . O valores da resistência R_s é de fundamental importância para o cálculo, tais valores podem ser obtidos através da medição da resistência do enrolamento do estator, o que acaba sendo um meio invasivo haja vista que o motor precisa estar desligado, o valor é obtido medindo-se a resistência entre quaisquer terminais de alimentação do MIT. Deve-se levar em consideração a variável temperatura na hora de medir tal resistência, uma vez que pode haver variações na resistência à medida que a temperatura aumenta ou diminui (SALOMON, 2014).

Para as perdas resistivas do rotor L_{cr} , como não é possível medir a corrente e a resistência que seriam necessárias para o cálculo da potência dissipada, usa-se a potência do entreferro P_{ag} e o escorregamento s da máquina de indução. Como visto na equação (2.5).

Perdas no núcleo L_{fe} ou perdas magnéticas ocorrem nas laminas de ferro do estator e do rotor (dependendo do tipo) devido ao efeito de histerese e correntes de Foucault, variam de acordo com a densidade do fluxo e a frequência. As perdas no núcleo variam pouco e são praticamente iguais na plena carga ou a vazio, tais perdas podem ser tratadas por meio do aumento da seção do ferro no estator e rotor, com o uso de lâminas delgadas e melhoramento dos materiais magnéticos (FRANCHI, 2008). A perda no núcleo pode ser determinada subtraindo a perda mecânica e a perda no cobre do estator das perdas totais do ensaio a vazio (ADISSI, 2015).

Perdas Mecânicas L_{mec} , como o próprio nome sugere são perdas provocadas por contatos mecânicos com oposição ao movimento do rotor ocorrem devido à fricção dos rolamentos, ventilação e perdas pela oposição do ar. São perdas que variam de motor para motor dependendo da sua construção e finalidades de operação, são perdas praticamente constantes e independem da carga imposta. As perdas mecânicas podem ser obtidas através de um ensaio a vazio utilizando regressão linear através de três pontos de potência versus tensão. Para determinação das perdas mecânicas, subtraem-se as perdas resistivas do estator das perdas totais a vazio (potência de entrada), para cada ponto de tensão, traça-se a curva de potência resultante versus tensão, a curva deve ser linearizada até a tensão nula, onde a potência nesse ponto de intersecção é a perda mecânica do motor. As perdas mecânicas podem ser reduzidas utilizando rolamentos

com baixa fricção e com melhorias no sistema de ventilação, tanto interno quanto externo (IEEE std-112, 2004).

Perdas suplementares L_{ar} são perdas associadas a aspectos construtivos da máquina decorrentes de imperfeições na construção do motor que impedem, por exemplo, o escoamento no ar e irregularidades na densidade do fluxo do ar ao ser escoado pelas aberturas, podendo causar vibrações e redução da eficiência do motor. Tais perdas podem aumentar de acordo com a vida útil do motor. Tais perdas podem ser reduzidas com a otimização do projeto do motor bem como a melhoria no processo de fabricação, tais perdas ao longo dos anos tem diminuído graças a investimentos em engenharia de precisão o que possibilita uma melhor construção. A obtenção das perdas suplementares pode ser feita de três maneiras, medida indireta, utilizando a subtração das perdas já conhecidas, medição direta, em que as componentes da frequência fundamental e alta frequência são medidas e compõem o total destas perdas, e medidas tabeladas, que podem ser assumidas através de valores de uma tabela, a partir de valores percentual da carga nominal, (IEEE std-112, 2004; SALOMON, 2014).

Tabela 2-1-Valores das perdas suplementares segundo IEEE Standard 112

Potência nominal do motor (Kw)	Perdas suplementares (% da carga)
1-90	1,8 %
91-375	1,5 %
376-1850	1,2 %
1851 e maiores	0,9 %

2.6- PLACA DE IDENTIFICAÇÃO

Todo motor elétrico comercializado no Brasil deve possuir placa de identificação com os dados referentes às principais variáveis do motor que são definidos de acordo com a NBR-7094. Os dados referentes à placa de identificação são de responsabilidade do fabricante e contem as características construtivas e de desempenho do motor, que acaba auxiliando na hora do dimensionamento, aplicação, assim como sua instalação.

O meio mais direto de estimação de parâmetros é por meio da placa de identificação sendo possível, por exemplo, verificar a eficiência. A partir dos dados da placa é possível verificar de forma rápida valores normais e de desempenho do motor,

todavia vale ressaltar que a medida da eficiência e das perdas, que constam na placa de identificação pode variar ligeiramente uma vez que tais valores dependem do método utilizado para obtenção dos valores e das normas adotadas. Outra característica é que tais valores podem mudar de acordo com a vida útil do motor, bem como se ele foi rebobinado.

MADE IN BRAZIL		WEG		W22 Premium	
2	3 kW(HP-cv)	0.75(1.0)	CARC. FRAME	80	MOTOR INDUÇÃO - GAIOLA INDUCT. MOTOR-SQUIRREL CAGE
V	220/380		A	2.89/1.67	
RPM min ⁻¹	1725	Hz	60	FS SF	1.25
REND(%) NOM.EFF.	83.0	AMB.	40°C	'SOL 'NSL	F ΔT
CAT DES	N	IP55	REG DUTY	S1	Alt. 1000 m.a.n.m. m.a.s.l.
220 V		380 V		Kg	
11417378		CE		RENDIMENTO E FATOR DE POTÊNCIA APROVADOS PELO INMETRO	
		PROCEL		INMETRO	
		NBR - 17094-1			

Figura 2.10-Placa de identificação de um motor de indução trifásico, seguindo a NBR-17094-1(Fonte: Weg, 2016)

2.7- EVOLUÇÃO DOS MOTORES ELÉTRICOS

Os motores elétricos constituem a principal força de trabalho na indústria moderna e desde seu surgimento vem evoluindo gradativamente ao decorrer dos anos. Graças à busca incessante de pesquisadores e fabricantes, os motores elétricos tiveram avanços significativos, o que se deve a novos materiais e tecnologias que foram descobertas e acrescentadas, com o intuito de diminuir as perdas e aumentar a eficiência.

Por ser robusto e com uma diversificada gama de aplicações os motores elétricos, principalmente os motores elétricos de indução trifásica, podem ficar em operação durante vários anos. Todavia ainda é recorrente a prática de manutenção em motores com uma idade avançada, a rebobinagem é a principal delas, segundo a (WEG, 2014) as perdas no rendimento podem variar de 1 a 5 pontos percentuais a cada rebobinagem do motor. Outras avarias também podem ocorrer e dependendo do tipo pode comprometer significativamente o rendimento do motor.

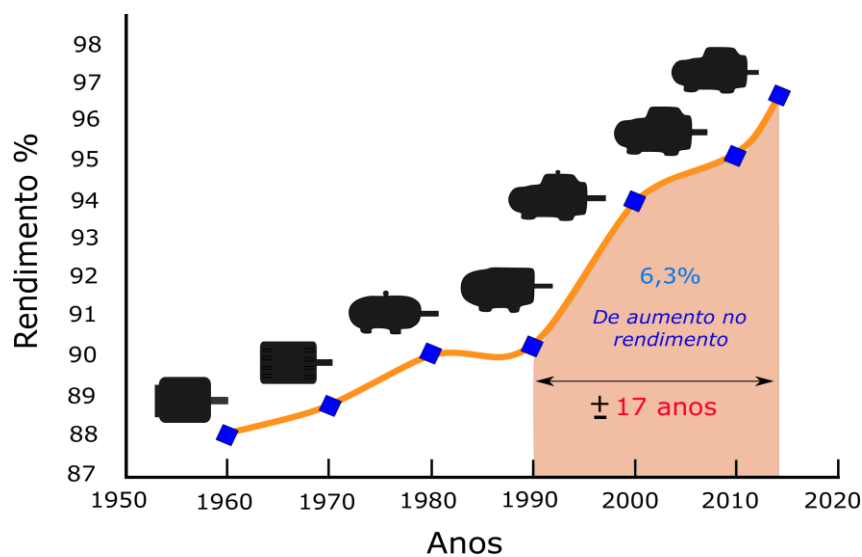


Figura 2.11-Rendimento dos motores elétricos ao longo dos anos (Fonte: WEG, 2014)

Os aspectos construtivos dos motores elétricos melhoraram significativamente desde seu desenvolvimento. Com a adição de novos materiais e estudo elaborado foi possível reduzir consideravelmente as perdas, seja elas mecânica, resistiva, magnética e suplementar. Outro aspecto que melhorou consideravelmente foi à relação peso/potência, um dos avanços mais consideráveis diz respeito ao desenvolvimento dos isolantes elétricos. Segundo (SENS, 2001) a isolação dos fios com seda natural ou artificial reduziu em cerca de 60% o espaço ocupado pelos condutores, outro grande avanço foi à utilização de materiais isolantes sintéticos, por exemplo, os esmaltes utilizados nos fios.

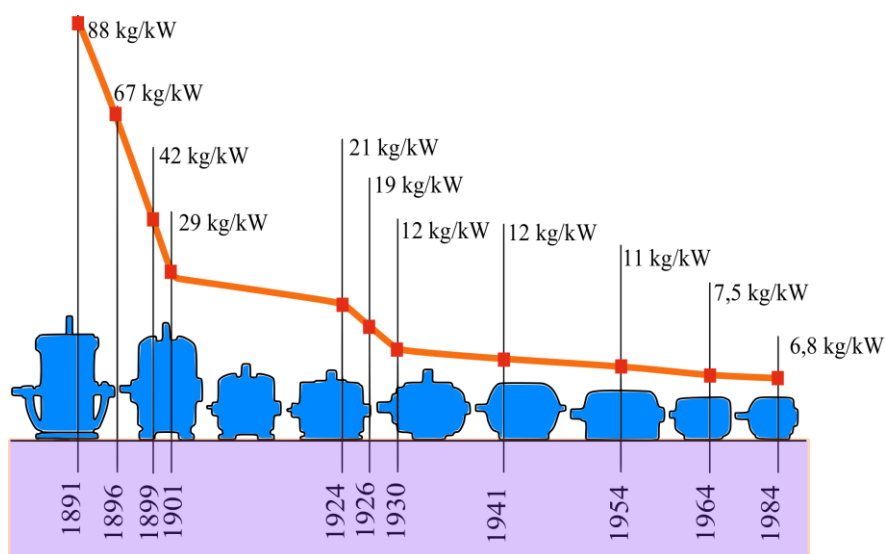


Figura 2.12-Evolução do motor trifásico, relação peso potência (Fonte: SENS,2001)

2.8- ANÁLISE DO SINAL SONORO USANDO FFT

Sinais acústicos ocorrem quando há variação de pressão do ar em relação à pressão média do ambiente ao longo do tempo e podem se propagar em diferentes ambientes, no nosso caso o meio de propagação é o ar.

A acústica é um ramo da física que trata do estudo do som. Existem alguns tipos de microfones, os que captam os sons de todas as direções também chamados de omnidirecionais, os que captam o som vindo de uma direção chamados de direcionais, os que captam os sons vindos de direções opostas chamados de bidirecionais e existem também os que captam com precisão os sons que vêm da frente chamados de hipercardioides e os cardioides que captam somente os sons frontais.

Existem vários métodos que permitem analisar e processar sinais, estes métodos podem ser representados no domínio do tempo ou no domínio da frequência, na figura 2.13 é possível observar um sinal do no domínio do tempo e seu espectro no domínio da frequência.

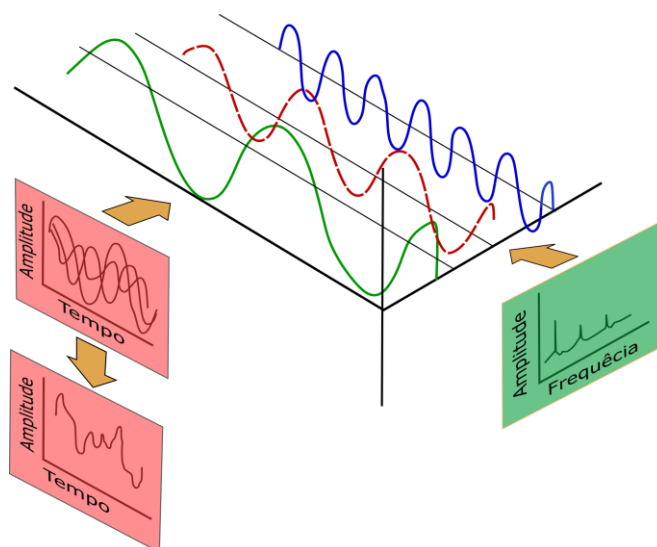


Figura 2.13-Representação de um sinal no domínio do tempo e no domínio da frequência (Fonte: COSTA; MATHIAS, 2008)

A transformada de Fourier permite uma análise ampla dos mais diversos tipos de sinais, isso se deve ao fato de lidar bem com as não linearidades dos sinais aperiódicos. O principal objetivo da transformada de Fourier é visualizar as características de um sinal que estavam intrínsecos nele, mas que não podem ser observáveis em um domínio. Sendo assim a transformada de Fourier muda um sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência, o que permite enxergar outras características do sinal analisado,

outra grande vantagem é a possibilidade de controle permitindo analisar um sinal de um domínio no qual não se tem controle, no caso o tempo, para outro domínio que pode ser facilmente modificado, no caso a frequência. (MELLO, 2011).

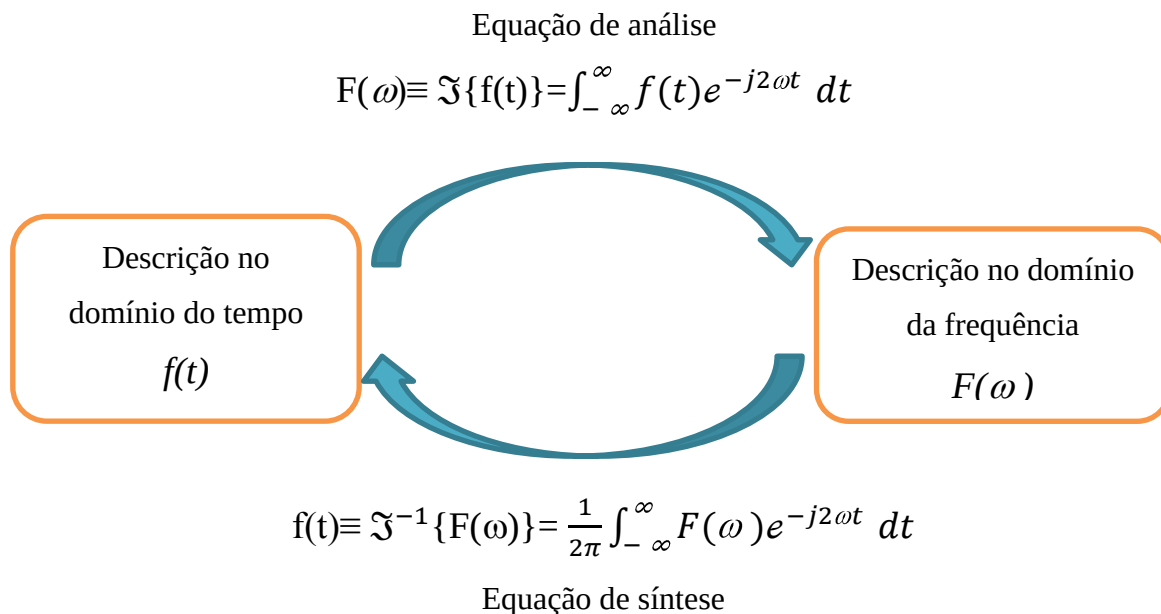


Figura 2.14-Passagens de domínios usando a Transformada de Fourier e sua inversa. Adaptado (HAYKIN; MOHER, 2009)

Com a popularização dos computadores e um aumento crescente no estudo da análise e processamento de sinais, aplicados nos mais diversos setores, alternativas foram desenvolvidas com a finalidade de otimizar o tempo de processamento e análise de sinais dos mais variados tipos. Uma dessas soluções é aplicação da Transformada Discreta de Fourier (DFT). São utilizadas para analisar um sinal discreto, sendo possível a análise de sinais onde a periodicidade não é bem definida e nos casos onde não é possível se obter uma expressão analítica (o que ocorre na maioria das vezes). Sendo assim a DFT consegue analisar funções ou sinais diversos, por exemplo, sinais de interesse como áudio, imagens e vídeo que a Transformada de Fourier clássica não conseguiria, por não possuírem expressões analíticas para descrevê-las (OLIVEIRA, 2007).

Com o uso da DFT o tempo de processamento de sinais usando computadores foi reduzido, entretanto ainda era ineficiente para aplicações online e consumia um tempo considerável. Em 1965 J.W. Cooley da IBM com a colaboração de J.W. Tukey do *Bell Labs* publicaram um trabalho com um novo método para aumentar a eficiência da DFT, o algoritmo ficou conhecido como *Fast Fourier Transform* (FFT). Embora

algoritmos semelhantes já fossem conhecidos por matemáticos como Gauss, Runge dentre outros, a forma analítica como eram desenvolvidos impossibilitava o uso e aplicações, tendo em vista a grande quantidade de cálculos que eram empregados, resultando em um longo tempo para encontrar uma solução. Graças aos computadores digitais o algoritmo de Cooley-Tukey rapidamente se popularizou, tendo em vista sua simplicidade em analisar sinais complexos em pouco tempo.

O Algoritmo desenvolvido por Cooley-Tukey é baseada na técnica de dizimação no tempo, outras variações do algoritmo utilizam a técnica de dizimação na frequência. A grande aplicabilidade da FFT nas mais diversas áreas, como, física, engenharias, biologia etc, se deve a seu tempo de processamento, podendo assim ser implementado de forma *online* calculando a DFT de forma rápida e eficiente. A FFT decompõe as operações utilizadas na DFT a fim de reduzir o custo computacional, transformando multiplicações em somas, por exemplo, além de explorar a periodicidade e simetria das funções trigonométricas calculando assim a transformada com aproximadamente $N \log_2 N$ operações enquanto na DFT são utilizadas N^2 operações, sendo assim, para $N=256$ amostras a FFT é 32 vezes mais rápida do que a DFT padrão (CHAPRA; CANALE, 2011).

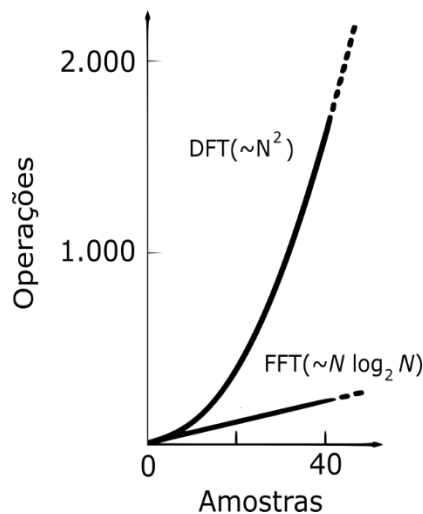


Figura 2.15- Número de operações em função do tamanho da amostra, comparação entre a DFT padrão e a FFT (CHAPRA; CANALE, 2011)

O algoritmo da FFT foi desenvolvido por (COOLEY; TUKEY, 1965) com o intuito de tornar mais rápido o cálculo da Transformada Discreta de Fourier o que em condições normais demanda muito custo computacional. O método desenvolvido por Cooley-Tukey também conhecido como Decimação no Tempo (embora possa ser aplicado também na frequência, como Decimação na frequência ou algoritmo de Sande-

Tukey) consiste em um método eficiente de reagrupar os cálculos dos coeficientes de uma DFT que podem ser definidos pela Eq.(2.6) (MELLO, 2011),(CHAPRA; CANALE, 2011).

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{kn}, \quad \text{Para } 0 \leq k \leq N-1 \quad (2.6)$$

Onde W_N é o peso e também conhecido como fator de giro ou ainda (*twiddle factor*) e pode ser definido como:

$$W_N = e^{\frac{-j2\pi}{N}}, \text{ aplicando a fórmula de Euler tem-se que: } W_N = e^{\frac{-j2\pi}{N}} = \cos\left(\frac{2\pi}{N}\right) - j\sin\left(\frac{2\pi}{N}\right)$$

O algoritmo da FFT usando a decimação no tempo divide recursivamente a sequência $x(n)$ em subsequências uma com coeficientes de índice par e outra com coeficientes de índice ímpar. Sendo N um número inteiro potência de 2, isto é, $N=2^l$ pode-se expressar a equação da DFT dada pela Eq.(2.6) dividindo o somatório em duas partes, uma com os elementos $x(n)$ de índices par e outra com elementos $x(n)$ de índice ímpar, logo pode-se reescrever a equação (1) (DINIZ; SILVA; NETTO, 2014) obtendo:

$$X_k = \sum_{n_{\text{par}}} x[n]W_N^{Kn} + \sum_{n_{\text{ímpar}}} x[n]W_N^{Kn} \quad (2.7)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) W_N^{2Kn} + \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) W_N^{(2n+1)/Kn} \quad (2.8)$$

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) W_N^{2Kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) W_N^{2kn} \quad (2.9)$$

Notando que para N par tem-se:

$$W_N^{2Kn} = e^{-j(2\pi/N)2nk} = e^{-j[2\pi/(N/2)]kn} = W_{N/2}^{Kn} \quad (2.10)$$

Rescrevendo a equação (2.9) tem-se que:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n) W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{N/2-1} x(2n+1) W_{N/2}^{kn} \quad (2.11)$$

Pelo processo mostrado acima se pode inferir que uma DFT de tamanho N pode ser calculada através de duas DFTs de tamanho $N/2$, além das multiplicações por W_N^k . Como cada DFT tem $N/2$ coeficientes cada coeficiente necessita apenas de $(N/2)^2$ multiplicações complexas. Após a multiplicação W_N^k , é efetuado as N adições das duas DFTs parciais, uma para K entre 0 e $N-1$, logo o número total de adições complexas na Eq. (2.11) pode ser dada pela Eq.(2.12) que pode ser designada como o esforço computacional necessário para calcular a DFT.

$$2\left[\left(\frac{N}{2}\right)^2 - \frac{N}{2}\right] + N = \frac{N^2}{2} \quad (2.12)$$

Fica evidente a redução da complexidade do calculo da DFT usando a FFT, a complexidade computacional é significativamente menor do que as N^2 multiplicações complexas e $N(N-1)$ adições complexas necessárias para o cálculo direto da DFT (HAYKIN; MOHER, 2009). Em síntese a FFT pode ser calculada usando $N \log_2 N$ multiplicações e adições complexas o que significa uma economia da ordem de $N/\log_2 N$ se comparada com a forma direta da FFT, (DINIZ; SILVA; NETTO, 2014).

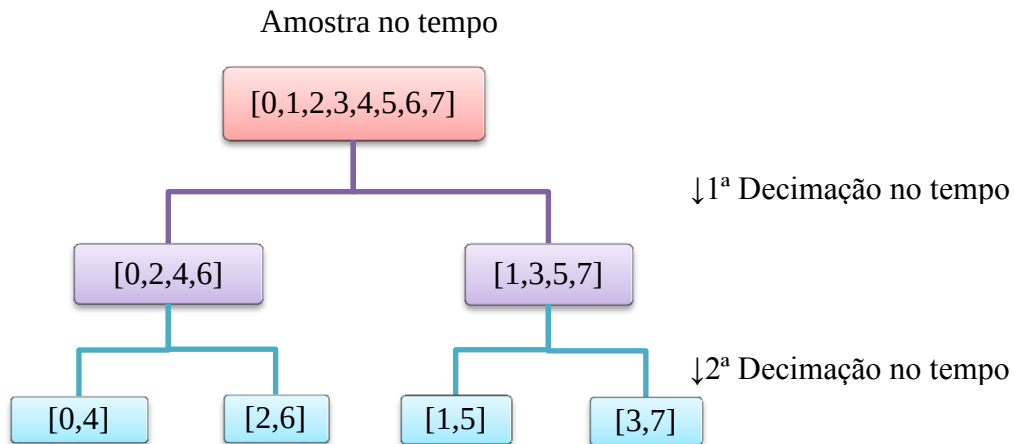


Figura 2.16-Processo de decimação no tempo

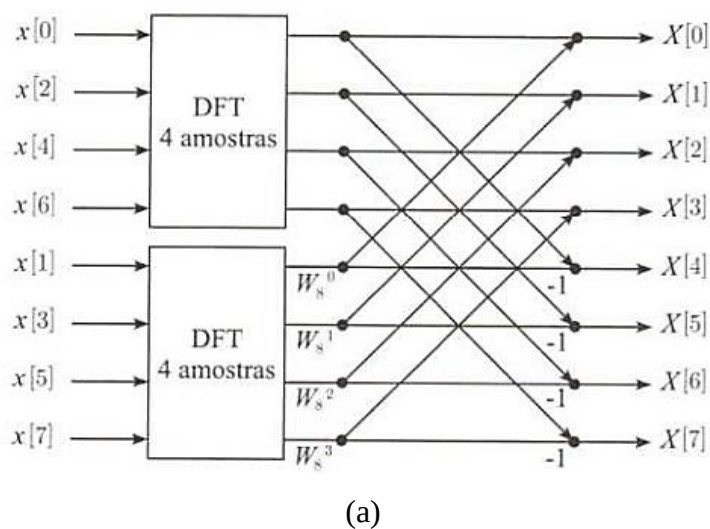
Depois que a primeira decimação for executada a DFT terá sido calculada em uma ordem embaralhada, os coeficientes de Fourier que foram embaralhados podem ser desembaralhados através de um procedimento conhecido como *bit reverse*, logo se a os

subscritos de 0 a 7 forem expressos em binários, a organização correta pode ser obtida com a inversão desses bits (CHAPRA; CANALE, 2011).

Tabela 2-2- Ilustração do processo de bit reverse (Fonte: CHAPRA; CANALE, 2011)

Índice do vetor	Representação binária	Representação binária com bit revertido	Índice com bit revertido
0	000	000	0
1	001	100	4
2	010	010	2
3	011	110	6
4	100	001	1
5	101	101	5
6	110	011	3
7	111	111	7

Após a reordenação das amostras segue-se o processo conhecido como *Butterfly*, esse nome vem do fato que a computação básica da passagem de um estágio para outro obedece a uma simetria e periodicidade dos coeficientes W_N obtendo um par de valores de um estágio a partir de um par de valores do estágio anterior. Devido a sua forma que se assemelha a uma borboleta o processo recebe o nome de *butterfly*.



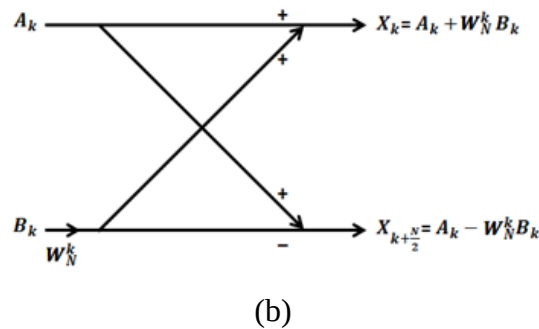


Figura 2.17- Fluxograma de uma FFT por decimação no tempo (a) FFT de uma DFT de oito pontos (b) gráfico de fluxo de uma computação butterfly simplificada

A DFT trabalha bem com sinais estacionários, discretizando o sinal a ser analisado, mesmo assim o processo exige um esforço computacional alto, como solução o algoritmo FFT otimiza os cálculos, tornando o processo muito mais rápido para o cálculo da DFT. Embora seja muito boa na análise de sinais estacionários (aqueles que a frequência não varia com o tempo) a Transformada de Fourier não oferece o mesmo desempenho para sinais não estacionários, isso se deve ao fato de que a TF considera todo o sinal, não sendo possível um controle dos domínios tempo-frequência, o que recorre ao princípio da incerteza de Gabor-Heisenberg. “Trata de uma relação entre a duração efetiva de um sinal e sua banda passante efetiva, obtida no contexto de sinais determinísticos” (OLIVEIRA, 2007).

Nas mais diversas áreas é comum encontrar sinais que não são estacionários, em muitos processos industriais e mesmo na bancada de teste de torque controlável, utiliza neste trabalho, onde a variação de carga imposta ao motor varia seu comportamento dinâmico os sinais não estacionários estão presentes. Sendo assim, novas alternativas, para se trabalhar com sinais que dependem da análise tanto do tempo quanto da frequência foram desenvolvidas. Gabor em 1946 apresentou em seu trabalho o que mais tarde ficou conhecida como Transformada de Fourier de Tempo Curto do inglês *Short-Time Fourier Transform* (STFT), ou até mesmo transformada de Gabor. A ideia era que a Transformada de Fourier não atuaria em todo o sinal, ela atuaria em frações ou partes, sendo assim, o sinal passaria a ser visto em janelas e a transformada calculada em cada uma dessas janelas, a denotação matemática da STFT pode ser dada pela fórmula abaixo, (GABOR, 1946).

$$\text{STFT}(\omega, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g(t - b) e^{-j\omega t} dt \quad (2.13)$$

A transformada pode ser definida como a frequência angular ω em função da posição b no tempo. A STFT equivale à transformada de Fourier da função janelada $f(t)g(t-b)$, onde a função janela $g(t)$ é concentrada em torno de $t=0$, sendo o seu principal propósito isolar os valores da função em estudo $f(t)$, em torno de $t=b$ antes do cálculo da transformada de Fourier. (DINIZ; SILVA; NETTO, 2014).

O uso das janelas no estudo de sinais foi uma grande contribuição, permitindo assim analisar o sinal em fatias. A operação de janelamento pode ser expressa matematicamente como uma multiplicação do sinal $f_1(t)$, que possui duração infinita por um sinal $f_2(t)$ do tipo janela, sendo assim o sinal resultante dessa multiplicação, mesmo que definido em todo o tempo, só é diferente de zero no intervalo de tempo considerado de interesse, durante esse tempo ele é igual ao sinal original, o que permite ser analisado a partir apenas da informação contida nesse intervalo (ADISSI, 2015).

Na figura abaixo são apresentados dois sinais $f_1(t)$ e $f_2(t)$, apresentando frequências distintas por meio de uma janela Gaussiana. Na figura 2.14(a) estão apresentados os sinais $f_1(t)$ e $f_2(t)$ originais, já na figura 2.14(b) é apresentado o sinal de uma função Gaussiana e por fim, na figura 2.14(c) os sinais $f_1(t)$ e $f_2(t)$ janelados (LYRA, 2014).

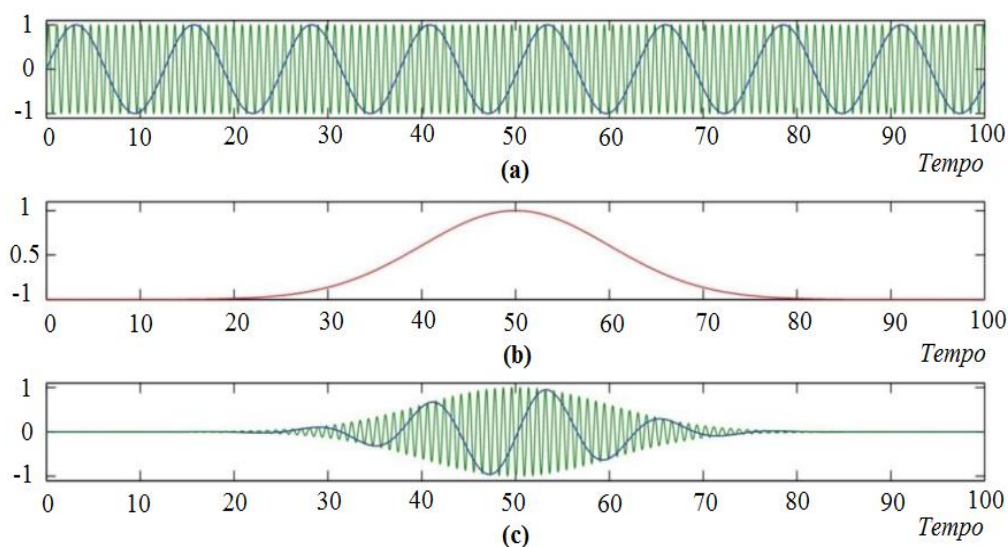


Figura 2.18-Sinais e as etapas de janelamento: em a) Sinais $f_1(t)$ e $f_2(t)$ originais, b) Janela Gaussiana, c) Sinal Janelado, Fonte: (NÓBREGA SOBRINHO, 2015)

A aplicação da STFT permitiu verificar os domínios tempo-frequência utilizando o conceito de sinal janelado, sendo assim o sinal passa a ser considerado apenas na porção que esta sob a janela, desconsiderando o restante nesse momento, dentro da janela o sinal assume comportamento estacionário (MELLO, 2011). Umas das grandes

contribuições da STFT foram justamente à possibilidade de verificar em qual momento um fenômeno de interesse ocorre.

Em processamento digital de sinais o uso de janelas é de grande importância, o que permite reconhecer padrões e analisar o sinal de acordo com o fenômeno de interesse, como ocorre no processamento de voz utilizado por buscadores automáticos nos celulares ou computadores, dentre outras aplicações, por exemplo. O grande problema é definir o tamanho da janela a ponto de obter com clareza o ponto de ocorrência do fenômeno que se pretende analisar, uma das desvantagens da STFT é justamente esta, o tamanho da janela é invariante durante o processo, sendo assim definir uma janela muito pequena pode ocultar informações, além de exigir mais processamento, por outro lado uma janela muito grande pode aumentar o erro quando diz respeito à estacionalidade do sinal.

Capítulo 3

MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DO TORQUE

No presente capítulo serão apresentados os principais métodos utilizados para estimação do torque em eixos rotativos, mostrando a evolução dos métodos até o que há de mais recente no estado da arte, permitindo assim acompanhar as tecnologias empregadas, bem como a busca por uma estimação onde o nível de invasão seja mínimo e a precisão da medição seja satisfatória.

3.1- MEDIÇÃO DIRETA DO TORQUE EM EIXO ROTATIVO

O monitoramento de sistema mecânico rotativo se faz necessário em vários casos, seja para controle ou para prevenir falhas em plantas industriais, preservando equipamentos e evitando quebras que possivelmente pararia algum processo no qual a máquina esta inserida.

O torque em eixos rotativos pode ser classificado de duas formas, estático ou dinâmico. O torque dinâmico é o torque na presença de aceleração angular, enquanto o torque estático é aquele com velocidade angular constante (LIMA FILHO, 2009).

A principal grandeza gerada em uma máquina que entrega trabalho por meio de um eixo girante é o torque. Os métodos de medições que envolvem torque estático são bem difundidos com instrumentos de medição de boa qualidade e exatidão. A grande dificuldade se encontra quando se pretende medir o torque dinâmico, tendo em vista as dificuldades encontradas para realizar a aquisição de dados, já que o sistema de medição necessita de alimentação e entrada/saída de dados e está conectado diretamente ao eixo rotativo, todas essas variáveis tornam-se ainda mais complicadas quando se pretende trabalhar no sistema de medição em tempo real (BORGES, 2015).

Na maioria das vezes a instalação de sistemas de medição direta de torque em máquinas de eixo rotativo torna-se inviável devido a diversos fatores, entre eles, pode-se destacar: dificuldades na instalação devido à acessibilidade ao eixo, custo elevado por unidade quando se faz necessário verificar o torque em várias máquinas, alterações na inercia da máquina, interferências causadas por ruídos devido ao ambiente industrial,

dentre outros fatores. Embora com alta exatidão, os sistemas de medição direta causam uma grande invasão a máquina de eixo rotativo, sendo assim, a busca por sistemas de medição *sensorless*, ao longo dos tempos vem ganhando novos adeptos, mesmo sabendo que as medições são baseadas em estimações, ou seja, aproximações do valor verdadeiro, que seriam obtidos através da medição direta no eixo. Sendo assim, o grande desafio enfrentado por pesquisadores e centros de ensino que estudam os métodos *sensorless* é encontrar um método capaz de estimar a grandeza no transitório e no regime permanente, com baixo erro, reduzindo esforço computacional e que seja simples e robusto para atender as necessidades da indústria (ADISSI, 2015).

A medição direta do torque em eixos pode ser feita utilizando três categorias: por absorção, por extensômetros de resistência elétrica e pelo ângulo de torção (BORGES et al, 2017). Com diversas variantes das categorias citados acima, é sempre aconselhável fazer um estudo prévio a fim de levantar o maior número de informações possíveis acerca do melhor método a ser utilizado na obtenção do torque o que pode reduzir os custos e melhorar a exatidão das medidas.

3.2- MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DO TORQUE

A estimação do torque tem como finalidade aplicar metodologias que visem uma aproximação com o valor medido diretamente no eixo, a chamada medição direta, sendo assim, são aplicadas técnicas que estimam um valor muito próximo do real, que por sua vez só é possível com o acoplamento direto do instrumento de medição ao eixo, o que torna os métodos de medição direta do torque em alguns casos inconveniente e na maioria das vezes inviável, já que nem sempre é possível ter acesso aos eixos das máquinas em funcionamento.

Grandes empresas que atuam diretamente no ramo das medições e calibração de instrumentos quase sempre utilizam equipamentos com tecnologia fechada, mais popularmente conhecida como ‘caixa preta’ onde o operador só possui os dados da entrada e da saída não tendo acesso ao conteúdo do processamento do sistema, sendo assim os torquímetros mais avançados na medição do torque dinâmico utilizados na indústria e em centros de pesquisa quase sempre são tecnologias privadas sendo dificilmente empregados em grande escala devido ao custo elevado.

3.2.1- Método indireto de medição do torque a partir da carga do motor

O método mais simples para estimação do torque em motores elétricos consiste em avaliar os dados fornecidos pelo fabricante. Também conhecido como método indireto do valor nominal, utiliza os dados da placa do motor, referentes à potência de saída e velocidade de rotação do eixo e estimar o torque, utilizando a Eq. (3.1) abaixo.

$$T_n = \frac{P_n}{\omega_n} \quad (3.1)$$

$T_n \rightarrow$ É o torque no eixo do motor, dado em Nm;

$P_n \rightarrow$ É a potência nominal do motor em W;

$\omega_n \rightarrow$ É a velocidade nominal de rotação do eixo em rad/s.

Embora seja um dos métodos mais simples para obtenção do torque é também um dos menos precisos. Quando o motor é rebobinado perde suas características originais, outros fatores também podem influenciar no resultado da estimação do torque, como a presença de harmônicas na rede e condições subdimensionadas ao qual o motor pode ser submetido, outro agravante é a aplicação do método em motores onde a carga varia constantemente variando assim seu torque, nestes casos a metodologia não terá bons resultados.

3.2.2- Método do escorregamento

Outro método interessante para a determinação do torque leva em consideração o escorregamento do motor. O método tem por base as condições de operação do motor, onde é feita uma linearização na curva de torque x velocidade, considerando os pontos de velocidade síncrona, nominal e de trabalho do motor. Consiste também em considerar que a taxa de escorregamento medido em relação à taxa do escorregamento nominal são iguais, sendo assim é possível calcular o torque pela Eq.(3.2).

$$T = \frac{s}{1-s} \frac{1-s_n}{s_n} T_n \quad (3.2)$$

Tem-se que:

$T \rightarrow$ Torque de trabalho (torque no eixo), em Nm;

$T_n \rightarrow$ Torque nominal, em Nm;

$s \rightarrow$ Escorregamento medido;

$s_n \rightarrow$ Escorregamento nominal (a plena carga)

O método do escorregamento é ligeiramente superior ao método indireto do valor nominal que considera fundamentalmente a placa de identificação do motor, todavia apresenta o empecilho de que o erro natural da taxa de escorregamento não é igual à porcentagem da carga, segundo (NEMA MG1, 2009) a velocidade nominal real pode variar em torno de 20 % do que consta na placa de identificação do motor.

Uma melhoria do método de determinação do torque pelo escorregamento pode ser feita ao incluir uma componente que indica a variação de tensão real, seguindo o método Ontario Hydro (LU; HABETLER; HARLEY, 2005), que pode ser feita por meio da Eq. (3.3).

$$T = \frac{s}{1-s} \frac{1-s_n}{s_n} T_n \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 \quad (3.3)$$

Em que:

$V \rightarrow$ Tensão de alimentação medida, em V;

$V_n \rightarrow$ Tensão de alimentação nominal, em V.

3.2.3- Método da corrente elétrica

Semelhante ao método do escorregamento, o método da corrente elétrica usa o mínimo de medições e dados do fabricante para estimar o torque, sendo sua principal vantagem à simplicidade, sendo assim é possível utilizar de forma análoga ao método do escorregamento, onde a taxa de corrente medida e a corrente nominal pode ser utilizada para estimar o torque. A curva da porcentagem da carga versus a taxa de variação da corrente é levemente não linear, conferindo uma melhor estimativa se comparada ao método do escorregamento. A medida da velocidade de rotação do eixo também se faz necessária como se pode perceber pela Eq. (3.4) abaixo (LU, 2006)

$$T = \frac{I}{I_n} \frac{\omega_n}{\omega} T_n \quad (3.4)$$

Onde:

$I \rightarrow$ Corrente de linha medida, em A;

$I_n \rightarrow$ Corrente de linha nominal, em A;

$\omega \rightarrow$ Velocidade angular medida, em rad/s;

$\omega_n \rightarrow$ Velocidade angular nominal, em rad/s.

3.2.4- Método das perdas segregadas

Nenhuma máquina é 100% eficiente devido às perdas que ocorrem durante o processo de conversão, no motor elétrico, por exemplo, como discutido no capítulo 2, tais perdas ocorrem das mais variadas formas, logo se for possível fazer o levantamento de todas as perdas presentes no motor é possível estimar o torque, sendo assim somando todas as perdas do motor e tendo o valor de rotação no eixo é possível obter o torque (IEEE-Std-112, 2004), conforme Eq. (3.5)

$$T = T_e - \frac{L_{Total}}{\omega} \quad (3.5)$$

Em que:

$T_e \rightarrow$ Torque de entrada do motor, em Nm;

$L_{Total} \rightarrow$ Perdas totais do motor, em W.

Onde T_e é o torque de entrada dado pela potência elétrica de entrada P_e dividida pela velocidade síncrona ω_s .

Os motores alocados nas linhas de produção ou em outros serviços nem sempre podem ser desligados sem que haja interrupção do processo, neste caso o método das perdas segregadas torna-se inviável para estimação do torque devido a grande invasão provocada no motor de indução, já que vários parâmetros internos da máquina precisam ser analisados.

3.3- MÉTODO DO TORQUE NO ENTREFERRO

O motor elétrico de indução trifásico é uma máquina que converte energia elétrica em energia mecânica e o entreferro é o elo entre essas duas grandezas. O entreferro é a região que se encontra entre o estator e o rotor, sua função é fazer a conexão entre a potência elétrica de entrada, definida pelas tensões e correntes do motor e potência mecânica de saída, esse processo se dá no momento que a potência elétrica imprime uma potência magnética que impõe um torque ao rotor fazendo o mesmo girar colocando a máquina de indução em funcionamento, na Figura 3.1 é possível ver a representação do sistema.

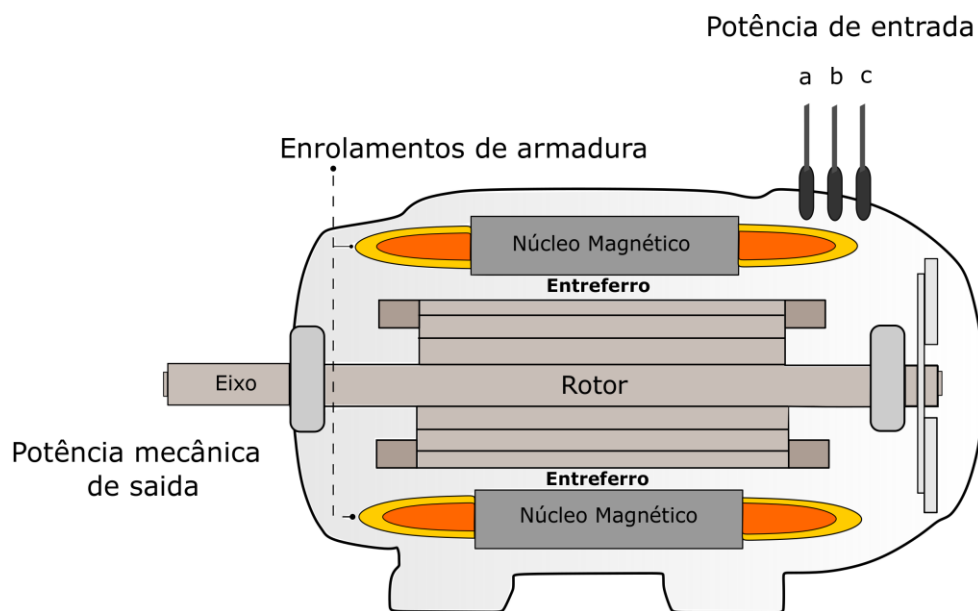


Figura 3.1-Indicação da posição do entreferro dentro do motor de indução (Adaptado, Lima-Filho, 2009)

Durante o processo de conversão entre, potência elétrica, magnética e por fim mecânica ocorrem perdas, tais perdas são diferentes e proporcionais. A potência mecânica desenvolvida depende do escorregamento e da potência de entrada, já o torque no entreferro (*air gap torque*) ou AGT, é definido pela potência do entreferro dividida pela velocidade angular (ADISSI, 2012).

O método de estimação do torque no eixo T_{eixo} a partir do torque no entreferro T_{ag} foi inicialmente descrito por OJO et al., (1990) e desde então vem sendo utilizado como método de estimação da eficiência em MITs, sendo um dos métodos mais adotados pela comunidade científica devido a sua eficácia, baixa invasão e boa exatidão.

Como visto anteriormente a potência de entrada do motor é calculada através das tensões de entrada e das correntes de fase, já a potência de saída é calculada através da relação de proporção direta da velocidade do rotor e do torque no eixo. A potência no eixo pode ser estimada pela potência do entreferro, para tanto se devem considerar as perdas, subtraindo assim do torque no entreferro as perdas por atrito e ventilação, associadas às perdas suplementares (BRANDT, 2011).

No motor de indução trifásico a potência de entrada pode ser calculada usando a soma através da equação (3.6), onde é realizado o somatório dos produtos das tensões de fase v_a , v_b e v_c . Onde i_a , i_b e i_c são as correntes de linha, logo a potência de entrada pode ser definida como se segue.

$$P_{in} = i_a \cdot v_a + i_b \cdot v_b + i_c \cdot v_c \quad (3.6)$$

As equações de tensão podem ser obtidas a partir da relação das expressões de fluxo com as quedas de tensão nos enrolamentos, onde cada tensão representa respectivamente as três fases do enrolamento de armadura MIT, pela Eq. (3.7) tem-se a seguinte expressão.

$$\begin{aligned} v_a &= \frac{d\lambda_a}{dt} + r_s i_a \\ v_b &= \frac{d\lambda_b}{dt} + r_s i_b \\ v_c &= \frac{d\lambda_c}{dt} + r_s i_c \end{aligned} \quad (3.7)$$

Tem-se que:

$r \rightarrow$ É a resistência do enrolamento estator;

λ_a, λ_b e $\lambda_c \rightarrow$ Fluxos concatenados dos enrolamentos a, b e c respectivamente.

A substituição da equação 3.6 nas 3.7 resulta na equação 3.8, logo tem-se que:

$$P_{in} = \left[i_a \left(\frac{d\lambda_a}{dt} + r i_a \right) + i_b \left(\frac{d\lambda_b}{dt} + r i_b \right) + i_c \left(\frac{d\lambda_c}{dt} + r i_c \right) \right] \quad (3.8)$$

Rescrevendo a equação 3.8, pode-se chegar as seguintes expressões matemáticas:

$$\begin{aligned} \lambda_a &= \int (v_a - r i_a) dt \\ \lambda_b &= \int (v_b - r i_b) dt \\ \lambda_c &= \int (v_c - r i_c) dt \end{aligned} \quad (3.9)$$

Rescrevendo a equação (3.9) a termos comuns, obtém-se:

$$\lambda_{abc} = \int (v_{abc} - r i_{abc}) dt \quad (3.10)$$

A equação do torque no entreferro pode ser escrita pela expressão (3.11), abaixo:

$$T_{ag} = \frac{p}{2\sqrt{3}} \{ (i_a - i_b) \cdot \int [v_{ca} - r (i_c - i_a)] dt - (i_c - i_a) \cdot \int [v_{ab} - r (i_a - i_b)] dt \} \quad (3.11)$$

Onde:

i_a, i_b e $i_c \rightarrow$ correntes de linha;

$v_{ab}, v_{bc}, v_{ca} \rightarrow$ são as tensões de linha;

$p \rightarrow$ número de polos.

Os motores elétricos de indução trifásicos apresentam diversas formas e tipos, também podem ser ligados tanto em configuração Δ como em Y. A Eq. (3.11) está relacionada diretamente ao campo magnético o que a torna válida para as aplicações envolvendo o MIT na configuração Δ ou Y (OJO et al., 1990).

As leis de Kirchhoff foram desenvolvidas por Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) físico alemão, sendo as mais conhecidas às leis de Kirchhoff das tensões e das correntes, a soma algébrica das tensões em qualquer malha de um circuito é sempre nula, já para as correntes, a soma algébrica das correntes em qualquer nó de um circuito é sempre nula.

$$\sum_{k=1}^n v_k = 0 \quad (3.12)$$

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0 \quad (3.13)$$

A análise feita acima permite fazer um elo entre os motores com configuração em Y e com as três fases equilibradas, as tensões de linha e as correntes podem ser expressas de acordo com as Eq. (3.14) e (3.15), (BRANDT, 2011).

$$v_{ab} + v_{bc} + v_{ca} = 0 \quad \equiv \quad v_{bc} = -(v_{ab} + v_{ca}) \quad (3.14)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad \equiv \quad i_c = -(i_a + i_b) \quad (3.15)$$

Usando tal abordagem é possível estimar o torque no entreferro tendo apenas o processamento dos dados a partir de dois sensores de tensão e dois sensores de corrente (LIMA FILHO, 2009).

A equação do torque no entreferro pode ser reescrita usando apenas as medidas dos dois sensores de tensão e dois sensores de corrente. Logo a equação (3.11) pode ser reescrita como:

$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} \{ (i_a - i_b) \int [v_{ca} + r(2i_a + i_b)] dt + (2i_a + i_b) \int [v_{ab} - r(i_a - i_b)] dt \} \quad (3.16)$$

O cálculo do torque resultante no eixo pode ser obtido, através do torque no entreferro subtraindo-se as perdas mecânicas L_{mec} e as perdas adicionais L_{ad} , sendo assim é possível obter a Eq. (3.17), onde ω é a velocidade angular.

$$T = T_{ag} - \frac{L_{mec}}{\omega} - \frac{L_{ad}}{\omega} \quad (3.17)$$

Quando se utiliza o método do torque no entreferro as perdas que ocorrem durante o processo de conversão eletromecânica devem ser levadas em consideração para se ter uma estimativa mais aproximada do torque no eixo, sendo elas, as perdas mecânicas e as perdas adicionais.

Os valores das perdas podem ser obtidos de valores tabelados, as perdas adicionais podem assumir os valores presentes na IEEE std-112 (2004), vale ressaltar que os valores assumidos devem ser baseados na potência do motor, os valores das perdas podem ser observados na tabela abaixo.

Tabela 3-1-Perdas adicionais e perdas mecânicas, Fonte: (ADISSI, 2015)

Potência Nominal (kW)	Perdas Adicionais (IEEE,2004) (% da nominal)	Perdas Mecânicas (LU <i>etal.</i> ,2008) (% da nominal)
1-90	1,8%	1,7%
91-375	1,5%	2,0%
376-1850	1,2%	2,3%
1851 e maiores	0,9%	2,6%

Quando o método do torque no entreferro é aplicado, tendo por base a Eq. 3.16, as integrais representam o fluxo magnético de acoplamento correspondente ao torque, na resolução das integrais se deve levar em consideração a fase inicial da força contra eletromotriz que causa um *offset* no sinal, devido a constante que sobra quando se resolve um calculo integral. Fisicamente, o *offset* provocado não existe durante a operação normal da máquina, uma ilustração desses fluxos é mostrada na figura (3.11), onde $\hat{\lambda}_s$ representa o vetor de fluxo estimado, λ_s representa o vetor fluxo de estator real e λ_{offset} o vetor fluxo de offset (ADISSI, 2015).

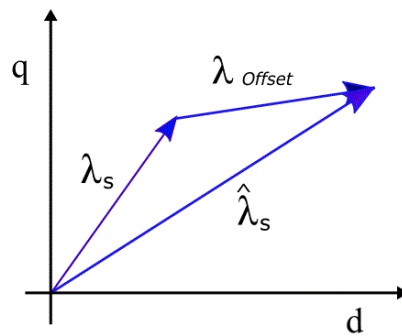


Figura 3.2-Representação do offset da integração do fluxo magnético (SENA, 2011)

Os valores de offset distorcem o sinal o que causa incerteza na estimação, é possível verificar na figura 3.3(a) os valores de offset após a integração, já na figura 3.3(b) estes valores são compensados, as figuras representam curvas com vários ciclos de senóides.

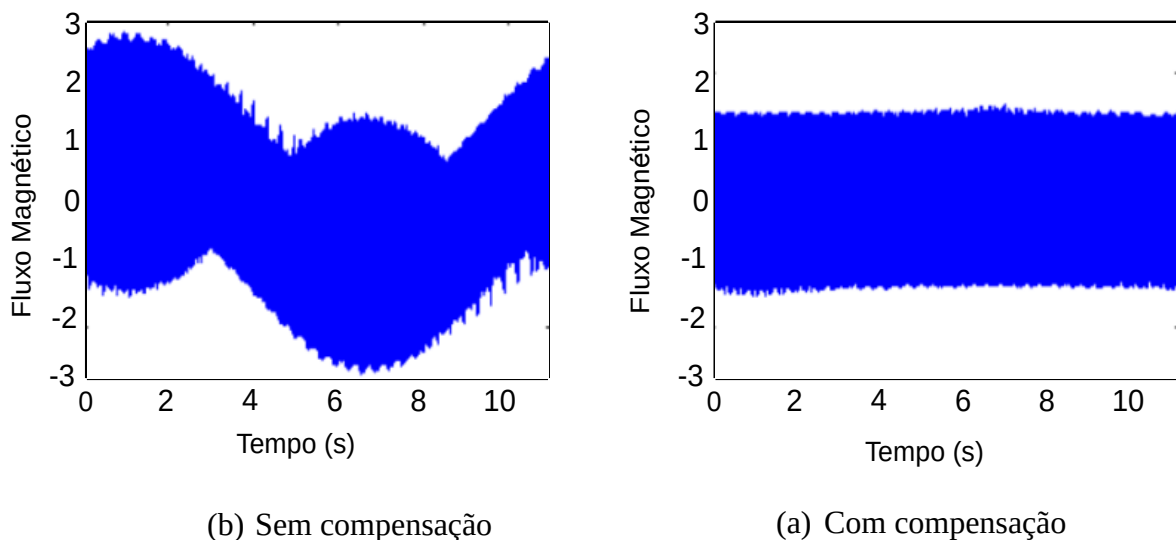


Figura 3.3-Sinal sem e com compensação de offset, fonte (ADISSI, 2015)

A correção do valor de offset pode ser feita através de diferentes métodos sendo comum a associação de filtros físicos, sejam filtros passa baixa ou filtros passa alta (SENA, 2011) o que vai depender das especificações do projeto. Mesmo passando por filtros físicos ainda ocorrem distorções na magnitude e fase do sinal que posteriormente precisam ser compensados via algoritmo.

Na retirada do valor de *offset* ADISSI, (2015) utilizou uma compensação no próprio algoritmo do torque no entreferro, retirando assim a componente DC do sinal senoidal resultante, através da subtração da média aritmética de cada ciclo de integração. A estratégia adotada para retirar o *offset* do sinal integrado foi à subtração

do valor da média a cada ciclo de senóide. O método mostrou-se excelente, eliminando os valores DC sem causar distorções na fase, além de não exigir muito processamento para executar.

No presente trabalho, tendo em vista os bons resultados alcançados utilizando o filtro da média móvel para retirar o valor de *offset*, foi adotada também tal abordagem, permitindo assim uma implementação no próprio algoritmo para compensação do valor de *offset* o que resulta em resultados mais confiáveis.

Para o valor final do torque no entreferro foi utilizado o filtro da média móvel, tornando o resultado mais estável no tempo, atua substituindo o valor do torque pela média dos valores de sua vizinhança, a vantagem é que tal abordagem torna o método mais robusto além de não exigir muito processamento (LIMA FILHO, 2009).

3.4- OBTENÇÃO DA VELOCIDADE EM MITS

As vantagens proporcionadas pelo controle da velocidade nos motores de indução podem ser encontradas no dia a dia, desde escadas rolantes, elevadores, esteiras transportadoras, entre outras, sendo o inversor de frequência fundamental na popularização do MIT e responsável na maioria das aplicações pelo controle da velocidade do motor o que ocasiona redução de energia e previne falhas.

A estimação da velocidade em MITs é bastante discutida no meio acadêmico, onde já foram desenvolvidos vários métodos de estimação que buscam predominantemente utilizar as grandezas que estão disponíveis como: corrente, vibração, sinal sonoro, dentre outras grandezas, tendo por objetivo causar o mínimo de invasão ao corpo do motor.

Como citado no Capítulo II a busca por métodos *sensorless* vem crescendo gradativamente ao decorrer dos anos, tendo como principal fonte a miniaturização de sistemas embarcados e técnicas de estimação baseadas em algoritmos.

Existem alguns bons métodos para a estimação da velocidade em motores de indução trifásicos. Serão abordados nesta parte do trabalho os principais deles, bem como métodos novos que foram desenvolvidos por pesquisadores do GPICEEMA ao decorrer de anos de pesquisa e inovações.

A estimação da velocidade no presente trabalho se dará com o intuito de estimar o rendimento do motor de indução trifásico, haja vista, que a velocidade de rotação no eixo é uma das variáveis necessárias, para tal fim. Será usado o método *sensorless* da

análise do sinal sonoro emitido pelo MIT durante seu funcionamento, mais detalhes serão abordados no Capítulo IV.

3.4.1- Medição direta da velocidade no eixo

Atualmente existem diversos transdutores de velocidade com boa exatidão e com as mais variadas configurações, como tacogeradores, encoders, resolvers, roda dentada com sensor indutivo, estroboscópio, dentre outros. A principal desvantagem do método de medição direto da velocidade é sua grande invasão, uma vez que o sistema de medição tem que ser acoplado ao eixo no qual nem sempre se tem acesso ou que seria inviável devido ao processo no qual a máquina está inserida, todavia ainda é a forma com maior exatidão que pode ser utilizada para encontrar o valor da velocidade no eixo.

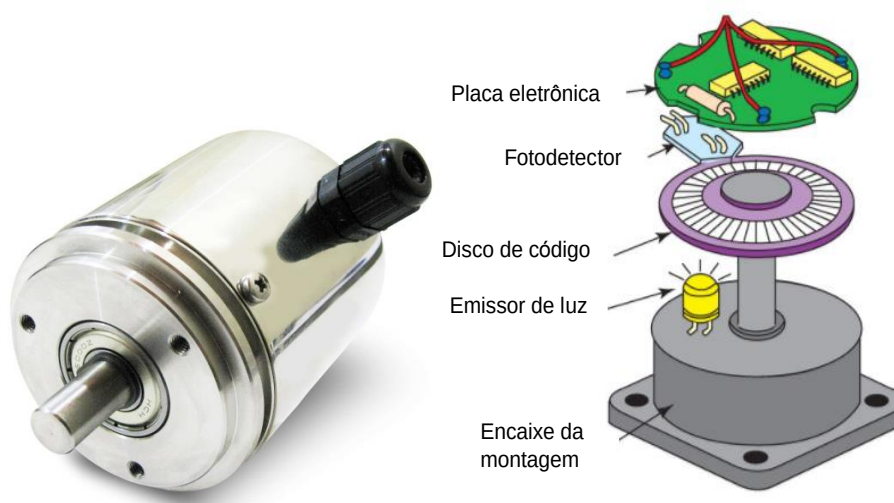


Figura 3.4-Representação de um encoder a esquerda e dos principais elementos que o compõem a direita (Disponível em: <<http://encoder.com/blog/encoder-basics/>> Acesso em: 22 de janeiro do 2018)

3.4.2- Estimação da velocidade no eixo a partir da harmônica nas ranhuras

Embora os métodos diretos de medição da velocidade em eixos girantes sejam os mais exatos, nem sempre é possível obtê-los, devido a restrições do próprio processo no qual o motor está inserido, além de ficar demasiado caro se a aplicação for feita em vários motores.

O método de estimação usando a harmônica das ranhuras consiste na análise espectral da frequência da corrente de linha e da busca de harmônicos gerados pelas saliências do motor e que são oriundas das ranhuras do rotor e da sua excentricidade.

A grande vantagem deste método é que ele utiliza os dados de um sensor de corrente oriunda da fonte de alimentação do motor. Tendo em vista que várias indústrias utilizam sensor de corrente para monitorar a rede elétrica e prevenir sobrecargas, o método pode ser implementado sem maiores invasões ao sistema. Mesmo que não haja um transdutor de corrente previamente instalado é possível instalá-lo sem maiores dificuldades devido a sua simplicidade de funcionamento, podendo ser utilizado um transformador de corrente, transdutor de efeito hall ou transdutor de efeito Rogowski (ROQUE, 2015).

A análise do espectro da corrente se mostra uma variável importante na estimação da velocidade do motor. As interações provocadas entre a indução de corrente elétrica no rotor é responsável por proporcionar o surgimento de uma força eletromagnética capaz de realizar trabalho mecânico. Existe uma relação de proporcionalidade muito forte entre o rotor e o estator, que se dá através de interações eletromagnéticas o que permite através da monitoração das correntes que circulam no estator determinar alguns parâmetros relativos ao rotor do MIT.

É possível determinar a velocidade do motor bem como o escorregamento utilizando a análise espectral da corrente, o que pode ser comprovado em trabalhos como: (BLASCO-GIMENEZ et al., 1996), (HURST e HABETLER, 1997), (LYRA et al., 2016). Partindo do princípio da análise do espectro da corrente juntamente de harmônicos que são gerados pelas saliências do motor, oriundas das ranhuras do rotor e da sua excentricidade. Pode-se traçar um paralelo entre a frequência desses harmônicos da excentricidade dinâmica do rotor com a sua velocidade, verifica-se pela Eq. (3.18)

$$f_{he} = f_1 \left[(kr + n_d) \frac{1-s}{p/2} + n_\omega \right] \quad (3.18)$$

Onde:

f_{he} → Frequência das harmônicas relacionadas com as saliências;

f_1 → É a frequência fundamental da alimentação;

k → É o número da harmônica, $k=0, 1, 2, \dots$

r → É o número de ranhuras do rotor;

p → É o número de polos;

s → É o escorregamento

n_d → É a ordem de excentricidade do motor, $n_d=0, \pm 1, \pm 2, \dots$

$n_\omega \rightarrow$ É a ordem dos harmônicos do entreferro, $n_\omega = \pm 1, \pm 3, \dots$

Vários métodos para obter e analisar o espectro de frequência podem ser utilizados e variam de acordo com a necessidade da aplicação, podendo ser desde a Transformada Rápida de Fourier (FFT) até as Transformadas Wavelets, com suas particularidades vistas no item 2.2 do capítulo 2. “Para transientes a transformada Wavelet é mais indicada devido à decomposição do sinal em janelas de tamanho variável no tempo e na frequência e a análise de multiresolução” (ADISSI, 2015), entretanto a FFT se aplica muito bem para a análise espectral neste caso em particular.

Para aplicações em tempo real o método da harmônica das ranhuras pode não ser indicado, tendo em vista que a exatidão do método depende de um alto número de amostras para obter uma resolução espectral aceitável, o método também é suscetível a ruídos e outras perturbações que ocorrem na rede elétrica. O alto custo de processamento é um dos limitadores do método para aplicações em tempo real.

3.4.3- Estimação da velocidade pelo método do torque no entreferro

A relação torque versus velocidade é muito comum nas máquinas motrizes, um automóvel, por exemplo, que na primeira marcha apresenta elevado torque e baixa velocidade e em marcha mais alta apresenta elevada velocidade e baixo torque. No motor de indução trifásico essa relação também existe e é uma das principais características do MIT sendo critério inclusive para dimensionar sua aplicação.

Quando uma carga é imposta ao motor de indução trifásico a tendência é que a velocidade varie, sendo assim quanto maior a carga aplicada maior será o torque e consequentemente maior será o escorregamento que por sua vez reduzirá a velocidade no eixo.

A estimativa da velocidade através do torque no entreferro foi um método desenvolvido por ADISSI (2012) na sua dissertação de mestrado, o método foi proposto com o intuito de contornar as dificuldades encontradas para estimar a velocidade em tempo real, tendo em vista, que as técnicas usadas até então demandam um alto processamento, não correspondendo assim às expectativas para ser alocado em um sistema embarcado que no caso foi desenvolvido e utilizado pelo pesquisador.

Os pontos de trabalho do MIT correspondem a uma faixa de operação que variam entre a velocidade síncrona e a velocidade correspondente ao torque máximo no motor. Ao traçar uma reta sobre a curva da figura 3.5 é possível obter uma boa

aproximação para a curva na região entre a velocidade e torque nominais e a velocidade síncrona e torque zero, sendo assim é possível obter uma aproximação linear da relação torque e velocidade, como pode ser vista na figura abaixo.

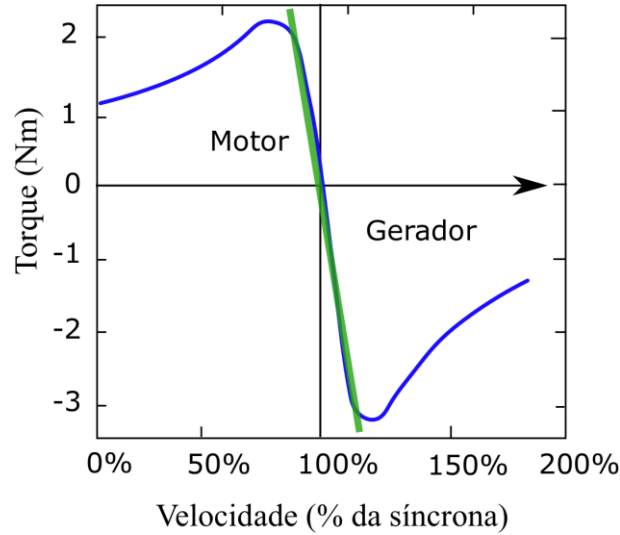


Figura 3.5-Relação linearizada entre o torque e a velocidade angular, (Fonte: ADISSI, 2012)

A velocidade é estimada antecipadamente a partir do torque no entreferro. Durante a transmissão de torque do entreferro para o rotor ocorrem perdas, todavia tais perdas não são tão acentuadas, logo a curva do torque no entreferro versus velocidade assemelha-se a curva da figura 3.5, levemente deslocada para cima.

Os parâmetros da reta podem ser obtidos com uma boa precisão a partir do teste a vazio, todavia nem sempre é possível fazê-lo, além de ser considerado um teste invasivo tendo em vista que para implementá-lo é preciso desacoplar o motor do processo no qual está inserido. Como nem sempre é possível fazer o teste a vazio, pode-se fazer usando dois pontos da reta, o primeiro ponto é referente ao torque zero e velocidade síncrona ω_g e o segundo ponto é referente ao torque nominal e a velocidade nominal ω_n .

Os torques no entreferro equivalentes ao ponto nominal T_{agn} e zero T_{ago} são determinados através de um algoritmo conforme equação 3.19 e 3.20, (ADISSI, 2012).

$$T_{agn} = \frac{P_n}{\omega_n} + T_{ago} \quad (3.19)$$

$$T_{ago} = \frac{(L_{ad} + L_{mec})P_n}{\omega_g} \quad (3.20)$$

Os parâmetros a e b da equação da reta podem ser determinados de acordo com a equação 3.21 e 3.22.

$$a = \frac{\omega_g + \omega_n}{T_{ago} - T_{agn}} \quad (3.21)$$

$$b = \omega_g - aT_{ago} \quad (3.22)$$

A inclinação a da reta é independente da frequência de funcionamento, entretanto em casos onde a velocidade síncrona do motor não seja nominal (para este caso um motor de 1800 rpm, 4 polos e frequência de alimentação em 60 Hz) o parâmetro b deve ser calculado com a frequência que está sendo utilizada (ADISSI, 2012). A estimação da velocidade pode então ser estimada diretamente do torque no entreferro, por meio da equação 3.23.

$$\hat{\omega} = a\hat{T}_{ag} + b \quad (3.23)$$

Fluxo da metodologia utilizada para estimar a velocidade, figura 3.6.

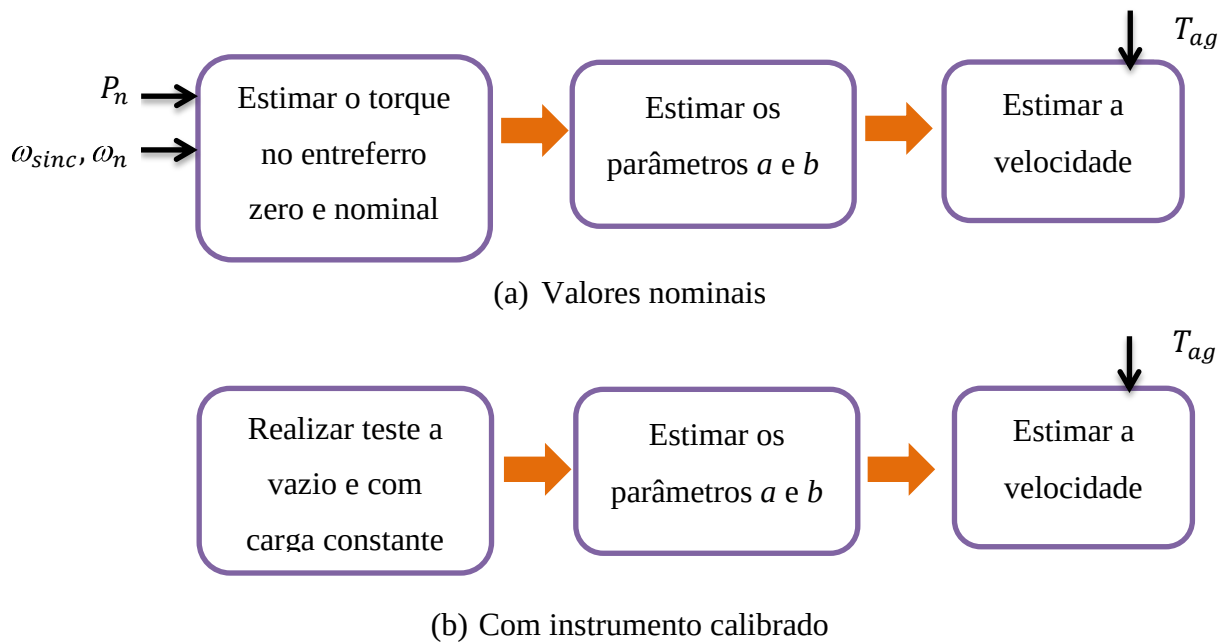


Figura 3.6-Esquema para estimar a velocidade a partir do torque no entreferro, (Fonte :ADISSI, 2015)

3.4.4- Estimação da eficiência a partir do torque no entreferro

As variáveis, velocidade e torque estimados a partir do torque no entreferro agora podem ser utilizados para estimar a potência de saída do motor de indução trifásico, tendo em vista que a relação direta, torque vezes velocidade permite calcular a potência de saída estimada do motor.

$$\hat{P}_{out} = \hat{T}\hat{\omega} \quad (3.24)$$

A eficiência de uma máquina é dada pela potência de saída dividida pela potência de entrada.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.25)$$

A estimação da eficiência do motor relaciona a potência de entrada com a potência de saída, a potência de entrada é puramente elétrica advinda da rede de alimentação do motor.

$$P_{in} = i_a v_a + i_b v_b + i_c v_c = -v_{ca}(i_a + i_b) - v_{ab}i_b \quad (3.26)$$

A potência de saída é puramente mecânica, sendo o produto da velocidade angular do motor $\hat{\omega}$ e do torque no eixo no eixo $\hat{T}$ do MIT, conforme equação 3.24 acima, logo a eficiência pode ser definida pela Eq. (3.27) abaixo.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\hat{T}\hat{\omega}}{-v_{ca}(i_a + i_b) - v_{ab}i_b} \times 100\% \quad (3.27)$$

A credibilidade do método do torque no entreferro é uma das suas principais características, a robustez do método permite uma estimação confiável da eficiência em motores de indução trifásicos, podendo ser alcançada utilizando parâmetros que podem ser facilmente obtidos sem causar maior invasão ao motor.

As tensões e correntes de linha v_{ab} e v_{ca} e i_a e i_b respectivamente, juntamente com o torque no eixo e a velocidade angular são as variáveis principais para estimar a eficiência utilizando o método do torque no entreferro.

3.5- EFICIÊNCIA A PARTIR DA ANÁLISE SONORA DO MIT

Muitos métodos foram criados com intuito de estimar a eficiência em motores de indução trifásicos. Essa necessidade surgiu com o intuito de conhecer o rendimento do motor e assim desenvolver metodologias que pudessem reduzir o desperdício de energia

elétrica. Ao longo dos anos, vários métodos foram propostos, todavia a invasão causada ao corpo do motor acaba tornando boa parte desses métodos impraticável.

A tendência que os novos métodos de estimação da eficiência têm seguido é a busca constante por uma metodologia com índice de invasão o mais baixo possível que seja eficaz e que tenham um valor estimado com boa precisão, se comparado ao valor medido de forma direta.

Um novo método de estimação da eficiência está sendo abordada no presente trabalho pela primeira vez. O método consiste em utilizar a análise do espectro sonoro do motor de indução trifásico para estimar a potência de saída do motor. A potência de saída pode ser obtida pela relação torque versus velocidade no eixo do motor.

A nova metodologia proposta consiste inicialmente em estimar a velocidade no eixo do motor usando a assinatura do sinal sonoro emitido pelo MIT quando em funcionamento. Valendo-se da relação da curva torque x velocidade discutida no item 3.4.3 e da relação de linearidade de surge entre essas duas grandezas ilustrada pela figura 3.5 um algoritmo foi desenvolvido com o intuito de estimar o torque no eixo. Sabe-se pela curva do torque versus velocidade que à medida que uma carga é imposta ao motor o torque aumenta fazendo com que a velocidade diminua, mantendo uma relação inversamente proporcional. Através dessa relação de linearidade entre o torque e a velocidade foi desenvolvido um algoritmo que permite estimar tanto a velocidade quanto o torque do MIT. Mais detalhes serão abordados nos itens que se seguem até o fim deste capítulo.

3.5.1- Estimação da velocidade a partir da análise sonora do MIT

Sinais acústicos ocorrem quando há variação de pressão do ar em relação à pressão média do ambiente ao longo do tempo e podem se propagar em diferentes ambientes, no nosso caso o meio de propagação é o ar. Vale ressaltar que mesmo que haja variação na pressão do ar o ouvido humano só será capaz de detectar se ela estiver oscilando em uma frequência compreendida entre 20 a 20 000 Hz, sendo assim, por exemplo, só seria possível ouvir o agitar de sua mão no ar para cima e para baixo se ela estivesse oscilando entre 20 Hz e 20 kHz (FONSECA, 2007).

O emprego da análise sonora em motores elétricos é objeto de estudo de diversos pesquisados principalmente quando o assunto é análise e prevenção de falhas. WANG; HUANG; ZHANG (2012) em seu trabalho reuniram os sinais sonoros da máquina

elétrica em diferentes condições de operação e eliminaram o nível desses sinais usando o método wavelet no domínio do tempo e no domínio da frequência. Em seguida, o autovetor do sinal foi analisado e extraído. Usaram um classificador de rede neural para classificar o som de falha do motor elétrico quantificado, vários métodos de eliminação de ruídos foram utilizados ao longo do processo. Os experimentos indicaram que o diagnóstico inteligente introduzido no trabalho alcançou uma alta taxa de precisão no reconhecimento do tipo de falha do motor elétrico com base na análise de ruído.

Em sua dissertação de mestrado LYRA (2014), propôs analisar diferentes métodos que pudessem ser empregados para estimar a velocidade no eixo por meio da técnica *sensorless*, denominados de acordo com o seu princípio fundamental, são eles: método pelas harmônicas das ranhuras, pelo torque no entreferro e pela emissão acústica, o primeiro método é o mais difundido no estado da arte, o segundo foi desenvolvido em laboratório tendo bons resultados e o terceiro método foi seu objeto de estudo, sendo um novo método tendo como objetivo estimar a velocidade através da assinatura sonora do MIT. Para a análise do espectro do sinal sonoro foi utilizada a FFT. A técnica da estimativa por emissão acústica, mostrou-se a menos invasiva se comparada a outros métodos, novos algoritmos podem ser implementados de modo a melhorar o seu tempo de resposta e exatidão, ambos requeridos em sistemas de controle robustos.

Percebe-se a relevância da análise sonora nas mais diversas aplicações. No presente trabalho também será utilizado o método da estimação da velocidade a partir da análise sonora do motor de indução trifásico. Devido a sua baixa intrusividade e boa precisão.

Para aquisição do som foi utilizado um sistema embarcado, o dispositivo é baseado na plataforma de desenvolvimento Arduino Due e conta com um *shield* microfone condensador de eletreto CMA-4544PF-W. O sistema embarcado em questão foi desenvolvido pelo pesquisador do GPICEEMA, (VASCONCELOS LIMA, 2017). Alguns detalhes sobre o dispositivo será mostrado no capítulo 4 do presente trabalho.

Ao iniciar o processo deve-se ter o cuidado de evitar colocar o sistema embarcado em apoios com vibração mecânica excessiva o que pode afetar a aquisição dos dados. Com o dispositivo próximo ao motor em estudo e através de um botão que dar início ao processo de gravação inicia-se o processo. A gravação do arquivo em formato *wave* é transmitida para um *personal computer* (PC) e analisada através de um algoritmo desenvolvido no Matlab.

Como o motor produz movimento rotativo algumas características sonoras e ruídos característicos tendem a aparecer repetidamente ao longo do tempo, sendo assim para cada velocidade de rotação do eixo do motor tem-se um ruído característico e uma frequência de giro correspondente (LYRA et al., 2016).

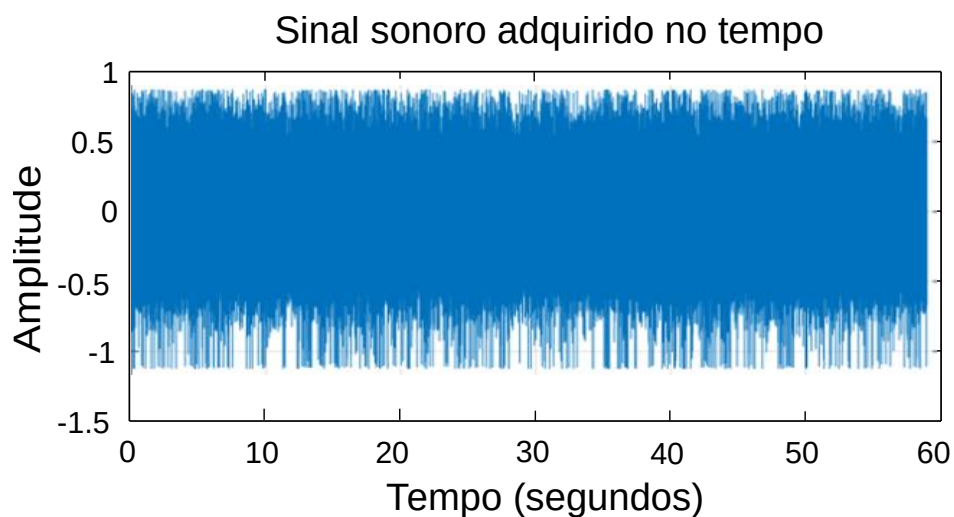


Figura 3.7-Sinal sonoro emitido pelo MIT

A frequência presente no padrão de energia elétrica brasileira é de 60 Hz. Para a maioria dos testes foi utilizada a partida direta no motor de indução trifásico, sendo assim quando se analisa o espectro do sinal sonoro do MIT verifica-se que a primeira harmônica de maior amplitude está bem próxima ao valor da frequência de 60 Hz. Ocorre então uma periodicidade no sinal da vibração sonora emitida pelo motor que coincide com a rotação do seu eixo. A partir da média das diferenças de frequência entre picos subsequentes (M_f), calculada por meio de um algoritmo escrito em Matlab, é possível determinar a velocidade estimada de rotação no eixo.

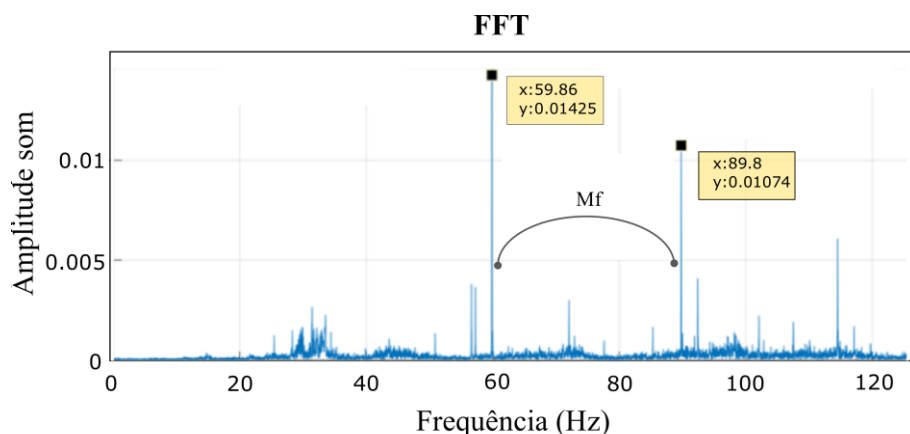


Figura 3.8-Espectro do sinal sonoro do MIT com frequência de alimentação a 60 Hz

O valor da velocidade estimada no motor de indução trifásico pode ser obtido pela equação 3.28, onde M_f é a média da diferença das harmônicas no domínio da frequência.

$$\hat{\omega} = M_f \times 60 \quad (3.28)$$

No caso da utilização do inversor de frequência o espectro da FFT mostraria a frequência da primeira harmônica de maior amplitude bem próxima ao valor da frequência de chaveamento usada para o controle da velocidade.

Para este caso em específico foi feita a estimação da velocidade para o motor partindo sem carga aplica ao eixo, apenas com o mecanismo acoplado sem imposição de torque. Fazendo a diferença entre 89,8 Hz e 59,86 Hz resulta em um valor de 29,94 Hz que é a M_f , logo a velocidade estimada $\hat{\omega}$ resulta em um valor de 1796,4 rpm. O valor medido diretamente no eixo através de um tacômetro obteve uma velocidade de 1797 rpm. Comprova-se assim a eficácia do método da estimação da velocidade através da assinatura sonora do motor, conferindo precisão e nenhuma invasão ao corpo do MIT e ao processo ao qual o mesmo está inserido.

O algoritmo desenvolvido no Matlab® faz a FFT do sinal sonoro emitido pelo MIT e detecta automaticamente a M_f . A partir do valor da frequência da diferença entre as harmônicas é possível estimar a velocidade.

3.5.2- Estimação do torque a partir da análise sonora do MIT

O torque é uma grandeza puramente mecânica, sendo a variável de maior importância em qualquer processo que envolva torção em eixos. Ao decorrer dos anos métodos foram propostos a fim de medir o torque, desde então várias técnicas foram implementadas e inúmeros transdutores de torque foram criados, cada qual com suas características e nível de precisão.

A equação da reta é uma forma de encontrar uma relação matemática entre dois pontos distintos, sendo aplicada nos mais diversos processos que envolvem sistemas lineares podendo ser utilizado desde a análise de misturas químicas até a programação de tarefas lineares em multiprocessador (GHAVIDEL et al., 2015).

Através da curva característica do motor de indução trifásico que associa o torque e a velocidade é possível obter uma relação linear entre dois pontos conhecidos da curva e assim determinar os coeficientes da equação linear da reta. No presente trabalho um novo método de estimação do torque foi desenvolvido, tendo por base a análise do som emitido pelo MIT, após a aquisição do sinal sonoro um algoritmo desenvolvido no software Matlab® é utilizado para mapear os pontos de torque e velocidade que serão utilizados para encontrar a equação da reta.

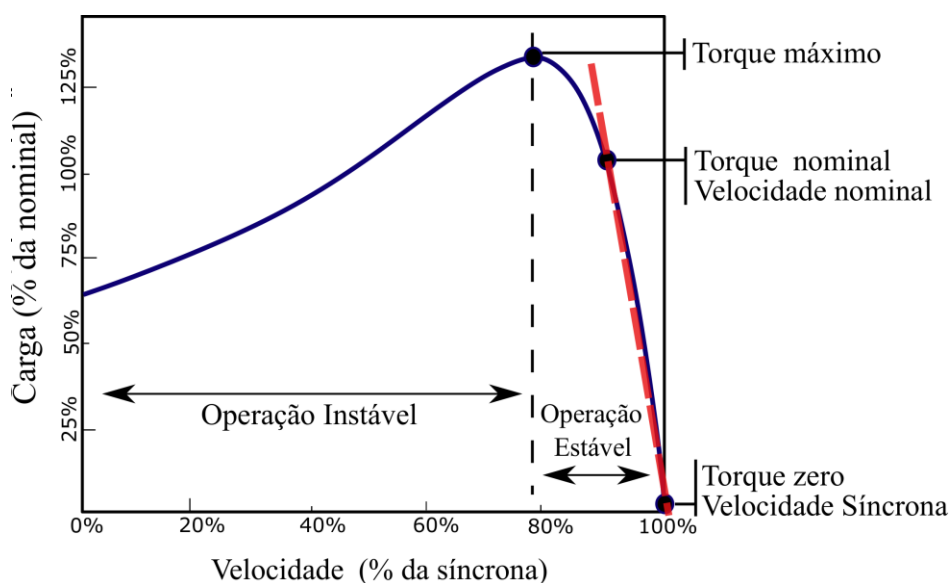


Figura 3.9-Relação torque *versus* velocidade no eixo do motor

A partir da linearização da curva torque versus velocidade como pode ser observada na figura 3.9 através da linha tracejada em vermelho é possível obter a equação característica da reta, que será utilizada como parâmetro para estimar o torque no eixo do motor. A primeira etapa do processo de estimação do torque utiliza dois pontos da curva, sendo o primeiro referente ao torque zero e velocidade síncrona ω_g e o segundo referente ao torque nominal e velocidade nominal ω_n , os dados da velocidade síncrona e nominal podem ser obtidas através da placa de identificação do motor ou até mesmo utilizado o método da estimação da velocidade através da análise da vibração sonora do MIT em estudo.

O Torque estimado pode ser expresso pela equação 3.29, sendo a mesma válida para toda a faixa de operação estável do motor.

O coeficiente angular da reta é dado por:

$$m = \frac{\hat{T}_{es} - T_{ag0}}{\hat{\omega} - \omega_g} \quad (3.29)$$

Já a equação da reta por ser expressa por:

$$\hat{T}_{es} - T_{ag0} = m(\hat{\omega} - \omega_g) \quad (3.30)$$

Substituindo as equações 3.28 na equação 3.30 é possível obter a equação 3.31:

$$\hat{T}_{es} = m(M_f x 60 - \omega_g) + T_{ag0} \quad (3.31)$$

Onde as variáveis que compõem a equação podem ser dadas por:

$\hat{T}_{es}$ → Torque estimado, em Nm;

T_{ag0} → Torque para a velocidade síncrona, em Nm;

m → Coeficiente angular da reta;

M_f → Média da diferença das harmônicas na frequência, em Hz;

$\hat{\omega}$ → Velocidade angular estimada, em rpm;

ω_g → Velocidade síncrona, em rpm.

A seguir é exemplificada a sequência de passos necessária para estimar o torque através da análise sonora do MIT.

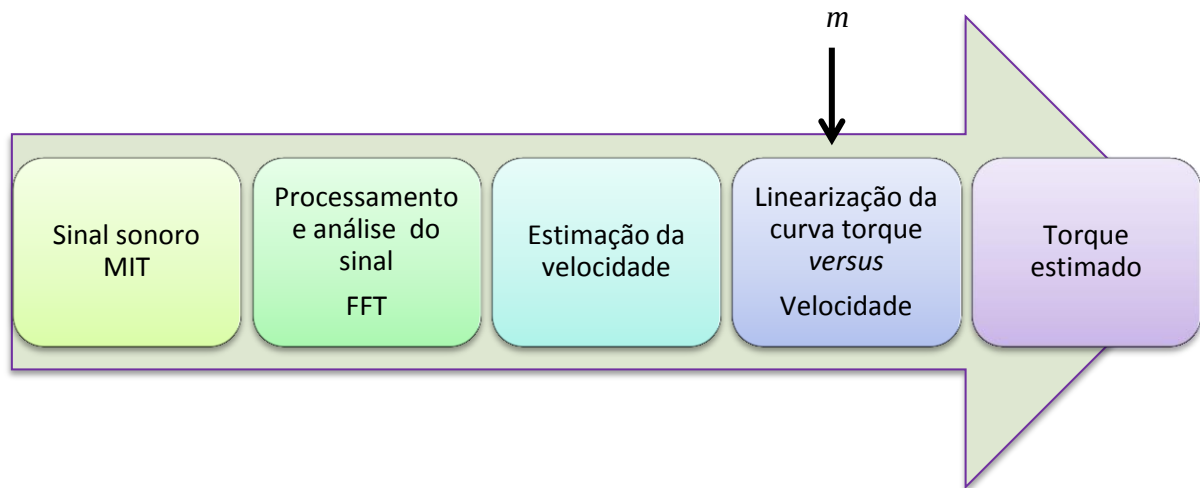


Figura 3.10-Sequência para estimar o torque através da análise sonora do MIT

Para a aplicação do método são necessários apenas os parâmetros referentes ao ponto com velocidade síncrona e torque zero e velocidade nominal e torque nominal, tanto a velocidade síncrona quanto a velocidade nominal podem ser obtidas facilmente através do catálogo do fabricante ou por meio da placa de identificação, quem vem

fixada no motor. O torque por sua vez, quando o motor está operando na velocidade síncrona tende a zero.

O algoritmo desenvolvido no Matlab utiliza dados do motor em estudo, (tais dados geralmente constam na placa de identificação). A estimação da velocidade é através da análise do som emitido pelo MIT. Após estas etapas é possível fazer o levantamento da equação da reta através da curva torque versus velocidade, que é uma curva característica dos motores de indução trifásicos, após essas etapas o torque é estimado.

3.5.3-Estimação da eficiência através da análise sonora do MIT

O cálculo da eficiência em motores de indução trifásicos correlaciona variáveis distintas, enquanto a potência de entrada é puramente elétrica a potência de saída é puramente mecânica. A potência de saída pode ser obtida relacionando a equação (3.31) com a equação (3.28), ou seja, a potência de saída é igual à velocidade estimada multiplicada pelo torque estimado, Eq. (3.32).

$$\hat{P}_{out} = \hat{T}_{es}\hat{\omega} \quad (3.32)$$

A potência de entrada é puramente elétrica, sendo necessário para o seu cálculo pelo menos os valores de duas tensões e duas correntes de alimentação do motor. A partir da análise sonora do MIT é possível obter o torque, a exemplo do que foi descrito no item anterior 3.5.2. É sabido que há uma relação direta entre a carga imposta ao motor e a eficiência, à medida que a carga aumenta a eficiência também aumenta, até chegar a um ponto de estabilidade, como é possível ser observado na figura 3.11 curva A. Através do sinal sonoro emitido pelo MIT o algoritmo desenvolvido no Matlab é capaz de estimar o torque e a velocidade no eixo, o que permite obter a potência de saída do motor em estudo. Usando dados catalogados, fornecidos pelo fabricante do MIT em análise, é realizada uma interpolação de resultados. Usando o torque estimado e a velocidade estimada é possível obter a potência fornecida em relação à potência nominal do motor, de tal forma que é plausível encontrar a eficiência estimada do MIT em estudo. No presente trabalho a estimação da eficiência é feita de forma totalmente não invasiva descartando o uso de sensores para a aquisição das tensões e correntes de linha, tão necessárias para o cálculo da potência de entrada do MIT.

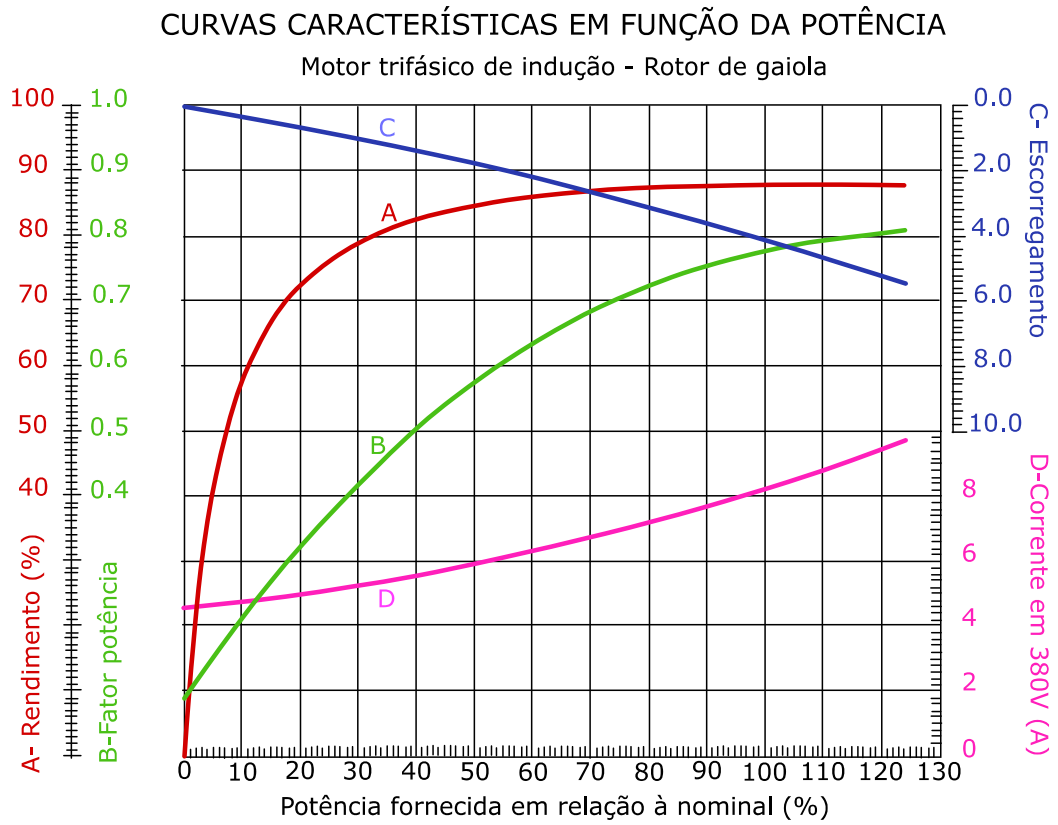


Figura 3.11-Curvas características do MIT W22 PLUS (Fonte: WEG, 2018)

Capítulo 4

MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo serão abordados os principais materiais e os métodos utilizados para alcançar o objetivo geral do trabalho. Com o intuito de analisar e validar a nova metodologia de estimação da eficiência a partir da análise sonora do MIT. Uma bancada de torque controlável foi desenvolvida, permitindo aplicar cargas controladas ao motor onde é possível variar desde um torque zero até um torque superior ao nominal. O acionamento do motor pode ser feito de duas maneiras, uma por partida direta e outra por inversor de frequência, esta última permite verificar outros parâmetros inerentes ao MIT e levantar dados desde baixa a alta rotação. Todos os instrumentos que compõem a bancada serão descritos na seção abaixo, bem como os sistemas de medição utilizados.

4.1- BANCADA DE TORQUE CONTROLÁVEL

A bancada de torque controlável foi desenvolvida no laboratório do GPICEEMA na UFPB, na bancada é possível aplicar cargas controladas ao eixo do motor de indução trifásico, permitindo atingir uma ampla gama de torque desde zero até valores superiores ao nominal. O MIT pode ser acionado por partida direta ou por inversor de frequência que permite controlar a velocidade do motor através da modulação da frequência, sendo assim é possível fazer testes para diferentes valores de velocidade e torque.

O software de aquisição de dados foi desenvolvido no Labview que é uma linguagem de programação criada pela National Instruments. O labview utiliza uma linguagem de programação gráfica por fluxo de dados, onde os programas podem ser feitos através do arraste e organização de blocos, por ser uma plataforma otimizada é bastante utilizada para aplicações em automação e instrumentação e apresenta facilidade na aquisição de dados através de dispositivos de hardware externos. Outra grande vantagem da linguagem é facilidade de implementar sistemas utilizando programação

concorrente, pois através deste recurso é possível sincronizar a aquisição de vários sensores adquirindo os dados ao mesmo tempo (ANJOS et al., 2008).

Na figura 4.1 é mostrado o esquema da bancada de torque controlável com todos os componentes envolvidos no processo, desde o acionamento do motor de indução trifásico até o controle da carga aplicada ao eixo por meio do motor CC, indo até a coleta de dados realizada através de computador pessoal (PC) por meio de uma conexão USB (*Universal Serial Bus*) ligada a DAQ.

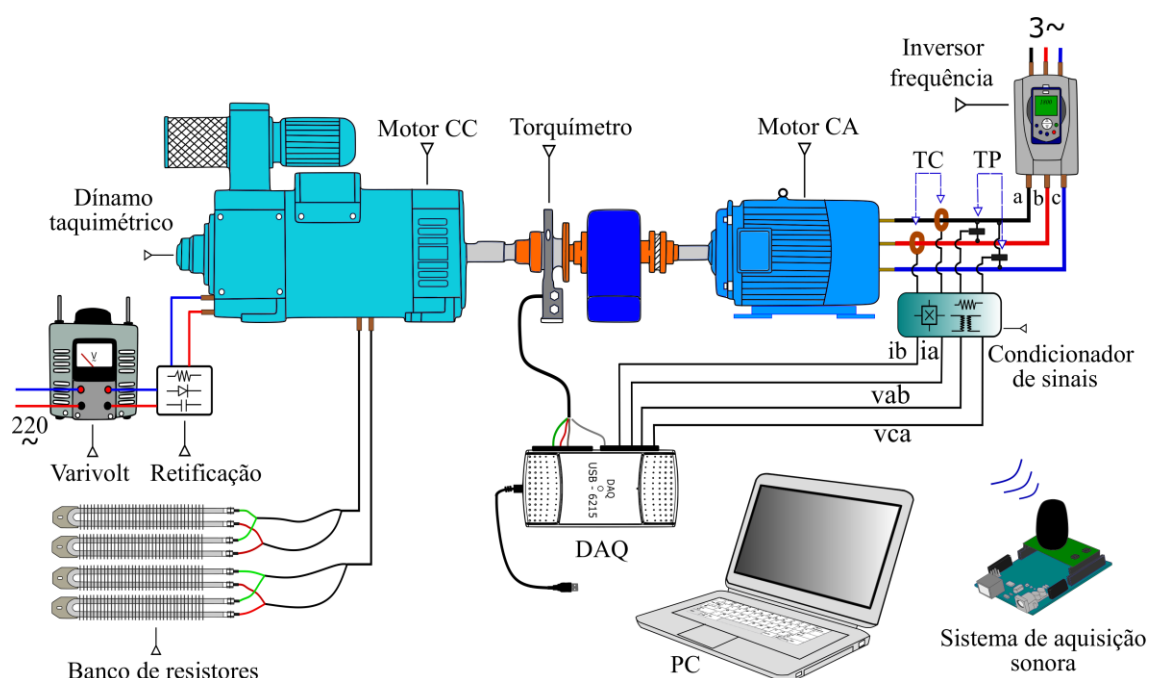


Figura 4.1-Representação global da bancada de torque controlável. (Fonte: Autor)

A bancada pode ser dividida em algumas partes sendo as principais: motor de indução trifásico e seu acionamento, gerador de carga e seu acionamento e os sistemas de medição. O objeto de estudo é o MIT que será analisado e submetido a testes para validar o método de estimação do rendimento proposto, para tanto é preciso que se aplique uma carga ao eixo do motor para gerar torque. A aplicação da carga é feita através de um motor de corrente contínua e de um varivolt que controla a variação da alimentação do campo do motor CC (que funciona como freio eletromagnético) permitindo impor ou retirar torque ao eixo do MIT.

Os principais componentes que constituem a bancada consistem em: [1] motor de indução trifásico, objeto de estudo do trabalho, [2] mancal para apoio com dois rolamentos e elementos de acoplamento, [3] transdutor de torque, [4] motor de corrente

continua com exaustor acoplado possuindo ainda um transdutor de velocidade [5]. Cada elemento será melhor detalhando ao decorrer do trabalho.

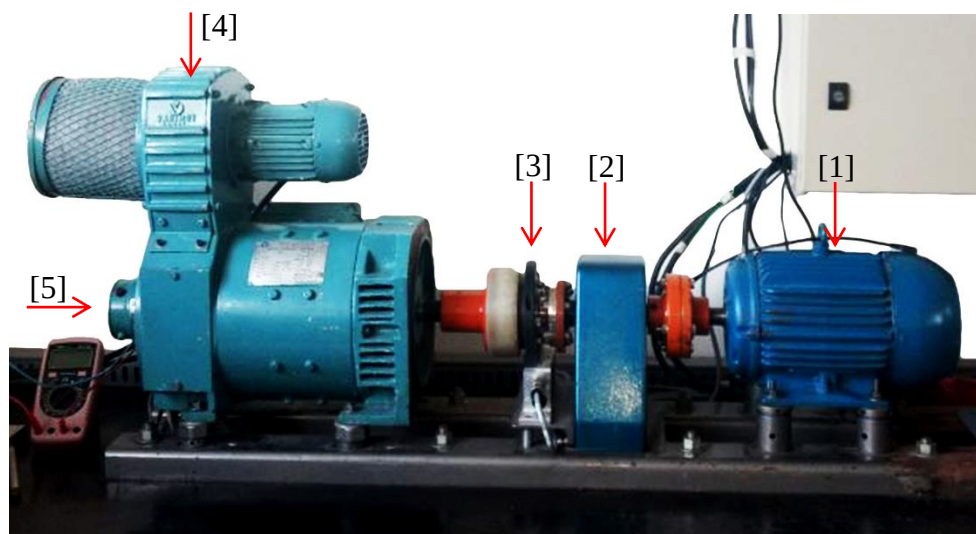


Figura 4.2- Ilustração dos principais componentes da bancada de torque controlável

A aplicação da carga ao motor de indução faz com que o mesmo tenha certa dificuldade em girar, pois o motor cc atua como um freio eletromagnético, permitindo gerar força contrária ao movimento do MIT gerando um torque no eixo. O varivolt atua como controlador da carga permitindo aumentar ou diminuir o campo eletromagnético do motor e consequentemente a impor carga ao eixo. O torque no MIT não deve ultrapassar muito o valor nominal, o que pode danificar eixos e o próprio motor.

Os valores medidos pelo torquímetro modelo HBM-T40B (que será mais bem caracterizado adiante) juntamente com o valor da velocidade no eixo permitem medir a potência de saída do motor, sendo imprescindível para o cálculo da eficiência. Os valores medidos serão utilizados como valores de referência e comparação com os valores estimados de torque, velocidade e eficiência do MIT em estudo.

4.1.1- Acionamento do motor de indução

O motor de indução trifásico utilizado é da fabricante Weg modelo W22 plus. A potência nominal de 5.0 cv com um F_s (fator de serviço) de 1.15 e rendimento nominal de 88.0%. O motor é dimensionado para operar com tensão 380/660 V em configuração Y/ Δ , com uma frequência de alimentação de 60 Hz em corrente alternada, possui 4 polos e uma velocidade nominal indicada em placa como sendo 1725 rpm lembrando que a velocidade pode variar devido a aspectos construtivos e carga aplicada. A carcaça

do motor é do tipo 100L (Lembrando que o tipo de carcaça pode ser definido pelo número de olhais e pela posição da caixa de ligação).



Figura 4.3-Motor elétrico de indução trifásico WEG W22 PLUS 5 cv.

O acionamento do motor de indução trifásico da bancada é feito de duas formas, utilizando partida direta através de contatores ou por meio do inversor de frequência. O inversor de frequência é um equipamento eletrônico que permite variar a velocidade do motor através da modulação da frequência da rede, quanto maior a frequência selecionada por meio o inversor maior será a velocidade de giro do motor. O inversor é bastante utilizado no meio industrial por ser robusto de fácil instalação e configuração além de reduzir o desperdício de energia elétrica.

O inversor de frequência utilizado na bancada é o modelo CFW 700 da WEG, podendo ser utilizado para controlar a velocidade em motores de até 30 cv envolvendo correntes próximas a 80 A, sendo possível também fazer o controle da velocidade usando o controle escalar ou o controle vetorial que pode ser programado como *sensorless* (sem necessidade de encoder). A figura 4.3 mostra a representação do modelo de inversor utilizado.



Figura 4.4-Modelo do Inversor de frequência WEG CFW 700 utilizado na bancada

O quadro de comando da bancada é composto pela parte de controle e de potência responsável por acionar o MIT pelos dois modos citados anteriormente, conta também com um contactor responsável pelo acionamento do exaustor do motor CC, além de conter a parte de instrumentação para aquisição dos sinais elétricos dos transdutores envolvidos no processo.

O quadro de comandos em sua parte externa é composto pela interface humano máquina (IHM) do inversor de frequência [1], por um mostrador display do voltímetro [2], uma botoeira para desligar o sistema em caso de irregularidade [3], um sinalizador luminoso para indicar partida direta [4], um sinalizador luminoso para indicar partida pelo inversor [5] e a chave seletora para escolher entre partida direta e partida pelo inversor [6]. Na parte interna do quadro de comandos o sistema consta com canaletas para passagem dos fios de potência e controle [7], contactores, disjuntores e sistemas de proteção para acionamento do circuito elétrico [8], placa de aquisição de dados DAQ USB-6215 [9], inversor de frequência [10], sensores de tensão e corrente para medição da potência de entrada [11].

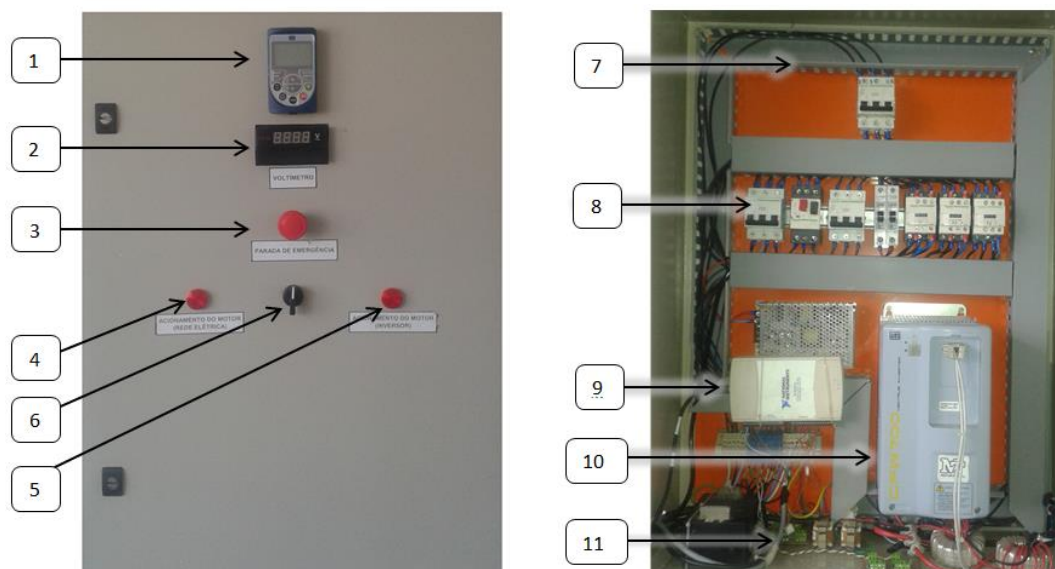


Figura 4.5-Quadro de comando da bancada parte externa e interna.

4.1.2- Motor CC

O motor CC utilizado é do fabricante VARIMOT tipo de carcaça 132 classe S com potência de 7,5 cv e velocidade de 1800 rpm, o motor é dimensionado para operar como aplicador de carga por frenagem eletromagnética, possui ventilação forçada que ajuda no resfriamento devido ao efeito Joule. A frenagem eletromagnética que provoca o torque é controlada através da tensão de armadura aplicada, o controle da tensão de

armadura é feito através um varivolt (variador de tensão) e um circuito retificador que serão abordados mais adiante.

Um motor elétrico pode operar em dois estágios, como motor ou como gerador. Como motor gera energia mecânica a partir da energia elétrica, já como gerador faz o processo contrário gerando energia elétrica através da energia mecânica por meio de movimento rotacional. O motor em aplicação na bancada funciona como gerador e a energia gerada é dissipada através de resistores de potência em série.



Figura 4.6-Motor de corrente contínua VARIMOT 132S

A carga aplicada para gerar torque é controlada por um JNG Varivolt com entrada de 220 V e saída de 250 V, corrente de 8A e frequência da rede de 50-60Hz, que é responsável por alterar a corrente de campo e assim obter uma carga controlável no eixo do MIT, permitindo trabalhar em uma grande faixa de operação desde torque zero até um torque que ultrapassa o valor nominal do motor em teste (não é recomendável aplicar torque muito acima do nominal ao motor em teste o que pode provocar falhas e sobreaquecer os banco de resistores).



Figura 4.7-Sistema de acionamento do motor CC, varivolt e circuito retificador

Arelado à saída do varivolt é conectado uma ponte retificadora a fim de converter a corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC), tendo em vista que tanto a entrada quanto a saída do variador de tensão é feita por corrente alternada. A ponte retificadora consiste de uma ponte de diodos com filtro capacitivo. A incitação do campo do motor CC feita após a retificação permite imprimir e controlar a carga imposta ao eixo do MIT. É importante salientar que a corrente de campo do motor CC não deve ultrapassar em demasia o valor nominal de 1A.

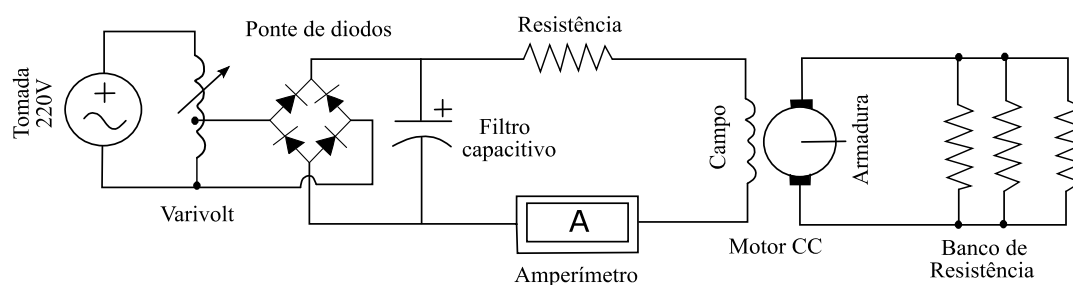


Figura 4.8-Circuito elétrico de acionamento do motor CC. (Fonte: Addissi, 2015)

Como a máquina utilizada para aplicar carga ao motor de indução esta funcionando como gerador ocorre geração de energia durante o processo de funcionamento da bancada, a energia excedente é dissipada através de um banco de resistores contendo quatro resistores de potência com 24Ω e 2000W, ligados em paralela a armadura do motor CC, durante um tempo prologando de testes com torque proximo do nominal o banco de resistores superaquece devido o efeito joule em resistores, para minimiazar o problema do aquecimento os mesmos são submetidos a ventilação mecânica por meio de um exaustor.



Figura 4.9-Resistores elétricos aletados conectados a armadura (Fonte:ADISSI, 2015)

4.1.3- Sistemas de medição

Para adquirir a potência de entrada do MIT são utilizados dois transformadores de potência (TP) e dois sensores de corrente. Os transformadores de potência reduzem a tensão de alimentação do motor de 380 Vrms para valores que sejam compatíveis com o conversor A/D, neste caso um DAQ NI 6215 que possui uma faixa de operação de entrada na ordem de ± 10 V. Durante a escolha do transformador de potência é preciso observar algumas características, tais como a composição estrutural e a curva de histerese, tendo em vista que pode haver atraso de fase entre o sinal de entrada do transformador e o que sai, podendo ocasionar uma coleta de dados errônea. Na bancada foram utilizados transformadores de grãos orientados.

O sensor de corrente por efeito hall ACS712, fabricados pela Allegro, apresenta simplicidade na instalação, alta velocidade na resposta e baixo custo além de poder ser empregado na medição de corrente contínua e alternada com altas frequências.

Os transformadores de potência utilizados são da marca *Tecnotrafo* com relação de tensão de 380 Vrms no primário para 3 Vrms no secundário. Já os TCs são da marca *Toroid®* com núcleo de grão orientado e com a seguinte relação de transformação: entrada do primário pode ser 1000 A, 500 A e 100 A e saída no secundário de 5 A. Depois de rebaixada a corrente o sensor de corrente por efeito *Hall* entra em ação, foi utilizado o sensor da marca *Allegro™* modelo ACS712.

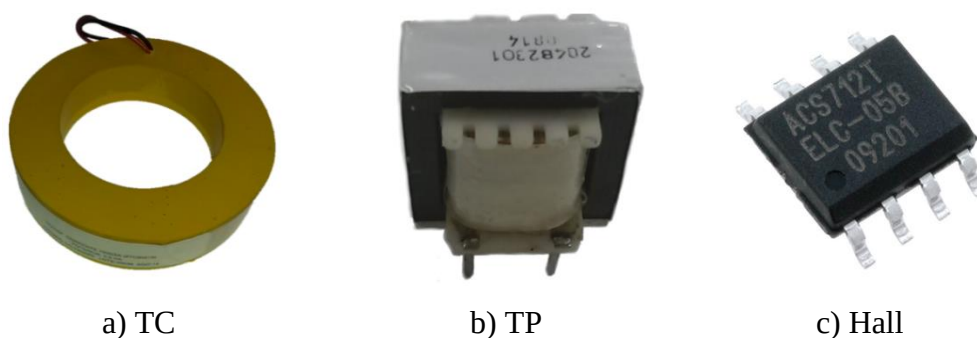


Figura 4.10-Componentes do sistema de conversão: a) Transformador de corrente; b) Transformador de potência; c) Sensor de corrente (efeito Hall). (Fonte: ADISSI,2015)

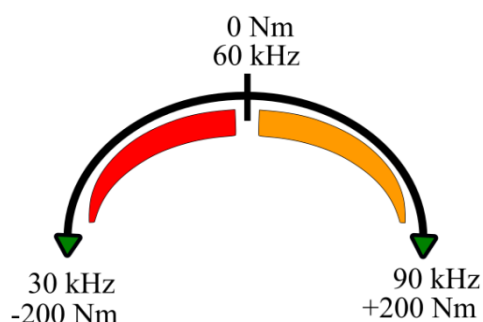
O torquímetro utilizado foi o modelo T40B-200 da HBM, que possui precisão de 0,1 Nm em fundo de escala, com capacidade de operar em torque nominal de até ± 200 Nm e rotações de até 20.000 rpm. O equipamento é robusto e preciso, utiliza uma antena circular para receber os dados de medição de torque do eixo, e possui duas

formas de saída de sinal que podem ser ligadas ao DAQ (Dispositivo de Aquisição de Dados) ou a qualquer outro sistema de análise e registro de dados compatível com sua plataforma de hardware e software.

O torquímetro possui dois canais de saídas, um deles com sinal na forma analógica apresentando um sinal modulado em tensão, numa faixa de -10 V à $+10\text{ V}$, variando linearmente, diretamente proporcional ao torque e sentidos de aplicação do torque indicados pelo sinal $-$ ou $+$ que depende do sentido de rotação do motor. A outra saída possui um sinal de torque modulado em frequência, onde a frequência varia também diretamente proporcional ao torque aplicado, na faixa de 30 kHz a 90 kHz , sendo o valor de 60 kHz equivalente à condição de ausência de torque ou torque zero, ou seja, para valores inferiores a 60 kHz o torque aplicado está num sentido enquanto para valores maiores de 60 kHz o sentido de aplicação do torque é oposto. Devido a maior precisão comprovada pelo fabricante foi utilizado o modo de coleta de dados usando a modulação por frequência.



a) Torquímetro



b) Torque modulador em frequência

Figura 4.11- Torquímetro a) modelo HBM-T40B-200 b) Escala no modo de frequência

O motor de corrente contínua possui um dínamo taquimétrico acoplado, que é um sensor analógico largamente utilizado em máquinas onde há a necessidade de medir a velocidade. Inicialmente foram coletados dados de velocidade através do dínamo taquimétrico, foi feita também uma calibração a fim de tornar mais preciso o valor da velocidade, para este propósito foi utilizado um estroboscópio da marca *Phiwe*, todavia o transdutor de velocidade apresentava uma grande quantidade de ruídos o que tornava a coleta de dados não muito precisa.

Com a finalidade de encontrar um valor de referência para a velocidade e assim comparar com o novo método proposto neste trabalho, foi utilizado um tacômetro ótico da *Minipa* modelo MDT-2238B que pode operar de duas maneiras: por contato e por foto detecção, como na bancada não é possível ter acesso ao eixo sem desmontar o mecanismo ou fazer adaptações utilizou-se o modo óptico. No modo foto, pode-se medir numa faixa entre 2,5 a 100000 rpm, com uma distância de detecção entre 50 a 500 mm, possui uma resolução de 1 rpm (acima de 1000 rpm no modo óptico) e uma precisão de (0,05% Leitura + 1 Dígito) a alimentação é feita através de 4 baterias AA com tensão de 1,5 V.

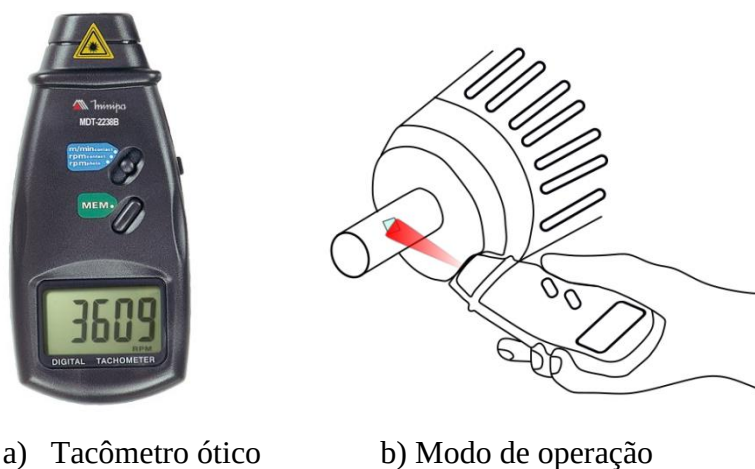


Figura 4.12-Tacômetro digital a) Modelo MDT-2238B b) Modo de operação óptico

O dispositivo de aquisição de dados utilizado (DAQ) foi o NI USB-6215 da *National Instruments*™ com 16 bits de resolução e uma taxa máxima de 250.000 amostras por segundo. O DAQ foi utilizado para obter os sinais elétricos, estes por sua vez, foram processados e então utilizados para obtenção de grandezas elétricas e mecânicas, como tensão e corrente de alimentação, via transformadores de tensão e de corrente (citados logo acima), a aquisição do torque também é realizada pelo DAQ. O torque medido em frequência pode ser obtido sem maiores dificuldade pelo Labview™, como a frequência do torquímetro pode chegar a 90 kHz pelo teorema de Nyquist o sinal amostrado deveria ter no mínimo 180 kHz de resolução, entretanto o DAQ utilizado possui clock interno de leitura e escrita que pode chegar a 20 MHz tornando possível a leitura de um sinal digital de 180 kHz. Utilizando o sistema Labview™ e DAQ é possível mensurar as menores variações de toque, todos os dados coletados são salvos em planilhas que podem ser acessadas facilmente por softwares como excel, Matlab, Origin, dentre outros.



Figura 4.13-Conversor analógico digital NI USB- 6215

O sistema embarcado de aquisição do sinal sonoro é baseado na plataforma arduino e suas bibliotecas foram totalmente desenvolvidas pelo pesquisador do GPICEEMA VASCONCELOS-LIMA (2017) em seu trabalho de tese de doutorado.

A aquisição do sinal sonoro, emitido pelo MIT, foi feita através de um sistema embarcado que é composto substancialmente por uma plataforma de desenvolvimento, Arduino DUE e por um microfone condensador de eletreto CMA-4544PF-W. O Arduino DUE possui elevadas capacidades computacionais, conta com um microcontrolador arm de 32 bits além de uma frequência de aquisição que pôde ser previamente estabelecida para operar com o valor de 44,1 kHz. Na figura 4.14 é possível visualizar o sistema embarcado.

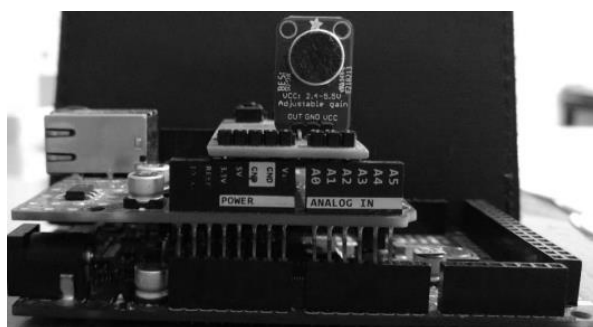


Figura 4.14-Sistema embarcado utilizado para aquisição do som

O microfone CMA-4544PF-W é um microfone omnidirecional com sensibilidade de 44 dB e com frequência de operação de 20 Hz até 20 kHz. A sua curva de resposta em frequência é bem estável, vide figura 4.15, caracterizando-o como um bom mecanismo de tradução.

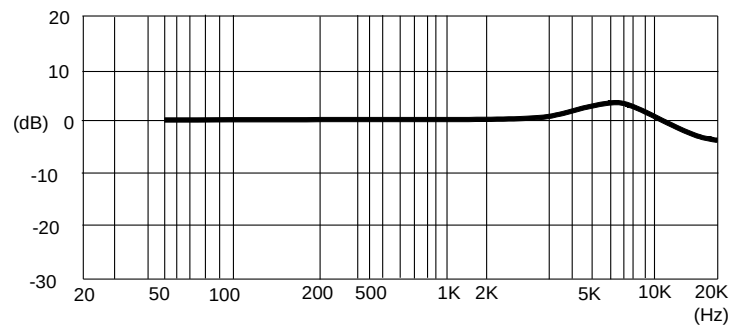


Figura 4.15-Curva de resposta em frequência do microfone CMA-4555PF-W

Todos os sinais coletados, referentes aos sensores da bancada, foram adquiridos através do conversor A/D USB-6215 e de um algoritmo desenvolvido em linguagem G no Labview™.

Capítulo 5

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

No presente capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos experimentos realizados na bancada de torque controlável. A partir de diferentes testes o sistema é validado. São obtidas curvas de velocidade, torque e eficiência a partir do método proposto. Os resultados de torque e eficiência são comparados com o método do torque no entreferro.

5.1– RESULTADO DA MEDIÇÃO TORQUÍMETRO HBM T40B

Com o intuito de determinar o resultado da medição (RM) para o torque no eixo do motor, foram realizadas 90 medições com condições constantes de carga. Por meio do conversor A/D NI USB-6215 as medições puderam ser feitas automaticamente, utilizou-se como referência um Valor Verdadeiro Convencional (VVC) que estivesse próximo ao torque nominal do motor. As medições foram realizadas com a imposição de um torque constante de 21 Nm, motor a uma frequência de 60 Hz e velocidade de 1730 rpm. Para a análise dos dados, referente ao torque foi utilizado o software de análise de dados estatísticos Minitab™ (V17).

Tabela 5-1-Dados coletados

#n	I	C	Ic	#n	I	C	Ic	#n	I	C	Ic
1	20,548	0,302	20,850	31	20,719	0,302	21,021	61	20,734	0,302	21,036
2	20,659	0,302	20,961	32	21,036	0,302	21,338	62	20,696	0,302	20,998
3	20,806	0,302	21,108	33	20,983	0,302	21,285	63	20,679	0,302	20,980
4	20,930	0,302	21,232	34	20,741	0,302	21,043	64	20,623	0,302	20,924
5	20,999	0,302	21,300	35	20,633	0,302	20,935	65	20,579	0,302	20,881
6	20,700	0,302	21,002	36	20,662	0,302	20,964	66	20,435	0,302	20,736
7	20,676	0,302	20,978	37	20,875	0,302	21,177	67	20,350	0,302	20,652
8	21,012	0,302	21,313	38	20,821	0,302	21,122	68	20,415	0,302	20,717
9	21,042	0,302	21,344	39	20,526	0,302	20,827	69	20,620	0,302	20,922
10	20,812	0,302	21,113	40	20,584	0,302	20,886	70	20,818	0,302	21,120

11	20,741	0,302	21,042	41	20,718	0,302	21,019	71	20,846	0,302	21,148
12	20,738	0,302	21,040	42	20,672	0,302	20,974	72	20,708	0,302	21,009
13	20,880	0,302	21,182	43	20,605	0,302	20,906	73	20,624	0,302	20,925
14	20,975	0,302	21,276	44	20,540	0,302	20,841	74	20,706	0,302	21,008
15	20,808	0,302	21,110	45	20,475	0,302	20,777	75	20,970	0,302	21,271
16	20,709	0,302	21,011	46	20,489	0,302	20,791	76	20,867	0,302	21,168
17	20,892	0,302	21,193	47	20,549	0,302	20,851	77	20,599	0,302	20,901
18	21,046	0,302	21,348	48	20,496	0,302	20,798	78	20,594	0,302	20,896
19	20,827	0,302	21,129	49	20,456	0,302	20,758	79	20,786	0,302	21,088
20	20,632	0,302	20,934	50	20,548	0,302	20,850	80	20,806	0,302	21,108
21	20,707	0,302	21,009	51	20,888	0,302	21,190	81	20,712	0,302	21,014
22	20,737	0,302	21,039	52	20,965	0,302	21,267	82	20,640	0,302	20,942
23	20,755	0,302	21,057	53	20,685	0,302	20,987	83	20,706	0,302	21,008
24	20,699	0,302	21,000	54	20,495	0,302	20,797	84	20,707	0,302	21,009
25	20,511	0,302	20,813	55	20,782	0,302	21,084	85	20,485	0,302	20,787
26	20,453	0,302	20,754	56	21,094	0,302	21,396	86	20,374	0,302	20,675
27	20,541	0,302	20,842	57	20,813	0,302	21,115	87	20,352	0,302	20,653
28	20,618	0,302	20,920	58	20,460	0,302	20,762	88	20,492	0,302	20,794
29	20,590	0,302	20,892	59	20,602	0,302	20,903	89	20,770	0,302	21,072
30	20,542	0,302	20,844	60	20,784	0,302	21,086	90	20,872	0,302	21,174
I- Indicação				C- Correção				Ic-Indicação corrigida			
								Média	20,698	0,302	21

Geralmente a incerteza-padrão é expressa na forma de desvio-padrão. Segundo o Guia para expressão de incerteza de medição (GUM, 2012), incerteza de medição é o parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. A incerteza padrão é a incerteza do resultado de uma medição expressa como um desvio-padrão.

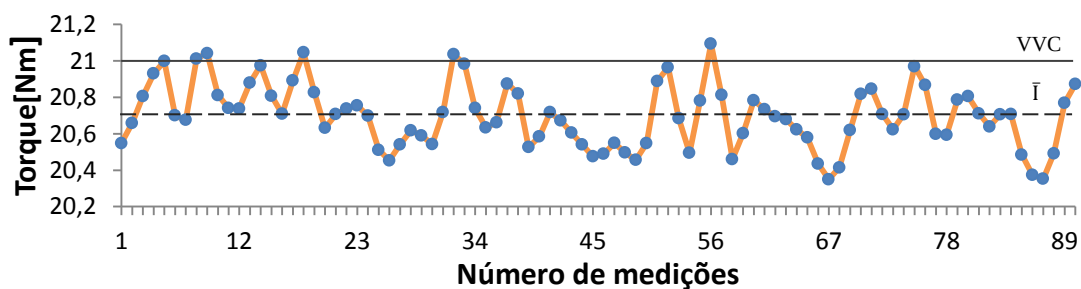


Figura 5.1- Amostras de torque para um valor verdadeiro convencional de 21 Nm

A aquisição do torque feita por meio do sistema de medição, composto essencialmente pelo torquímetro e pelo conversor A/D permitiu coletar 90 medições e para um torque com VVC de 21 Nm. A média para as N amostras foi de 20,689 Nm com uma tendência de 0,302 Nm, com valor máximo de 21,094 Nm e mínimo de 20,374, seguindo o manual do torquímetro foram consideradas três casas decimais. No

Histograma da figura 5.2 é possível verificar a distribuição da frequência das medições para uma distribuição normal com desvio padrão 2σ .

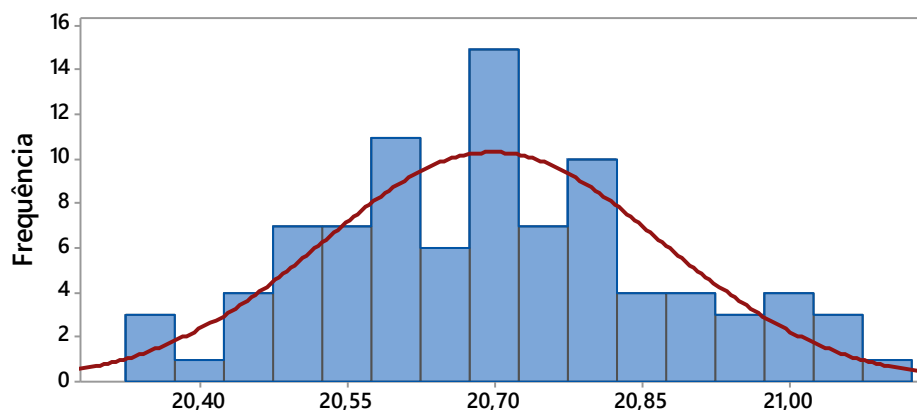


Figura 5.2-Histograma com a distribuição normal das amostras

Como o mensurando (torque) possui comportamento variável, a incerteza-padrão foi calculada pela Equação (5.1) e a repetitividade pela Equação (5.2):

$$u(I) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (I_k - \bar{I})^2}{n - 1}} \quad (5.1)$$

Sendo:

$u(I)$ → Incerteza-padrão das indicações calculadas a partir de “n” medições repetidas

I_k → K-ésima indicação

$\bar{I}$ → A média das “n” indicações

n → O número de indicações repetidas efetuadas

$$Re = t \cdot u \quad (5.2)$$

Tabela 5-2-Dados estatísticos das 90 medições. Fonte: Própria

Variáveis	Valores
Correção – C	0,302
Incerteza Padrão – u	0,173
Graus de liberdade – $v = n-1$	89
Coeficiente t de Student – t ($2\sigma=95,45\%$)	2,028
Repetitividade – Re	0,158

Com base nas variáveis estatísticas obtidas das Tabelas 5.1 e 5.2, calculou-se o RM através da Equação (5.3), portanto para a área da curva normal com 95,45% o resultado da medição pôde ser estabelecido pela seguinte relação:

$$RM = \bar{I} + C \pm \frac{Re}{\sqrt{n}} \quad (5.3)$$

$$RM = 20,698 + (0,302) \pm 0,037$$

$$RM = (21,0 \pm 0,037) \text{ Nm}$$

5.2 – PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Para os experimentos optou-se por realizar testes no MIT através do acionamento por partida direta, uma escala de torque foi utilizada com valores que variam de 0 até 24 Nm. Vale ressaltar ainda que as aquisições foram realizadas com carga constante.

5.3- ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE NO EIXO

Usando o sistema embarcado baseado na plataforma arduino foi possível fazer a aquisição do sinal sonoro para cada faixa de torque. O tempo de aquisição utilizado foi de 60 segundos para cada valor de torque. Na medição do torque foi utilizado o torquímetro HBM T40B-200, já para medir a velocidade utilizou-se um tacômetro modelo MDT-2238B da Minipa. Na tabela abaixo estão representados os valores obtidos em cada aquisição, e posteriormente o gráfico do torque vs velocidade.

O gráfico torque vs velocidade figura 5.3, permite demonstrar que o torque e a velocidade são inversamente proporcionais e que neste caso, o erro relativo entre as duas curvas apresentaram um valor médio de 0,05% com desvio 0,03.

O motor de indução trifásico utilizado tem uma potência de 5,0 cv e 4 polos, com velocidade síncrona de 1800 rpm a 60 Hz. O escorregamento médio foi de 2,19% para as nove medições de velocidade, enquanto para as estimações da velocidade o escorregamento médio ficou em torno de 2,22 %.

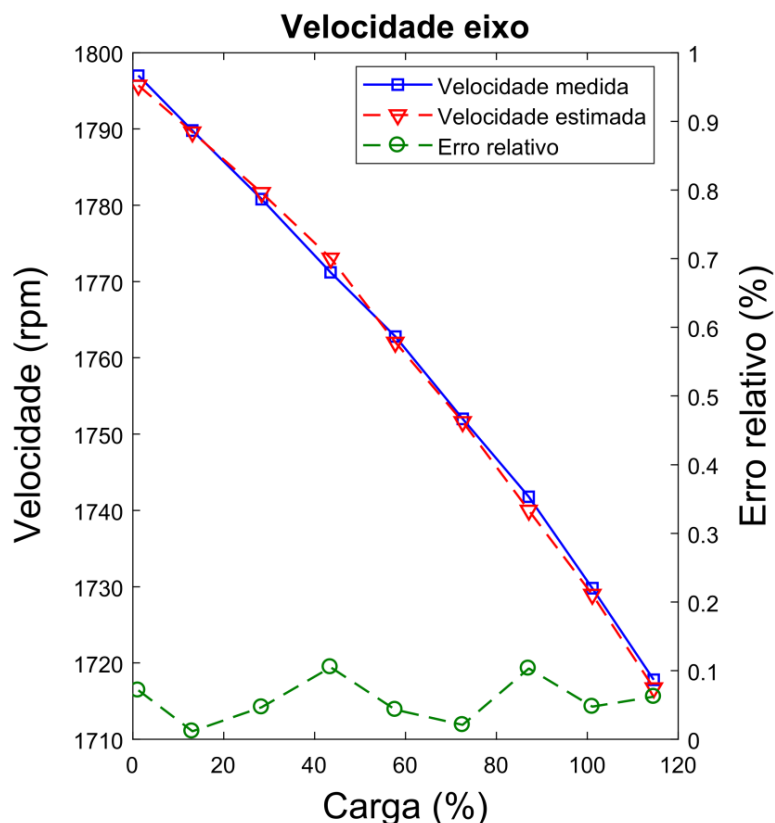


Figura 5.3- Valor medido vs valor estimado e o erro relativo entre as duas medições.

A velocidade medida e estimada foram bem próximas, comprovando a eficácia do método de estimação da velocidade através da análise sonora do MIT. Também mostrou-se aplicável, funcional e sem qualquer tipo de invasão ao motor.

Uma relação linear pode ser observada ao traçar o gráfico da velocidade medida vs a velocidade estimada. Usando uma regressão linear simples é possível verificar através da equação de regressão como as duas variáveis se relacionam e assim usar a equação para prever o valor de correlação entre os dois valores de torque, estimado e medido. Na figura 5.4, observa-se a curva dos valores das velocidades e a linha de regressão linear, bem como a função de regressão estimada que descreve seu comportamento.

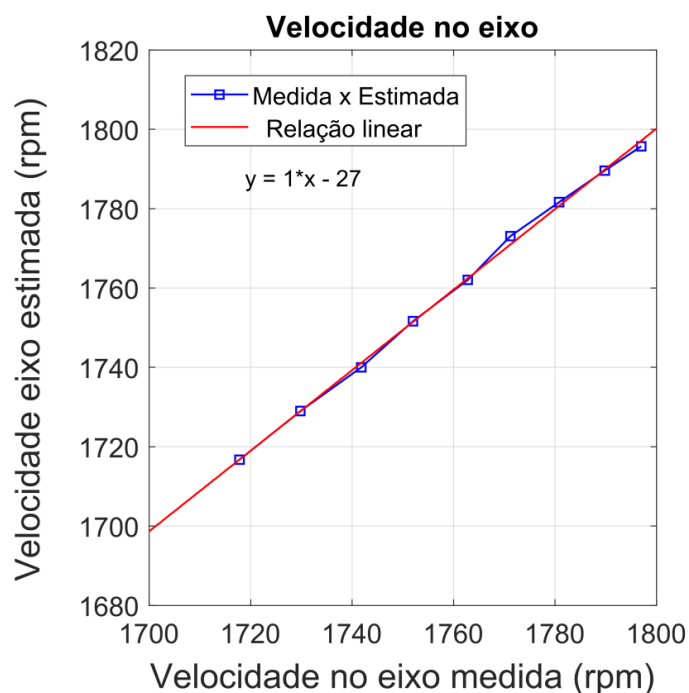


Figura 5.4-Regressão linear da velocidade medida vs velocidade estimada

5.4- ESTIMAÇÃO DO TORQUE NO EIXO

Na bancada de torque controlável o torquímetro HBM T40B-200 foi utilizado para medir o torque no eixo e os valores obtidos usados como valores de referência. Uma escala de torque variando de 0 a 24 Nm foi utilizada como referência de valores. Na figura 5.5 é possível observar de forma gráfica os valores para o torque medido e para o torque estimado.

Para melhor comparação entre os resultados medidos e estimados do torque, foi feita uma análise de regressão linear simples, que pode ser encontrada no apêndice A.1 no final deste trabalho, o que permite verificar também o nível de correlação entre as grandezas medidas e estimadas.

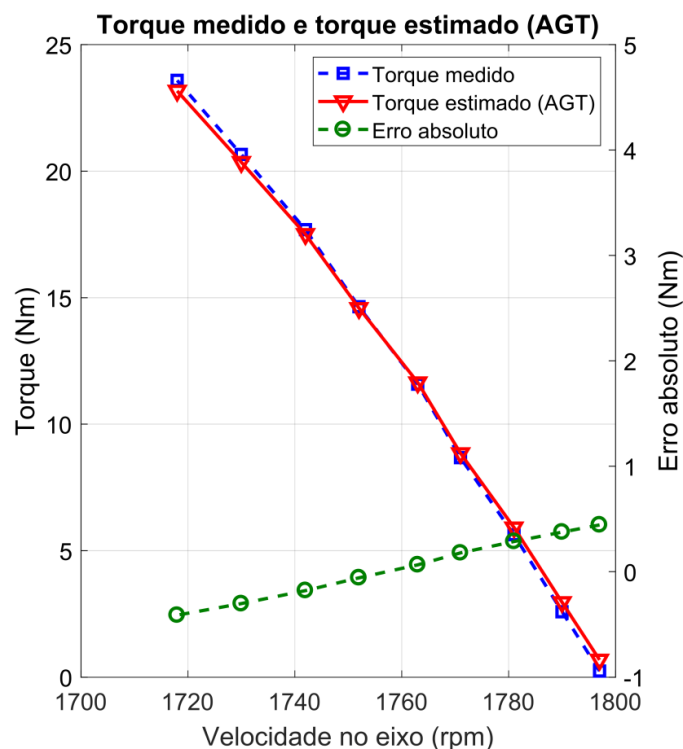


Figura 5.5- Torque medido e torque estimado usando Air Gap Torque (AGT)

Na figura 5.5, percebe-se a proximidade dos valores medidos e estimados, com média de 11,70 Nm para os valores de referência medido e 11,74 Nm para os valores estimados usando torque no entreferro. O erro absoluto entre os valores medidos e estimados demonstra o quanto o método é preciso, com valor máximo de 0,44 Nm e mínimo de -0,41 Nm. Uma maior variação do erro para os dois primeiros pontos pode ser pelo fato do motor em estudo estar acoplado ao motor CC e mesmo sem carga aplica, este aplica um torque resultante da massa do conjunto, sendo assim, o torque não parte de um valor nulo.

O torquímetro de referência utilizado tem a capacidade de operar em torque nominal de até 200 Nm e rotações de até 20.000 rpm, o motor em estudo por sua vez possui um torque nominal de 25 Nm e velocidade nominal de 1725 rpm, ou seja, 1/8 da capacidade de operação do torquímetro é utilizada no processo. Através dos vários testes e aquisições realizadas com o torquímetro percebeu-se que os valores de torque abaixo de 9 Nm oscilavam bastante, o que não mostrava consistência para pequenos valores de torque.

Na análise gráfica da figura 5.6 os valores medidos e estimados usando análise sonora, são confrontados. O valor estimado acompanha bem o valor de referência, o que demonstra a eficácia do novo método. Para este método o erro absoluto máximo foi de

1,88 Nm enquanto o erro absoluto mínimo -0,47 Nm, com os demais valores oscilando entre esses dois extremos. Para torques muito pequenos, abaixo de 5 Nm, o método utilizando a análise sonora não convergiu como o esperado. Acima de 5 Nm o método convergiu satisfatoriamente, demonstrando assim, bom desempenho. O valor estimado acompanha bem o valor de referência, o que demonstra a eficácia do novo método.

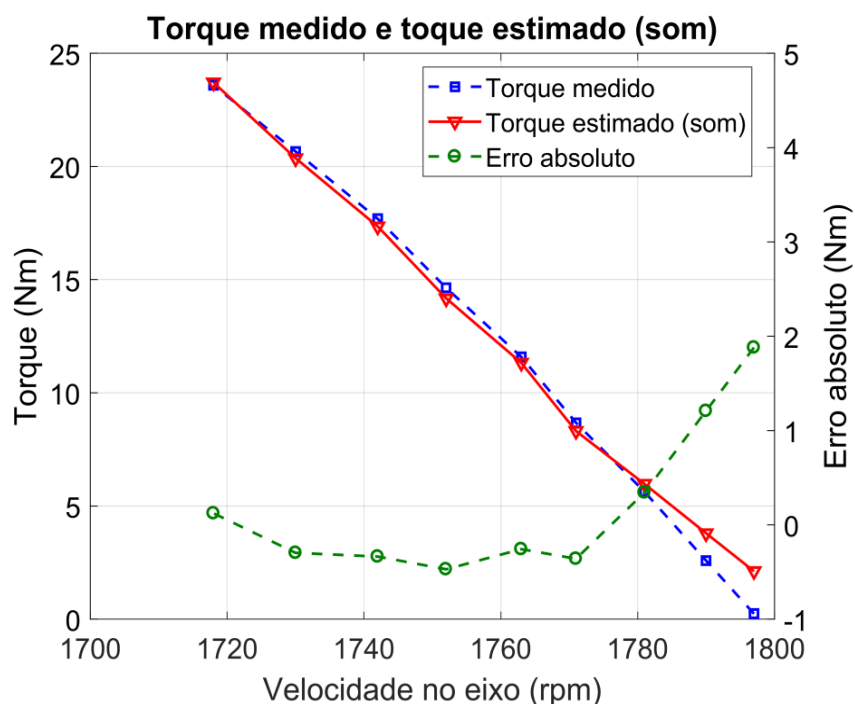


Figura 5.6-Torque medido e torque estimado pelo método da análise sonora

Na figura 5.7 os valores estimados e de referência foram confrontados. Percebe-se que os valores estimados acompanham bem o valor de referência. Todavia, conforme visto nos dois casos anteriores a estimação do torque tanto pelo método do torque no entreferro quanto pelo método da análise sonora oscilaram com torques abaixo de 6 Nm. Geralmente sistemas de medição precisam passar por uma calibração, com o intuito de atender com plenitude o fim para o qual foi projetado, que é medir algum tipo de grandeza. Com essa temática, a fim de melhorar a precisão da estimação do torque para valores pequenos poderia-se pensar numa forma de calibrar o método de estimação usando a análise sonora do MIT, entretanto tais melhorias podem ser feitas em trabalhos futuros.

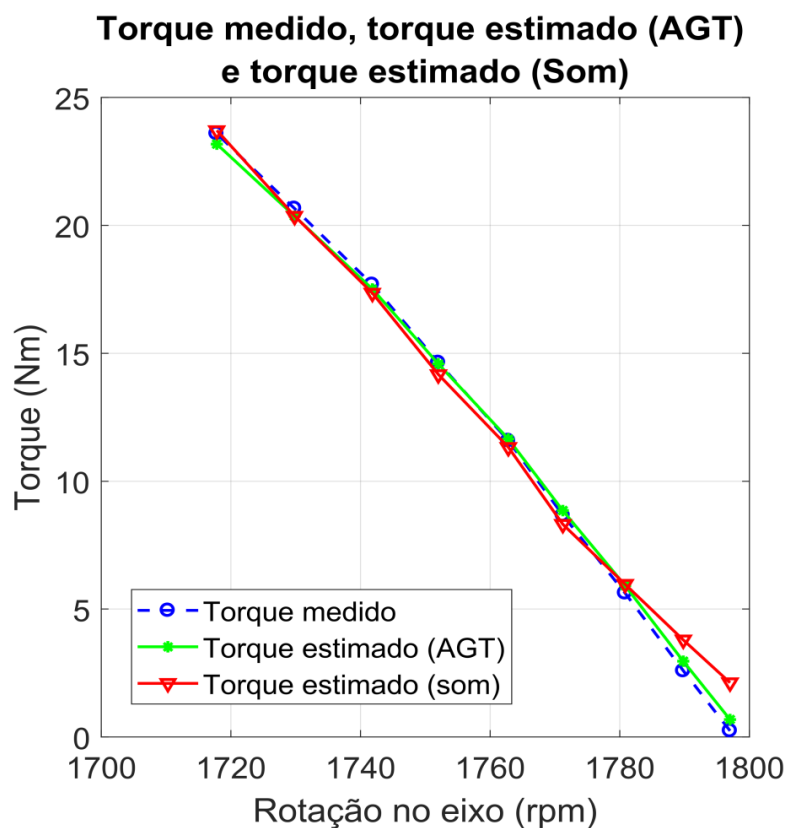


Figura 5.7- Comparação entre os valores medidos e os dois valores estimados.

5.5- ESTIMAÇÃO DA EFICIÊNCIA

A eficiência medida foi comparada a eficiência estimada, usando o método do torque no entreferro e com a eficiência estimada usando o método da análise sonora. No método medido sensores de corrente e de tensão foram utilizados para obter a potência de entrada e um torquímetro e tacômetro utilizados para obter a potência de saída, já usando o torque no entreferro somente dois sensores de tensão e dois de corrente, já no método através da assinatura sonora do motor apenas o som emitido pelo MIT captado pelo sistema embarcado.

Tanto para o método de estimação usando o torque no entreferro quanto para o método utilizando o som, as perdas devem ser levadas em consideração, no levantamento da curva da eficiência os valores das perdas foram obtidos através de valores nominais tabelados como pode ser vista na tabela 3.1.

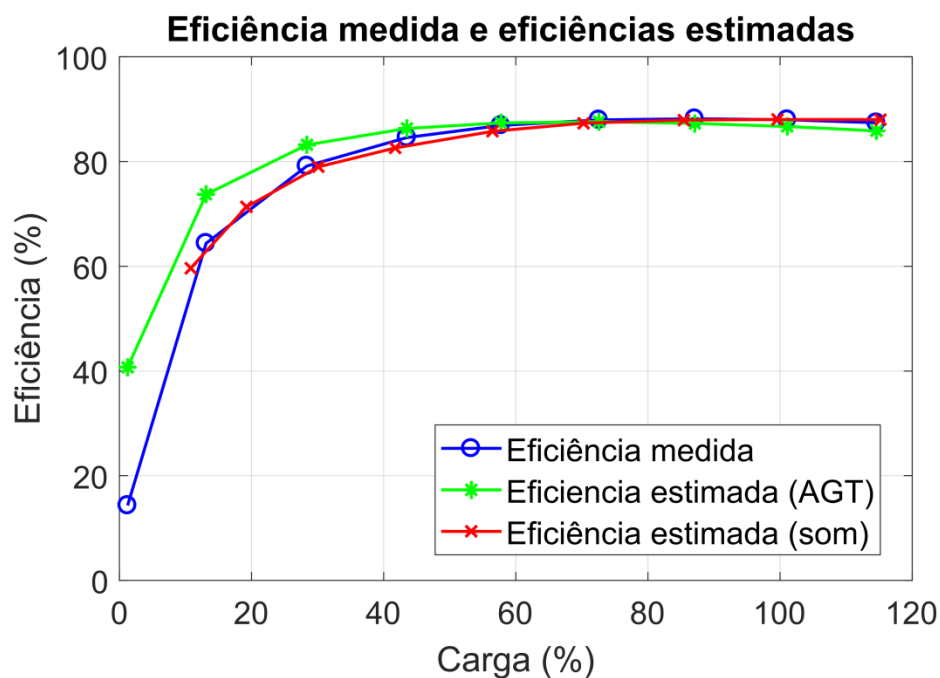


Figura 5.8-Curvas de eficiência, medida, estimada (AGT) e estimada (som)

A curva da eficiência medida foi utilizada como referência e acompanhou bem a curva de eficiência catalogada pelo fabricante do motor, como pode ser vista na figura 3.11. A eficiência estimada pelo torque no entreferro teve uma leve acentuação se compara a curva medida, passando a se estabilizar quando a carga atinge 40 %. A eficiência estimada pela análise sonora do MIT, para o trecho inicial da aplicação da carga, ligeiramente abaixo de 10%, não convergiu, partindo com uma eficiência relativamente alta, o que não vai de acordo com a literatura, entretanto, valores carga aplicada acima de 10% convergiram bem.

A estimação da eficiência parte a partir da estimação do torque, que por sua vez advém da estimação da velocidade. Como visto no item 5.4 os valores de torques abaixo de 6 Nm apresentam menos precisão, o que consequentemente acaba influenciando também na estimação da eficiência. No entanto, pontos de melhorias foram identificados, dentre eles, a necessidade de desenvolver um método de calibração deste sistema, e desta forma aumentar o grau de confiabilidade dos dados reduzindo-se as incertezas de medição.

Capítulo 6

CONCLUSÃO

No presente trabalho foram realizados estudos com o intuito de desenvolver e validar um sistema para estimar a velocidade de rotação no eixo, o torque e a eficiência em motores de indução em operação, tendo como principal objetivo desenvolver um método que fosse totalmente não invasivo. Foi realizada uma revisão bibliográfica a fim de levantar o estado da arte do que há de mais recente no que diz respeito a métodos de estimação da eficiência em motores de indução em operação com mínima invasibilidade. A partir deste estudo ficou caracterizado que o método do torque no entreferro atendia bem os requisitos de baixa invasão ao corpo do motor, em contra partida ainda tinha certo índice de invasão. Assim sendo, partiu-se em busca de um método que fosse totalmente não invasivo, e optou-se pelo estudo do sinal sonoro emitido pelo MIT.

A estimação da velocidade, torque e da eficiência em motores em operação é de grande importância para evitar paradas por quebras mecânicas em eixos e reduzir o desperdício de energia elétrica nos mais diversos setores industriais nos quais os motores de indução trifásicos são utilizados.

Os experimentos foram realizados utilizando a bancada de torque controlável do laboratório do GPICEEMA. Os valores medidos da velocidade, torque e eficiência foram confrontados com os valores estimados pelos métodos do torque no entreferro e da análise sonora emitida pelo MIT.

O sistema proposto, usando a análise sonora do MIT, possui desvantagens de não poder ser aplicado em motores reconicionados e apresenta erros se for usado em sistemas de alimentação desbalanceados, possuindo uma incerteza maior que os métodos baseados no torque no entreferro, porém é o único totalmente não invasivo.

O método de estimação usando análise sonora mostrou alta exatidão para a estimação da velocidade no eixo, como pode ser observado na seção 5.3. A estimação do torque também foi satisfatória, todavia abaixo de 6 Nm, não convergiu como o esperado, o que é aceitável tendo em vista a dificuldade encontrada até para sistemas de medição que medem o torque diretamente no eixo do motor. A eficiência do MIT pelo

método da análise sonora também mostrou bons resultados o que permitiu validar o método.

Para trabalhos futuros sugere-se um estudo para melhorar o sistema de medição do torque, utilizando o torquímetro, e das tensões e correntes de alimentação do motor; eliminando fontes de erros que causam imprecisão nas medições, como: fontes de ruídos provenientes dos cabos de alimentação que são muito próximos dos cabos de dados que transmitem sinais, além de desalinhamento dos eixos mecânico que causa torques residuais.

Um software embarcado também pode ser desenvolvido com o intuito de implementar remotamente o novo método proposto, além de algoritmos de classificação e otimização serem implementados, a fim de conferir uma maior imunidade a ruídos.

Referências bibliográficas

ADISSI, M. O. **Sistema Embarcado para Estimação de Torque, Velocidade e Eficiência em Motores de Indução**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFPB. João Pessoa- Paraíba, 2012.

ADISSI, M. O. **Estudo e Desenvolvimento de Sistema de Monitoramento da Eficiência Energética em Motores Elétricos na Indústria**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFPB, João Pessoa- Paraíba 2015.

ANDRADE, C. T. C.; MOREIRA, A. B.; PONTES, R. S. T. Análise comparativa de métodos para cálculo de eficiência de motores de indução em operação. **III Congresso Brasileiro de Eficiência Energética - CBEE 2009**, 2009.

ANDRADE, C. T. D. C. **Análise de Métodos para Determinação da Eficiência de Motores Trifásicos de Indução**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFC, Fortaleza-Ceará, 2009.

ANJOS, E. G. et al. Sistema de Teste Para um Torquímetro Dinâmico Telemétrico Aplicado a Eixos Rotativos. p. 1–6, 2008.

BLASCO-GIMENEZ, R. et al. Performance of FFT-rotor slot harmonic speed detector for sensorless induction motor drives. **IEE Proceedings - Electric Power Applications**, v. 143, n. 3, p. 258, 1996.

BORGES, J. C. DA S. **Estudo e Desenvolvimento de um Transdutor de Torque Para Eixos Rotativos por Meio de Sensores de Efeito Hall**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFPB, João Pessoa - Paraíba, 2015.

Borges, J. C. S., De Deus, D. B. B., Lima Filho, A. C. and Belo, F. A., 2017 "New Contactless Torque Sensor Based on the Hall Effect," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 16, pp. 5060-5067.

BRANDT, R. **Análise de Métodos de Baixa Intrusividade Para Estimativa da Eficiência de Motores Trifásicos de Indução**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica - UFRS, Porto Alegre-RS, 2011.

BREEN, T. B. B. et al. A demonstration of a sensorless torque meter for AC motors. **IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting**, v. 1, p. 633–637, 1996.

BRITO, R. M. DE. **Sistema Eletro-Eletrônico para Medição Direta de Torque em Dispositivos Girantes Utilizando Extensômetros de Resistência Elétrica**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Metalúrgica e dos Materiais - UFRGS, Porto Alegre - RS, 1994.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5 edição ed. [s.l.] Bookman,

2013.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Métodos Numéricos para Engenharia**. 5ª edição ed. Bookman, 2011.

COOLEY, J. W.; TUKEY, J. W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. **Mathematics of Computation**, v. 19, n. 90, p. 297, 1965.

DA SILVA, L. E. B. et al. Differential Evolution based Air-Gap Torque method approach for induction motor efficiency estimation. **2015 18th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, ISAP 2015**, 2015.

DINIZ, P. S. R.; SILVA, E. A. B. DA; NETTO, S. L. **Processamento Digital de Sinais Projeto e Análise de Sistemas**. 2ª edição ed. [s.l: s.n.].

ELMALEEH, M. A. A.; SAAD, N. Acoustic emission techniques for early detection of bearing faults using LabVIEW. **Proceeding of the 5th International Symposium on Mechatronics and its Applications, ISMA 2008**, 2008.

FONSECA, N. **Introdução à Engenharia de Som**. 1ª edição ed. [s.l: s.n.].

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 3 Edição ed. São Paulo: [s.n.].

GABOR, D. Theory of communication. Part 1: The analysis of information. **Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Radio and Communication Engineering**, v. 93, n. 26, p. 429–441, nov. 1946.

GHAVIDEL, A. et al. LTS: Linear Task Scheduling on Multiprocessor through Equation of the Line. p. 6, 2015.

HAYKIN, S.; MOHER, M. **Introdução aos sistemas de comunicação**. [s.l: s.n.].

HURST, K. D.; HABETLER, T. G. A comparison of spectrum estimation techniques for sensorless speed ndetection in induction machines. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 33, n. 4, p. 898–905, 1997.

IEEE MACHINERY COMMITTEE. **IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators**. [s.l: s.n.]. v. 2004.

INMETRO, I. N. DE M.; TECNOLOGIA, Q. E. **GUM 2008 - Guia para a expressão de incerteza de medição**. [s.l: s.n.].

IPQ. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. 1ª edição ed. Duque de Caixias, RJ: INMETRO, 2012, 2012.

JACOB, A.; JOSE, V.; SEBASTIAN, D. Energy Management by Online Efficiency Estimation and Condition Monitoring of Induction Motor. **International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering**, v. 3, n. 5, p. 286–294, 2014.

KARUNAKAR, Y.; KUWADEKAR, A.; AL BEGAIN, K. A mobile based application for detecting fault by sound analysis in car engines using triangular window & wavelet transform. **Proceedings - 2010 International Conference on Computational Intelligence and Communication Networks, CICN 2010**, p. 523–528, 2010.

KEMALKAR, A. K.; BAIRAGI, V. K. Engine Fault Diagnosis Using Sound Analysis. n. March, p. 943–946, 2016.

KOTAK, V. Improvising Strategies For Efficiency of IE 4 SCIM. p. 3932–3936, 2016.

LIMA FILHO, A. C. **Estudo e Desenvolvimento de Soluções para Determinação do Torque em Unidades de Bombeio Mecânico Utilizadas na Extração de Petróleo**. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-UFPB. João Pessoa-PB, 2009.

LU, B. **Energy Usage Evaluation and Condition Monitoring for Electric Machines Using Wireless Sensor Networks**. [s.l.] Georgia Institute of Technology, 2006.

LU, B.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. A survey of efficiency-estimation methods for in-service induction motors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 42, n. 4, p. 924–933, 2006.

LU, B.; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. A nonintrusive and in-service motor-efficiency estimation method using air-gap torque with considerations of condition monitoring. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 44, n. 6, p. 1666–1674, 2008.

LU, B. L. BIN; HABETLER, T. G.; HARLEY, R. G. A Survey of Efficiency Estimation Methods of In-Service Induction Motors with Considerations of Condition Monitoring Requirements. **IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005.**, p. 1365–1372, 2005.

LYRA, G. J. **Análise de métodos para estimação da velocidade no eixo de motores de indução trifásicos**. Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica- UFPB, João Pessoa- Paraíba, 2014.

LYRA, G. J. et al. Análise de métodos para estimação da velocidade no eixo de motores de indução trifásicos. n. 1, p. 15, 2016.

Ministério de Minas e Energia- **Plano Nacional de Eficiência Energética**- Brasil, 2011.

MELLO, C. A. Processamento digital de sinais. In: UFPE, C. DE INFORMÁTICA- (Ed.). . Recife: [s.n.]. p. 321.

OJO, J. O. et al. Measurement and computation of starting torque pulsations of salient pole synchronous motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 5, n. 1, p. 176–182, 1990.

OLIVEIRA, H. M. DE. **Análise de Fourier e Wavelets: Sinais Estacionários e não estacionários**. Recife- Pe: [s.n.].

PRAINETR, S.; SANTI WANGNIPPANTO, S. T. Detection Mechanical Fault of Induction Motor Using Harmonic Current and Sound Acoustic. n. March, p. 8–10, 2017.

ROQUE, L. A. A. DE M. **Estimação da Velocidade do Motor de Indução através do Algoritmo de Aproximação Senoidal na Corrente do Estator**. Itajubá- MG: Universidade Federal de Itajubá, 2015.

SALOMON, C. P. **Estimação da Eficiência de Motores de Indução Considerando apenas as Grandezas Elétricas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. UNIFEI, Itajubá- MG, 2014.

SAMAT, S. A.; TAHIR, S. M.; ZURI, A. Engines condition monitoring based on spectrum analysis of sound signals. n. 6, 2001.

SENA, A. P. C. DE. **Estratégia para estimação do conjugado eletromagnético de motores de indução**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. UFPB, João Pessoa- PB, 2011.

SENS, E. M. Avanços tecnológicos nos motores elétricos. p. 11–13, 2001.

WANG, W.; HUANG, Q.; ZHANG, Y. On the Motor Fault Diagnosis Based on Wavelet Transform and ANN. p. 5339–5346, 2012.

WEG. **Gestão eficiente da energia elétrica-Motores elétricos, inversores de frequência e geração solar**. REV-3, Jaraguá do Sul, 2016.

WEG. **Motores Elétricos Guia de Especificação**. Jaraguá do Sul, 2014.

Apêndice A – Análise de regressão linear simples e correlação para os valores de torque medidos e estimados

A.1- Análise de regressão linear simples dos valores do torque medido e estimados

A fim de fazer uma análise de como os valores medidos e estimados se relacionam, foi feita uma regressão linear simples com o intuito de verificar a correlação entre os mesmos. Verificando os valores medidos, através do torquímetro, e dos valores estimados, pelo método do torque no entreferro e pelo método da análise sonora do MIT.

A.1.1- Regressão Linear simples para os valores medidos e estimados usando o método do torque no entreferro.

Tabela A.1- Torque medido e estimado (AGT)

Torque medido*	Torque estimado (AGT)*
0,24	0,69
2,59	2,96
5,63	5,91
8,67	8,85
11,58	11,65
14,64	14,58
17,69	17,51
20,66	20,36
23,59	23,17
* Valore em Nm	

A regressão linear pode ser expressa através de uma função que relaciona os valor x e y e pode ser expressa como uma função do tipo: $y = a + bx$, onde y é a variável depende e x é a variável independente, a e b são os coeficientes linear e angular, respectivamente.

A equação ajustada para o modelo linear que descreve a relação entre o valor estimado y, torque estimado pelo método AGT e o valor medido x, torque medido, pode ser expressa pela equação $Y = 0,4817 + 0,9626X$ que relaciona as duas variáveis, dando previsibilidade a variável dependente.

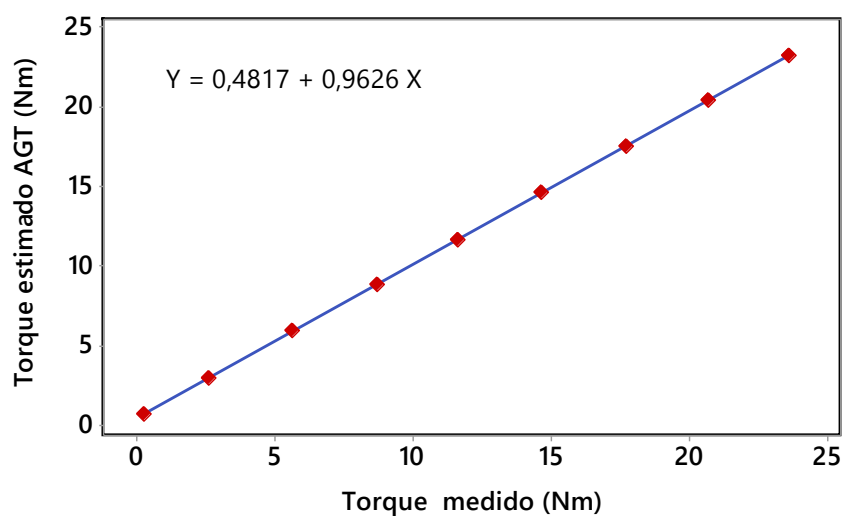


Figura A.1- Regressão linear simples, torque medido vs torque estimado (AGT)

Correlação entre o torque medido e o torque estimado

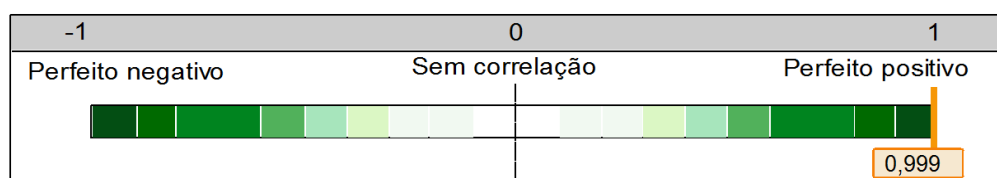


Figura A.2- Índice de correlação $r = 0,999$

O índice de correlação $r = 0,999$ indica uma relação forte e direta entre os valores medidos e estimados.

A.1.2- Regressão Linear simples para os valores medidos e estimados usando o método da análise sonora emitida pelo MIT.

Tabela A.2- Torque medido e estimado pelo som

Torque medido*	Torque estimado (Som)*
0,24	2,12
2,58	3,79
5,62	5,97
8,67	8,31
11,58	11,32
14,64	14,17
17,6876	17,3500
20,6604	20,3622
23,5867	23,7092
* Valores em Nm	

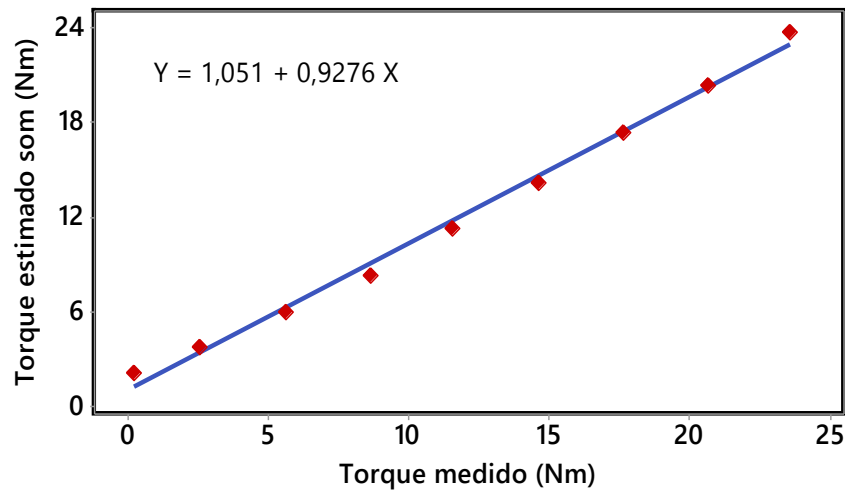


Figura A.3- Regressão linear simples, torque medido vs torque estimado (som)

Correlação entre o torque medido e o torque estimado

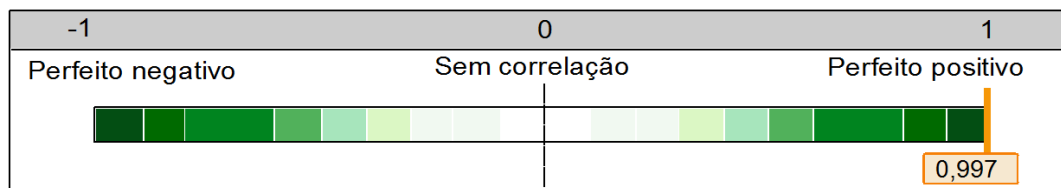


Figura A.4- Índice de correlação $r = 0,997$

Índice de correlação indica uma relação forte e direta entre os valores medidos e estimados usando o método da análise sonora do MIT. A equação que $Y=1,051 + 0,9276X$ descreve o comportamento da variável estimada em função da variável medida.