



*Universidade Federal da Paraíba*

*Centro de Tecnologia*

*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*

**Mestrado**

**ANÁLISE DE MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DA  
VELOCIDADE NO EIXO DE MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS**

por

Gabriela Jordão Lyra

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da*

*Paraíba para obtenção do grau de Mestre.*

**GABRIELA JORDÃO LYRA**

**ANÁLISE DE MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DE  
VELOCIDADE EM EIXOS PARA MOTORES DE INDUÇÃO  
TRIFÁSICOS**

Dissertação apresentado ao curso de Pós-Graduação em engenharia mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

**Orientador: Abel Cavalcante Lima Filho**

L992a Lyra, Gabriela Jordão.  
Análise de métodos para estimação de velocidade em eixos  
para motores de indução trifásicos / Gabriela Jordão Lyra.-  
João Pessoa, 2014.  
93f. : il.  
Orientador: Abel Cavalcante Lima Filho  
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT  
1. Engenharia mecânica. 2. Motor de indução trifásico.  
3. Estimação de velocidade. 4. Análise espectral. 5. Torque no  
entreferro.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

# ANÁLISE DE TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE DE ROTAÇÃO EM EIXOS DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

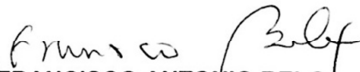
por

**GABRIELA JORDÃO LYRA**

*Dissertação aprovada em 24 de outubro de 2014  
Período letivo 2014.2*



**Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO**  
*Orientador – UFPB*



**Prof. Dr. FRANCISCO ANTONIO BELO**  
*Examinador Interno - UFPB*



**Prof. Dr. LEANDRO DIAS DA SILVA**  
*Examinador Externo – UFAL*



## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais, Alexandre José Jordão Lyra e Maria da Conceição Lyra.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por tudo que ele já me proporcionou.

Ao meu orientador Abel Cavalcante Lima Filho por toda atenção e confiança.

A todos meus familiares que sempre acreditaram em mim.

Ao meu noivo Brainer de Castro pela compreensão.

Aos meus companheiros de pesquisa Marcéu Adissi, Carlos Alberto e Sandro Sena por todo conhecimento passado, ajuda e força. Aos companheiros de laboratório Diógenes e Jobson por sempre estarem disposto a ajudar.

A todos que contribuíram de certa forma para o desenvolvimento deste trabalho.

A CAPES pelo suporte financeiro.

# ANÁLISE DE MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE EM EIXO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS

## RESUMO

O motor de indução trifásico (MIT) é o principal sistema de conversão eletromecânica existente, presente em praticamente todos os processos industriais. Devido a sua versatilidade e razoável baixo custo, a utilização de inversores de frequência combinados com os MIT, praticamente, substituíram os motores de corrente contínua em sistemas que necessitam de variação de velocidade angular. Para o controle de malha fechada em MIT, sem a utilização de sensores de velocidade (*sensorless*), é fundamental que se estime a velocidade no eixo com alta exatidão e com tempo de resposta satisfatório. O trabalho proposto visa analisar diferentes métodos que podem ser empregados para estimação na velocidade no eixo *sensorless*, denominados de acordo com o seu princípio fundamental, são eles: método pela harmônicas das ranhuras, pelo torque no entreferro e pela emissão acústica. Sendo o primeiro citado, o método não-invasivo mais conhecido no estado arte, o segundo, desenvolvido recentemente em laboratório e o terceiro, exposto aqui pela primeira vez. Todos os métodos são comparados com um instrumento de referência para medida de velocidade (tacômetro). A fim de se obter a validação das técnicas empregadas foi construída uma bancada de testes experimentais composta basicamente por um motor de indução trifásico, torquímetro e motor de corrente contínua utilizado como gerador (para impor carga variável ao eixo). O principal objetivo do estudo é comparar os métodos para diversas situações de velocidade e carga, tendo também como base o grau de invasividade e exatidão de cada método. Para o desenvolvimento e análise da técnica pela harmônicas das ranhuras e da emissão acústica, foi realizada uma análise espectral pela Transformada de Fourier do sinal da corrente e do som, respectivamente. Usou-se para este estudo ferramentas computacionais como o LABVIEW e MATLAB. Depois de extensos ensaios experimentais, os métodos foram validados e obteve-se conclusões sobre diferentes aspectos de cada técnica analisada.

Palavras chave: Motor de Indução Trifásico, Estimação de Velocidade, Análise Espectral, Torque no Entreferro.

# **ANÁLISE DE MÉTODOS PARA ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE EM EIXO DE MOTORES DE INDUÇÃO TRIFÁSICOS**

## **ABSTRACT**

The three phase induction motor (MIT) is the main system in electromechanical conversion, present in practically all industrial processes. Due to its versatility and low cost, the use of frequency inverters combined with MIT practically replaced the DC motors in systems requiring variation in angular velocity. For closed-loop control at MIT, without the use of speed sensors (sensorless), it is essential to estimate the velocity on the axis with high accuracy and with satisfactory response time. The proposed work has the object of analyzing different methods that can be employed to estimate the speed in sensorless axis, named according to their fundamental principle, they are: the method of harmonic slots, the torque in the air gap and the acoustic emission. The first mentioned is the best known non-invasive method in the state art, the second one was recently developed in the laboratory and the third one was exhibited here for the first time. All methods are compared with a reference instrument for measuring speed (tachometer). In order to obtain validation of the techniques we constructed a work bench tests basically composed by a three phase induction motor, torque meter and DC motor used as a generator (to enforce the axis load variable). The main objective of the study is to compare the methods for various situations of speed and load, also based on the degree of invasiveness and accuracy of each method. For the development and analysis of technique for harmonic slots and acoustic emission, a spectral analysis by Fourier transform of the current signal and the sound was performed, respectively. It was used tools such as MATLAB and LABVIEW for the computational study. After extensive experimental testing, the methods have been validated and it was obtained conclusions about different aspects of each discussed technique.

Keywords: Three Phase Induction Motor, speed estimation, Spectral Analysis, Torque in the air gap.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
INTRODUÇÃO.....	1
1.1. MOTIVAÇÃO .....	6
1.2. OBJETIVO GERAL .....	6
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	7
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	7
CAPÍTULO II.....	9
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	9
2.1. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO.....	9
2.1.1. COMPOSIÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO .....	10
2.1.2. ESTATOR .....	11
2.1.3. ROTOR.....	12
2.1.4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO .....	13
2.1.4.1. CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE.....	13
2.1.4.2. LEI DE LENZ.....	14
2.1.4.3. ESCORREGAMENTO .....	15
2.2. TEORIA DE FOURIER .....	16
2.2.1. TRANSFORMADA DE FOURIER DE CURTA DURAÇÃO.....	18
CAPÍTULO III .....	23
MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE EM EIXOS GIRANTES .....	23

3.1.	MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE .....	23
3.2.	MÉTODO A PARTIR DAS HARMÔNICAS DAS RANHURAS .....	24
3.2.1.	Método de detecção automática dos parâmetros $nd$ , $nw$ e $r$ .....	29
3.3.	MÉTODO DE ESTIMAÇÃO ATRAVÉS DO TORQUE NO ENTREFERRO	31
3.4.	MÉTODO DE ESTIMAÇÃO A PARTIR DA VIBRAÇÃO ACÚSTICA .....	38
CAPÍTULO IV .....		42
BANCADA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO .....		42
4.1.	SISTEMA DE ACIONAMENTO .....	44
4.2.	GERADOR CC .....	45
4.3.	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO .....	46
4.3.1.	Torquímetro .....	46
4.3.2.	Dínamo taquimétrico .....	47
4.3.3.	Sensor acústico .....	48
4.3.4.	Sistema de Aquisição de tensão e corrente .....	49
4.3.5.	Módulo de Aquisição de Dados (DAQ) .....	50
CAPÍTULO V .....		52
RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....		52
5.1.	MÉTODO DE ESTIMAÇÃO ATRAVÉS DAS HARMÔNICAS DAS RANHURAS .....	52
5.2.	MÉTODO DE ESTIMAÇÃO ATRAVÉS DO TORQUE NO ENTREFERRO..	56
5.3.	MÉTODO DE ESTIMAÇÃO ATRAVÉS DA EMISSÃO ACÚSTICA .....	59
5.4.	COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE.....	61
CAPÍTULO VI .....		66
6.	CONCLUSÃO .....	66
REFERÊNCIAS .....		68
ANEXO I .....		74

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Esquema dos tipos de motores elétricos.....	10
Figura 2.2 - Figura de um motor de indução fechado. (FRANCISCO, 2006).....	11
Figura 2.3- Estator.....	11
Figura 2. 4 - Rotor Gaiola. (FRANCISCO, 2006).....	12
Figura 2.5 - Rotor Bobinado. (FRANCISCO, 2006).....	13
Figura 2.6 - Enrolamento de um motor trifásico. (FRANCHI, 2010).....	13
Figura 2.7 - Simulação de operação de janelamento: a) Sinais originais de $f_1(t)$ e $f_2(t)$ , b) Sinal tipo janela Gaussiana, c) Sinais janelados de $f_{_1}(t)$ e $f_{_2}(t)$ .....	20
Figura 2.8 - Resolução tempo-frequência da STFT.....	21
Figura 3.1 - Espectro do sinal de corrente com o motor com uma frequência de alimentação á 60 Hz com o escorregamento de 0,0032.....	28
Figura 3.2 – Procedimento de estimação da velocidade a partir do espectro.....	29
Figura 3.3 Procedimento de detecção dos parâmetros $nd, nweR$ .....	31
Figura 3.4- Curva de torque versus velocidade no eixo de um motor de indução (ANDRADE, 2003).....	32
Figura 3.5 – Relação entre o torque e a velocidade angular (FITZGERALD et al, 2006). 33	
Figura 3.6- Integral obtida quando são feitas (a) e quando não são feitas (b) as considerações de valores de offset dos sinais adquiridos e do valor DC gerado na integral. ....	35
Figura 3.7 - Relação de linearização entre o torque e a velocidade angular. (Adaptada da figura 3.5).....	36
Figura 3.8- Procedimento para estimação da velocidade através do método do torque no entreferro.....	38
Figura 3.9- Sinal do som do motor a uma frequência de alimentação de 30 Hz.....	39

Figura 3.10 - Espectro do sinal de som do motor de indução trifásico com a velocidade síncrona da 30Hz. ....	40
Figura 3. 11 – Procedimento para estimação da velocidade a partir da acústica. ....	41
Figura 4.1 - Bancada para ensaios de torção em motores de indução trifásicos.....	43
Figura 4.2 - Inversor de frequência utilizado no acionamento da bancada.....	44
Figura 4.3 - Quadro de comando. ....	45
Figura 4.4 - Máquina de corrente contínua. ....	45
Figura 4.5 - Resistências aletadas acopladas à armadura .....	46
Figura 4.6 - Torquímetro digital HBM T40B. ....	46
Figura 4.7 - Dinamo taquimétrico acoplado ao eixo do gerador.....	47
Figura 4.8 - Estroboscópio utilizado na calibração do dínamo taquimétrico. ....	48
Figura 4.9 - Microfone utilizado para aquisição do som.....	48
Figura 4.10 – Mesa de som. ....	49
Figura 4.11 - a) Transformadores (sensor de tensão). b) Sensor de corrente. ....	50
Figura 4.12 - Módulo de conversão A/D USB-6215.....	51
Figura 5.1 - Comparação da velocidade de referência com a velocidade estimada pelo método das harmônicas das ranhuras. ....	53
Figura 5.2 - Comparação de estimação da velocidade pelo método da harmônica da ranhura com o tacômetro, aplicando carga a uma frequência de alimentação de 60Hz (a) e de 40Hz(b).....	54
Figura 5.3 - Comparação de estimação de velocidade pelo método das harmônicas das ranhuras com carga dinâmica. ....	55
Figura 5.4 - Relação entre o torque no entreferro e a velocidade estimada através do torque do entreferro nominal (a) e calibrado (b). ....	56
Figura 5.5 - a) Curva da velocidade medida e da velocidade estimada pelo método do torque do entreferro com valores nominais de potência e velocidade, com seus respectivos erros.b) Curva da velocidade medida e da velocidade estimada pelo método do torque do entreferro com valores calibrados de potência e velocidade, com seus respectivos erros....	57
Figura 5.6 - Curva de estimação de velocidade através do torque no entreferro nominal e calibrado com carga dinâmica aplicada a uma frequência de alimentação em torno de 60 Hz.....	58
Figura 5.7 – Estimação da velocidade pelo método da acústica.....	59



Figura 5.8 – Estimação da velocidade pelo método da acústica, com uma frequência de alimentação de 60 Hz e com carga.....	60
Figura 5.9- Carga dinâmica aplicada. ....	61
Figura 5.10- Curvas de erros com todos os métodos de estimação da velocidade proposto. Frequência de alimentação 60Hz. ....	62
Figura 5.11- Curvas de comparação dos métodos de estimação de velocidade. ....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1- Tempo de processamento para 10s de aquisição. ....	63
Tabela 5.2- Tempo de processamento de cada método para 20s de aquisição .....	63
Tabela 5.3- Média dos erros nas frequências de alimentação de 60Hz para várias cargas aplicadas. ....	64
Tabela 5.4- Comparação entre os parâmetros. ....	65

## LISTA DE SÍMBOLOS

MIT	- Motor De Indução Trifásico
FT	- Transformada De Fourier
IFFT	- Transformada De Fourier Interpolada
RSH	- Harmônicas De Ranhuras
RNA	- Redes Neurais Artificiais
$n_s$	- Velocidade Síncrona
P	- Número De Polos
$f_1$	- Frequência De Alimentação
Fem	- Força EletroMotriz
S	- Escorregamento
N	- Velocidade Do Rotor
DFT	- Transformada Discreta de Fourier
FFT	- Transformada Rápida de Fourier
STFT	- Transformada de Fourier de Tempo Curto ou Curta Duração
TW	- Transformada Wavelet
w	- Frequência Angular
MRA	- Análise Multiresolucional
$B_{ag}$	- Fluxo Magnético
$P_{ag}$	- Permeância No Entreferro
$MMF_{ag}$	- Força Magneto Motriz Do Entreferro

$f_{he}$	- Frequência Das Harmônicas Relacionadas Com A Saliência
$f_1$	- Frequência Fundamental Da Alimentação
$k$	- Número Da Harmônica
$r$	- Número De Ranhuras Do Rotor
$p$	- Número De Polos
$n_d$	- Ordem De Excentricidade Do Rotor
$T_{ag}$	- Torque No Entreferro
$\lambda_{ab}, \lambda_{cb}$	- Fluxos Magnéticos De Acoplamento
$i_a, i_b, i_c$	- Correntes De Linha De Entrada Do Motor
$V_{(a,b,c)}$	-Tensões De Fase
$R$	-Resistência Do Enrolamento Do Estator
$f_{ecc}$	- Frequência Das Harmônicas De Excentricidade
$h_{máx}$	- Harmônica De Maior Amplitude
$f_h$	- Frequência Da Harmônica De Maior Amplitude
$n$	- Velocidade Do Eixo Do Motor
$\omega_{sinc}$	- Velocidade Síncrona
$\omega_n$	- Velocidade Nominal
$T_{agnom}$	- Torques No Entreferro Equivalentes Ao Ponto Nominal
$T_{ag0}$	- Torques No Entreferro Equivalentes Ao Ponto Zero
$n_w$	- Ordem Dos Harmônicos Do Entreferro.
$L_{ad}$	- Porcentagem De Perdas Adicionais
$L_{mec}$	- Porcentagem De Perdas Mecânicas
$P_n$	- Potência Nominal Do Motor
$aeb$	- Parâmetros Da Equação Da Reta
$\hat{\omega}$	- Velocidade Estimada
EA	- Emissão Acústica

$M_f$  - Valor Médio Entre As Frequências

ADC - Conversor Analógico Digital

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Os motores elétricos são responsáveis por 95% da fonte primária de movimento das nações industrializadas (AHMED et al, 2004). Desses, 90% são Motores de Indução Trifásicos (MIT), estando presentes em praticamente todos os setores industriais (HANITSCH, 2002) e, por isso, são considerados a espinha dorsal da indústria moderna (YE et al, 2003). No Brasil, particularmente, o motor de indução trifásico, rotor em gaiola de esquilo, responde por 75% dos motores utilizados (AMERICO, 2003). O motor de indução tem como vantagem a sua simplicidade, que se traduz em baixo custo e máxima eficácia com manutenção mínima.

Devido ao seu baixo custo e com o avanço da tecnologia, MIT acionados por inversores de frequência tem substituído o motor CC em diversas aplicações. Para o controle em malha fechada é fundamental que se determine a velocidade com elevada exatidão e com um tempo de resposta satisfatório, de modo a permitir um menor tempo de convergência possível do controlador.

Até meados da década de 60, os sistemas de medição e controle da velocidade em motores industriais eram basicamente eletromecânicos. Os sensores de medição de velocidade requerem fiação extra, montagem cuidadosa, calibração delicada, e manutenção regular, além de que sensores montados incorretamente podem reduzir a confiabilidade de todo o sistema, aumentando o seu custo.

O uso de instrumentos invasivos de medição da velocidade do eixo de um motor de indução trifásico tais como tacômetro com acoplamento mecânico ou com sensor ótico ou magnético podem ser inconvenientes ou pouco práticos. Em algumas instalações, por exemplo, não se tem acesso às extremidades do eixo do motor, dificultando a utilização de tacômetro com acoplamento mecânico. O uso de tacômetros baseados em sensores óticos ou mecânicos pode implicar na fixação de elementos ao eixo do motor (fita ótica ou disco dentado), o que nem sempre é possível e pode ter limitações de exatidão, (SANTOS E OLIVEIRA, 2005).

Os métodos de medição indireta (*sensorless*) apresentam-se como uma solução que não exigem alterações na estrutura do motor nem interação mecânica com o mesmo. Medir a velocidade pode ser inviável em determinados processos (SCHAUDER, 1992, ZHEN, 1998).

Várias pesquisas foram feitas para o desenvolvimento de métodos *sensorless* para estimação de velocidade.

HURST E HABETLER (1996) propõem um esquema de medição de velocidade sem sensor que melhora o desempenho de unidades de máquina de indução, especialmente para operação de baixa frequência. Harmônicos relacionados com velocidade são analisados através de processamento de sinal digital. Suas conclusões mostram que esse esquema pode melhorar significativamente o desempenho e a confiabilidade de acionamentos de motores de indução de baixo e médio rendimento sem um sensor de velocidade e sem a necessidade de conhecimento prévio de informações específicas da máquina.

HURST E HABETLER (1997) determinam um método para extrair com exatidão os harmônicos relacionados à velocidade no menor espaço de tempo. Vários algoritmos de processamento de sinal digital são investigados, incluindo a transformação rápida de Fourier e outros métodos tradicionais, bem como técnicas de parâmetros que podem fornecer uma melhor estimativa do espectro para os registros de dados curtos. Cada abordagem é avaliada por critérios de precisão, robustez e tempo de computação, indicado um registro de dados de curta duração. Os resultados experimentais e análises determinaram que os métodos paramétricos podem produzir resultados mais precisos do que o FFT para registros da duração mínima de oito ciclo de dados. Para um registro de

dados de 16 ciclos, a estimativa do espectro FFT é melhorada e é pelo menos tão precisos como os métodos paramétricos.

NISHIBATA, et al (2006) propõem um novo método de estimação de velocidade do motor, através da detecção de picos das harmônicas das ranhuras no domínio da frequência, que varia de acordo com o escorregamento do MIT. Foi possível detectar as harmônicas de ranhuras do motor com elevada relação sinal-ruído através da utilização de um modelo de harmônicas de MIT e transformação rápida de Fourier (FFT). No trabalho foi observado o método utilizando a harmônica de ranhura a partir da aquisição da corrente de linha para uma unidade de controle *sensorless* de MIT para altas velocidades.

DONGFENG, et al (2006) propuseram um novo sistema baseado na transformada de Hilbert e transformada rápida de Fourier interpolada (IFFT) para melhorar a precisão da estimativa da velocidade do motor de indução a partir de sinais de corrente do motor. A transformada de Hilbert foi introduzida para demodular as flutuações de amplitude e fase da corrente do motor, o qual continha harmônicas relacionadas com a velocidade. As flutuações de fase da corrente foram consideradas mais robusta e eficaz e, portanto, podem ser utilizados para detectar harmônicos relacionados à velocidade em condições transitórias, por exemplo, a aceleração do motor, já as flutuações de amplitude da corrente eram adequados para o monitoramento de velocidade constante. Como método de análise, foram feitas simulações que mostraram melhora considerável na precisão da estimativa usando IFFT, em comparação com a técnica de FFT. Um estudo experimental confirmou uma boa concordância entre a velocidade do motor estimada usando o esquema proposto e a velocidade medida utilizando um codificador.

HABETLER, et al (2002) fizeram considerações para estimativa de velocidade *sensorless* de máquinas CA, usando a transformada wavelet analítica do sinal de corrente do estator, com vistas ao controle direto de torque. Segundo os autores, este método pode ser implementado em tempo real em um processador de sinal digital com custo computacional menor. Porém, o trabalho não mostra resultados de validação, o que não permite concluir a viabilidade, exatidão e eficácia da técnica.

DERDIYOK (2002) apresentou um novo algoritmo de estimação de velocidade, através da corrente de armadura de um motor de indução. Na técnica proposta, o modelo dinâmico da máquina é utilizado na construção de um observador de estado não-linear. O



esquema proposto é validado pela simulação e resultados experimentais e apresenta um bom desempenho em altas velocidades. Porém, esse método apresenta uma inconveniência de se ter um conhecimento prévio de dados básicos de placa do MIT.

SANTOS E OLIVEIRA (2005) utilizaram como método de estimação o espectro de frequência de uma das correntes de fase de um motor de indução trifásico, obtido por um Analisador de Espectro Lock-in Digital, esta abordagem se mostrou mais exata e imune a ruídos do que as convencionais tais como a FFT e a PSD. A partir deste espectro, estimou-se de modo não invasivo a velocidade do eixo de um motor de indução trifásico. Este método possui um tempo de processamento para estimação alto, o que torna esse método mais adequado a sistemas quando a exatidão é mais importante que o tempo de estimação da velocidade.

KOUBAA (2006), propôs uma nova abordagem para a estimação de parâmetros de motores de indução trifásicos com técnicas de mínimos quadrados. O método de identificação dos parâmetros é baseado nas equações de estado de equilíbrio elétrico do motor de indução e permite a utilização de algoritmos de identificação lineares. Medições das correntes do estator, das tensões e velocidade angular do rotor são necessárias para o processo de identificação com base num algoritmo simples. O método foi demonstrado por meio de simulações, foi concluído que o algoritmo de identificação deve ser executado sempre que o sistema de controle de velocidade está em estado estável, logo, não pode ser utilizado nas piores situações operacionais, quando o sistema está num estado transitório ou sob oscilação.

OGUZ E DEDE (2011) usam redes neurais artificiais para a construção de um estimador de velocidade *sensorless* para MIT. O método foi implementado em um DSP (*Digital Signal Processor*) para um sistema de controle vetorial. O desempenho do estimador de velocidade é considerado excelente em uma ampla região de velocidade. O trabalho exhibe resultados dinâmicos satisfatórios. Este também utiliza o modelo dinâmico do MIT para estimar a velocidade de rotação no eixo

ADISSI (2012) observou que os métodos convencionais de estimação de velocidade não atendiam a necessidade de seu trabalho, então desenvolveu um novo método de estimação de velocidade de um motor de indução trifásico. O método consiste em estabelecer uma relação entre a velocidade angular que é a desejada e o torque no

entreferro já conhecido. Para fazer a comparação do novo método de estimação de velocidade com a velocidade real, foi utilizado um sensor magnético na bancada. Esta comparação é válida, pois o sensor de velocidade tem ótima precisão. Com essa comparação foi observado um erro máximo de 0,5% e uma correlação entre a curva da velocidade estimada e a curva da velocidade medida pelo sensor, de 99,35%. Esse modelo não necessita de conhecimentos prévios do MIT, podendo ser aplicado para uma ampla faixa de velocidades.

KEYSAN e ERTAN (2013) desenvolveram um método capaz de detectar a harmônica das ranhuras sem a necessidade de análise espectral. O sinal obtido através de uma bobina externa posicionada no entreferro sofre um processo de modulação e demodulação no domínio do tempo para se detectar a velocidade de rotação no eixo a partir das harmônicas das ranhuras. Este método apresenta certa invasividade na instalação da bobina, além de necessitar de um sensor de velocidade extra para poder iniciar o algoritmo de detecção.

Kun e Xiaojie (2009) propõem uma estimação da velocidade utilizando um estimador de fluxo do rotor com aplicação de filtros passa-baixa. O estimador de velocidade proposto tem boas performances dinâmicas durante os períodos de velocidade crescente e decrescente. Porém percebe-se que a estimação da velocidade sensorless em estado estacionário tem menor erro do que a estimativa de velocidade em estado dinâmico.

Este trabalho faz uma análise da técnica que utiliza a detecção da harmônica das ranhuras (HURST E HABETLER, 1996), talvez o meio mais utilizado para estimativa *sensorless* de velocidade em MIT, comparando-a com uma técnica desenvolvida recentemente pelo grupo de pesquisa da autora (ADISSI, 2012) e com uma proposta de estimativa através da análise sonora, desenvolvida neste trabalho. É feita uma ampla análise dos três métodos de forma comparativa. Para validação das técnicas utilizadas, foram realizados extensos ensaios experimentais realizados em uma bancada desenvolvida em laboratório.

## 1.1. MOTIVAÇÃO

Devido a sua robustez, simples construção, durabilidade e baixo custo, sistemas mecânicos impulsionados por motores de indução trifásicos acionados por inversores de frequência têm sido utilizados em larga escala para diferentes aplicações industriais.

A medida da velocidade deve ser realizada como parâmetro de entrada em sistemas de controle de velocidade de malha fechada. A estimativa da velocidade *sensorless* (sem a utilização de sensores) tem sido amplamente estudada com o intuito de se eliminar a utilização de sensores, o que se deve a diversos fatores, como: o alto custo de alguns sensores; a medida da velocidade direta nem sempre é viável devido a impossibilidade de inserir o sensor no processo; em caso de falha do sensor o processo de controle seria perdido.

Diante desses problemas surgiram métodos de estimação de velocidade *sensorless* de forma não invasiva ao sistema, permitindo que o MIT mantenha as suas características normais de operação sem adição de sensores auxiliares. Talvez, a técnica mais utilizada com essa finalidade seja a estimação da velocidade a partir da detecção da componente de frequência da harmônica das ranhuras pela análise espectral da corrente de armadura do motor de indução. Neste trabalho, esta técnica é analisada e comparada com mais outras duas propostas: estimação da velocidade a partir do espectro da vibração sonora e pela técnica do torque no entreferro, ambas desenvolvidas pelo grupo de pesquisa a qual a autora é integrante.

## 1.2. OBJETIVO GERAL

O trabalho proposto tem como objetivo geral analisar de forma comparativa diferentes métodos de estimação *sensoless* da velocidade em eixos de motores de indução trifásicos.

### **1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Desenvolver algoritmos para estimação da velocidade em motores de indução trifásicos através do método de vibração acústica, do torque no entreferro e da harmônica das ranhuras;
- Implementar o algoritmo em programa computacional para processamento de dados e realizar testes em bancada experimental para validação dos métodos utilizados;
- Melhorar e comparar metodologias não invasivas para estimação de velocidade.
- Confrontar os dados experimentais de cada método destacando vantagens e desvantagens de cada um.

### **1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação foi dividida em seis capítulos, assim nomeados: introdução, fundamentação teórica, métodos de estimação de velocidade em eixos girantes, bancada experimental e instrumentação, resultados experimentais, e conclusão.

Neste primeiro capítulo, buscou-se apresentar o sistema proposto de uma forma geral e também algumas referências de trabalhos feitos de estimação de velocidade em motores, e traçados os objetivos.

O segundo capítulo apresenta a base teórica dos motores elétricos de indução trifásicos, mostrando seus principais componentes, seu princípio de funcionamento e a Transformada de Fourier.

No terceiro capítulo são apresentados os métodos de estimação de velocidade utilizados neste trabalho para comparação, cada método é descrito detalhadamente como foi implementado.

No quarto capítulo contém a descrição de todos os componentes pertencentes à bancada de testes utilizada para aplicação dos métodos de estimação, mostrando como foram feitas as aquisições dos dados e toda a instrumentação necessária.

O quinto capítulo apresenta os resultados adquiridos nos experimentos realizados em laboratório: os gráficos das estimações da velocidade no eixo do motor, a comparação entre os métodos e a referência da velocidade.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões principais deste estudo e trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO II**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo são apresentados os conceitos básicos sobre Motor de Indução Trifásico (MIT), o conceito da transformada de Fourier e suas aplicações na estimação da velocidade.

#### **2.1. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Motores elétricos têm como função transformar energia elétrica em energia mecânica, ou seja, em um motor a presença da corrente elétrica, seja corrente contínua ou alternada, garante movimento em um eixo, que pode ser utilizado em diversas aplicações. O motor de indução trifásico está presente em praticamente todos os processos industriais sendo o principal meio de conversão eletromecânica existente, apresentando como vantagens o baixo custo e a máxima eficácia com manutenção mínima, boa eficiência energética, baixo consumo nos processos de aceleração e frenagem, construção simples, robustez e durabilidade.

Uma característica importante dos motores de indução é que eles são máquinas com excitação própria, embora tais máquinas sejam equipadas tanto com enrolamento de campo

como um enrolamento de armadura, em condições normais de utilização a fonte de energia é conectada a um único enrolamento, o enrolamento de armadura (DEL TORO, 1999).

Para o acionamento de cargas mecânicas podem ser utilizados outros motores elétricos, como: motores de corrente contínua, motores de corrente alternadas síncronos, motores de indução monofásico, ou motores elétricos especiais. Esses vários tipos podem ser agrupados na Figura 2.1:

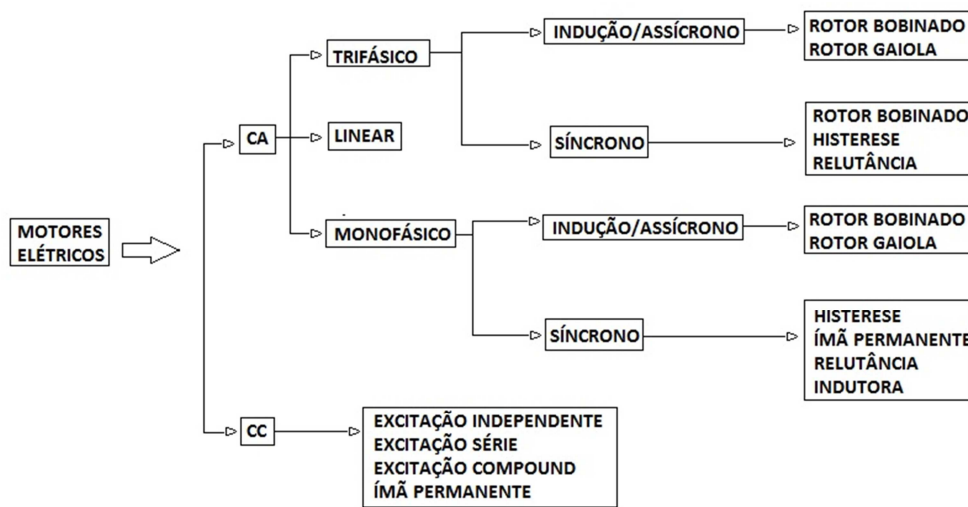


Figura 2.1- Esquema dos tipos de motores elétricos.

### 2.1.1. COMPOSIÇÃO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os motores de indução têm como partes constituintes principais o estator (que é a parte fixa), o rotor (parte móvel, centrada no interior do estator com diâmetro ligeiramente menor), as bobinas e o espaço entre o rotor e o estator é denominado de entreferro (air gap). A Figura 2.2 mostra os componentes do motor de indução.

O entreferro realiza a interface entre a parte eletromagnética e mecânica da máquina e, embora inevitável, é indesejado, uma vez que obriga a criação de um campo magnético mais intenso, para se induzir a mesma potência no rotor, ou seja, durante o processo de conversão de energia nem toda a energia elétrica entregue ao motor é convertida em mecânica (ADISSI, 2012).

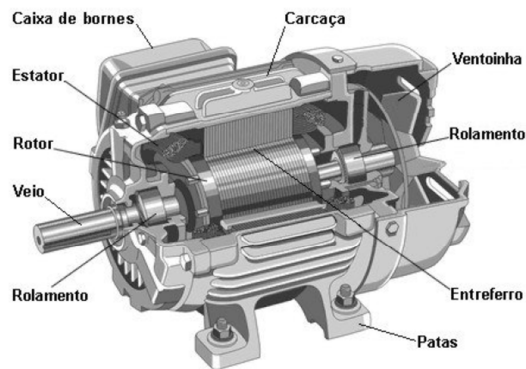


Figura 2.2 - Figura de um motor de indução fechado (FRANCISCO, 2006).

### 2.1.2. ESTATOR

O estator é composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente ou de aço silício para reduzir ao mínimo as perdas por correntes parasitas e histerese. Estas chapas têm o formato de um anel com ranhuras internas (vista frontal) de tal maneira que possam ser alojados enrolamentos, os quais por sua vez, quando em operação, deverão criar um campo magnético no estator, Figura 2.3.

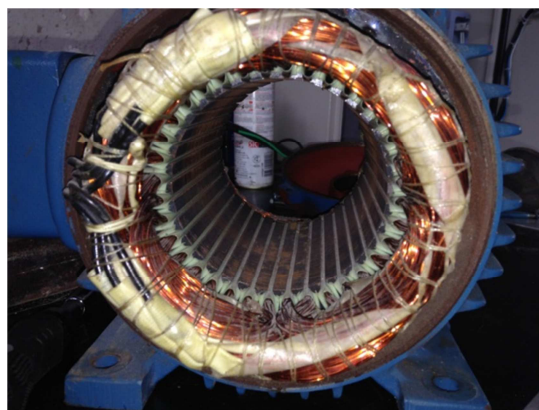


Figura 2.3- Estator de um motor de indução.



### 2.1.3. ROTOR

O rotor é composto de chapas finas de aço magnético tratadas termicamente, com o formato também de anel (vista frontal) e com os enrolamentos alojados longitudinalmente. O rotor pode ser de dois tipos, o de gaiola de esquilo ou o bobinado. O rotor gaiola de esquilo é constituído por um núcleo de chapas ferromagnéticas, isoladas entre si, sobre o qual são colocadas barras de alumínio (condutores), dispostas paralelamente entre si e unidas nas suas extremidades por dois anéis condutoras, também de alumínio, que provocam um curto-circuito nos condutores, Figura 2.4.

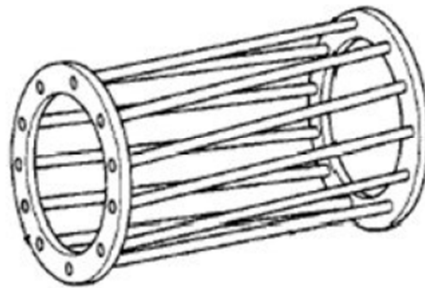


Figura 2. 4 - Rotor Gaiola (FRANCISCO, 2006).

Rotor bobinado é constituído por um núcleo ferromagnético laminado sobre o qual são alojadas espiras que constituem o enrolamento trifásico, normalmente em estrela. Os três terminais livres de cada uma das bobinas do enrolamento trifásico são ligados a três anéis de deslizamento de escovas colocados no eixo do rotor e por meio de escovas de grafite estacionadas no estator. Esses três anéis são ligados exteriormente a um reostato de partida constituído por três resistências variáveis, ligadas em estrela, figura 2.5.

Motores com rotor bobinado são utilizados quando se deseja um elevado torque de partida ou quando é necessário fornecer uma partida mais suave ao motor, reduzindo a corrente de pico na partida.

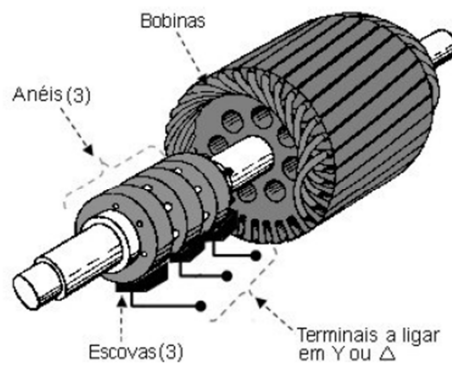


Figura 2.5 - Rotor Bobinado (FRANCISCO, 2006).

## 2.1.4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Para compreender o funcionamento de um motor de indução trifásico é preciso saber algumas teorias presentes no princípio de funcionamento das máquinas de indução de corrente alternada.

### 2.1.4.1. CAMPO MAGNÉTICO GIRANTE

FRANCHI (2010) mostra que o princípio de funcionamento do motor de indução trifásico baseia-se nas leis do eletromagnetismo. A partir de três correntes senoidais, defasadas  $120^\circ$  entre si, o campo girante do motor de indução trifásico é gerado. A figura 2.6 mostra o enrolamento de um motor trifásico.

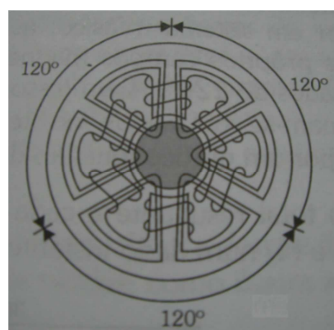


Figura 2.6 - Enrolamento de um motor trifásico (FRANCHI, 2010).

Na figura 2.6 pode-se observar o enrolamento trifásico feito com três enrolamentos monofásicos defasados entre si de 120°. Se esse enrolamento for alimentado por um sistema trifásico as correntes, criarão do mesmo modo os seus próprios campos magnéticos, sendo esses campos também espaçados de 120°.

Quando um enrolamento trifásico é alimentado por correntes trifásicas, cria-se um campo girante como se houvesse um único par de pólos girantes com intensidade constante. O campo girante, criado pelo enrolamento trifásico do estator, induz tensões nas barras do rotor as quais geram correntes e com isso geram um campo no rotor de polaridade oposta à do campo girante. Como os campos opostos se atraem e o campo girante de estator é rotativo, o rotor tende a acompanhar a rotação desse campo desenvolvendo um conjugado motor que faz com que o rotor gire.

Considera-se que o campo do fluxo magnético está girando numa velocidade correspondente à frequência aplicada ao estator e dividida pelo número de par de pólos do enrolamento do estator. Essa velocidade é chamada de velocidade síncrona,  $n_s$ , e é descrita em (2.1) em que  $f_1$  é a frequência de alimentação e  $p$  é o número de pólos.

$$n_s = \left( \frac{f_1}{p/2} \right) \quad (2.1)$$

#### **2.1.4.2. LEI DE LENZ**

O entendimento do princípio de funcionamento do motor de indução pode ser uma aplicação da lei de Lenz.

“Em todos os casos de indução eletromagnética, uma Força Eletromotriz (FEM) induzida fará com que a corrente circule em um circuito fechado, num sentido tal que seu efeito magnético se oponha à variação que a produziu” (KOSOW, 1982)

No MIT a FEM induzida surgirá no rotor pela variação do fluxo magnético ocasionado pelo campo girante originado no estator. Essa FEM é induzida no circuito fechado do rotor gerando correntes induzidas que por sua vez geram campos magnéticos.

Esses campos magnéticos, obedecendo a Lei de LENZ são tais que se opõem à variação do fluxo original produzindo o torque que mantém girando o rotor. (RODEIRO, 2005).

### 2.1.4.3. ESCORREGAMENTO

Em um motor de indução, para que ocorra a geração de correntes induzidas, a velocidade do rotor não poderá ser igual à do campo girante do estator.

No motor de indução, a velocidade do rotor não poderá ser igual à do campo girante do estator, pois, se isso ocorresse não haveria mais geração de correntes induzidas e, conseqüentemente, desapareceria o efeito magnético rotórico necessário a manter o rotor girando (MARTIGNONI, 1973).

Dessa forma o rotor deve “escorregar” em velocidade a fim de que se produza torque (KOSOW, 1982). Essa diferença de velocidade entre o campo girante e o rotor é um importante aspecto do MIT que também é chamado de motor assíncrono devido a essa característica, ou seja, motores que não possuem rotação síncrona com a do campo indutor (MARTIGNONI, 1973).

Um parâmetro fundamental de medida de velocidade, muito utilizado nas diversas equações matemáticas que envolvem os MIT, é o escorregamento,  $s$ . Chama-se de velocidade de escorregamento a diferença entre a velocidade síncrona,  $n_s$  e a velocidade do rotor  $n$ . (RODEIRO, 2005) O escorregamento, expresso em (2.2) é a fração de rotação que o rotor perde a cada rotação do campo girante, ou seja, razão entre a velocidade de escorregamento e a velocidade síncrona:

$$s = (n_s - n/n_s) \quad (2.2)$$

## 2.2. TEORIA DE FOURIER

A Transformada de Fourier (FT) é uma ferramenta matemática que permite representar e estudar o comportamento de certos sinais em relação a propriedades de periodicidade.

O cálculo prático do espectro via transformada clássica (empregando propriedades ou soluções analíticas) não é comum, pois vários sinais de interesse não possuem expressões analíticas para descrevê-los, nestes casos é utilizada a Transformada Discreta de Fourier (DFT) fazendo-se uso de um algoritmo conhecido como a FFT (Transformada Rápida de Fourier), o qual não é um tipo diferente de transformada e sim um algoritmo que possibilita avaliar DFT de forma mais rápida e, proporcionando um menor esforço computacional (DE OLIVEIRA, 2007). Para se obter os espectros de frequência utiliza-se um sistema de aquisição de sinais que faz a conversão analógica-digital dos sinais, armazena na forma numérica e os processam utilizando um algoritmo FFT, apresentando o resultado, espectro de frequência, em tempo real. Esse processo de obtenção do espectro exige cuidados importantes na apresentação e ajuste das condições de obtenção do sinal, das faixas de frequências que se deseja analisar e da resolução em frequência dentro dessas faixas. (JESUS, 2010). A maior desvantagem deste método é ser inadequado para a análise de sinais cujo comportamento é de natureza não-estacionária ou transiente (SANTIAGO e PEDERIVA, 2003), devido ao fato deste poder determinar todas as frequências presentes no sinal, sem a existência de uma relação com o domínio temporal (SEVEGNANI, 2009). A análise via Transformada de Fourier não apresenta um caráter local, e representa um “comportamento global médio” de um sinal. Isto significa que, embora seja capaz de determinar o conteúdo de frequências presentes em um sinal, não há uma indicação de quando (em que intervalo de tempo) elas ocorrem (DE OLIVEIRA, 2007).

Em muitos processos industriais, e mesmo na bancada de teste deste trabalho, trabalha-se com motores que sob variação de carga, ou seja, com comportamento dinâmico (não estacionário). Para processar estes sinais que variam no tempo, ou seja, sinais cujo conteúdo espectral depende do tempo, é necessário uma técnica que represente os mesmos simultaneamente no domínio do tempo e frequência. A limitação da Transformada de Fourier levou o desenvolvimento de técnicas de processamento de sinais como tempo-frequência (Transformada de Gabor, Wigner-Ville, etc.) e tempo-escala (Transformada de

Wavelet) (SANTIAGO e PEDERIVA, 2003). A primeira desenvolvida foi a Transformada de Gabor também mencionada na literatura como Transformada Janelada de Fourier, a qual se estendeu para um caráter mais generalista como Transformada de Fourier de Tempo Curto ou Curta Duração (STFT – Short Time Fourier Transform). Esta transformada passou a depender fortemente do instante de tempo analisado, como se o sinal fosse “fatiado” em vários trechos, e em cada trecho a contribuição espectral fosse analisada, resultando em um espectro local. Ou seja, o sinal é dividido em intervalos pequenos o suficiente de modo que se possa assumir estacionaridade (MESQUITA et al., 2002), podendo-se portanto, observar o sinal por meio de uma curta “janela” operando como uma “Transformada de Fourier Local” (DE OLIVEIRA, 2007). A totalidade dos espectros de cada intervalo mostra como o conteúdo de frequência do sinal está variando com o tempo. A divisão do sinal é feita por meio do uso de uma janela de observação para enfatizar as características do sinal apenas nas proximidades do instante de interesse. Uma das limitações associadas à STFT diz respeito à largura da janela, cujo valor é constante para todos os instantes de tempo. Pelo princípio da incerteza de Heisenberg, da física quântica, estabelece que não se pode obter a informação exata da frequência de um sinal e o instante/local exato no tempo/espaço onde esta frequência ocorreu. O que podemos saber é o intervalo de tempo os quais certas bandas de frequência existem. Com isso, não é possível obter alta resolução em tempo e frequência simultaneamente. Em outras palavras, um sinal não pode ser representado como um ponto no espaço tempo-frequência. Desta maneira, as informações obtidas pela STFT têm precisão limitada devido à largura da janela (MESQUITA et al., 2002).

Observando essa limitação de STFT surgiu a Transformada Wavelet (TW), que segundo Cox (2004), pode analisar variações espectrais com diferentes resoluções (multiresolução) tempo-frequência, ou seja, esta transformada permite variar o tamanho da janela de análise, de acordo com a frequência do sinal. A Transformada de Wavelet interpreta o sinal como versões deslocadas e escalonadas de uma wavelet original, chamada de wavelet-mãe, (LACERDA et al., 2011). De maneira geral, a wavelet pode ser manipulada de dois modos: movendo-se para várias posições sobre o sinal (translação) e dilatando-se ou comprimindo-se (escala). Assim, pode-se mencionar que elas funcionam como uma janela que diminui para os componentes de altas frequências e aumenta para os de baixas frequências (SEVEGNANI, 2009).

### 2.2.1. TRANSFORMADA DE FOURIER DE CURTA DURAÇÃO

A perda da informação temporal na análise clássica de Fourier gerou a necessidade de uma nova estratégia para a análise de sinais não-estacionários. Nessa estratégia assume-se uma divisão do sinal em porções pequenas o suficiente para que dentro destas, o sinal possa ser tratado como estacionário. Aplica-se uma janela sobre o sinal, de forma que sejam separadas cada uma de suas porções estacionárias, tal que a DFT de cada porção obterá exatamente a frequência presente em cada uma. Essa estratégia provou-se adequada para diversas aplicações, dando origem a uma "revisão" da Transformada de Fourier que passou a ser conhecida como Transformada de Fourier de Tempo Curto (STFT, do inglês Short Time Fourier Transform).

Matematicamente, a operação de janelamento pode ser modelada como uma multiplicação do sinal  $f(t)$  (que possui duração infinita) por um sinal  $g(t)$  do tipo janela. O sinal resultante dessa multiplicação, embora seja definido em todo tempo, só é diferente de zero no intervalo de tempo considerado de interesse, durante o qual ele é igual ao sinal original, podendo, portanto, ser analisado a partir apenas da informação contida nesse intervalo.

Existem diversas escolhas para a janela, sendo as principais as que possuem suporte compacto e regularidade razoável. Quando a janela selecionada é Gaussiana,  $g(t) = e^{-t^2/2}$ , que é proporcional à função densidade de probabilidade normal padrão, a STFT é conhecida particularmente como Transformada de Gabor.

Formalmente, a STFT pode ser definida pela Eq.(2.3) em função da frequência angular  $\omega$  e da posição  $b$  no tempo:

$$STFT(b, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)g(t-b)e^{-j\omega t} dt \quad (2.3)$$

Outra forma de abordagem utiliza a representação:  $g_{\omega,b}(t)=g(t-b)e^{-j\omega t}$ . Segundo Santiago (2004) uma limitação associada à STFT diz respeito à largura da janela cujo valor é constante para todas as frequências, de forma que uma janela larga, ocasionada por um maior número de amostras, permite uma boa resolução no domínio da frequência, mas uma pobre resolução no domínio do tempo, e vice e versa, não sendo possível, portanto, a obtenção de uma boa resolução nos dois domínios de forma simultânea. Um caso particular ocorreria quando a janela estivesse com largura infinita, ocasionando a máxima resolução em frequência possível e nenhuma resolução no tempo, ou seja, seria obtida a  $f(j\omega)$ . Por outro lado, aplicando uma largura infinitesimalmente pequena, mas não nula, o resultado seria simplesmente o máximo de resolução no tempo e nenhuma resolução na frequência, ou seja, seria obtida a  $f(t)$ .

A janela da Eq.(2.3) pode ser interpretada de duas formas. A janela limita a extensão do sinal a ser analisado, de modo que em um dado intervalo  $t$  este possa ser considerado satisfatoriamente estacionário, podendo-se, portanto, calcular a contribuição de todas as frequências, ou ainda, tal qual um banco de filtros, onde a uma dada frequência  $\omega$ , o sinal é processado ao longo do tempo em um filtro passa-banda cuja resposta ao impulso é a função da janela  $g_{\omega,b}(t)$  modulada àquela frequência (GARCIA, 2005). Neste sentido, a STFT pode ser entendida como uma representação passa-baixa das saídas de um filtro passa-banda, onde todos os filtros passa-banda têm a mesma largura de banda determinada pela janela selecionada (OLESKOVICZ et al., 2006).

Na Fig.(2.7) é apresentada a operação de janelamento para dois sinais  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$  com frequências distintas por meio de uma janela Gaussiana: Na Fig.(2.7a) estão apresentados os sinais  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$  originais; Na Fig.(2.7b) é apresentado o sinal de uma janela Gaussiana; Na Fig.(2.7c) os sinais  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$  janelados.



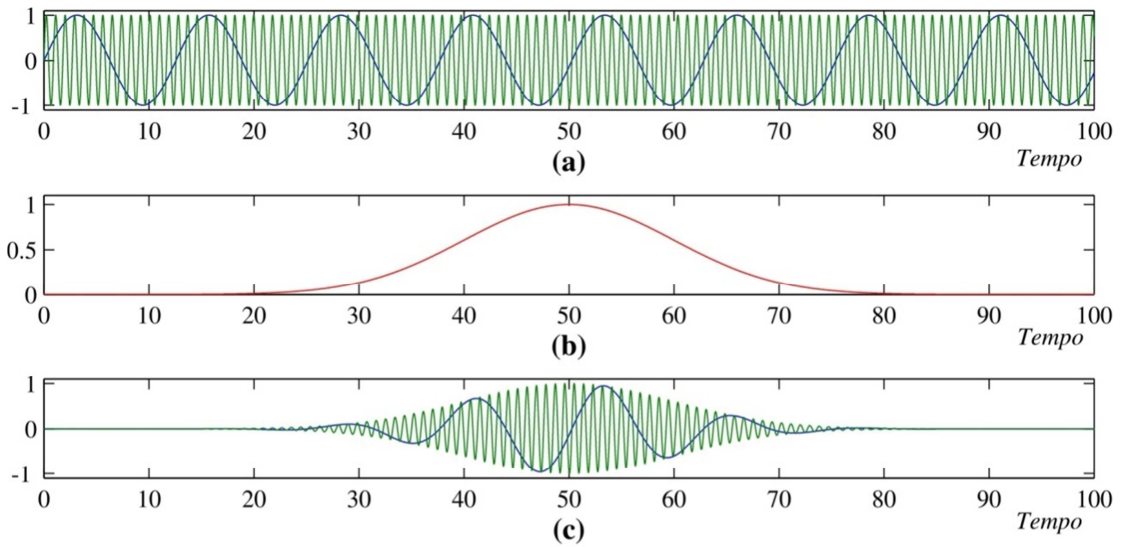


Figura 2.7 - Simulação de operação de janelamento: a) Sinais originais de  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$ ,  
b) Sinal tipo janela Gaussiana, c) Sinais janelados de  $f_1(t)$  e  $f_2(t)$ .

Escolhe-se na prática uma janela com resolução que possibilite a obtenção de informações em ambos os domínios, todavia limitando a precisão da análise (SANTIAGO, 2004) devido à mudança de escala permitir, numa escala maior, uma visão mais global, mas com menor precisão, e em uma escala menor, observar detalhes, renunciando o comportamento global. A seleção da janela  $g_{ab}(t)$  influi na resolução em tempo e frequência. Analogamente à mecânica quântica, pode-se definir uma relação entre as extensões das influencias da janela no tempo e na frequência conforme Eq.(2.4).

$$\Delta t \Delta \omega \geq \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

As resoluções de frequência e no tempo não podem ser arbitrárias devido ao seu produto ser limitado (resolução máxima) pelo Princípio da Incerteza de Heisenberg descrito na Eq.(2.4), a qual define a área mínima dos retângulos no plano tempo-frequência de larguras  $\Delta t$  e  $\Delta \omega$  conhecidos como caixa de Heisenberg ou átomo de tempo-frequência. Este princípio estabelece o máximo de separação do período do tempo e das frequências presentes na forma de onda analisada.  $\Delta t$  e  $\Delta \omega$  correspondem aos desvios padrões, isto é, raiz quadrada da variância, medidas de espalhamento (DE OLIVEIRA, 2007). Janelas Gaussianas são comumente utilizadas, pois minimizam a inequação. Pode-se provar que esse produto só se iguala a  $1/2$  se  $g_{ab}(t)$  for Gaussiana. Esta é, portanto, a melhor função a

ser usada como janela, quando for necessária uma boa resolução combinada de tempo e frequência. Entretanto, o problema principal da STFT permanece: uma vez escolhida a função janela e seu comprimento, as resoluções são fixas para a análise. Tal fato gera aliasing das componentes de altas e baixas frequências do sinal original que não se enquadram na escala da janela (GARCIA, 2005).

As resoluções fixas de um átomo de STFT são visualizadas na representação esquemática por caixas de Heisenberg na Fig.(2.8). Para efeito de clareza, os quadros são desenhados apenas em três janelas centradas em  $b_1$ ,  $b_2$  e  $b_3$  cujas respostas em frequências estão respectivamente moduladas em  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  e  $\omega_3$ . Considere uma janela  $g_{\omega,b}(t)$  cuja FT seja  $G_{\omega,b}(\omega)$ . Os pontos que indicam o centro do retângulo não fornecem nenhuma informação sobre o sinal, sendo relevante apenas a informação fornecida pela caixa de Heisenberg. Observe que  $\Delta t$  e  $\Delta\omega$  são fixos. Neste caso, o mesmo  $\Delta\omega$  apropriado para a distinção de frequências em torno de  $\omega_3$  pode não ser grande o suficiente para discernir frequências em torno de  $\omega_1$ . De modo análogo, um  $\Delta t$  que permita identificar com precisão adequada o instante  $b_1$  pode não ser grande o suficiente para distinguir com a precisão necessária o instante de tempo onde a frequência mais alta ocorre (GARCIA, 2005).

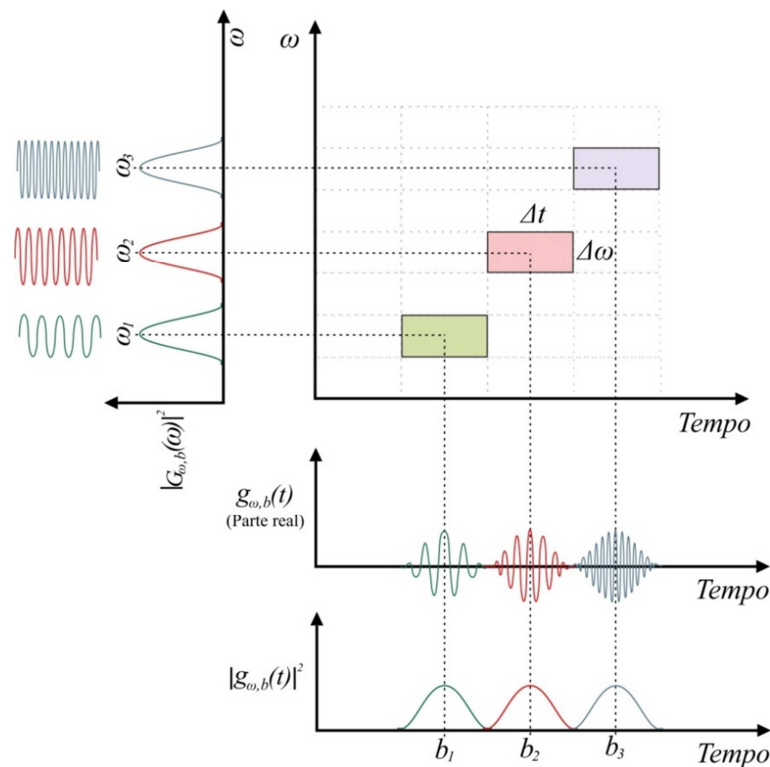


Figura 2.8 - Resolução tempo-frequência da STFT.

Outra restrição consiste em não existir bases ortogonais para a STFT, implicando na impossibilidade da definição de uma transformada inversa, sendo também difícil a definição de um algoritmo rápido que auxilie a aplicação da transformada.

A alternativa encontrada para o problema da resolução na análise tempo-frequência foi o desenvolvimento de uma nova técnica em que as diferentes frequências contidas no sinal são analisadas em diferentes resoluções. A essa técnica deu-se o nome de análise multiresolucional (MRA, do inglês Multiresolution Analysis).

A MRA foi desenvolvida para permitir uma análise com boa resolução no tempo e pouca resolução em frequência para altas frequências e, ao contrário, pouca resolução no tempo e alta resolução em frequência nas frequências baixas. Essa abordagem faz muito sentido quando se considera que a grande maioria dos sinais práticos apresentam componentes de alta frequência com curta duração e componentes de baixa frequência com longa duração.

A questão principal na MRA é que as janelas não têm mais um tamanho fixo durante a análise, mas variável que se adapta conforme as necessidades de resolução de cada situação. Essas novas janelas passaram a ser representadas por uma classe de funções que receberam o nome de wavelets.

Neste trabalho é realizada uma comparação de vários métodos de estimação da velocidade, em dois deles será utilizado a STFT para análise espectral do sinal.

## CAPÍTULO III

### MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE EM EIXOS GIRANTES

#### 3.1. MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DE VELOCIDADE

Como métodos de medição de velocidade, existem os diretos e os indiretos. Os métodos diretos utilizam de dispositivos eletromecânicos e tem alta exatidão. Sistemas de medição que utilizam sensores geralmente são montados no eixo do motor, porém, estes dispositivos apresentam limitações em suas aplicações, muitas vezes devido à dificuldade ao acesso ao eixo impossibilitando a implementação dos sensores. Existem diversos sensores para medição de velocidade, sendo classificados de acordo com sua exatidão, forma de comunicação e princípio de funcionamento.

Dessa forma vários métodos de medição indireta vêm sendo desenvolvidos ao longo dos anos. Em alguns casos a medição indireta acarreta em perda na exatidão, todavia muitas vezes é a única solução possível por ser um método não invasivo.

O grande desafio dos pesquisadores que estudam métodos *sensorless* é encontrar um método capaz de estimar a grandeza no transitório e no regime permanente, com um baixo erro, reduzindo esforço computacional, simplicidade e robustez, que atenda às necessidades da indústria (ADISSI, 2012).

Foram realizados três métodos para comparação da estimação de velocidade, onde foram necessários quatro tipos de sensores, o sensor de corrente e tensão, utilizado no método do torque no entreferro e da harmônica das ranhuras, o sensor de som (microfone)

e para validação dos métodos o tacômetro. Cada sensor merece certo cuidado em seu uso, pois seu uso incorreto pode afetar os sinais adquiridos.

O microfone é um sensor de som capaz de captar vibrações sonoras (geralmente frequência de 20Hz a 20Khz) e transformar em sinal elétrico. Neste trabalho o microfone foi utilizado para captar as ondas sonoras do motor. Através do sinal de saída do microfone será estimada a velocidade, de uma forma simplista, para cada “som ruído” diferente, terá uma velocidade correspondente. É importante resaltar que para uma boa medição com esse sensor é necessária a eliminação de qualquer ruído externo.

O sensor para medição da velocidade de referência foi o tacômetro, é um dispositivo que fornece o número de rotações em um eixo por unidade de tempo, pode ser mecânico ou elétrico. Esse sensor é bastante utilizado em aplicações quando é necessária uma boa exatidão, porém é instalado no motor, ocorrendo uma invasividade ao sistema.

O sensor escolhido para medição da corrente foi de efeito Hall por apresentar diversas vantagens, como: velocidade de resposta, robustez, durabilidade, variedade de formatos e sensibilidades, fácil instalação e a medição feita é sem contato. Esse sensor tem a capacidade de medir tanto campos contínuos (DC) como alternados em um único instrumento. O dimensionamento do sensor depende da potência do motor a ser monitorado.

A aquisição da tensão no motor é feita através de dois transformadores que reduzem a tensão elétrica entre fase e motor, geralmente de 380V a 30V AC, para valores compatíveis com os circuitos conversores A/D, no caso, de 0 a 3,3V.

### **3.2. MÉTODO A PARTIR DAS HARMÔNICAS DAS RANHURAS**

Este método de estimação da velocidade em eixos girantes é baseado no espectro de frequência da corrente. Abordagens que utilizam o espectro de frequências das correntes de um motor de indução trifásico enquadram-se na categoria de métodos não invasivos (SANTOS e OLIVEIRA, 2005).

Na maioria das indústrias já se encontra um sensor de corrente nos motores, para diversos tipos de controle. Logo, em um sistema que já utilize esse tipo de sensor é possível à estimação da velocidade, sem que seja necessária a instalação de um sensor exclusivo para essa estimação.

Os componentes de frequência do espectro de corrente do estator, no motor de indução, estão relacionados com a velocidade de rotação do rotor, com o número de ranhuras do rotor e com o número de pares fundamentais de polos (NANDI et al, 2001). Estes componentes surgem de variações na permeância do entreferro, que, interagindo com a força magneto motriz de entreferro, produz uma densidade de fluxo magnético de entreferro (HURST et al, 1996).

A distribuição da densidade de fluxo no entreferro é a base para o entendimento de como esses componentes de frequências surgem. Para analisar essa distribuição é considerada a abordagem de campos girantes no entreferro (SANTANA et al, 2000). Sabendo que a densidade de fluxo é o produto da permeância específica e da força magneto motriz, as ondas de densidade de fluxo, de permeância e da força magneto motriz também são relacionadas da mesma forma e expressas em (3.1) (SANTANA et al, 2000).

$$B_{ag} = P_{ag} * MMF_{ag} \quad (3.1)$$

Onde:

$B_{ag}$  : fluxomagnético do entreferro;

$P_{ag}$ : permeância do entreferro;

$MMF_{ag}$ : força magnetomotriz do entreferro.

As variações na permeância de entreferro são causadas principalmente através das perturbações das ranhuras e excentricidade do rotor (RODEIRO, 2005).

A partir do espectro de frequências da corrente de fase do MIT, pode ser estimada indiretamente a velocidade de seu eixo de forma não invasiva (BLASCO-GIMENEZ et al,

1997). O método parte da análise espectral e na busca de harmônicos gerados pelas saliências do motor, que surgem a partir da ranhura do rotor e da sua excentricidade. A frequência desses harmônicos da excentricidade dinâmica do rotor está relacionada com a sua velocidade segundo a equação (3.2).

$$f_{he} = f_1 \left[ (kr + n_d) \frac{1-s}{p/2} + n_w \right] \quad (3.2)$$

Onde

$f_{he}$ : é a frequência das harmônicas relacionadas com a saliência;

$f_1$ : é a frequência fundamental da alimentação;

$k = 0, 1, 2, \dots$  é o número da harmônica;

$r$ : é o número de ranhuras do rotor;

$p$ : número de polos;

$s$ : é o escorregamento;

$nd = 0 \pm 1, \pm 2, \dots$ : é a ordem de excentricidade do rotor;

$n_w = \pm 1, \pm 3, \dots$ : é a ordem dos harmônicos do entreferro.

No método para relacionar um componente de frequência de ranhura particular a partir de (3.2), além de  $f_1$  e do número de pólos,  $p$ , é necessário conhecer  $n_d, n_w$  *er*. Estes parâmetros dependem de características estruturais da máquina que em geral são desconhecidos. Nessa situação os harmônicos de excentricidade, próximas da frequência fundamental  $f_1$ , possibilitam uma opção de método para a determinação desses parâmetros (RODEIRO, 2005).

Os parâmetros  $k, nd$  e  $n_w$  do motor podem ser determinados através da incorporação de harmônicas de excentricidade. Podem ser localizados no espectro da corrente próximo da fundamental  $f_1$ , substituindo  $k=0, n_d = \pm 1, n_w=1$  em (3.2):

$$f_{ecc} = f_1 \left[ 1 \pm \left( \frac{1-s}{p/2} \right) \right] \quad (3.3)$$

Os principais harmônicos de ranhuras, os mais evidentes, podem ser dados pela equação (3.2) substituindo  $k=1, n_d = 0, n_w=1$  (NANDI et al, 2001).

Na equação (3.2) percebe-se claramente a dependência do componente de frequência  $f_{he}$  apenas em função do escorregamento quando fixados os demais parâmetros. Entretanto, os componentes de frequência descritos por (3.2) não estão presentes na corrente elétrica para todas as combinações de  $p$  e do número de ranhuras dos MIT (NANDI et al, 2001).

Para fazer a estimativa da velocidade inicialmente é medido uma de suas correntes de fase através do módulo de aquisição de dados (DAQ). Posteriormente, um programa feito no LABVIEW busca a frequência ( $f_h$ ) de maior amplitude ( $h_{máx}$ ) dentro da faixa de frequência dada pela equação (3.2) e que depende do número de ranhuras ( $r$ ) (SANTOS e OLIVEIRA, 2005).

Na figura 3.1 se observa a FFT do sinal da corrente no intervalo determinado pela fórmula (3.2), e a harmônica máxima  $h_{max}$  para um motor com frequência de alimentação em 60 Hz.

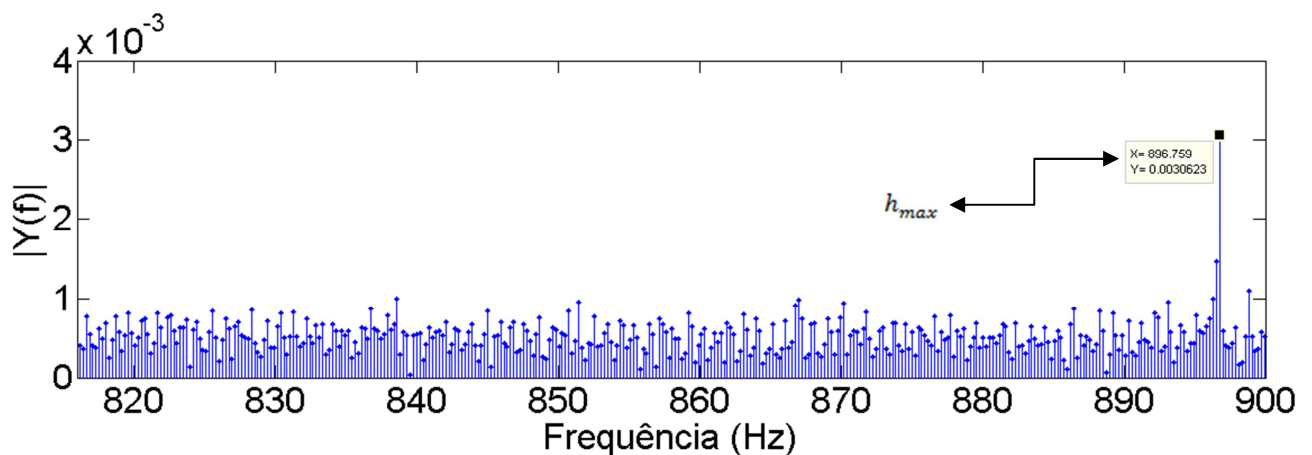


Figura 3.1 - Espectro do sinal de corrente com o motor com uma frequência de alimentação a 60 Hz com o escorregamento de 0,0032.



Com posse da frequência ( $f_h$ ) de maior amplitude ( $h_{máx}$ ) é calculado o escorregamento pela equação (3.5).

$$s = 1 - \frac{(p/2) * (f_h - 1)}{r} \quad (3.5)$$

A partir desse escorregamento  $s$ , e da velocidade síncrona  $n_s$ , estima-se a velocidade do eixo do motor de indução trifásico com a equação (3.6).

$$n = n_s(1 - s) \quad (3.6)$$

Na figura 3.2 se apresenta o diagrama de blocos do método para obtenção da estimação da velocidade.

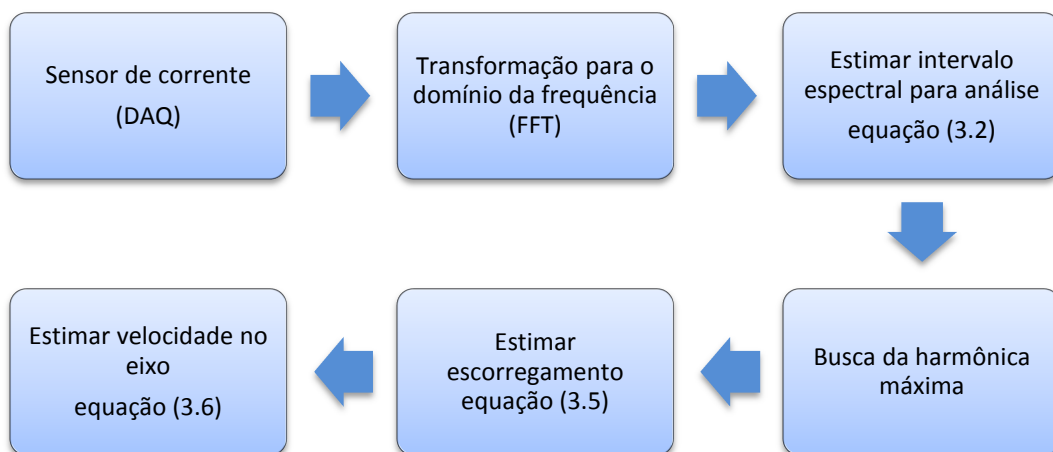


Figura 3.2 – Procedimento de estimação da velocidade a partir do espectro.

O espectro da frequência foi obtido através do método da transformada de Fourier de curta duração.

Com a aquisição apenas de uma corrente é possível realizar a estimação da velocidade. Na rotina criada é calculado a FFT de curta duração do sinal da corrente. O usuário entra com os dados do parâmetro do motor, a frequência de alimentação, o número de pólos, e os parâmetros  $n_d, n_w, reK$ . Em seguida é encontrada a faixa de frequência da maior harmônica pela fórmula (3.2), e é localizada a frequência de maior amplitude de forma automática. Com posse dessa frequência é calculado o escorregamento pela fórmula (3.5). Com o escorregamento, e a velocidade síncrona, estima-se a velocidade do eixo do motor de indução trifásico com a equação (3.6). Com essa velocidade estimada e com a velocidade do tacômetro também adquirida e presente no arquivo de entrada, é feita uma comparação e calculada a diferença entre essas duas velocidades. O programa para estimação da velocidade através do método das harmônicas das ranhuras segue no Anexo 1.

Segundo Adissi, 2012, esse método possui restrição em sua implementação digital, como a necessidade de um número de amostras relativamente alto para obter uma resolução espectral razoável, alta sensibilidade a ruídos e a necessidade de um alto processamento.

Para uma excelente análise do espectro de frequência, no momento da coleta de dados, as variações de torque e velocidade devem ser as mínimas possíveis, eliminando assim harmônicas indesejáveis e obtendo uma correta estimação da velocidade.

A bancada utilizada para esses testes apresenta exatamente essas características, de estabilidade do sistema como um todo.

### **3.2.1. Método de detecção automática dos parâmetros $n_d, n_w$ e $r$**

Para determinação dos parâmetros que não são conhecidos pelos usuários e não é disponibilizado pelos fabricantes, foi proposto um algoritmo para identificação automática (RODEIRO, 2005). Os parâmetros são o número de ranhuras  $R$ , a ordem de excentricidade  $n_d$ , e a ordem do componente de frequência  $n_w$ . Eles são necessários para encontrar  $f_{he}$ , para  $k = 1$ , (vide Eq. 3.2) eles se destacam no espectro da corrente elétrica, e tendo posse desses valores a velocidade é estimada de forma indireta.

O algoritmo separa as componentes de frequência que possuem maiores amplitudes e que se encontram separados por uma distância de um múltiplo inteiro de  $2 \cdot f_1$ .

O par de componentes de frequência mais significativo em amplitude denomina-se de primário e é caracterizado por seus parâmetros específicos  $K, n_d, n_{w1}$  e  $n_{w2}$ . Outro par, mais fraco, de excentricidade diferente,  $n_{d2}$ , se existir é chamado de secundário.

O algoritmo de detecção de velocidade usa as equações de harmônicas de ranhura primários e secundários para o cálculo da velocidade (HURST et al, 1996).

As harmônicas de excentricidade, que são prontamente aparentes na maioria dos motores de indução, não apenas determinam parâmetros de inicialização, mas também melhoram o desempenho do algoritmo de detecção de velocidade (HURST et al, 1996).

O algoritmo trabalha considerando que os possíveis valores pares que o número de ranhuras podem assumir valores de 28 a 54. Inicialmente o algoritmo foi baseado na referência (HURST e HABETLER, 1996) que previa números ranhuras de 32 a 54, no entanto houve a necessidade de acrescentar algumas modificações que pudessem viabilizar a inclusão do motor de 28 ranhuras no modelo do algoritmo, (RODEIRO, 2005).

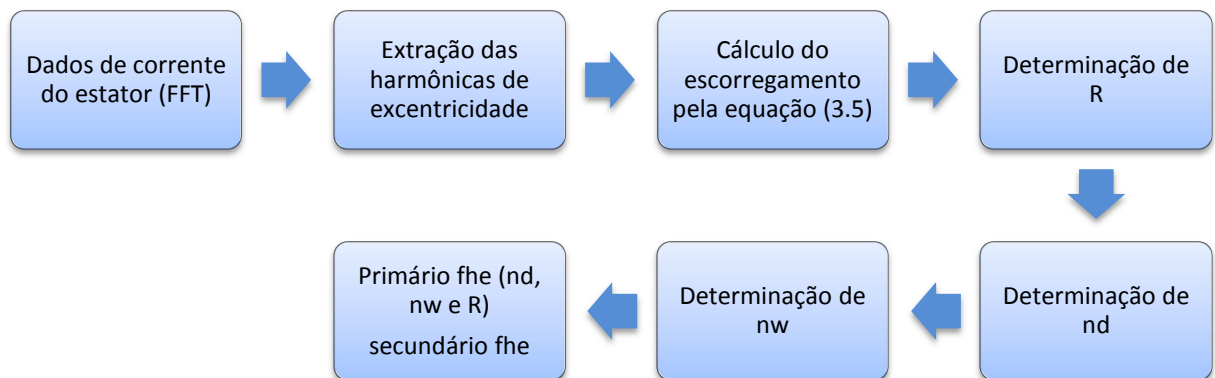


Figura 3.3 - Procedimento de detecção dos parâmetros  $n_d, n_w$  e  $r$ .

O programa para encontrar o número de ranhuras do motor foi feito no MATLAB, o programa é uma rotina que varia os possíveis números de ranhuras, que foi programado

para variar de 20 a 54, sendo sempre números pares. Junto a essa variação dos possíveis números de ranhura é feita a variação da ordem da excentricidade  $n_d$  entre -1 e 1. Aplicando esses possíveis valores na equação (3.2) são localizados o pico entre esses intervalos, e comparado com os outros harmônicos obtidos, é armazenada a informação toda vez que essa harmônica for maior, restando dessa comparação o maior harmônico obtido, com seu número de ranhura correspondente. A rotina para determinação da ordem da excentricidade ( $n_d$ ), foi feita variando  $n_d = \pm 1$  e a ordem da harmônica  $n_w = \pm 1$ , e da mesma forma que para ranhura essa variação foi feita na equação 3.2 e localizado o pico entre esses intervalos, sempre comparando com o ultimo pico encontrado e se maior é armazenado. Da mesma forma é feito para encontrar a ordem da harmônica ( $n_w$ ), variando apenas  $n_w = \pm 5$ .

### **3.3. MÉTODO DES ESTIMAÇÃO ATRAVÉS DO TORQUE NO ENTREFERRO**

Este método consiste em estabelecer uma relação direta entre a velocidade angular e o torque no entreferro. Foi desenvolvido por Adissi (2012) quando em sua dissertação foi necessário estimar a velocidade em um rápido tempo de processamento, por ser um sistema embarcado.

Horrell (1957) estudou a relação e traçou a curva torque versus velocidade em condições de funcionamento com tensão e frequência constantes. Esta curva é amplamente conhecida e trata-se de uma das curvas mais importante do motor de indução.

A figura 3.4 mostra um acurva de velocidade versus o torque.

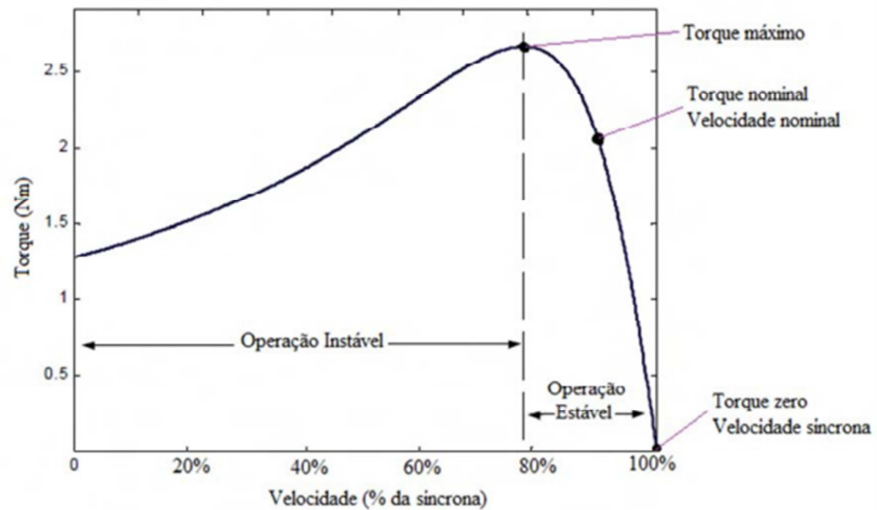


Figura 3.4- curva de torque versus velocidade no eixo de um motor de indução (ANDRADE, 2003).

Observa-se que a operação estável ocorre para velocidades compreendidas entre a velocidade síncrona e a velocidade correspondente ao torque máximo que o motor pode fornecer. Para velocidades abaixo deste ponto a operação se torna instável, e quando a operação ocorre nessa região, o motor é levado à velocidade zero ou situação de bloqueio do rotor (ANDRADE, 2003).

Nessa região de operação estável a relação de torque e velocidade é aproximadamente linear.

O fluxo de corrente e a queda de tensão na impedância do estator ficam invertidas quando a máquina opera como gerador (Figura 3.5), isto indica que a força eletromotriz durante a geração é maior que durante a operação motora para os mesmos escorregamentos. Deste modo, o fluxo de entreferro também fica maior e isto é o que justifica o maior pico do conjugado quando é operado como gerador, conforme a figura 3.5.

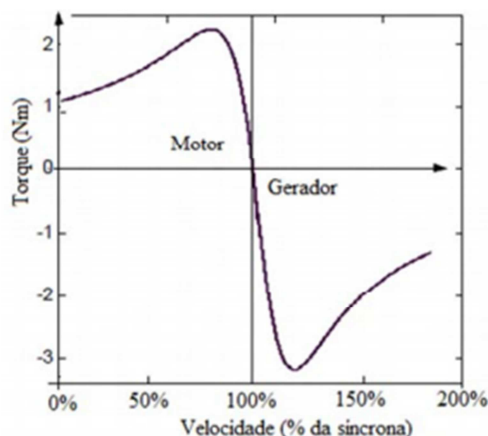


Figura 3.5 – Relação entre o torque e a velocidade angular (FITZGERALD et al, 2006).

O método de estimação consiste em estimar primeiro o torque no entreferro e a partir dele, estimar a velocidade no eixo do motor de indução.

A potência elétrica de entrada, definida pelas tensões e correntes do motor é transmitida a região do entreferro como potencia magnética, que por sua vez é transmitida ao rotor ao impor um torque e gerar uma potência mecânica. Nessa transferência de potência ocorrem perdas, logo, a magnitude da potência elétrica, magnética e mecânica são diferentes e proporcionais. O torque no entreferro é definido pela potência do entreferro dividida pela velocidade angular.

É possível definir o torque do entreferro a partir da sua relação com o fluxo o de acoplamento do enrolamento do estator, que é dado pela equação (3.7) (OJO,1990).

$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} [(i_c - i_a)\lambda_{ab} + (i_a - i_b)\lambda_{cb}] \quad (3.7)$$

Onde:

$\lambda_{ab}, \lambda_{cb}$  = fluxos magnéticos de acoplamento;

$i_a, i_b, i_c$  = correntes de linha de entrada do motor;

$p$  = número de pólos do motor.

O fluxo magnético de acoplamento em cada fase é dado pela equação (3.8)

$$\lambda_{a,b,c} = \int (V_{a,b,c} - Ri_{a,b,c}) dt \quad (3.8)$$

Onde:

$V_{a,b,c}$  = tensões de fase;

$R$  = resistência do enrolamento do estator.

A partir da equação (3.7) e (3.8) obtêm-se a equação (3.9) (OJO, 1990).

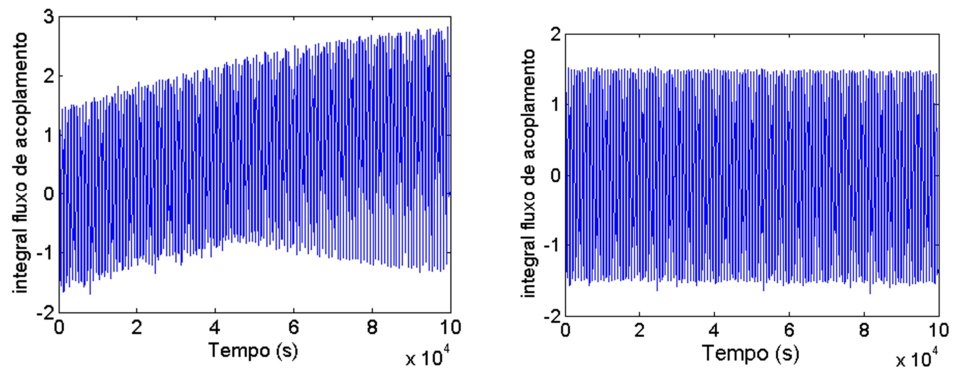
$$T_{ag} = \frac{p\sqrt{3}}{6} \{ (i_c - i_a) \int [V_{ca} + R(2i_a + i_b)] dt + (2i_a - i_b) \int [V_{ab} - R(i_a - i_b)] dt \} \quad (3.9)$$

Com a equação (3.9) é possível determinar o torque no entreferro, somente com o processamento das medidas de dois sensores de tensão e dois sensores de corrente (LIMA FILHO, 2009).

Ao serem calculadas as integrais do fluxo de acoplamento leva-se em consideração a fase inicial da força-eletromotriz que causa um offset no sinal. Os valores offset oriundos dos sensores e do conversor analógico/digital, são compensados a cada ciclo de integração, subtraindo do sinal a sua média. Dessa forma é retirado a componente DC do sinal senoidal resultante.

Fisicamente, esse offset representa um nível de fluxo constante que não existe durante a operação normal da máquina (ADISSI, 2012).

Na Fig. (3.6.a) é ilustrada a integral quando não são feitas as considerações de valores de off-set dos sinais adquiridos e do valor DC gerado na integral, enquanto que em Fig (3.6.b) estes valores são compensados. Em ambas as curvas são mostrados vários ciclos de senóide em função do tempo, a saturação é verificada pelo contorno da curva e no seu deslocamento no eixo das ordenadas.



a)

b)

Figura3. 6- Integral obtida quando não são feitas (a) e quando são feitas (b) as considerações de valores de offset dos sinais adquiridos e do valor DC gerado na integral.

O algoritmo utilizado para estimação da velocidade no eixo do motor, que utiliza o torque no entreferro, deve compensar os componentes DC gerados (offset).

O resultado dessa compensação através da subtração do valor média a cada ciclo da senóide foi excelente, pois a eliminação do valor DC é precisa e não causa distorções na fase, ao contrário de alguns métodos propostos na literatura, como a associação de Filtros Passa Baixas (HU E WU, 1998) ou Filtro Passa Alta (ZERBO, 2006), que ocasionam distorções na magnitude da fase, sendo necessário a sua compensação no próprio algoritmo, exigindo assim mais processamento para execução.

Para o calculo do torque no entreferro é necessário saber a resistência do enrolamento do estator ( $R$ ), que pode ser medida diretamente através de um ohmímetro.

Com posse do torque no entreferro calculado pela equação (3.9) é possível estimar a velocidade, estabelecendo uma relação direta entre a velocidade angular procurada e o torque do entreferro já conhecido (ADISSI, 2012).

O motor opera em velocidades compreendidas entre a velocidade síncrona e a velocidade correspondente ao torque máximo do motor. Nessa região a relação do torque e velocidade é aproximadamente linear.



Ao traçar uma reta sobre a curva da figura (3.5), obtemos uma boa aproximação para a curva na região entre a velocidade e torque nominais e a velocidade síncrona e torque zero.

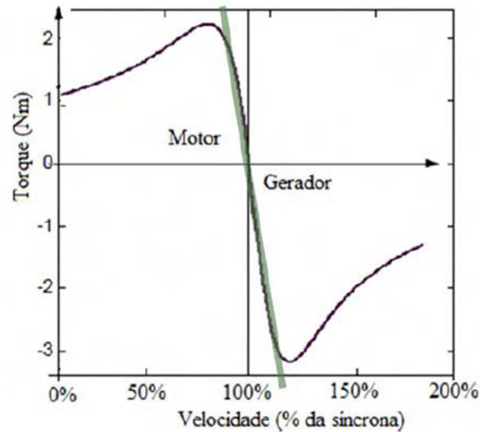


Figura 3.7 - Relação de linearização entre o torque e a velocidade angular. (Adaptada da figura 3.5)

A partir desse gráfico se estabeleceu uma relação linear entre velocidade e o torque no entreferro, pois o torque no eixo é muito próximo do torque no entreferro, distanciado apenas do valor da perda. Portanto, a curva do torque no entreferro em função de velocidade é semelhante à curva da figura (3.7), sendo levemente deslocada para cima (ADISSI, 2012).

Sendo assim, os parâmetros da relação linear devem ser determinados a partir de dois pontos conhecidos da curva.

A estimação da velocidade feita por esse método foi realizada de duas maneiras, estimando a velocidade pelo torque do entreferro nominal, onde os parâmetros a e b da reta foram determinados pelo ponto de torque zero e velocidade síncrona ( $\omega_{sinc}$ ) e pelo ponto nominal e velocidade nominal ( $\omega_n$ ), e outra maneira de estimação da velocidade pelo torque no entreferro calibrado, onde os valores de a e b da reta foram calibrados de acordo com a velocidade medida no eixo do motor.

O algoritmo apresentado por Adissi (2012) determina os torques no entreferro equivalentes ao ponto nominal ( $T_{agnom}$ ) e zero ( $T_{ag0}$ ), conforme as equações:

$$T_{ag0} = \frac{(L_{ad} + L_{mec})P_n}{\omega_{sinc}} \quad (3.10)$$

$$T_{agnom} = \frac{P_n}{\omega_n} + T_{ag0} \quad (3.11)$$

Onde:

$L_{ad}$  = porcentagem de perdas adicionais;

$L_{mec}$  = porcentagem de perdas mecânicas;

$P_n$  = potência nominal do motor;

Com posse de ( $T_{agnom}$ ) e ( $T_{ag0}$ ) são determinados os parâmetros a e b da equação da reta, conforme as equações (3.12) e (3.13).

$$a = \frac{(\omega_{sinc} - \omega_n)}{T_{ag0} - T_{agnom}} \quad (3.12)$$

$$b = \omega_{sinc} - aT_{ag0} \quad (3.13)$$

E finalmente a velocidade é estimada diretamente a partir do torque no entreferro de acordo com a equação (3.14).

$$\hat{\omega} = aT_{ag} + b \quad (3.14)$$

Pelo método da estimação da velocidade pelo torque no entreferro calibrado os valores dos parâmetros a e b da equação da reta foram calibrados com os valores das velocidades do eixo medida.

Na figura 3.8 segue a sequência dos passos realizados para este método.

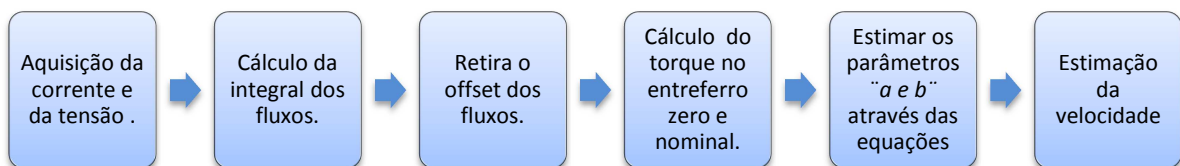


Figura 3.8- procedimento para estimação da velocidade através do método do torque no entreferro.

É importante ressaltar que nesse método ocorre grande influência de todos os valores necessários para obter o valor da velocidade angular, como a potência nominal, velocidade síncrona, velocidade nominal e torque no entreferro. Os valores nominais estão presentes nas informações da placa do motor, porém podem conter um erro de até 20%.

### **3.4. MÉTODO DE ESTIMAÇÃO A PARTIR DA VIBRAÇÃO ACÚSTICA**

Muitas pesquisas de controle de motor de indução e principalmente de análise de falhas através da vibração acústica, já foram realizadas. Jeevanand e Abraham (2008) fizeram um trabalho que demonstra a forma como o estado de um motor de indução pode ser monitorado através da análise do sinal acústico, que representa os dados de vibração não estacionários. A análise foi feita usando vários algoritmos de processamento de sinal e foi desenvolvido utilizando o conceito PSD (Power Spectral Density) em Wavelet de decomposição.

Elmaleeh e Saad (2008) demonstram um método baseado na análise de tempo de um sinal de emissão acústica (EA) e rajadas capturadas a partir de conjunto de rolamento. Estes sinais são processados e analisados por meio de técnicas avançadas de processamento de sinal para obter as informações sobre o processo que está sendo monitorado. Um sistema de medição da emissão acústica em tempo real é desenvolvido. Isso permite que os sinais (EA) sejam processados e analisados utilizando o LabVIEW.

Raad, et al (2004) propõe um trabalho baseado na detecção precoce de falhas de transmissão em máquinas rotativas, tendo como objetivo ilustrar a aplicação de monitoramento de emissão acústica para detecção de falhas de transmissão. O monitoramento de emissão acústica é realizado rotineiramente em um número limitado de aplicações industriais, sendo não só para detectar processos de degradação dos componentes, mas também para detectar eventuais anomalias.

Tendo em vista todos esses trabalhos que utilizam da emissão acústica do motor de indução trifásico para o seu monitoramento, em todos os sistemas com motores que apresentem a EA como fonte para captura do sinal, é possível também utilizar esse sinal

produzido para estimação da velocidade, não sendo necessária a instalação de outro tipo de sensor.

O microfone é um sensor de som capaz de captar vibrações sonoras e transformar em sinal elétrico.

Existem vários tipos de microfones, e será feito uma breve classificação de acordo com a sua directividade. Existem os omnidirecionais que captam os sons de todas as direções, os direcionais que captam o som vindo de uma direção, os bidirecionais que captam sons de direções opostas, os cardioides que captam melhor os sons frontais, os hipercardioides que captam com precisão os sons que vêm da frente, destacando-os mais que os que vem de trás.

A ideia da utilização desse tipo de medição surgiu da sua simplicidade, e total não-invasividade ao sistema.

O microfone será instalado próximo ao motor de indução e será ligado a uma mesa de som que funciona como um circuito de condicionamento do sinal, por sua vez a mesa de som esta conectada ao computador na entrada do microfone, o programa de aquisição dos dados foi o Labview.

Para cada velocidade de rotação do eixo do motor tem-se um ruído característico e uma frequência de giro correspondente. Figura 3.9.

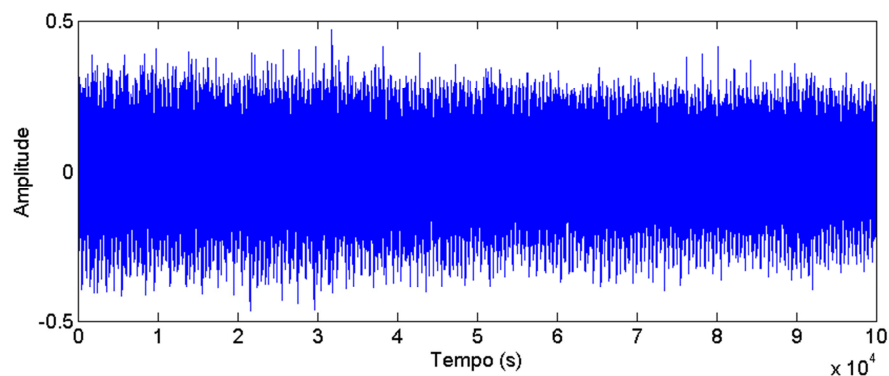


Figura 3.9- sinal do som do motor a uma frequência de alimentação de 30 Hz.

A Figura 3.10 ilustra o espectro centrado na frequência de 10 kHz para o sinal de som adquirido próximo do rolamento do motor. Percebem-se picos igualmente espaçados entre si nessa faixa de frequência, que é a frequência de chaveamento do inversor de frequência. Esses picos indicam uma periodicidade da vibração acústica emitida pelo motor que coincidem com a rotação do eixo do motor. A partir da média das diferenças de frequência entre picos subsequentes ( $M_f$ ) tem como se determinar a velocidade de rotação no eixo.

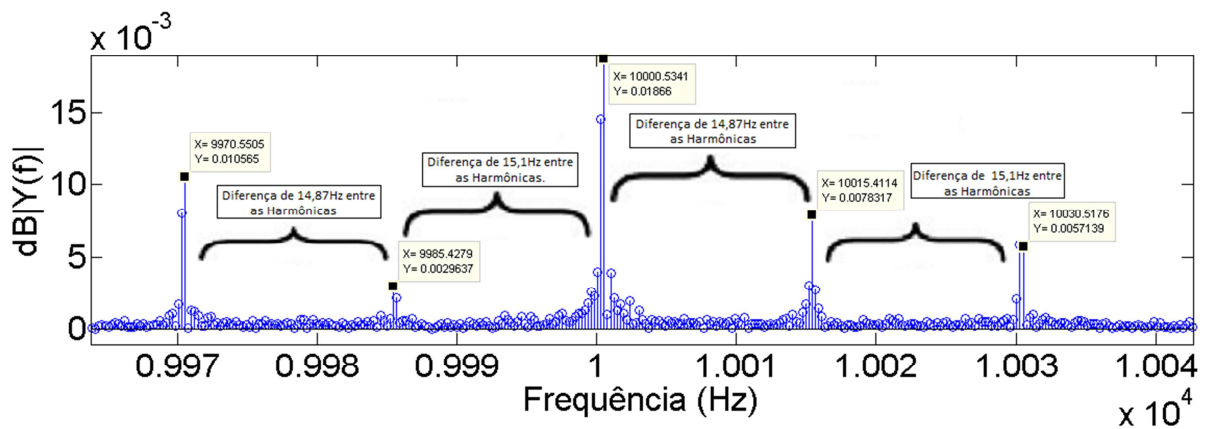


Figura 3.10 - Espectro do sinal de som do motor de indução trifásico com a velocidade síncrona a 30Hz.

Para estimar a velocidade do motor ( $\hat{\omega}$ ), tem-se a equação 3.15:

$$\hat{\omega} = M_f \times 60 \quad (3.15)$$

Onde  $M_f$  é a média da diferença das harmônicas na frequência.

Na figura (3.10) observa-se que a diferença da posição das harmônicas é de aproximadamente 15Hz e que a velocidade síncrona do motor estava a 30Hz.

Essa diferença pode variar um pouco devido ao escorregamento. Com posse desse valor de frequência é estimada a velocidade do eixo do motor.

Importante citar as dificuldades encontradas nesse método. Como esse método é baseado no som, é de fundamental importância para uma boa precisão da estimativa da velocidade que nenhum ruído externo interfira na hora de colher os dados.

Na Figura 3.11 encontra-se o diagrama de blocos do método de estimativa da velocidade através da acústica.

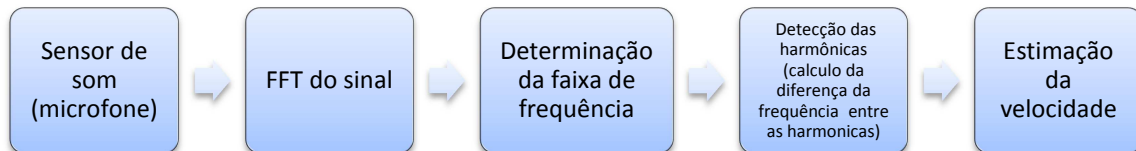


Figura 3.11 – Procedimento para estimativa da velocidade a partir da acústica.

O programa de estimativa da velocidade foi feito no Matlab. Entrando com o sinal do som o programa faz a FFT desse sinal, e automaticamente detecta as harmônicas na faixa de frequência escolhida, com as harmônicas localizadas é calculada a diferença entre o seu posicionamento na frequência. A partir desse valor de frequência das diferenças das harmônicas é estimada a velocidade.

## CAPÍTULO IV

### **4. BANCADA EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO**

Uma bancada de testes foi desenvolvida utilizando dois motores: um de corrente alternada e outro de corrente contínua, o torquímetro e o inversor de frequência. Ferramentas e instrumentos computacionais como o LABVIEW e o MATLAB (na aquisição dos dados e no processamento) também foram utilizados.

A bancada projetada é capaz de submeter uma carga conhecida constante ao eixo do MIT, variando de zero até valores de torque acima do nominal. O MIT é acionado por inversor de frequência, assim é possível variar a frequência de alimentação do motor, fazendo variar a velocidade de baixa à alta rotação.

Na Figura 4.1 está ilustrada a bancada projetada e construída em laboratório para realização de testes de medição e estimação de velocidade. A bancada consiste basicamente em um MIT com seu sistema de acionamento, o sistema de controle de carga com um gerador de corrente contínua; e os instrumentos de medição elétricos e mecânicos.

A bancada contém um motor de indução (5), acionado através de inversor de frequência (7) e acoplado ao transdutor de torque (3). O gerador CC (2) tem em seus terminais de armadura um banco de resistências para dissipar a energia gerada com o movimento. O enrolamento de campo do gerador CC é alimentado através de um circuito retificador com varivolt (1), possui também um mancal com rolamentos (4) e uma fonte de

alimentação (6). Ao ser posto em movimento pelo MIT, o gerador impõem uma carga controlada pelo usuário ao eixo do motor, enquanto os instrumentos medem as variáveis de interesse.



Figura– 4.1 - Bancada para ensaios de torção em motores de indução trifásicos.

Se o motor de indução funcionar em vazio, ele apresentará um torque próximo de zero no eixo. A partir do momento que se imprime uma dificuldade ao eixo do motor em girar, ou seja, submete ele a uma carga, o mesmo começa a apresentar um torque no eixo.

A frequência nominal do MIT utilizado é de 60 Hz, mesma da rede elétrica brasileira, porém, com o inversor é possível variar controladamente a frequência, alterando diretamente a velocidade síncrona do motor.

O inversor de frequência utilizado na montagem da bancada foi o CFW 700 fabricado pela WEG (Figura 4.2).





Figura 4.2 - Inversor de frequência utilizado no acionamento da bancada.

#### **4.1. SISTEMA DE ACIONAMENTO**

A bancada é acionada utilizando o quadro de comando (Figura 4.3), através do inversor de frequência CFW 700 fabricado pela WEG que pode ser ajustado para a velocidade síncrona desejada do motor. O quadro contém uma botoeira vermelha para ser acionada pelo usuário e desligar todo o sistema em caso de anormalidade. O quadro contém disjuntores e contactores para proteção, seccionamento e acionamento do circuito. Em funcionamento normal, o motor pode ser acionado e sua velocidade ajustada sem precisar abrir o quadro de comando.

O quadro de comando conta ainda com espaço para o sistema de aquisição de dados de tensão e corrente elétrica.



Figura 4.3 - Quadro de comando.

## 4.2. GERADOR CC

O gerador CC (Figura 4.4) é uma máquina de corrente contínua, capaz de atuar como gerador e como motor, modelo 132S, fabricante Varimot, potência nominal 7,5 CV, rotação nominal de 1800 rpm.

A máquina é utilizada para impor carga no motor de indução trifásico. A máquina CC alimenta uma carga resistiva constante e a variação da potência é feita pela variação da excitação de campo da máquina CC, através de uma fonte de tensão contínua ajustável (varivolt). Dessa forma, a variação da excitação muda a tensão sobre os resistores que dissipam a potência recebida. Através da alteração da corrente de campo é possível obter uma carga controlável no eixo, permitindo que o mesmo trabalhe em todas as faixas de potência possíveis.



Figura 4.4 - Máquina de corrente contínua.

Nos terminais da armadura do gerador CC foram acopladas quatro resistências de  $24\ \Omega$  e 2000 W ligadas em paralelo (Figura 4.5) para dissipar a energia gerada com o movimento do gerador.

Dessa forma, a resistência elétrica na armadura é convertida em resistência mecânica (torque) ao motor de indução.



Figura 4.5 - Resistências aletadas acopladas à armadura.

### 4.3. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

#### 4.3.1. Torquímetro

Torquímetro é um instrumento de medição direta do torque no eixo girante. O aparelho selecionado para a bancada foi o torquímetro digital HBM T40B-200 (Figura 4.6), com acoplamento por flange, capacidade de torque nominal de 200Nm, precisão de 0,05% do fundo de escala, capacidade de medida de torque a rotações até 20.000 rpm. Possui um sistema eletromagnético de medições precisas da velocidade de rotação, mesmo em baixas rotações (HBM, 2014).



Figura 4.6 - Torquímetro digital HBM T40B.

### 4.3.2. Dínamo taquimétrico

Dínamo taquimétrico, tacogerador ou gerador taquimétrico (Figura 4.7) é um sensor analógico de velocidade, largamente utilizado em máquinas que necessitam conhecer a velocidade.

A comparação deste dispositivo a um pequeno motor, com especificações próprias, é pertinente. O dínamo é acoplado ao eixo do motor, onde ao girar é gerada uma tensão elétrica proporcional à sua velocidade de rotação.

Para que as medições realizadas com o dínamo taquimétrico tenham uma boa confiabilidade são consideradas algumas características como: linearidade, mínimo tempo de resposta, mínima ondulação, reversibilidade e robustez.



Figura 4.7 - Dínamo taquimétrico acoplado ao eixo do gerador.

Para validação dos resultados de estimação da velocidade pelos métodos propostos, a velocidade estimada foi comparada a velocidade medida pelo dínamo taquimétrico.

Para calibração do dínamo taquimétrico foi utilizado o estroboscópio da Figura 4.8 que foi instalado na bancada. Este instrumento contém uma lâmpada que pisca em uma frequência conhecida, permitindo a medição da velocidade de objetos rotativos.



Figura 4.8 - Estroboscópio utilizado na calibração do dínamo taquimétrico.

### 4.3.3. Sensor acústico

O microfone utilizado, visto na Figura 4.9, foi o Behringer ULTRAVOICE XM1800S. É do tipo dinâmico, tem uma resposta de frequência de 80Hz – 15 kHz, sua directividade é hipercardióide, tem uma impedância de  $600\Omega$ , sensibilidade de  $-52\text{dBV}$  ( $0\text{dBV} = 1 \text{ V/Pa}$ ),  $2.5 \text{ mV/Pa}$ .

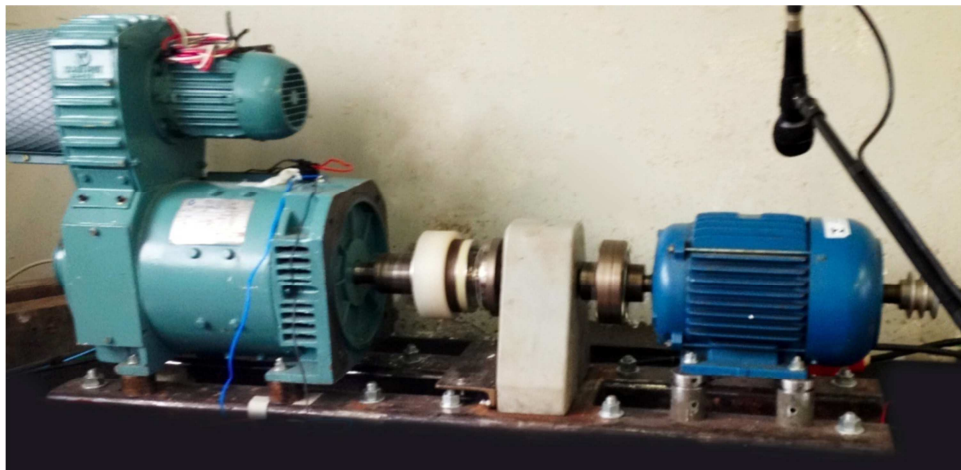


Figura 4.9 - Microfone utilizado para aquisição do som.

O padrão hipercardióide é usado pelo XM1800S. Assim, o XM1800S se destaca em ambientes onde existe uma grande quantidade de ruído ambiente indesejado. O XM1800S

excelentemente reproduz os sinais sonoros originados diretamente em frente ao microfone, enquanto rejeita ou minimizar sinais sonoros originados na área atrás do microfone.

Ligado ao microfone encontra-se a mesa de som da UNIC com o modelo MAC STD 04 (Figura 4.10), obtendo como especificações técnicas 4 canais independentes e resposta em frequência de 10Hz a 30KHz. Essa mesa amplifica o sinal do som e foi conectada diretamente ao computador para a aquisição do sinal.



Figura 4.10 – Mesa de som.

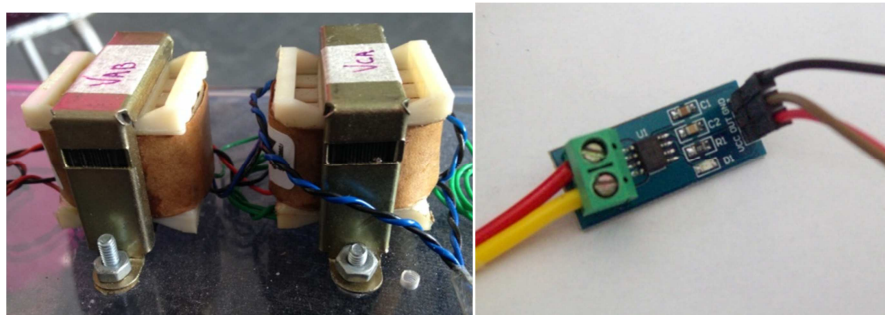
#### 4.3.4. Sistema de Aquisição de tensão e corrente

Os sensores de tensão (Transformadores de tensão), visualizados na Figura 4.11(a), fornecem um sinal proporcional à tensão de alimentação e o sensor de efeito Hall de corrente fornece um sinal de tensão proporcional à corrente de armadura. Estes sinais são disponibilizados ao conversor A/D, que realizam a amostragem e transmitem as informações dos sensores para o computador onde os mesmos podem ser visualizados ou armazenados.

O sensor de efeito Hall para medição da corrente, ilustrado na Figura 4.11(b), foi escolhido por apresentar diversas vantagens, como: robustez às interferências externas, alta velocidade na resposta, fácil instalação, baixo custo e ótima precisão. Este sensor é capaz

de medir tanto os campos contínuos como campos alternados, com diferentes frequências e com ampla faixa de amplitude. O dimensionamento do sensor depende da potência do motor a ser monitorado, ou seja, da faixa de corrente demandada.

A aquisição da tensão no motor é feita através de dois transformadores e a aquisição da corrente através de dois sensores Hall, pois são necessárias duas tensões e duas correntes para estimação da velocidade através do método do torque no entreferro.



(a)(b)

Figura 4.11 - a) Transformadores (sensor de tensão). b) Sensor de corrente.

#### 4.3.5. Módulo de Aquisição de Dados (DAQ)

A aquisição de dados é realizada através do hardware DAQ (Figura 4.12), que atua como a interface entre um computador e sinais do mundo exterior, funcionando basicamente como um dispositivo que digitaliza sinais analógicos de entrada de forma que um computador possa interpretá-los. Os três componentes principais de um dispositivo DAQ usados para medir um sinal são os circuitos eletrônicos de condicionamento de sinais, conversor analógico digital (ADC) e o barramento do computador.

Na prática, os sinais analógicos variam continuamente ao longo do tempo e um ADC coleta "amostras" periódicas de um sinal em uma taxa predefinida. Essas amostras são transferidas por um barramento ao computador, onde o sinal original é reconstruído a partir das amostras do software.





Figura 4.12 - Módulo de conversão A/D USB-6215.

Os sinais obtidos serão enviados para o computador onde serão processados no LabView.

O programa para aquisição dos dados foi desenvolvido no software LabView, da National Instruments, o programa consiste em um painel frontal no qual é escolhido a taxa de amostragem, a quantidade de amostras por canal e o modo de amostragem.

É no diagrama de blocos onde é feita a lógica do programa. O LabView faz a comunicação com placa de aquisição de dados, o programa configura a DAQ e transforma os sinais colhidos em matriz. Essa matriz passa por um condicionamento de sinal com o objetivo de serem transformados em valores reais de tensão, corrente das fases do motor e da velocidade em RPM do tacômetro. Por fim, quando se pressiona a tecla STOP, o programa interrompe a aquisição e o processamento, armazenando as amostras em forma de planilha. O mesmo programa também adquire o sinal de emissão acústica e armazena no formato .wav Estes arquivos são estudados em reprocessamento no LabView e no Matlab. No Anexo I se encontra o programa de aquisição dos dados.



## CAPÍTULO V

### **RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

Neste capítulo são apresentados os resultados do sistema proposto, inicialmente são mostrados os resultados de cada método, harmônicas das ranhuras, torque no entreferro e estimação através da acústica, em particular, mostrando a comparação de cada método com a velocidade de referência e os erros. Por fim é feita uma comparação entre os métodos e é analisado o método mais preciso em cada situação.

#### **5.1.MÉTODO DE ESTIMAÇÃO ATRAVÉS DAS HARMÔNICAS DAS RANHURAS**

Para análise do método das harmônicas das ranhuras, foram realizados acionamentos com as seguintes frequências de alimentação da máquina, 60Hz, 50Hz, 40Hz, 30Hz e 20Hz, tendo em vista que o motor é de 4 polos, a frequência de alimentação utilizada fornece, respectivamente, as seguintes velocidades síncronas: 1800rpm, 1500rpm, 1200rpm, 900rpm e 600rpm.

Em um teste inicial o método da harmônica nas ranhuras foi verificado. A Figura 5.1 apresenta a estimação da velocidade em função da frequência de alimentação do inversor

de frequência e seu erro em relação à medida realizada pelo tacômetro. Os testes apresentados na Figura (5.1) foram realizados sem carga.

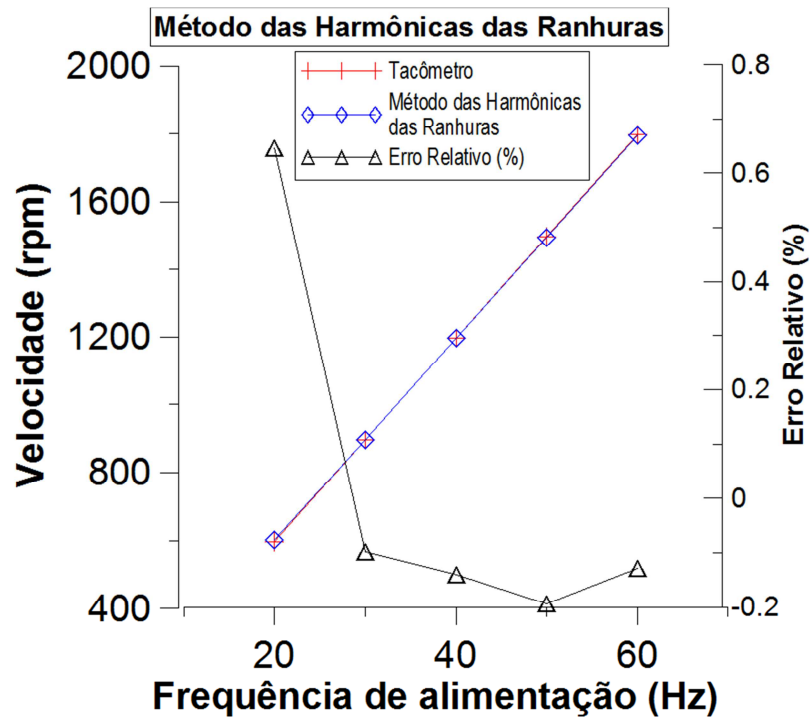
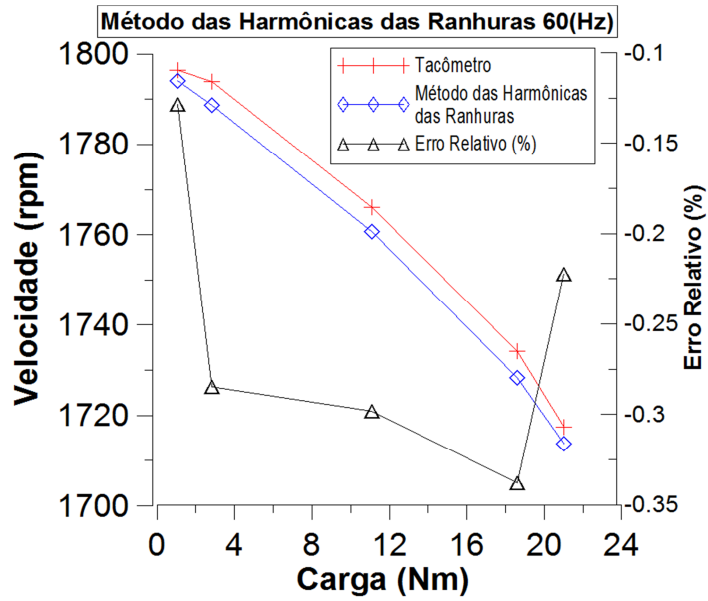
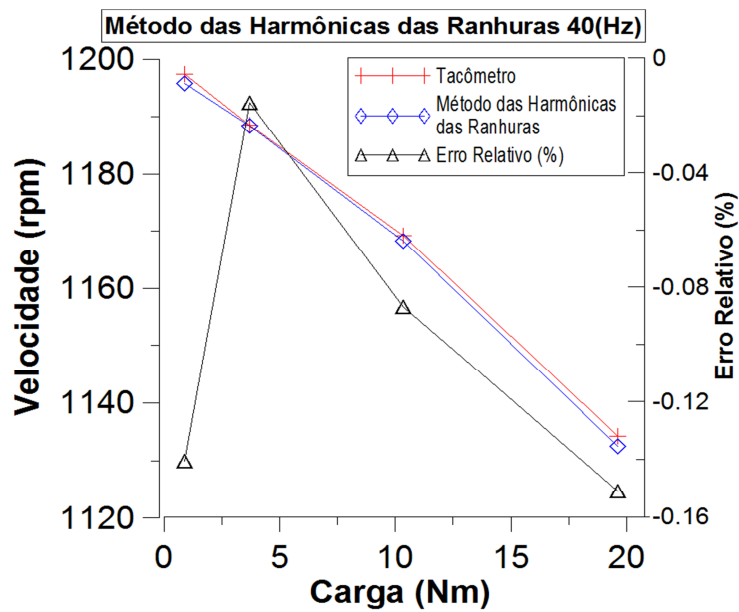


Figura 5.1 - Comparação da velocidade de referência com a velocidade estimada pelo método das harmônicas das ranhuras.

Nos experimentos realizados ocorreram algumas dificuldades na localização do pico das harmônicas quando ocorriam variações nos torques ou velocidades instáveis. Quando aplicada uma carga instável, a variação do escorregamento pode resultar em uma contaminação do espectro que retrata o comportamento no tempo em um período fixo, e a faixa de localização da harmônica da ranhura modifica de acordo com a equação (3.2), implicando em uma maior dificuldade, pois surgem harmônicas indesejadas no espectro da frequência e a busca dessa harmônica de ranhura se torna mais difícil acarretando alguns erros na hora da estimação.



(a)



(b)

Figura 5.2 - Comparação de estimação da velocidade pelo método da harmônica da ranhura com o tacômetro, aplicando carga a uma frequência de alimentação de 60Hz (a) e de 40Hz(b).

No gráfico 5.2(a) o erro máximo é de 0,34% a média dos erros é de 0,25% a uma frequência de alimentação em torno de 60Hz, já em uma velocidade mais baixa no gráfico 5.2(b) o erro máximo é de 0,15% e a média dos erros é de 0,1%.

A Figura 5.3 ilustra o ensaio com variação de carga para as medidas realizadas pelo tacômetro e pelo método de estimação pela harmônica das ranhuras. Percebe-se que existe um acompanhamento das curvas, evidenciando a eficácia no método e algoritmo utilizado, mesmo sabendo que técnicas espectrais apresentam limitações sob cargas dinâmicas.

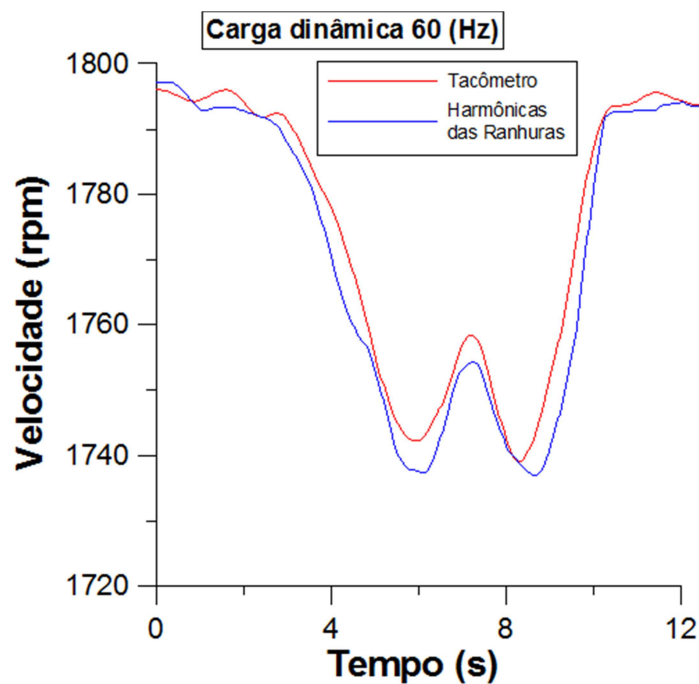


Figura 5.3 - Comparação de estimativa de velocidade pelo método das harmônicas das ranhuras com carga dinâmica.

## 5.2.MÉTODO DE ESTIMAÇÃO ATRAVÉS DO TORQUE NO ENTREFERRO

Foram realizadas as estimações da velocidade através do método do torque no entreferro nominal e do torque do entreferro calibrado.

O torque do entreferro calibrado consiste em fazer testes no motor a vazio para obter a potência e a velocidade, do motor específico. Já no método de torque do entreferro nominal é utilizado o valor nominal da máquina.

Como descrito na seção 3.3 para estimar a velocidade é necessário encontrar o torque no entreferro. A velocidade é estimada a partir de uma aproximação linear da curva de velocidade versus torque, a fim de verificar se essa aproximação realmente foi fiel à realidade, foram sobrepostas às curvas do torque do entreferro em função da velocidade medida e estimada, Figura 5.4.

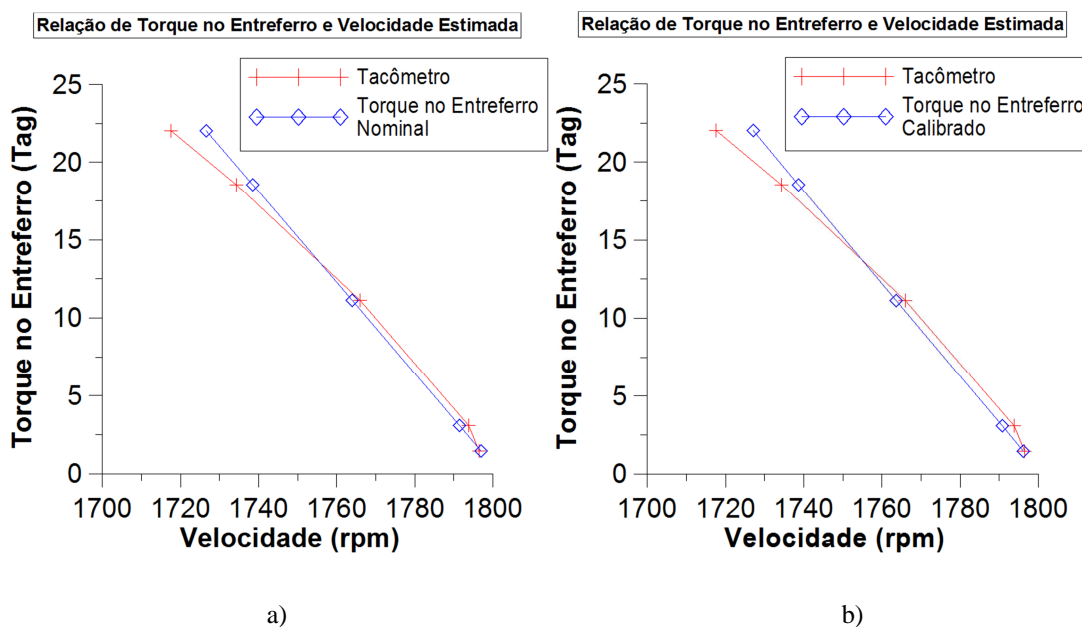
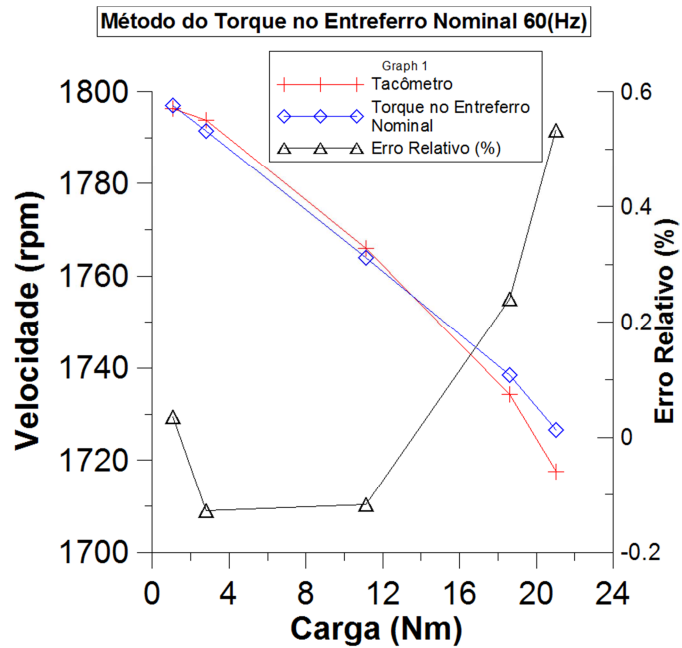
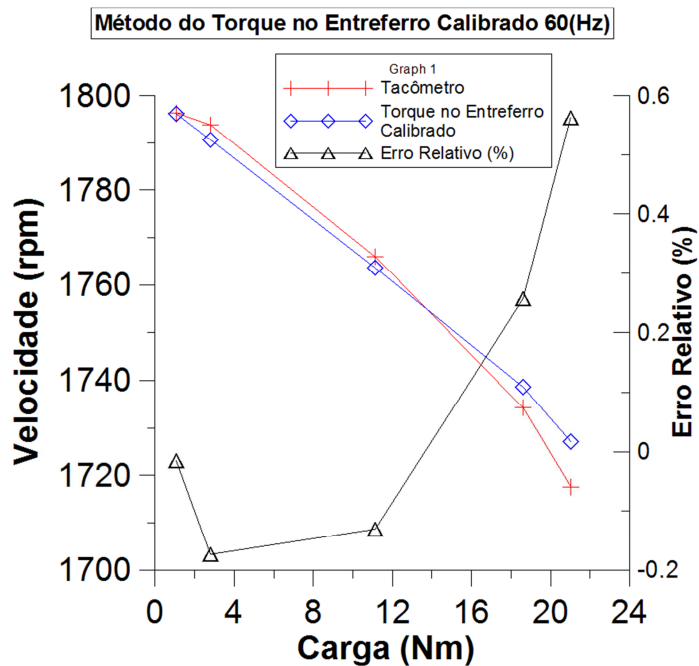


Figura 5.4 - Relação entre o torque no entreferro e a velocidade estimada através do torque do entreferro nominal (a) e calibrado (b).



a)



b)

Figura 5.5 - a) Curva da velocidade medida e da velocidade estimada pelo método do torque do entreferro com valores nominais de potência e velocidade, com seus respectivos erros. b) Curva da velocidade medida e da velocidade estimada pelo método do torque do entreferro com valores calibrados de potência e velocidade, com seus respectivos erros.

Na figura 5.5 o erro com o método calibrado é sutilmente menor do que o erro com a velocidade estimada pelo método do torque no entreferro com os valores nominais. Isso devido aos valores dos parâmetros da reta a e b. A média dos erros das estimações do entreferro nominal é de 0,11% e a média dos erros das estimações das velocidades no entreferro calibrado é de 0,09%. Nota-se assim que mesmo com a estimação com os valores nominais o método é eficaz.

O método de estimação apresentado com carga dinâmica, para um tempo de aquisição total de aproximadamente 12,6s, tem um tempo de processamento de 11s, sendo relativamente curto quando comparados aos outros métodos de estimação.

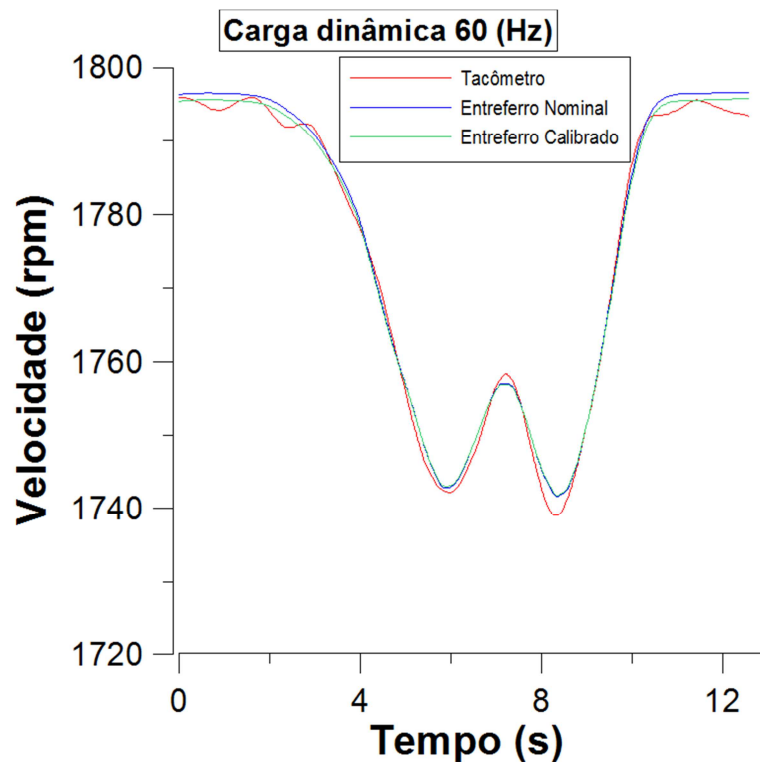


Figura 5.6 - Curva de estimação de velocidade através do torque no entreferro nominal e calibrado com carga dinâmica aplicada a uma frequência de alimentação em torno de 60 Hz.

Na curva da Figura 5.6 o erro médio do entreferro nominal é de 0,05% e do entreferro calibrado é de 0,02%. Demonstrando um desempenho satisfatório para sistemas dinâmicos, isso porque a técnica do torque no entreferro utiliza uma abordagem no domínio do tempo, cujos valores são calculados em tempo real, o que não ocorre nos demais métodos que utilizam uma análise espectral.

### 5.3.MÉTODO DE ESTIMAÇÃO ATRAVÉS DA EMISSÃO ACÚSTICA

A emissão acústica do som produzido pelo motor foi adquirida juntamente com os outros parâmetros (tensão e corrente) para comparação dos métodos. A Figura 5.7 ilustra o gráfico que fornece o valor medido e o estimado para uma ampla faixa de velocidade, como o motor funcionando sem carga.

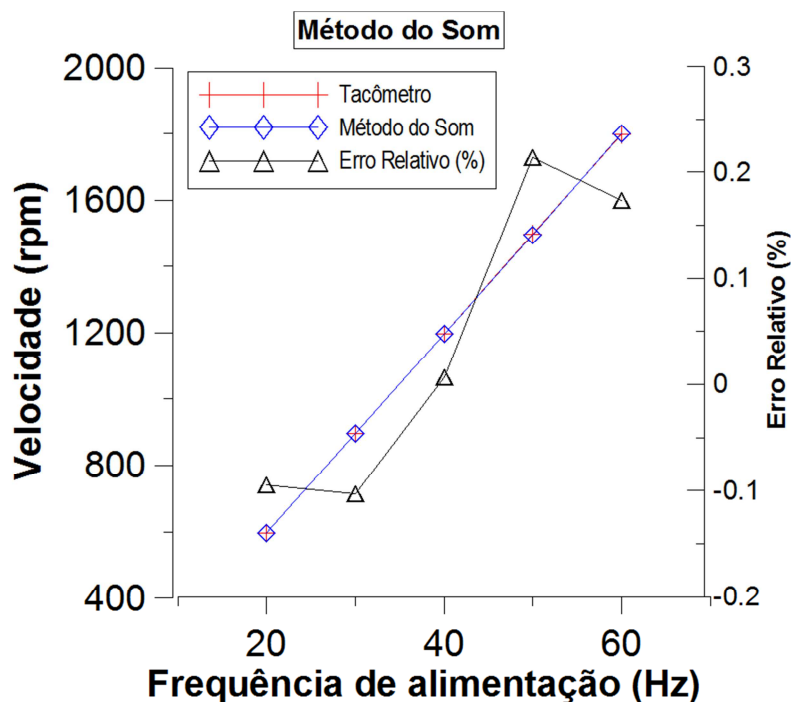


Figura 5.7 – Estimação da velocidade pelo método da acústica.

No figura 5.7 a média dos valores dos erros foi de 0,09%, o que valida a técnica utilizada.



Foi observado que este método não é adequado para baixas velocidades de rotação, menores que 300 rpm. Sabe-se que sistemas com baixa rotação no eixo tornam-se não observáveis sob o ponto de vista de velocidade de rotação, dificultando a implementação de técnicas de controle. O que explica o comportamento desse método para essas faixas de estimação.

Na Figura 5.8 é ilustrada a variação da velocidade estimada pelo método da análise acústica, comparada com a velocidade medida pelo tacômetro sob variação de carga. Os dados do gráfico fornecem um erro médio entre as medidas de 0,5%, mostrando forte aproximação entre os valores mesmo para pequenas variações de velocidade.

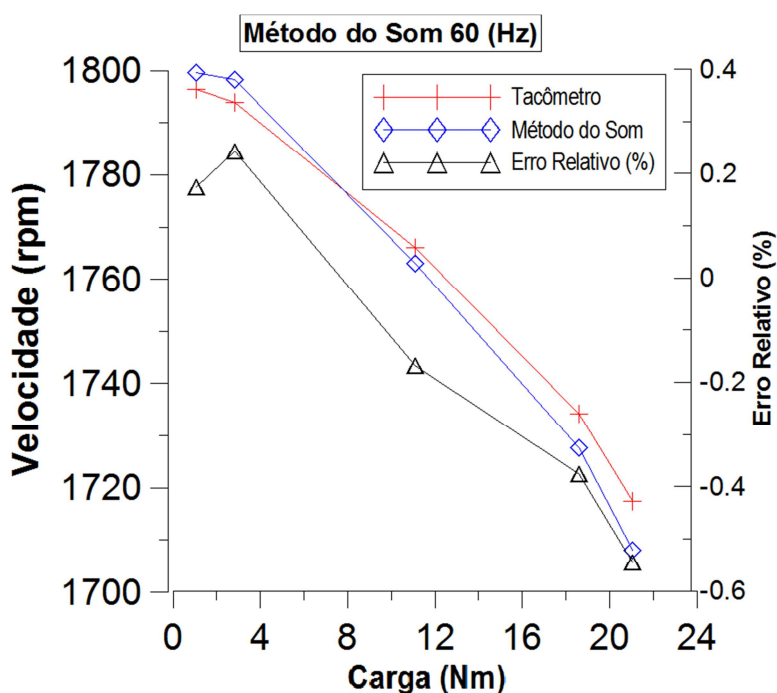


Figura 5.8 – Estimação da velocidade pelo método da acústica, com uma frequência de alimentação de 60 Hz e com carga.

A Figura 5.9 ilustra os dados estimados pelo método da vibração acústica comparado com o medido pelo tacômetro. Quando aplicado uma carga dinâmica a emissão acústica sofre muita variação resultando em uma difícil localização dos picos das harmônicas no espectro do sinal, resultando em perda de exatidão na medida.

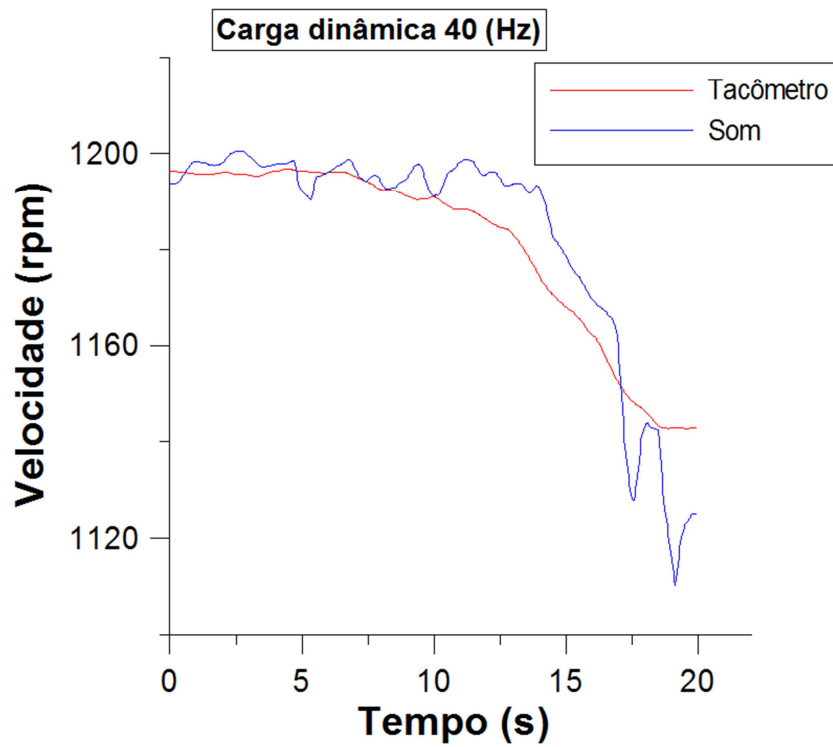


Figura 5.9- Carga dinâmica aplicada.

#### **5.4.COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE**

Para validação dos métodos todos foram comparados com a referência (tacômetro), e depois todos foram comparados entre si, mostrando o erro relativo quando comparados com a referência.

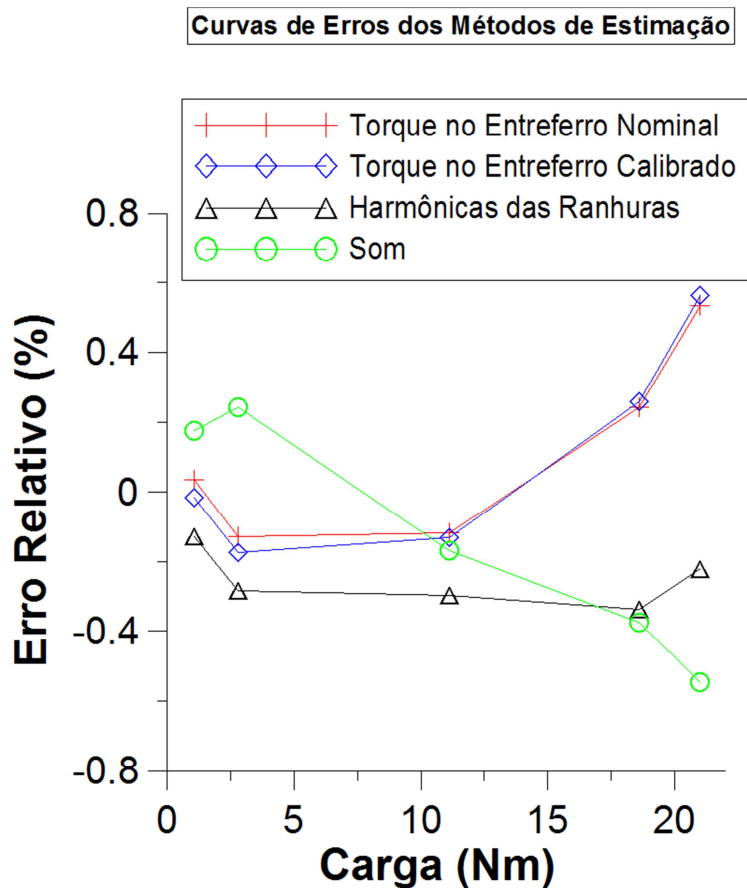


Figura 5.10- Curvas de erros com todos os métodos de estimação da velocidade proposto. Frequência de alimentação 60Hz.

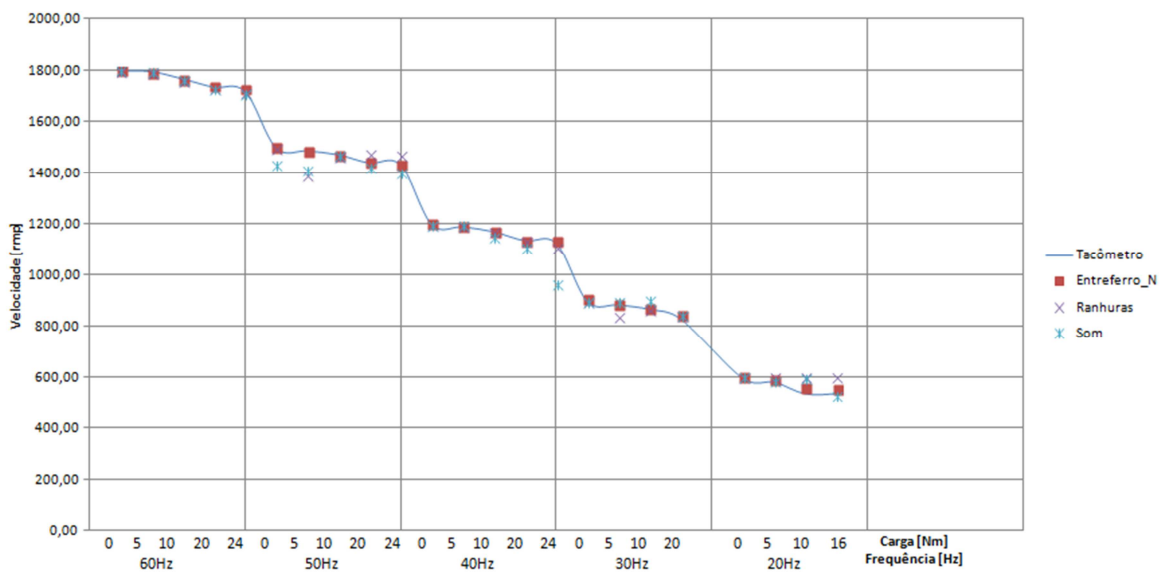


Figura 5.11- Curvas de comparação dos métodos de estimação de velocidade.

Na Figura 5.11, observa-se o comportamento da estimação da velocidade em cada método, para cada frequência de alimentação e cargas variadas aplicadas, é fácil perceber que o método do som em algumas situações sai da faixa de velocidade quando comparado com a referência.

Como parâmetro de comparação em relação ao tempo de processamento dos métodos foram criadas as tabelas 5.1 e 5.2, onde é apresentado o tempo de processamento para 10s de aquisição e de 20s de aquisição dos dados respectivamente.

Tabela 5.1- Tempo de processamento para 10s de aquisição.

<b>Carga dinâmica (60Hz) 10s</b>	<b>Tempo de processamento da estimação da velocidade</b>
<b>Estimação pelo torque no entreferro</b>	9 s
<b>Estimação pelo som</b>	19s
<b>Estimação pelas harmônicas das ranhuras</b>	26s

Tabela 5.2- Tempo de processamento de cada método para 20s de aquisição.

<b>Carga dinâmica (40Hz) 20s</b>	<b>Tempo de processamento da estimação da velocidade</b>
<b>Estimação pelo torque no entreferro</b>	14s
<b>Estimação pelo som</b>	56s
<b>Estimação pelas harmônicas das ranhuras</b>	1min 8s

Tabela 5.3- Média dos erros nas frequências de alimentação de 60Hz para várias cargas aplicadas.

	Erro relativo	Desvio padrão
<b>Torque no entreferro nominal</b>	0,11%	0,28%
<b>Torque no entreferro calibrado</b>	0,09%	0,31%
<b>Harmônicas das ranhuras</b>	0,25%	0,08%
<b>Som</b>	0,13%	0,34%

Pelas tabelas, gráficos e resultados obtidos podemos obter às seguintes conclusões sobre o desempenho dos diferentes métodos empregados, de acordo com o tipo de controle ou processo ao qual a técnica será empregada:

**Invasividade:** quando se trata da invasividade na instalação podemos citar o método da análise acústica o mais apropriado, o microfone não precisa de contato como o motor e nem de interromper a instalação, podendo ser integrado diretamente ao sistema de controle (se for o caso). Para sistemas que já dispõem de sensores de tensão e corrente ou TPs (transformadores de potencial) e TCs (transformadores de corrente), o método do torque no entreferro e da harmônica das ranhuras podem ser integrados aos sistemas com pouca ou nenhuma invasividade.

**Exatidão/tempo de resposta:** embora na Tabela 5.3, para uma frequência síncrona de 60 Hz, as técnicas apresentam um desempenho similar, observando a figura 5.11, percebe-se que o método mais estável do ponto de vista de exatidão ao longo de toda a faixa de velocidade foi o torque no entreferro, para todas as velocidades sob teste ele manteve sempre a mesma trajetória do tacômetro, enquanto que os métodos da vibração acústica e harmônica das ranhuras apresentam pontos fora do esperado, devido à dificuldade de se localizar os picos correspondentes no espectro do sinal. Percebe-se que para cargas dinâmicas o torque do entreferro também foi o mais exato. Por realizar

processamento em tempo real e no domínio do tempo, esse método possui tempo de resposta praticamente instantâneo permitindo que acompanhe o sinal de referência do tacômetro com uma exatidão maior.

**Tempo de resposta:** pelas tabelas 5.1 e 5.2 percebe-se um tempo de resposta maior para a técnica do torque no entreferro. Vale salientar que esse tempo de resposta obtido só serve para comparação relativa entre os métodos, haja vista que para todos os métodos esse tempo pode ser reduzido, utilizando algoritmos de menor tempo operacional e hardware dedicado.

**Custo** – o hardware e software para todos os métodos possuem custo similar. A diferença básica está no sensor utilizado. Sensores de tensão e corrente costumam ser mais baratos que microfones direcionais, como para o torque no entreferro são necessários pelo menos dois sensores de corrente e dois de tensão, pode-se considerar que a técnica de menor custo é a da harmônica das ranhuras que utiliza apenas um sensor de corrente. Porém, é comum que em sistemas de controle de motores de indução esses sensores já estejam instalados, o que tornariam as técnicas de harmônica das ranhuras e o torque no entreferro com menor custo de implementação.

Para melhor meio de comparação foi criada a tabela 5.4 onde foram atribuídas notas para cada parâmetro de comparação. A nota 1 representa ótimo, a 2 representa bom e por fim a 3 é regular.

Tabela 5.4- Comparação entre os parâmetros.

Parâmetros	Hamônicas Das Ranhuras	Torque no Entreferro	Emissão Acústica
Invasividade	2	3	1
Exatidão	2	1	3
Tempo Resposta	3	1	2
Custo	1	2	3

## CAPÍTULO VI

### 6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise de métodos de estimação de velocidade em eixos girantes. Depois de feita uma revisão bibliográfica em trabalhos que aplicavam alguns desses métodos, foram escolhidos três métodos não invasivos ao motor para a estimação da velocidade: o método pela harmônicas das ranhuras, através do torque no entreferro, que foi dividido em calibrado e nominal e, por último, o da emissão acústica que foi desenvolvido nesse trabalho, os quais apresentaram resultados bem satisfatórios dentro dos testes experimentais realizados.

Pela análise realizada pode-se afirmar que o método do torque no entreferro reúne características como exatidão, tempo de reposta, baixa invasividade e baixo custo, superior às demais técnicas que foram observadas no estado da arte e nesse trabalho.

Percebe-se que a técnica da estimativa por emissão acústica, é a menos invasiva e novos algoritmos podem ser implementados de modo a melhorar o seu tempo de resposta e exatidão, ambos requeridos em sistemas de controle robustos.

Para trabalhos futuros, pretende-se implementar ambos os métodos em um sistema embarcado dedicado para o tempo de execução, além de se otimizar os algoritmos utilizados.

Este trabalho procura contribuir para análise de métodos de estimação relevantes na utilização de sistemas de controle. O método a ser escolhido para composição de um sistema *sensorless* de controle de motores de indução depende de diversas variáveis intrínsecas de cada método, que aqui foram apresentadas e discutidas.



## REFERÊNCIAS

- ADISSI, M., 2012, “*Sistema Embarcado Para Estimação De Torque, Velocidade E Eficiência Em Motor De Indução*”. Dissertação de mestrado, PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- AHMED, I., SUPANGAT, R., GRIEGER, J., ERTUGRUL, N. AND SOONG, W. L., 2004, “*A Baseline Study for On-Line Condition Monitoring of Induction Machines*”, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2004), 26-29 September 2004, Brisbane, Austrália.
- AMERICO, M. “*Sistemas Motrizes: Eficiência Energética e Técnicas de Acionamento*”. Apresentações em Power-Point em curso Cepel/Sebrae-RJ/UFF. Niterói-RJ, 2003.
- ANDRADE, D. A., 2003. *Acionamento de Máquinas Elétricas*. Curso de Pós Graduação em Engenharia Elétrica/UFU.
- BLASCO-GIMENEZ R., *Comments on “Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives”*, K. D. Hurst and T. G. Habetler, *Authors’ Reply*. Correspondence, IEEE Transactions On Power Electronics, Vol. 12, No. 5, September 1997.
- COX, P.H., 2004. “*Análise e Síntese de um Processador Wavelet*”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Brasil.
- DE OLIVEIRA, H. M.. “*Análise de sinais para Engenheiros: Uma abordagem via Wavelets*”. 1 ed. Brasport, 2007. pag. 268.

- DEL TORO, V., “*Fundamentos de Máquinas Eléctricas*”. Trad. Onofre de Andrade Martins. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1999.
- DERDIYOK, A., 2002, “*A novel speed estimation algorithm for induction machines*”, Department of Electronics Engineering, Ataturk University, Erzurum 25240, Turkey, *Electric Power Systems Research* 64 (2003) 73- 80.
- DONGFENG SHI, PETER J. UNSWORTH, AND ROBERT X. G., 2006. “*Sensorless Speed Measurement of Induction Motor Using Hilbert Transform and Interpolated Fast Fourier Transform*”. *IEEE Transactions On Instrumentation And Measurement*, vol. 55, No. 1, February.
- ELMALEEH, M.A.A.; SAAD, N., “*Acoustic emission techniques for early detection of bearing faults using LabVIEW,*” *Mechatronics and Its Applications, 2008. ISMA 2008. 5th International Symposium on* , vol., no., pp.1,5, 27-29 May 2008
- FRANCISCO A. M. S., 2006, “*Motores de Indução Trifásicos*”, editora : ETEP - Edições Técnicas e Profissionais, 2º edição.
- FRANCHI, C. M., “*Acionamentos Eléctricos*”. 4ªed. São Paulo: Editora Érica, 2010.
- FITZGERALD, A. E., KINGSLEY JR., C., UMANS, S.D.,2006, “*Máquinas Eléctricas*”, 6 ed., Bookman, Porto Alegre , RS, Brasil.
- GARCIA, E.V., 2005. “*Processamento de Sinais Usando Wavelet para Caracterização da Repolarização Ventricular Durante Hipoglicemia*”, Tese de Doutorado em Engenharia Eléctrica. Universidade Federal de Santa Catarina.
- HABETLER, T. G., et al., 2002 “*Sensorless Speed Measurement of AC Machines Using Analytic Wavelet Transform*”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 5, September/October.
- HANITSCH, R., 2002, “*Energy Efficient Electric Motors,*” in Proc. RIO 02— WorldClimate & Energy Event, pp 6-11. Rio de Janeiro.

- HORRELL, R. F., WOOD, W. E., 1957. "*Induction Motor Speed-Torque-Current Curves With a Constant Rotor Temperature*", Power Apparatus and Systems, Part III. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, vol. 76, pp 343- 347.
- HU, J., WU, B., 1998. "*New Integration Algorithms for Estimating Motor Flux Over a Wide Speed Range*". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 13, n. 5 (Sept.), pages: 969-977.
- HURST, K. D., HABETLER, T. G., 1996. "*Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation*". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 11, no. 1, January, 1996
- HURST, K. D., HABETLER, T. G., 1997. "*A Comparison of Spectrum Estimation Techniques for Sensorless Speed Detection in Induction Machines*". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 33, No. 4, July/August 1997
- JEEVANAND, S., ABRAHAM, T. M., 2008, "*Condition Monitoring of Induction Motors Using Wavelet Based Analysis of Vibration Signals*", Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symposia.
- JESUS, K.M.S., 2010. "*Implementação e Análise do Desempenho de Técnicas de Monitoramento Através de Medição de Vibração e Correlação com Corrente Estatística*". Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará. Brasil.
- KEYSAN, O.; ERTAN, H.B., "*Real-Time Speed and Position Estimation Using Rotor Slot Harmonics*," Industrial Informatics, IEEE Transactions on, vol.9, no.2, pp.899,908, May 2013 doi: 10.1109/TII.2012.2210231
- KOUBAA, Y., 2006, "*Application of least-squares techniques for induction motor parameters estimation*", Research Unity of Automatic Control, National Engineering School (ENIS), BP: W, 3038, Sfax, Tunisia, Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems Vol. 12, No. 4, August 2006, 363 – 375

- KOSOW L. I., 1982 “*Maquinas Elétricas e Transformadores*”, trad. Felipe Luiz Ribeiro Daiello e Percy Antônio Pinto Soares, , Porto Alegre Editora Globo, 4ª edição.
- KUN ZHAO; XIAOJIE YOU, "Speed estimation of induction motor using modified voltage model flux estimation," Power Electronics and Motion Control Conference, 2009. IPEMC '09. IEEE 6th International , vol., no., pp.1979,1982, 17-20 May 2009 doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157719
- LACERDA, A.L.M.; LAMIM FILHO, P.C.M.; BRITO, J.N. e PEDERIVA, R. “*Detection of Faults in Three Phase Induction Motors Using Wavelet Packet Analysis*”. In: 21st International Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal - RN.
- LIMA FILHO, A. C., 2009, “*Estudo e Desenvolvimento de Soluções para Determinação de Torque em Unidades de Bombeio Mecânico Utilizadas na Extração de Petróleo.*” Tese de doutorado, PPGEM/UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.
- MARTIGNONI, A. “*Máquinas de Corrente Alternada*”. Porto Alegre, Editora Globo – 1973, 1a edição.
- MESQUITA, A.L.A.; SANTIAGO, D.F.A.; BEZERRA, R.A.; MIRANDA, U.A.; DIAS JR, M. e PEDERIVA, R., “*Detecção de Falhas em Rolamentos Usando Transformada Tempo-Frequência - Comparação com Análise de Envelope*”. In: First South-American Congress on Computacional Mechnics - MECOM 2002, 2002, Santa Fé - Paraná, Argentina. vol. XXI, pp. 1938-1954.
- NANDI, S.; AHMED, S.; TOLIYAT, H.A., "Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.16, no.3, pp.253,260, Sep 2001
- NISHIBATA, K. et al., 2006. “*Speed Estimation Method utilizing Rotor Slot Harmonics Detected from Line Current for Speed Sensorless Drive of Ultra High Speed Induction Machine*” IEEE Transactions on Industry Applications.
- OGUZ Y., DEDE M., 2011 “*Speed estimation of vector controlled squirrel cage asynchronous motor with artificial neural networks*”, Department of Electrical

Education, Faculty of Technical Education, Afyon Kocatepe University, Afyonkarahisar, Turkey, *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 675–686.

OJO, J.O., OSTOVIC, V., LIPO, T. A., WHITE, J.C., 1990 "Measurement and computation of starting torque pulsations of salient pole synchronous motors," *IEEE Transactions Energy Conversion*, vol. 5, n. 1 (March), pp. 176-182.

OLESKOVICZ, M.; COURY, D.V.; CARNEIRO, A.A.F.M.; ARRUDA, E.F.; DELMONT FILHO, O. e SOUZA, S.A., "Estudo comparativo de ferramentas modernas de análise aplicadas à qualidade da energia elétrica". *Controle & Automação (Impresso)*, v. 17, p. 331-341, 2006.

RAAD A., ZHANG F., SIDAHMED M., 2004 "Acoustic Emission For Gear Fault Detection : A Promising Tool", *Surveillance 5 CETIM Senlis* 11- 13 october.

RODEIRO, V. R. V., 2005. "Detecção Automática De Parâmetros Do Motor De Indução Trifásico Para Estimacão Da Velocidade Por Análise Espectral". Dissertação de mestrado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal da Bahia, Brasil.

SCHAUDER, C., 1992, "Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers". *IEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28.

SANTANA , A. M., LIMA A.C.C., AGUIAR A. L., "Estimacão de Velocidade de motores de Indução Trifásicos", Universidade Federal da Bahia, *Eletricidade Moderna*, março de 2000.

SANTIAGO, D.F.A. e PEDERIVA, R., "Influência da Resolução Tempo-Frequência da Wavelet de Morlet no Diagnóstico de Falhas de Máquinas Rotativas". In: XIII Congreso Sobre Métodos Numéricos y Sus Aplicaciones - ENIEF 2003, 2003, Bahía Blanca - Argentina. *Mecânica Computacional*. Bahia Blanca - Argentina: Publicado em 2003 por AMCA. Eds. Marta B. Rosales, Victor H. Cortínez, Diana V. Bambill, 2003. v. XXII. pP. 2538-2550.

- SANTIAGO, D.F.A., 2004. “*Diagnóstico de Falhas em Máquinas Rotativas Utilizando Transformada de Wavelet e Redes Neurais Artificiais*”, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, Brasil.
- SANTOS, E. T., OLIVEIRA, A., 2005. “*Estimação Indireta De Velocidade De Um Motor De Indução Trifásico Utilizando Um Analisador De Espectro Lock-In*”. Revista Controle & Automação, vol.16 no. 1 (Jan., Fev. e Março).
- SEVEGNANI, F.X., 2009. “*Análise da Assinatura Magnética Resultante de Faltas em Sistemas Elétricos Via Wavelets*”. Tese de Doutorado em Engenharia de Energia e Automação Elétricas. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Brasil.
- YE, ZHONGMING, WU, BIN, AND SADEGHIAN, ALIREZA, 2003, ”*Current Signature Analysis of Induction Motor Mechanical Faults by Wavelet Packet Decomposition*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 50, no. 6, 2003, pp. 1217 – 1228.
- ZHEN, L. e XU, L., 1998, “*Sensorless Field Orientation Control of Induction Machines Based on a Mutual MRAS Scheme*”. Ieee Transactions On Industrial Electronics, vol. 45, no. 5, October.
- ZERBO, M., SICARD, P., BA-RAZZOUK, A., 2005. "Accurate Adaptive Integration Algorithms for Induction Machine Drive Over a Wide Speed Range". In: IEEE International Conference on Electric Machines and Drives. pp. 1082-1088. May.

# ANEXO I

## PROGRAMAS NO LABVIEW

Painel frontal do programa para estimação da velocidade através do método das harmônicas das ranhuras

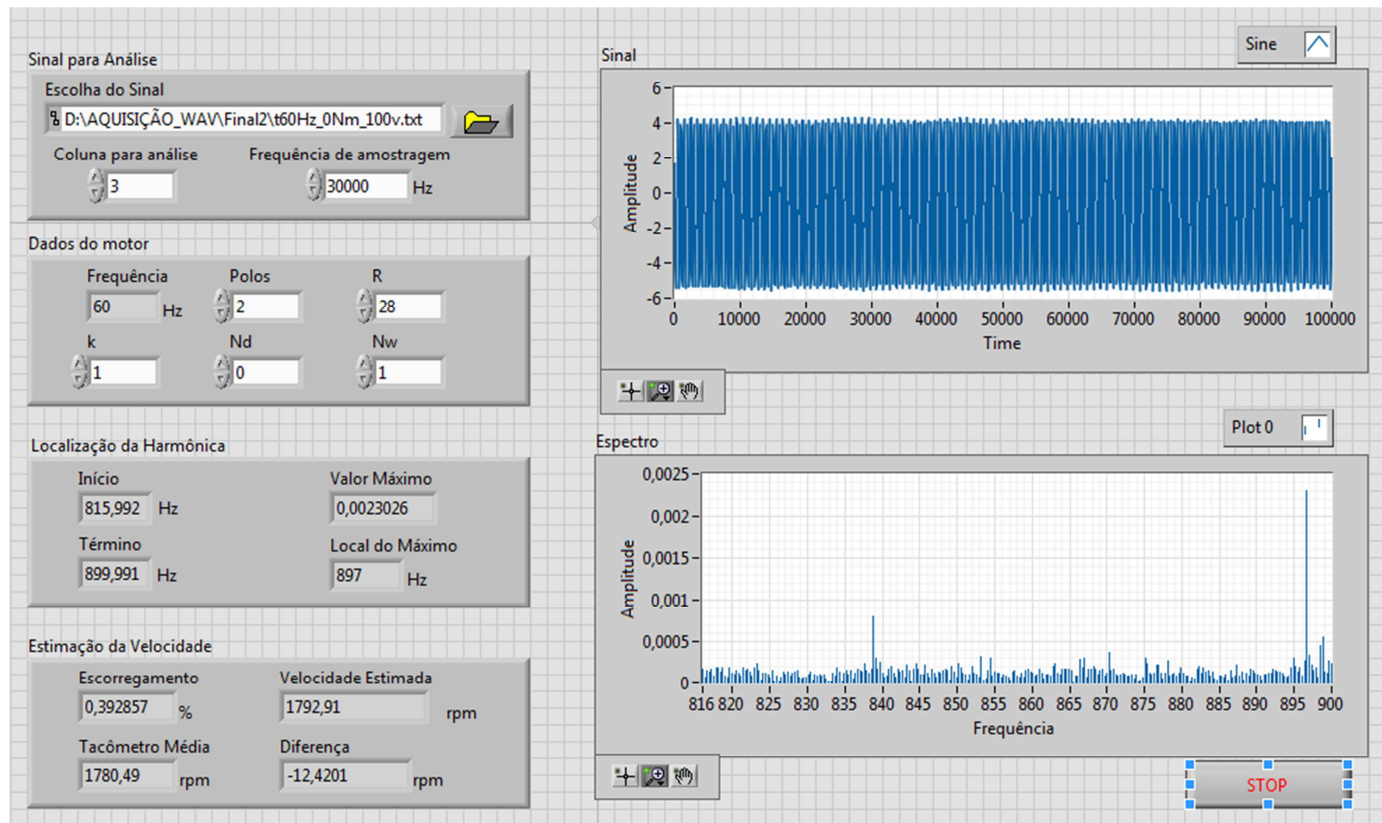
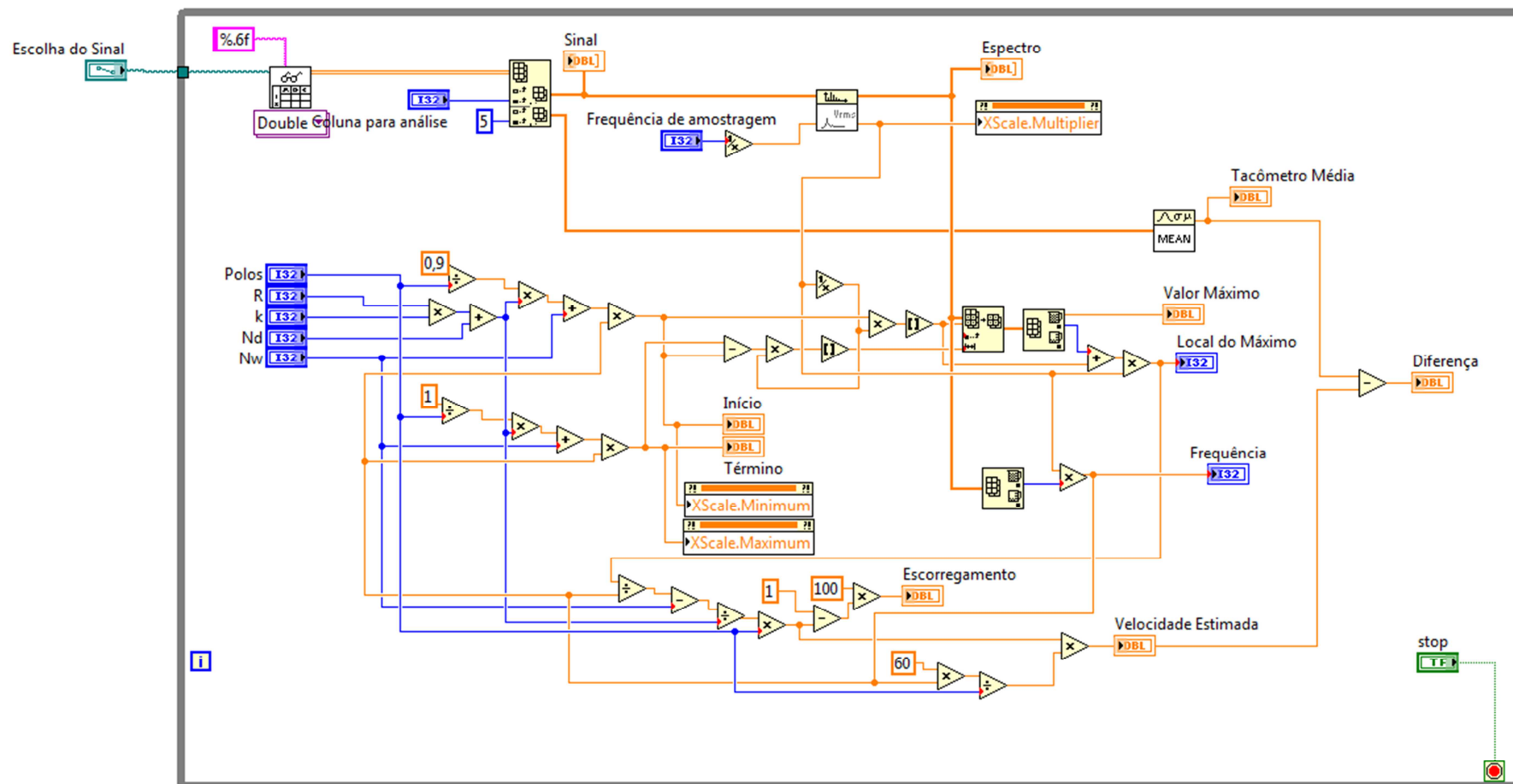


Diagrama de blocos do programa para estimação da velocidade através do método das harmônicas das ranhuras





Painel frontal e diagrama de blocos do programa de aquisição da corrente, tensão, velocidade e emissão acústica.

