

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA
E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO
CAMPUS SÃO PAULO

GUILHERME KENJI YAMAMOTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALHAS DE
DESBALANCEAMENTO, *ON-LINE*, BASEADO EM FPGA PARA APLICAÇÃO
EM MÁQUINAS ROTATIVAS DE INDUÇÃO**

São Paulo

2016

GUILHERME KENJI YAMAMOTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DETECÇÃO DE FALHAS DE
DESBALANCEAMENTO, *ON-LINE*, BASEADO EM FPGA PARA APLICAÇÃO
EM MÁQUINAS ROTATIVAS DE INDUÇÃO**

Dissertação apresentada ao programa de Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Automação e Controle de Processos**.

Área de Concentração:

Engenharia de Automação e Controle de Processos

Orientador:

Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

Co-orientador:

Prof. Dr. Cesar da Costa

São Paulo

2016

Y195d Yamamoto, Guilherme Kenji

Desenvolvimento de um sistema de detecção de falhas de desbalanceamento, on-line, baseado em FPGA para aplicação em máquinas rotativas de indução / Guilherme Kenji Yamamoto. São Paulo: [S.n.], 2016.

86 f. ; il.

Orientador: Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

Co-orientador: Prof. Dr. Cesar da Costa

Dissertação (Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, IFSP, 2016.

1. Vibrações 2. Detecção de Falhas 3. Desbalanceamento
4. Sistema Embarcado I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo II. Título

CDU 681



ATA DE EXAME DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Nome do Programa: **Mestrado Profissional em Automação e Controle de Processos**

Nome do(a) Aluno(a): Guilherme Kenji Yamamoto

Nome do(a) Orientador(a): Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa

Nome do(a) Coorientador(a): Prof. Dr. Cesar da Costa

Título do Trabalho: "Desenvolvimento de um sistema de detecção de falhas de desbalanceamento, on line, baseado em FPGA para aplicação em máquinas rotativas de indução"

Abaixo o resultado de cada participante da Banca Examinadora

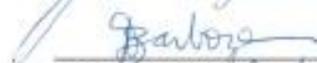
Nome completo dos Participantes Titulares da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa – Orientador	IFSP – SJC	Aprovado
Prof. Dr. Paulo Roberto Barbosa – Membro Interno	IFSP – SJC	Aprovado
Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias - Membro Externo	UNESP	APROVADO
Nome completo dos Participantes Suplentes da Banca	Sigla da Instituição	Aprovado / Não Aprovado
Prof. Dr. Eduardo Alves da Costa – Membro Interno	IFSP - SPO	
Prof. Dr. Wendell de Queiróz Lamas – Membro Externo	USP	

Considerando-o: APROVADO
 NÃO APROVADO

Assinaturas

São Paulo, 04 de março de 2016


Presidente da Banca


Membro Interno


Membro Externo

Observações: Fazer modificação conforme banca examinadora 30 dias no máximo.



AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por toda inspiração e por abençoar as escolhas que faço e os caminhos que trilho.

Este trabalho representa as contribuições de muitas pessoas. Eu gostaria de agradecer o suporte desses profissionais; **Prof. Dr. João Sinohara da Silva Sousa**, meu orientador, pelo apoio durante o processo de definição e desenvolvimento deste trabalho, e pela dedicação e paciência durante a orientação; **Prof. Dr. Cesar Costa**, meu co-orientador pelas horas dedicadas às discussões sobre o projeto e requisitos do sistema; **Renan Azevedo** pelo seu incentivo dado durante todo o desenvolvimento desta dissertação; **Dayana Coelho Oliveira Yamamoto**, minha esposa, por toda a dedicação, paciência e companheirismo durante o desenvolvimento desta pesquisa; meus pais, familiares e amigos que diretamente e indiretamente me apoiaram e me incentivaram durante o período deste trabalho.

Gostaria de agradecer também ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) pela oportunidade de realização do programa de mestrado; e aos colegas da *National Instruments* pelo tempo disponibilizado, suporte dado e pela disponibilização de todos equipamentos necessários para a realização deste trabalho.

“One’s mind, once stretched by a new idea, never regains its original dimensions.”

Oliver Wendell Holmes, Sr.

RESUMO

YAMAMOTO, G. K. Desenvolvimento de um sistema de detecção de falhas de desbalanceamento, *on-line*, baseado em FPGA para aplicação em máquinas rotativas de indução. 2016. 86p. Dissertação (Mestre em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), São Paulo, 2016.

RESUMO

Até num passado recente, para executar a observação de problemas ocorridos em máquinas, operários colocavam a ponta de uma barra metálica na região da máquina a estudar e a outra extremidade no ouvido, para sentirem e ouvirem o que estava ocorrendo, e por meio da sensibilidade e experiência desenvolvida por cada um, tentar determinar um diagnóstico. Esta prática ainda é muito comum em oficinas para diagnosticar problemas diversos de máquinas em funcionamento, como por exemplo, o desbalanceamento, tema abordado neste estudo. Durante os últimos anos tem ocorrido uma grande evolução tecnológica na área de processamento digital de sinais, eletrônica, microeletrônica e instrumentação, abrangendo inovações tanto em *hardware* como em *software*. Tais inovações permitiram o desenvolvimento de novas metodologias de detecção e diagnósticos de falhas em máquinas rotativas. Com base nessas inovações, esta dissertação teve como objetivo implementar em FPGA um algoritmo de análise, baseado em espectro de frequências, possibilitando detectar, de maneira *on-line*, falhas de desbalanceamento em motores de indução. Este trabalho apresenta um estudo sobre análise de vibrações a partir de gráficos (espectros de frequência) e o desenvolvimento de uma bancada experimental de testes, que em conjunto, permitem que um maior número de pessoas treinadas, independente da larga experiência no diagnóstico de falhas, possam analisar e determinar perfeitamente o diagnóstico sobre as condições de funcionamento da máquina rotativa. Os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, ensaios apresentaram redução do nível de vibração na máquina na ordem de 8 vezes (máquina desbalanceada) em relação ao balanceamento da máquina indicado pelo sistema desenvolvido nesta pesquisa.

Palavras-chave: Vibrações, Detecção de Falhas, Desbalanceamento, Sistema Embarcado, Máquina Rotativa, FPGA.

ABSTRACT

YAMAMOTO, G. K. Development of an unbalanced fault detection system, on-line, based on FPGA for use in rotating induction machines. 2016, 86p. Dissertation (Master in Automation and Process Control) - Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo (IFSP), São Paulo, 2016.

RESUME

Even in the recent past to perform the analyze of problems that occur on machines, workers put the tip of a metal bar in the region of the machine to study and the other end in the ear, to feel and hear what was going on, and through the sensibility and experience developed by each an attempt to determine a diagnosis. This practice is still widespread in workshops in which utilize mechanical switches to diagnose elongated slots, such as unbalance, issue addressed in this study. Over the past years there has been a major technological development in digital processing area signals, electronics, microelectronics and instrumentation, including innovations in both hardware and software. Such innovations have allowed the development of new methods of detection and fault diagnosis for rotating machinery. Based on these innovations, this master thesis aims to implement in FPGA an analyzes algorithm, based on frequency spectrum, allowing detect, on line, unbalance failure in induction motors. This paper presents a study on vibration analysis from graphics (frequency spectra) and the development of an experimental test bench, which together enable an increasing number of trained people, regardless of extensive experience in fault diagnosis, can analyze and determine the perfectly diagnosis of the operating conditions of the rotary machine. A case study will be addressed in the detection area of unbalance faults in rotating machinery. The objectives proposed it was achieved, tests presented vibration reduction below 8 times (unbalanced machine) in comparison to the balance indicated by the system developed in this research.

KEYWORDS: *Vibrations, Fault Detection, Unbalancing, Embedded Systems, Rotating Machines, FPGA.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sinal de vibração no domínio do tempo e no domínio da frequência	22
Figura 2. Registro de um sinal de vibração no domínio do tempo	24
Figura 3. Registro de um sinal de vibração no domínio da frequência.....	25
Figura 4. Estrutura interna de um motor de indução	27
Figura 5. Classificação das falhas em motores de indução.....	28
Figura 6 – Esquema do desbalanceamento estático	31
Figura 7. Esquema do desbalanceamento acoplado.....	32
Figura 8. Esquema do desbalanceamento quase-estático	32
Figura 9. Esquema do desbalanceamento dinâmico	33
Figura 10. Esquemático do balanceamento estático	35
Figura 11. Desbalanceamento específico como uma função do disco e grau de qualidade do balanceamento.....	36
Figura 12 – Representação vetorial do nível de desbalanceamento inicial	38
Figura 13 – Representação vetorial do nível de desbalanceamento inicial e com massa de teste	38
Figura 14 – Representação do vetor que equivale à massa de teste isoladamente	39
Figura 15 – Representação vetorial dos níveis de vibração calculados	39
Figura 16 – Diagrama de balanceamento completo.....	40
Figura 17- Diferentes partes de um FPGA	42
Figura 18. A arquitetura LabVIEW RIO	47
Figura 19. Bancada de testes proposta.....	48
Figura 20. Diagrama de funcionamento do sistema automático de detecção de falhas de desbalanceamento	50
Figura 21. Acelerômetro modelo 352C03	51
Figura 22. Posição do acelerômetro montado no mancal do rolamento	52
Figura 23. Módulo de condicionamento de sinais modelo NI 9234.....	53
Figura 24. Sensor fotoelétrico retro reflexivo modelo BOS 5K-PS-RR10-S75	54
Figura 25. Posição do sensor fotoelétrico montado para medir a rotação no disco.....	54
Figura 26. Módulo de entrada de sinais analógicos modelo NI 9229.....	55

Figura 27. Plataforma CompactRIO™ – Sistema composto por controladora, chassis FPGA e módulos para condicionamento de sinais	56
Figura 28. Projeto em LabVIEW™ do programa do sistema de detecção de falhas de desbalanceamento	57
Figura 29. Loop de aquisição de dados no FPGA	58
Figura 30. Seção completa do código para aquisição de dados no FPGA.....	59
Figura 31. Representação de um exemplo de diagrama de balanceamento completo.....	60
Figura 32. Funções para o cálculo vetorial	61
Figura 33. Funções para o monitoramento <i>on-line</i> do estado do desbalanceamento.....	63
Figura 34. Fluxograma do programa proposto para a bancada de testes	64
Figura 35. Telas do assistente de balanceamento no LabVIEW.....	65
Figura 36. Sinal do sensor fotoelétrico	66
Figura 37. Sinal de vibração sem massa de desbalanceamento medidas pelo acelerômetro	67
Figura 38. Espectro de vibração sem massa de desbalanceamento medido pelo acelerômetro ...	68
Figura 39. Disco acoplado ao eixo, com duas massas, que geram desbalanceamento	68
Figura 40. Sinal de vibração com uma massa de desbalanceamento medido pelo acelerômetro.	69
Figura 41. Espectro de vibração com uma massa de desbalanceamento medido pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).	70
Figura 42. Sinal de vibração com duas massas de desbalanceamento medido pelo acelerômetro	70
Figura 43. Espectro de vibração com duas massas de desbalanceamento medido pelo acelerômetro.....	71
Figura 44. Interface para cálculos do ângulo e do valor da massa de correção	72
Figura 45. Comparação entre o sinal com massa desbalanceadora e o sinal de correção do desbalanceamento medidos pelo acelerômetro	74
Figura 46. Comparação entre o sinal sem massa desbalanceadora e o sinal de correção do desbalanceamento medidos pelo acelerômetro	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do acelerômetro	52
Tabela 2: Especificações do sensor fotoelétrico	55
Tabela 3: Dados obtidos experimentalmente de correção do desbalanceamento	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHDL	<i>Altera® Hardware Description Language</i>
ADC	<i>Analog-to-Digital</i>
ASIC	<i>Application Specific Integrated Circuit</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Content Addressable Memory</i>
CCM	<i>Custom Computing Machine</i>
CLB	<i>Configurable Logic Block</i>
CMOS	<i>Complementary Metal Oxide Semiconductor</i>
CPLD	<i>Complex Programmable Logic Device</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DAQ	<i>Data Acquisition</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
EAB	<i>Embedded Array Block</i>
EDA	<i>Electronic Design Automation</i>
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read Only Memory</i>
EPLD	<i>Erasable Programmable Logic Device</i>
EPROM	<i>Erasable Programmable Read Only Memory</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility Directive</i>
FPGA	<i>Field Programmable Gate Array</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
HCPLD	<i>High Complex Programmable Logic Device</i>
HDL	<i>Hardware Description Language</i>
IDE	<i>Integrated Development Environment</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MCM	<i>Machine Condition Monitoring</i>

MCSA	<i>Motor Current Signature Analysis</i>
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
VHDL	<i>VHSIC Hardware Description Language</i>
VHSIC	<i>Very High Speed Integrated Circuits</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	18
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
3.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS.....	21
3.1.1 Movimento vibratório no domínio do tempo	22
3.1.2 Movimento vibratório no domínio da frequência	24
3.2 MANUTENÇÃO PREDITIVA	26
3.2.1 Natureza de falhas em máquinas rotativas de indução	27
3.3 FALHAS DE DESBALANCEAMENTO	28
3.3.1 Tipos de desbalanceamento	30
3.3.2 Desbalanceamento estático	30
3.3.3 Desbalanceamento acoplado	31
3.3.4 Desbalanceamento quase-estático	32
3.3.5 Desbalanceamento dinâmico	33
3.4 PRINCÍPIO DE BALANCEAMENTO	33
3.4.1 Técnica de correção de desbalanceamento	35
3.4.2 Selecionando uma massa de teste	36
3.5 MÉTODO DO CÁLCULO VETORIAL.....	37

3.6 SISTEMAS EMBARCADOS EM FPGA	41
3.6.1 Tecnologia FPGA	41
3.6.2 ARQUITETURA FPGA.....	42
3.6.3 Ferramentas de projeto	45
4 MATERIAIS E MÉTODOS	48
4.1 MATERIAIS.....	48
4.1.1 Bancada experimental de teste	49
4.2 METODOLOGIA DE TESTES.....	50
4.2.1. Dispositivo para aquisição de dados	51
4.2.2 Ambiente de programação	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
5.1 DETECÇÃO DE DESBALANCEAMENTO.....	66
5.1.1 Aplicação de massas de desbalanceamento	68
5.1.2 Aplicação de duas massas de desbalanceamento	70
5.2 CORREÇÃO DO DESBALANCEAMENTO.....	71
6 CONCLUSÃO	76
6.1 FUTUROS TRABALHOS.....	76
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICE	83

1 INTRODUÇÃO

Durante sua operação as máquinas rotativas estão sujeitas à fadiga, desgaste, deformação e acomodação em suas fundações. Tais ocorrências levam-na a um incremento nas folgas entre as partes em contato, desbalanceamento, trincas nos elementos e desbalanceamento do disco, que produzem algum nível de vibração na máquina, que podem ser associadas a causas específicas. Com o passar do tempo, os níveis de vibração tendem a aumentar, dando origem a falhas ou parada total da máquina.

Atualmente, torna-se um grande desafio para a engenharia de manutenção desenvolver ferramentas de diagnóstico de máquinas, que possibilitem a detecção de falhas incipientes, em seu estágio inicial, na busca de evitar transtornos técnicos maiores em suas instalações como, por exemplo, parada de máquinas durante a produção. Para tanto é imprescindível conhecer quais as características das vibrações decorrentes das diversas combinações, causas e comportamentos das máquinas rotativas.

Os motores elétricos de indução e suas partes estruturais (eixo, rolamento, mancal, disco, etc.) são um dos principais componentes de uma máquina rotativa presente na indústria de manufatura brasileira e mundial. O monitoramento, detecção e diagnóstico de falhas incipientes nesse equipamento e suas partes estão tornando-se questões cada vez mais importante no domínio da manutenção de máquinas rotativas.

Com a introdução de novas técnicas de processamento de sinais, novos métodos para análise de vibrações e os métodos não-invasivos, que são capazes de detectar falhas utilizando medição de sinais, sem desmontar a máquina e as suas partes estruturais, a análise de vibrações permite a identificação prematura de defeitos em máquinas rotativas, antes que os níveis de vibração sejam muito elevados, comprometendo o funcionamento e parada total da máquina.

Segundo a literatura, a ser discutida posteriormente no item Revisão da Literatura desta dissertação, por meio da análise do espectro de vibração da máquina é possível associar a cada defeito uma frequência típica correspondente. Monitorando-se a amplitude desta frequência de falha, pode-se identificar tendências de evolução do defeito.

A mesma literatura informa, que o desbalanceamento do rotor em relação ao eixo acoplado ao motor de uma máquina rotativa é uma das principais razões, que levam ao aumento do nível da

amplitude da vibração em máquinas rotativas. Estima-se que juntos, o desbalanceamento e o desalinhamento são a causa de 70% dos problemas de vibração em máquinas rotativas industriais.

Este trabalho apresenta um estudo sobre análise de vibrações a partir de gráficos (espectros de frequência) e o desenvolvimento de uma bancada experimental de testes, que em conjunto, permitirão que um maior número de pessoas treinadas, independente da larga experiência no diagnóstico de falhas, possam analisar e determinar perfeitamente o diagnóstico sobre as condições de funcionamento da máquina rotativa. Será abordado um estudo de caso na área de detecção de falhas de desbalanceamento em máquinas rotativas.

1.1 OBJETIVOS DO TRABALHO

Desenvolver uma bancada experimental de testes constituída por um sistema para conexão em máquinas rotativas com o objetivo de detecção (análise e diagnóstico) de falhas por desbalanceamento. O sistema será baseado em dispositivo eletrônico denominado FPGA (Field Programmable Gate Arrays), hardware e software.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os principais objetivos específicos esperados com este trabalho são apresentados a seguir:

- Desenvolver um modelo de aquisição de dados a partir de medição de: (i) vibrações provenientes de sensor tipo acelerômetro; (ii) rotação e fase captados por sensor fotoelétrico;
- Embarcar em dispositivo FPGA um algoritmo de análise, desenvolvido em microcomputador PC;
- Desenvolver uma bancada experimental de testes, que permita simular e diagnosticar falhas de desbalanceamento em máquinas rotativas de indução.
- Desenvolver no ambiente LabVIEW™ um algoritmo de análise, baseado em espectro de frequências, que permita detectar, *on-line*, falhas de desbalanceamento em máquinas rotativas de indução;

- Implementar um algoritmo que possibilite a correção do desbalanceamento;
- Realizar testes com falhas de desbalanceamento induzido, através de massas acopladas no disco de rotor da bancada experimental de testes.

1.2 JUSTIFICATIVA

A justificativa para este trabalho está no fato de que o sistema proposto apresenta como vantagens: (i) a detecção *on-line* de falhas de desbalanceamento; (ii) as grandezas a serem medidas são apenas vibrações mecânicas, rotação do eixo e fase, de fácil obtenção; (iii) procedimento de medição não-invasivo, ou seja, não precisa desmontar a máquina; (iv) baixo custo de implantação em comparação ao custo de substituição de um motor e gerador devido a falhas incipientes não detectadas; (v) relevância considerável para o ambiente industrial, pois proporciona a localização de tendências de evolução de falhas na máquina, antes de sua parada total e; (vi) a proposta tem uma aplicação real, pois o sistema enfoca uma das falhas mais comuns em máquinas rotativas, conforme apresentado na revisão bibliográfica, podendo de ser disponibilizada para a fabricação na forma de um protótipo.

1.3 METODOLOGIA DO TRABALHO

A metodologia aplicada no desenvolvimento do trabalho consistiu das seguintes etapas. Na primeira etapa foi apresentada uma revisão bibliográfica, sobre pesquisas recentes nas áreas de detecção e diagnóstico de falhas em máquinas rotativas de indução. Este estudo é abordado no capítulo 2 do trabalho.

A segunda etapa constou da fundamentação teórica do trabalho. Os tópicos tratados nesta revisão objetivaram conceituar a teoria de análise de vibrações e estabelecer os fundamentos para a implementação e utilização dos algoritmos de identificação de falhas de desbalanceamento de eixos de máquinas rotativas de indução, bem como princípios de balanceamento, sistemas embarcados em FPGA. Este estudo é abordado no capítulo 3 do trabalho.

Na terceira etapa são apresentados os materiais e processos utilizados no desenvolvimento

da bancada experimental de testes, bem como o sistema (programa) para diagnóstico de falhas de desbalanceamento e suas rotinas de aquisição de dados, análise e medição de vibração, no domínio do tempo e da frequência. As rotinas foram validadas com base nos resultados obtidos a partir da análise de sinais coletados de acelerômetro e sensor fotoelétrico, na simulação de falhas na bancada experimental de testes desenvolvida. Esta etapa foi cumprida no capítulo 4.

A quarta etapa da metodologia, apresentada no capítulo 5, consistiu da apresentação dos resultados e discussões obtidos nos testes propostos. A última etapa consiste das conclusões que são apresentadas no capítulo 6.

2 REVISÃO DA LITERATURA

O estudo de detecção e o diagnóstico de falhas em máquinas rotativas de indução, principalmente do seu principal componente o motor de indução trifásico e suas partes estruturais, tem despertado o interesse de muitos pesquisadores. Assim sendo, existe uma quantidade considerável de trabalhos, que nortearam esta pesquisa. Será apresentado a seguir a síntese de alguns trabalhos, que foram fundamentais na realização da pesquisa.

Em seu trabalho (DIAS, 2009) apresenta que os sinais de vibração são um somatório de sinais periódicos, que possuem diferentes valores de frequências, de tal forma que é impossível determinar as frequências existentes no domínio do tempo. Já por meio da análise espectral, ou seja, no domínio da frequência, é possível identificar individualmente cada frequência, com suas respectivas amplitudes. Neste caso, a transformada de Fourier pode ser utilizada como ferramenta para o estudo das características espectrais do sinal estacionários de vibrações no domínio da frequência.

Uma metodologia para a detecção de falhas em máquinas rotativas elétricas por meio da classificação de padrões de falhas extraídos foi apresentada por (RAMALHO et al., 2014) apresentaram, aplicando a decomposição dos sinais de vibração, por Transformada Wavelet, proveniente de sinais de vibração obtidos com acelerômetros MEMS (Microelectromechanical System). Os dados extraídos da decomposição do sinal de vibração foram utilizados para o estudo na detecção de falhas em máquinas rotativas elétricas.

Durante suas pesquisas (VANNI et al., 2012) desenvolveram um sistema especialista que capta uma forma de onda através do uso de um acelerômetro e em seguida, passa por um processamento, onde é condicionado e convertido para o domínio da frequência, por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT). As informações contidas no espectro de vibrações são processadas por um sistema para a determinação da condição de cada frequência identificável do espectro, comparando com uma tabela, a qual indica a gravidade das vibrações de acordo com a norma ISO 2372.

Em seu trabalho (KUMAR et al., 2009) desenvolveu um sistema de monitoramento de condição *on-line* e avaliação da integridade de motores de indução. Primeiramente desenvolveu um modelo simulado em MATLAB/SIMULINK, e em seguida um sistema adquirindo dados reais utilizando LabVIEW™.

Em seu livro (PIOTROWSKI, 2007) mostra que uma alteração em um espectro de vibração axial é de duas vezes a frequência de rotação do eixo, devido ao desalinhamento quando ocorre em mancais compostos por rolamentos.

Segundo (ALGULE e HUIJARE, 2015) o desbalanceamento e desalinhamento de rotor são as razões mais comuns para o surgimento de vibrações em máquinas. Juntos, o desbalanceamento e o desalinhamento, correspondem por mais de 70% dos problemas relacionados a máquinas rotativas (SANTOS, 2007).

A maioria das falhas em máquinas rotativas são evitadas ao balancear ou alinhar a máquina. Uma pequena quantidade de desbalanceamento pode causar problemas severos em uma máquina que esteja operando em alta rotação reduzindo a vida útil da máquina (SALEEM, et al., 2012).

Em sua dissertação (GRISEL et al., 2004) apresentaram um método de implementação usando um algoritmo dedicado à detecção de falha em máquina. O exemplo dado está relacionado ao diagnóstico de uma máquina de indução. A implementação proposta foi baseada na linguagem VHDL, também conhecida como Linguagem de descrição de *hardware* VHSIC, a fim de obter uma solução flexível em termos de implementação de protótipos de circuitos digitais realizados na arquitetura de *hardware* reconfigurável FPGA. Os autores descrevem como foi realizada a modelagem VHDL da rede, e como este modelo pode ser usado para o “treinamento” da rede. O estudo foi dividido basicamente em quatro partes. Método de classificação utilizado para a detecção, implementação do neurônio, estrutura baseada em VHDL e por fim a validação do sistema. O sistema de classificação adotado neste trabalho foi uma versão simplificada do PLN (Progressive Learning Network), chamado EXIN, devido a suas características de flexibilidade e adaptabilidade a um grande número de processos de cálculo. A implementação VHDL foi um passo puramente funcional e usou valores reais para diferentes cálculos. Para validar a operação os autores utilizaram valores obtidos da máquina de indução real (em curto circuito em uma fase). O modelo comportamental permitiu a validação do projeto e também a validação funcional do algoritmo de treinamento. Por fim, apesar dos resultados terem sido obtidos para o diagnóstico de máquinas de indução, o autor conclui que este sistema poderia também ser utilizado para outros tipos de aplicações.

Em sua dissertação de mestrado (ARAÚJO, 2011) mostra como a análise de vibrações pode localizar as tendências de evolução de defeitos em motores trifásicos de indução, antes de sua

parada total. São apresentados diferentes métodos em função dos dados adquiridos, entretanto a análise espectral foi o método utilizado para o estudo apresentado.

Em sua tese de doutorado (DA COSTA, 2011) apresenta um estudo de novas ferramentas de projeto para sistemas digitais embarcados, baseados em arquitetura de *hardware* aberta com lógica reconfigurável FPGA. Aborda um estudo de caso na área de detecção de falhas em máquinas rotativas, por análise de vibrações. Foi apresentado a modelagem em FPGA de instrumento para medição de vibrações mecânicas em máquinas rotativas bem como sua implementação e teste. A tese de (DA COSTA, 2011) é a base na análise e correção de falha em máquina, delimitado à falha de desbalanceamento nesta atual pesquisa.

No contexto de diagnóstico em máquina rotativa de indução, vários métodos podem ser usados (DA SILVA et al., 2005). De acordo com (FRANCO-GASCA et al., 2009) e (CABAL-YEPEZ et al., 2013) os FPGA vem sendo utilizados para a implementação de métodos de detecção de falhas, sendo incorporada no contexto de diagnóstico automático de falhas em motores de indução como solução para o diagnóstico *on-line*.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 VIBRAÇÕES MECÂNICAS EM MÁQUINAS ROTATIVAS

O movimento vibratório pode consistir em um único componente ocorrendo em uma única frequência, como acontece com um desbalanceamento puro, ou em vários componentes que ocorrem em frequências diferentes, simultaneamente, como, por exemplo, no caso de folgas em máquinas rotativas (DA COSTA et al, 2008). Toda a estrutura de uma máquina rotativa vibra em função dos esforços dinâmicos decorrente de seu funcionamento. A frequência de vibração é idêntica àquela dos esforços que os provocam. O sinal de vibração, tomado em algum ponto da máquina, será a soma das respostas vibratórias da estrutura às diferentes frequências dos esforços excitadores.

O sinal de vibrações medido em pontos determinados de uma máquina ou estrutura contém uma grande quantidade de informações dinâmicas relacionadas as diversas forças de excitações aplicadas à máquina. A deterioração da máquina pode traduzir-se por uma alteração na distribuição de frequências do sinal de vibrações, cuja consequência é o aumento do nível de vibrações. Assim sendo, pode-se acompanhar a evolução do nível de vibrações de uma máquina rotativa, a partir da análise do espectro de frequências do sinal de vibrações e identificar o surgimento de novos esforços dinâmicos ou o aumento repentino da amplitude do nível de vibrações, que são fortes indicadores do surgimento de defeitos ou degradação do funcionamento da máquina rotativa. Os sinais de vibrações podem ser analisados através do domínio do tempo e do domínio da frequência (espectro de frequência). A Figura 1 ilustra a representação do sinal de vibrações no domínio do tempo e no domínio da frequência. O domínio de tempo é uma representação bidimensional de amplitude no eixo vertical e o tempo no eixo horizontal. O domínio da frequência representa a amplitude no eixo vertical e as frequências no eixo horizontal (DA COSTA, 2011).

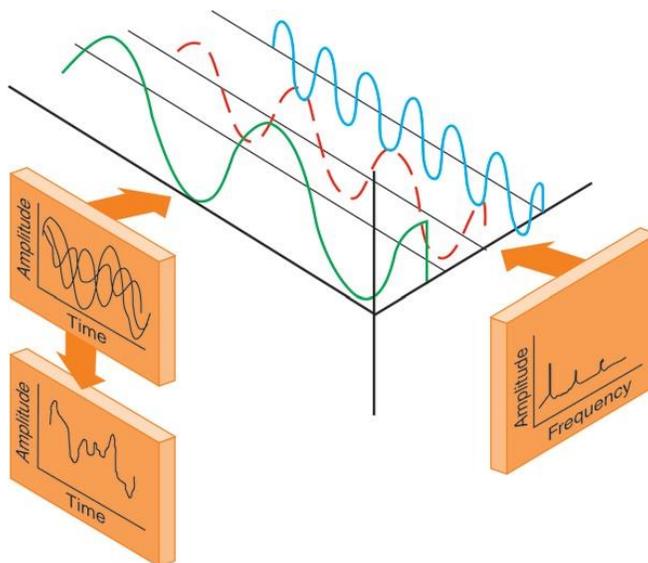


Figura 1. Sinal de vibração no domínio do tempo e no domínio da frequência. (Fonte: ZARRAGA, 2010)

3.1.1 Movimento vibratório no domínio do tempo

Os métodos mais aplicados na análise do sinal de vibração são: no domínio do tempo e no domínio da frequência (DA COSTA et al, 2008). No domínio do tempo o sinal é representado pela forma de onda do sinal de vibrações. Ela mostra o que está ocorrendo a cada instante. O exame da forma de onda no domínio do tempo pode revelar detalhes importantes das vibrações, que não são visíveis no domínio da frequência. Sua principal aplicação é identificar a ocorrência de eventos de curta duração, como impactos. Existem várias maneiras de se definir o movimento vibratório no domínio do tempo por meio de expressões matemáticas, que podem ser simples, como de alta complexidade. Em sua forma mais simples, uma vibração pode ser representada matematicamente no domínio do tempo, como um sinal senoidal, representado pela Equação 1.

$$x(t) = X \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (1)$$

Onde:

X = Amplitude do sinal;

$\omega = 2. \pi. f$ (Frequência angular de oscilação em rad/s);

$f = \frac{1}{T}$ (Indica quantas vezes o sinal se repete por unidade de tempo em Hz);

ϕ = Angulo de fase em radiano.

Da física elementar, pode-se definir as grandezas de deslocamento (x), velocidade (v) e aceleração (a) relativas ao movimento oscilatório, da seguinte forma:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = X \omega \cos(\omega t + \phi) \quad (2)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = -X \omega^2 \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (3)$$

Observando-se essas relações, verifica-se que, para descrever completamente um sinal no domínio do tempo, é suficiente conhecer sua amplitude, frequência e fase. Como o deslocamento (x), a velocidade (v) e a aceleração (a) estão relacionados entre si, pelas equações diferenciais 2 e 3. O conhecimento de uma das equações permite calcular o valor das demais.

Como existem vários componentes e massas vibrando numa máquina rotativa a funcionar em regime permanente, o seu movimento vibratório não pode ser analisado como um fenômeno periódico, como representado na equação 1. Entre os fenômenos não periódicos destacam-se os sinais quase periódicos e os sinais transitórios. Os fenômenos quase periódicos são aqueles em que, não existindo uma periodicidade formal, podem ser analisados considerando a existência de um período. Os fenômenos transitórios são aqueles em que não é possível observar nenhuma repetição de valores após um dado período de tempo. Dessa forma, o problema de se analisar e estabelecer comparações entre diversos sinais de vibrações não pode ser resolvido com base no simples conhecimento de valores de sua amplitude e frequência (RANDALL, 2011).

Uma maneira de resolver este problema é tomar-se um conjunto de valores dependentes do tempo, que não possa ser descrito de uma relação matemática explícita, mas sim descrito através de propriedades estatísticas apropriadas. Algumas medidas, cuja definição permite o cálculo de valores quantitativos globais no domínio do tempo são: Valor eficaz (Eq. 4), Valor médio (Eq.5), Fator de forma (Eq.6) e Fator de crista (Eq.7), cujas fórmulas de cálculos, para um período do sinal são apresentadas a seguir.

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (4)$$

$$X_m = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt \quad (5)$$

$$F_f = \frac{X_{RMS}}{X_m} \quad (6)$$

$$F_c = \frac{X_{pico}}{X_{RMS}} \quad (7)$$

A Figura 2 apresenta valores globais de medidas de vibrações para um sinal de vibração no domínio do tempo.

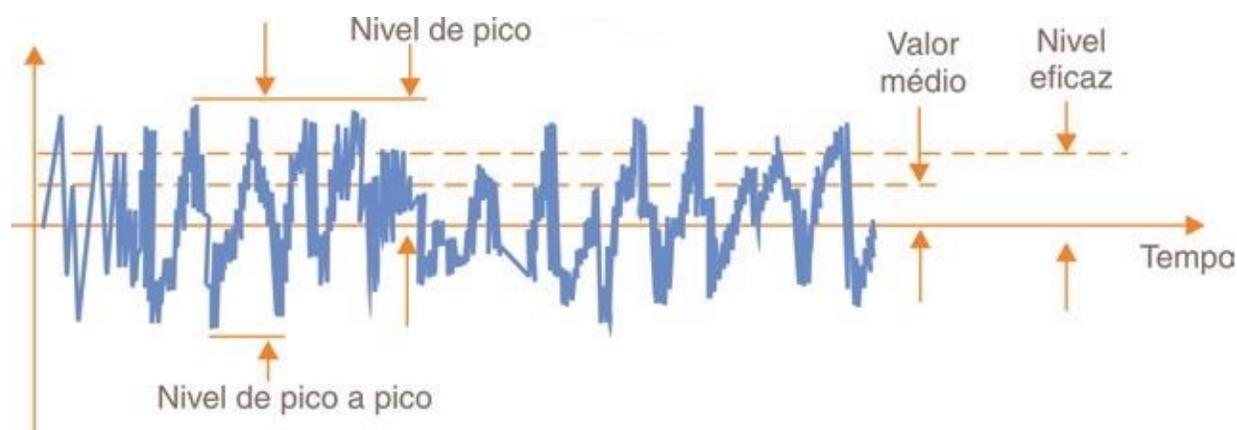


Figura 2. Registro de um sinal de vibração no domínio do tempo. (Fonte: LAGO, 2006)

3.1.2 Movimento vibratório no domínio da frequência

A técnica no domínio da frequência é baseada na aplicação de conceitos da Transformada de Fourier e implementada sob a forma de algoritmo FFT (*Fast Fourier Transformer*). Geralmente, a análise espectral consiste em comparar os espectros atuais com espectros, que caracterizem o sistema sem defeito ou de referência. As vibrações de um motor saudável são constituídas por um conjunto de vibrações de várias frequências, cada uma delas originada por um determinado

componente do motor. A forma de onda no domínio do tempo não é importante, mas sim a amplitude, frequência e fase de cada componente do sinal de vibração. Considerando-se que um motor real se comporta como várias massas vibrantes e cada massa possui sua frequência de vibração, torna-se natural descrever o fenômeno vibratório de um motor, indicando os valores das amplitudes máximas, relativas a cada uma das frequências de vibração, presentes na composição do sinal vibratório (SILVA, 2012).

Esta forma de descrição do sinal de vibração é denominada espectro de frequências, ou seja, a representação do sinal de vibração no domínio da frequência, que é apresentado em forma gráfica na Figura 3. Nesta representação, observa-se uma distribuição de amplitudes no eixo y, em função das frequências que compõem o sinal no eixo x (SPAMER, 2009). A separação dos vários componentes nas diversas frequências contidas no fenômeno pode ser feita por meio de filtros eletrônicos denominados passa – banda, que permitem a passagem de apenas um determinado número de frequências do sinal, bloqueando as demais, ou por meio de um método matemático, como por exemplo, a Transformada Discreta de Fourier – DFT, que a partir da descrição temporal do sinal vibratório, transforma esse sinal para o domínio da frequência, permitindo calcular o espectro e, assim, estudá-lo (AMARO, 2006) e (DA COSTA, 2011).

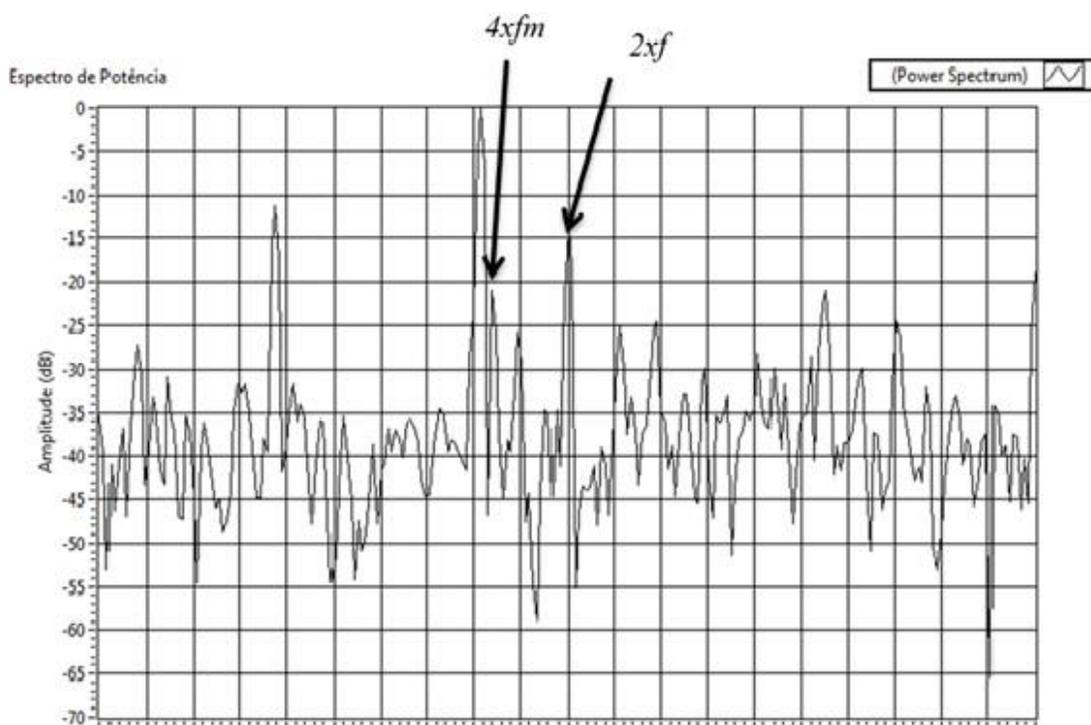


Figura 3. Registro de um sinal de vibração no domínio da frequência. (Fonte: MEOLA, 2006).

As principais falhas que surgem em sistemas mecânicos rotativos geralmente estão relacionadas com sinais de vibrações. Na caracterização de modelos de sinais de vibrações, discute-se as componentes espectrais relacionadas com as frequências de vibrações e suas harmônicas ($4xf_m$, $2xf$, etc.), bandas laterais, componentes espúrios devidos a ruídos e características do sinal modificado pela introdução de outros defeitos que produzem um sinal de vibração mais complexo.

3.2 MANUTENÇÃO PREDITIVA

A manutenção preditiva pelo monitoramento da vibração e da corrente elétrica é uma abordagem científica, que se tornou um novo caminho no gerenciamento da manutenção industrial de máquinas rotativas de indução. Muitos métodos de monitoramento têm sido propostos, por diferentes tipos de detecção e localização de falhas. Na indústria, grandes sistemas eletromecânicos são frequentemente equipados com sensores de vibração e mais recentemente utilizam o monitoramento da corrente do estator do motor, que pode fornecer as mesmas indicações das vibrações mecânicas sem requerer acesso ao motor (BENBOUZID, 2000).

Uma vez que todo equipamento rotativo apresenta um determinado nível de vibração, uma alteração do comportamento vibratório da máquina pode ser indício do agravamento de um defeito. Um nível de vibração elevado costuma ser consequência de desbalanceamento de rotores, desalinhamento entre equipamento acionador e acionado, deformação na estrutura do equipamento, atrito, falhas de lubrificação, desgaste e defeitos superficiais nos seus componentes (MENNA, 2003).

Toda a estrutura de um motor ou máquina rotativa de indução vibra em função dos esforços dinâmicos decorrentes de seu funcionamento. A frequência de vibração é idêntica àquela dos esforços que os provocam. O sinal de vibração, tomado em algum ponto da máquina, será a soma das respostas vibratórias da estrutura às diferentes frequências dos esforços excitadores. A deterioração de uma máquina de indução pode traduzir-se por uma alteração na distribuição de frequência do sinal de vibração, e/ou do sinal de corrente do estator do seu motor de indução, cuja consequência é o aumento do nível de ruído, vibração, redução do desempenho até a degradação

do funcionamento da máquina. Assim sendo, pode-se acompanhar a evolução da falha de uma máquina rotativa, a partir do monitoramento do espectro de frequência do sinal de vibração em pontos determinados do motor e pela análise da corrente elétrica absorvida pelo estator, para identificar o surgimento de novos esforços dinâmicos, que são fortes indicadores do início do surgimento de defeitos (CARDOSO et al., 2005).

3.2.1 Natureza de falhas em máquinas rotativas de indução

As máquinas rotativas de indução são robustas e consideradas tolerantes a falhas. O seu principal componente é o motor elétrico de indução trifásico, que é basicamente composto de um estator, de um rotor e um eixo. Neste rotor, o eixo transmite o movimento ao exterior. Para potências de até 500 CV o rotor mais usado é o do tipo gaiola de esquilo ou *squirrel cage* no qual não existe contato elétrico entre o rotor e o estator. Embora os motores de indução sejam bem construídos e robustos, a possibilidade de falhas é inerente. A Figura 4 ilustra a estrutura interna de um motor de indução.

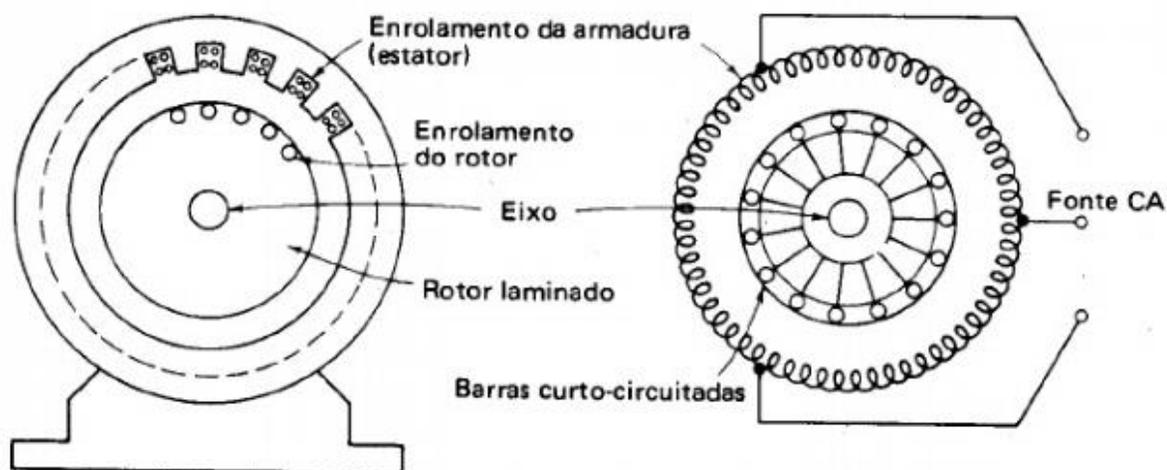


Figura 4. Estrutura interna de um motor de indução. (Fonte: Kosow, 1979)

Uma falha não significa necessariamente o colapso total do elemento da máquina. Falhas incipientes dentro de um motor de indução, geralmente afetam o seu desempenho, antes mesmo que falhas significativas ocorram. As falhas em motores de indução podem ser divididas em falhas

mecânicas e falhas elétricas. As origens dessas falhas podem ser internas, externas ou conforme o ambiente de operação do motor. A Figura 5 apresenta a classificação das falhas em motores de indução e suas principais origens. Observa-se que uma falha interna pode ser classificada como mecânica ou elétrica, e a sua origem pode estar no rotor ou estator, por exemplo. Geralmente, outros tipos de falhas como rolamentos e ventilação referem-se a falhas de rotor, porque esses elementos pertencem as partes móveis do motor, cujo principal elemento é o rotor (KAZZAS et al., 2003).

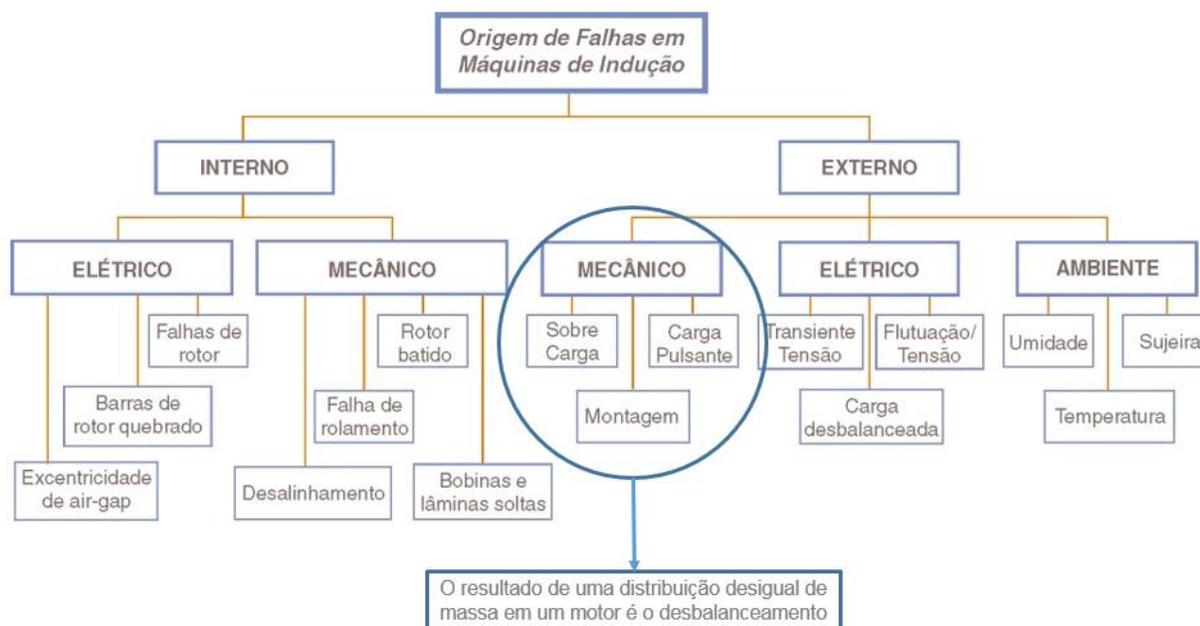


Figura 5. Classificação das falhas em motores de indução. (Fonte: GONGORA, 2013).

3.3 FALHAS DE DESBALANCEAMENTO

O desbalanceamento é a fonte de vibração mais comumente encontrada em máquinas rotativas. É um parâmetro muito importante a ser considerado em projeto de máquinas modernas, especialmente em aplicações que envolvem um alto grau de confiabilidade e para máquinas que operam em altas velocidades de rotação.

O desbalanceamento em um motor é o resultado de uma distribuição desigual de massa, que causa as vibrações no rotor. A vibração é produzida pela interação de um componente de massa desbalanceada com uma aceleração radial devido à rotação, as quais juntas geram uma força centrífuga. Como a componente de massa gira, a força também gira e tenta mover o rotor para fora da linha de ação da força. A vibração é transmitida para os rolamentos do rotor, e o rolamento irá suportar esta força uma vez por revolução (SANTOS, 2007).

O desbalanceamento ocorre em máquinas rotativas quando o centro de massa e o centro geométrico não coincide, um com o outro. Um rotor desbalanceado gera vibrações, que podem danificar os componentes deste rotor. Com o objetivo de estender a vida útil de uma máquina, as vibrações devidas ao desbalanceamento devem ser reduzidas à níveis aceitáveis. Os níveis de vibração podem ser avaliados de duas maneiras distintas; (i) por meio de tabelas de referência padronizadas pelas agências reguladoras e; (ii) por meio de avaliação contínua, através de medições, do estado em que se encontra a máquina em dado momento, em comparação com o estado de uma máquina em perfeitas condições de funcionamento. No que diz respeito à ser capaz de reduzir o desbalanceamento a níveis menores, estes limites devem ser definidos (OBAID, 2003).

O desbalanceamento é expresso como sendo:

$$U = m \times r \quad (8)$$

Onde:

m = massa desbalanceada em quilogramas (Kg)

r = distância da massa desbalanceada em relação, ao centro do eixo em metros (m).

A força centrífuga, de desbalanceamento que gera a vibração é expressa como sendo:

$$F = m \times r \times \omega^2 \quad (9)$$

Onde:

F = Força em Newton (N)

m = massa em quilograma (Kg)

r = raio em metros (m)

w = velocidade em radianos por segundo (rad/s)

3.3.1 Tipos de desbalanceamento

Em seu trabalho (ALMEIDA, 2008) especifica que os tipos mais comuns de desbalanceamento, segundo a norma ISO 1925 são: (i) o desbalanceamento estático; (ii) o desbalanceamento acoplado; (iii) o desbalanceamento quase-estático e; (iv) o desbalanceamento dinâmico.

3.3.2 Desbalanceamento estático

O desbalanceamento estático é definido como a excentricidade em relação ao centro de gravidade de um disco, causado por um ponto de massa a uma determinada distância radial ao centro de rotação, conforme mostrado na Figura 6. Uma massa de valor igual, inserida a um ângulo de 180° em relação à massa de desbalanceamento à mesma distância, é necessária para recuperar o centro de gravidade ao mesmo ponto do centro de rotação. O balanceamento estático envolve solucionar primeiramente as forças em um plano e adicionando uma massa de correção neste mesmo plano. Muitas partes rotativas, que possuem muitas massas concentradas em apenas um plano, podem ser tratadas como problemas de balanceamento estático. Se o disco possui um diâmetro entre sete a dez vezes sua largura, este é normalmente tratado como um disco com um único plano (SOUSA, 2005).

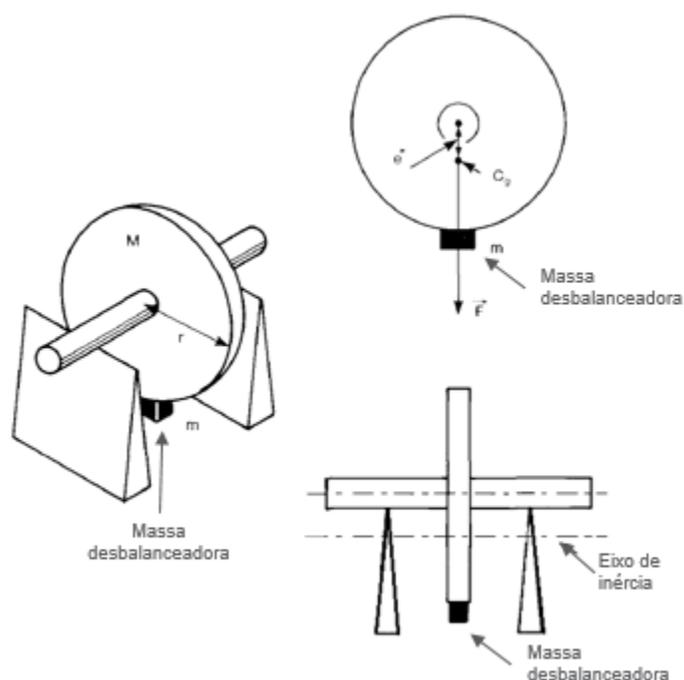


Figura 6 – Esquema do desbalanceamento estático. (Fonte: Brüel & Kjær, 2015).

3.3.3 Desbalanceamento acoplado

O desbalanceamento acoplado pode ser encontrado em um motor no qual seu diâmetro é menor que, entre sete e dez vezes sua largura. Para exemplificar este conceito, na Figura 7 é apresentado um cilindro, onde é possível ter duas massas iguais, posicionadas simetricamente sobre o centro de gravidade, posicionadas a 180° uma da outra. Neste caso, não existe excentricidade do centro de gravidade, portanto, ainda assim, trata-se de um disco com um desbalanceamento estático, entretanto, quando este disco gira, as duas massas causam uma mudança nos eixos de inercia, portanto, este eixo não está mais alinhado com o eixo de rotação, levando a um considerável aumento da vibração nos rolamentos. O desbalanceamento pode ser corrigido ao realizar a medição da vibração com o motor em rotação e adicionando-se massas aos dois planos. A diferença entre o desbalanceamento estático e o desbalanceamento acoplado é ilustrado na Figura 7. Pode observar-se que quando o disco é estacionário, as massas nas pontas

balanceiam uma com a outra. Entretanto, quando o disco passa a girar, um grande desbalanceamento é experimentado (SOUSA, 2005).

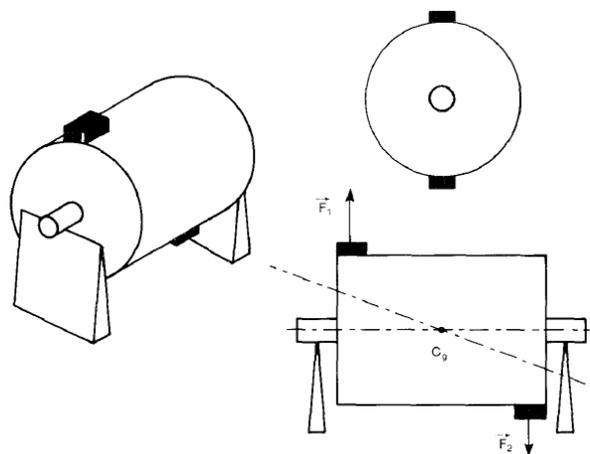


Figura 7. Esquema do desbalanceamento acoplado. (Fonte: Brüel & Kjær, 2015).

3.3.4 Desbalanceamento quase-estático

O desbalanceamento quase estático é a intersecção entre o centro de giro principal e o centro de giro de inércia em um ponto diferente do centro de massa do disco. Um exemplo de desbalanceamento gerado é quando se possui uma única massa desbalanceada sobre um ponto do disco, que não seja o plano que passa pelo centro de massa, conforme ilustrado na Figura 8 (SOUSA, 2005).

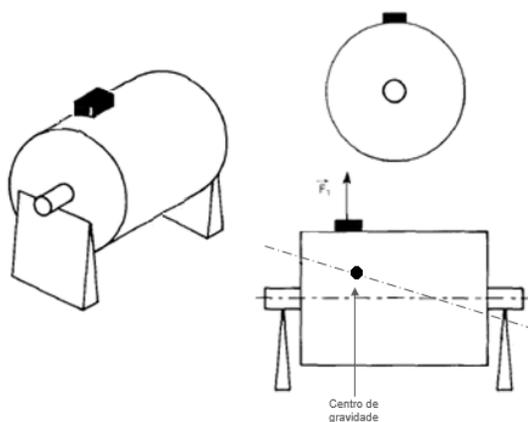


Figura 8. Esquema do desbalanceamento quase-estático. (Fonte: Brüel & Kjær, 2015).

3.3.5 Desbalanceamento dinâmico

O desbalanceamento dinâmico é uma combinação do desbalanceamento estático e o acoplado, ou seja, que possuem massas de desbalanceamento nos dois planos, mas que não estejam radialmente opostas uma da outra, conforme visto na Figura 9. Neste tipo de desbalanceamento o centro de giro não coincide com centro de inércia, este é também o tipo de desbalanceamento mais comumente detectado em discos. Para corrigir o desbalanceamento dinâmico, se faz necessário realizar a medição enquanto a máquina está em rotação e adicionando massas em dois planos (SOUSA, 2005).

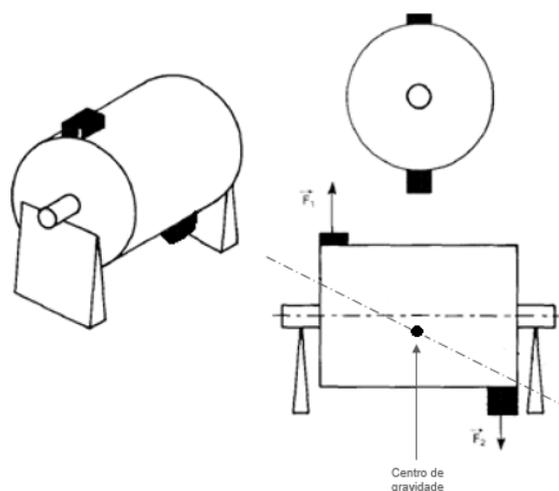


Figura 9. Esquema do desbalanceamento dinâmico. (Fonte: Brüel & Kjær, 2015).

3.4 PRINCÍPIO DE BALANCEAMENTO

O balanceamento de discos previne a carga excessiva sobre rolamentos e evita falhas por fadiga, reduzir o desbalanceamento tem efeito direto no prolongamento da vida útil da máquina. O balanceamento é o processo para tentar melhorar a distribuição de massa do disco, para que o disco gire no rolamento sem forças centrífugas descompensadas. Esta correção é normalmente

feita adicionando massas de compensação ao disco no local prescrito. Outra forma menos comum é removendo uma quantidade de massa do material, por exemplo furando a peça. Um disco é balanceado ao adicionar uma massa de correção de um determinado tamanho e em uma determinada posição que contrabalança o disco. Para tanto, o tamanho e a posição da massa devem ser determinados (MEOLA, 2006).

O princípio para realizar o balanceamento é realizando alterações, na distribuição da massa no disco, adicionando massas de teste, e medindo o resultado da fase e magnitude da vibração nos rolamentos. O efeito desta correção de teste permite que a quantidade e posição da massa de correção seja determinada. Qualquer ponto fixo do rolamento experimenta uma força centrípeta devido ao desbalanceamento, uma vez por revolução do disco. Portanto, em um espectro de frequência de um sinal de vibração, o desbalanceamento é visto como um aumento da amplitude na frequência de rotação (MEOLA, 2006).

Na abordagem tradicional, a vibração devido ao desbalanceamento é medida por meio de um acelerômetro montado no mancal do rolamento, conforme Figura 10. O sinal de vibração é passado por um filtro que deve ser ajustado para a frequência de rotação do disco, para que apenas a componente referente ao espectro de vibração na frequência de rotação seja medida. O sinal filtrado é passado por um algoritmo FFT para determinar a magnitude do sinal. O nível de vibração é diretamente proporcional à força produzida pela massa de desbalanceamento. O mesmo sinal da saída do filtro, passa por um algoritmo que compara a fase deste sinal em relação à fase do sinal do tacômetro, que é considerado o sinal de referência. O ângulo calculado pelo algoritmo permite dar a localização exata da posição angular do disco desbalanceado, em relação à posição dada (SOUSA, 2005).

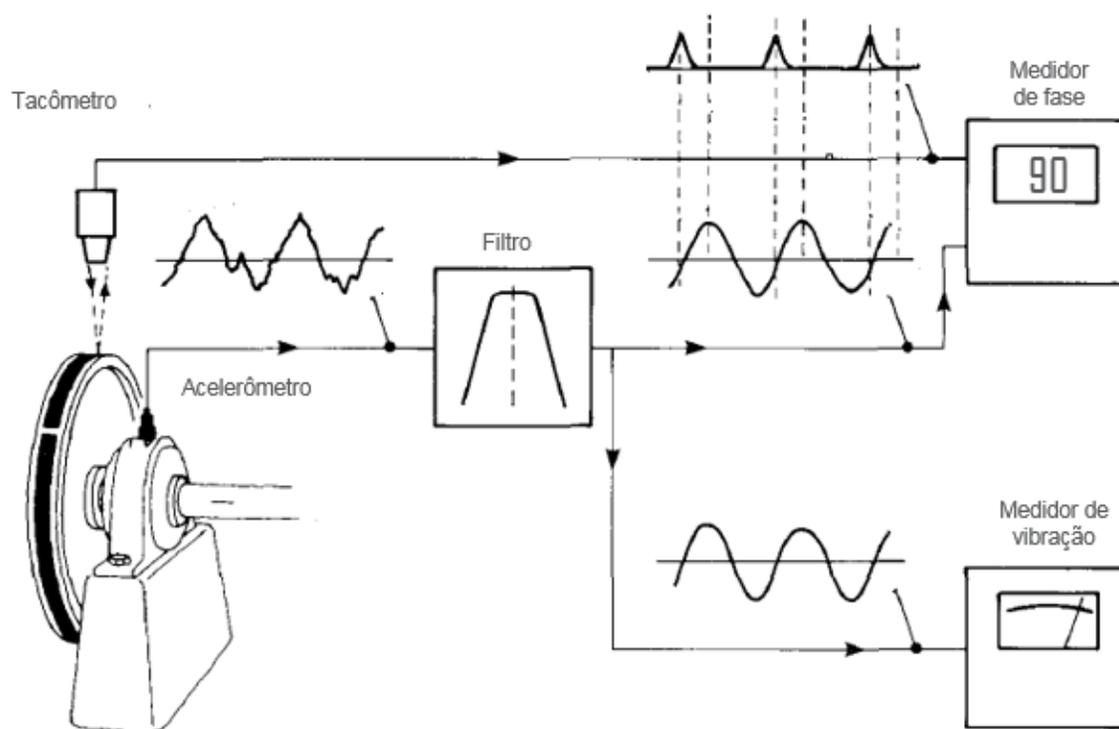


Figura 10. Esquemático do balanceamento estático (Fonte: Brüel & Kjær, 1987).

3.4.1 Técnica de correção de desbalanceamento

Idealmente uma máquina balanceada não deveria apresentar desbalanceamento. Entretanto, na prática, devido a tolerâncias de precisão mecânica, o balanceamento perfeito nunca é atingido. Para diferentes tipos e tamanhos de máquinas, o nível de vibração considerado como excessiva varia consideravelmente. Por exemplo, uma vibração de nível aceitável para uma escavadeira rotativa de mineração provavelmente destruiria um veículo automotivo. É importante, portanto classificar o disco para ser balanceado de acordo com o nível de vibração aceitável.

A Figura 11 apresenta um gráfico baseado na norma ISO 1940. O gráfico lista o grau de qualidade e alguns exemplos típicos para cada grau. Uma vez que o grau foi definido, o máximo de desbalanceamento residual aceitável pode ser determinado, entretanto a frequência de rotação do disco deve ser conhecida. O valor obtido é o máximo nível aceitável de desbalanceamento específico após o balanceamento (RIMOLA, 2010).

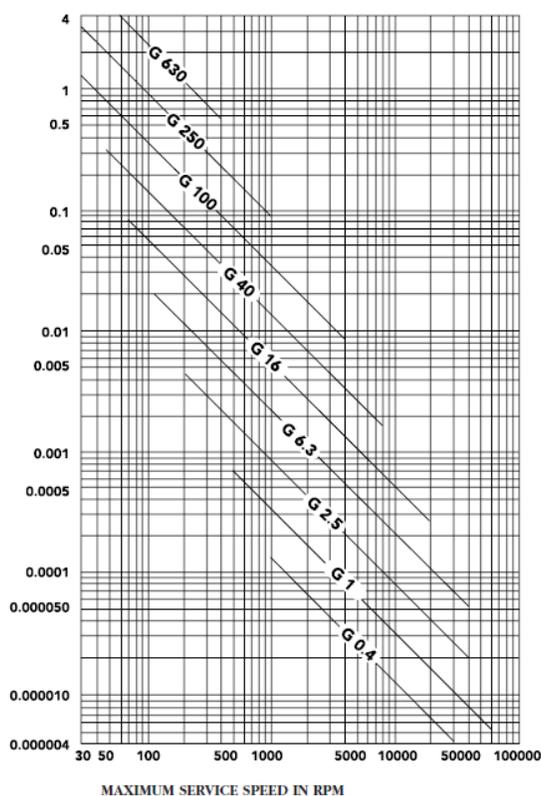


Figura 11. Desbalanceamento específico como uma função do disco e grau de qualidade do balanceamento. (Fonte: ISO 1940)

3.4.2 Selecionando uma massa de teste

O desbalanceamento específico é utilizado para calcular o valor das massas de teste, as quais são utilizadas durante o balanceamento para fazer alterações temporárias na distribuição de massa do disco, para determinar a relação entre o desbalanceamento específico e a vibração no rolamento. Para estimar o valor de uma massa de teste adequada, a massa do disco, em quilogramas e a distância em radianos, em milímetros, em que cada massa de correção está, deve ser determinada a máxima massa residual, ou M_{MR} , em gramas, conforme equação abaixo:

$$M_{MR} = \frac{S.U \times M_R}{R_C} \quad (10)$$

Onde:

$S.U$ = Desbalanceamento específico requerido (em g mm/Kg);

M_R = Massa do disco (Kg);

R_C = Correção em milímetros (mm).

Uma massa de teste adequada é de cinco a dez vezes o valor da máxima massa residual M_{MR} .

3.5 MÉTODO DO CÁLCULO VETORIAL

Uma segunda opção para determinação do desbalanceamento é o cálculo vetorial. Quando resultados de testes aceitáveis tiverem sido obtidos, o próximo passo é calcular o valor da massa de correção e seu ângulo. O método utilizado para determinar os dados necessários é através do diagrama de vetores, a seguir será apresentado o procedimento para determinar a massa de correção para um balanceamento em um único plano. Os valores de massa de correção e o ângulo podem ser determinados pela representação vetorial das grandezas medidas, conforme etapas apresentadas a seguir.

1. Um vetor \vec{V}_0 é desenhado representando o desbalanceamento inicial. O módulo de \vec{V}_0 é igual à amplitude da vibração e sua direção é dada pelo ângulo da fase, Figura 12.

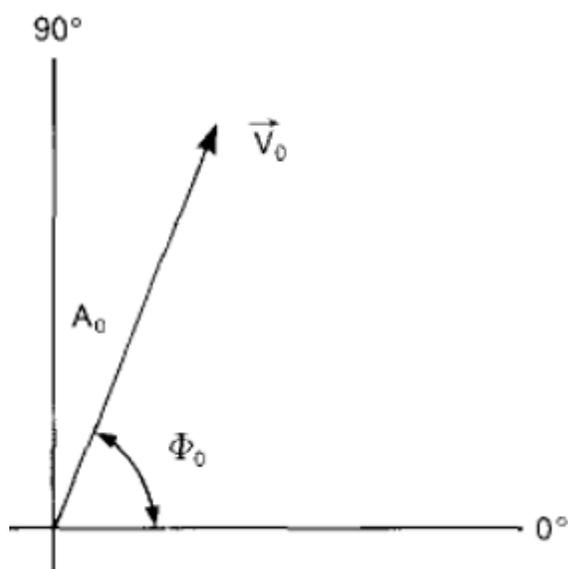


Figura 12 – Representação vetorial do nível de desbalanceamento inicial. (Fonte: Brüel & Kjøer, 1987).

2. Outro vetor \vec{V}_1 é desenhado representando a amplitude e a fase medida com uma massa de teste montada, Figura 13.

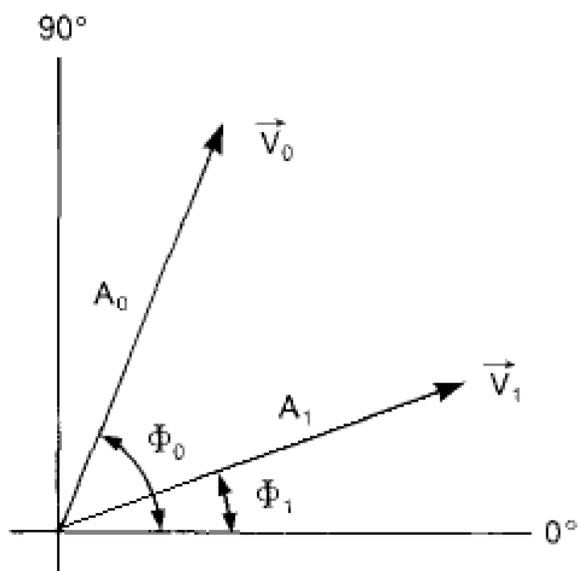


Figura 13 – Representação vetorial do nível de desbalanceamento inicial e com massa de teste. (Fonte: Brüel & Kjøer, 1987).

3. Os vetores \vec{V}_0 e \vec{V}_1 são interligados por meio de um terceiro vetor \vec{V}_T , o qual é marcado para que este indique a direção de \vec{V}_0 para \vec{V}_1 , devido à direção na qual ocorreu o desbalanceamento, como mostrado na, Figura 14. Este vetor representa o comportamento da massa de teste isoladamente.

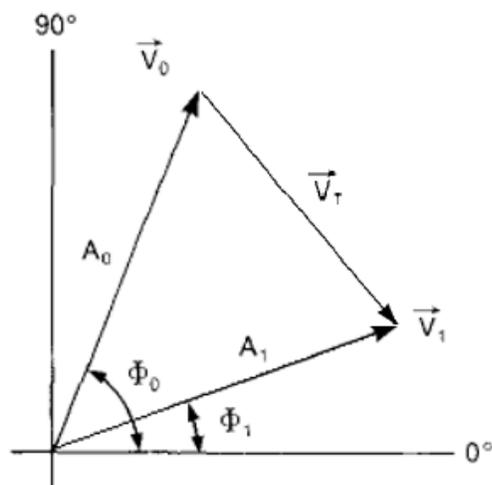


Figura 14 – Representação do vetor que equivale à massa de teste isoladamente. (Fonte: Brüel & Kjær, 1987).

4. Um vetor \vec{V}_T é desenhado paralelo ao vetor \vec{V}_T , com a mesma amplitude e direção, mas iniciando na origem do gráfico. Este vetor também é chamado de \vec{V}_T , Figura 15.

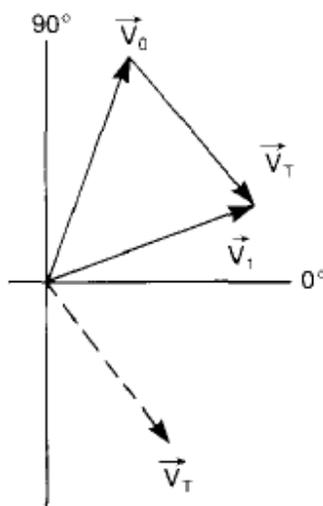


Figura 15 – Representação vetorial dos níveis de vibração calculados. (Fonte: Brüel & Kjær, 1987).

5. O vetor \vec{V}_0 é desenhado da origem, mas em sentido oposto da direção do vetor \vec{V}_0 . Este vetor é chamado de \vec{V}_C e representa a posição e magnitude da massa requerida para neutralizar o desbalanceamento original, Figura 16.

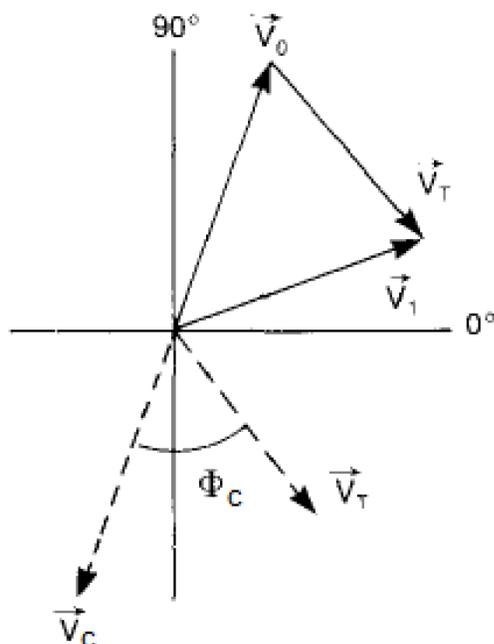


Figura 16 – Diagrama de balanceamento completo. (Fonte: Brüel & Kjær, 1987).

6. Na literatura é aceito que a amplitude da vibração é proporcional à massa de desbalanceamento, conforme apresentado na equação:

$$\frac{M_T}{V_T} = \frac{M_C}{V_C} = \frac{M_0}{V_0} \quad (11)$$

Esta expressão permite determinar o valor da massa de compensação, M_C .

7. A posição da massa relativa à posição atual da massa de teste pode ser determinada a partir do diagrama vetorial usando um transferidor, ou pode ser determinado através da equação:

$$\phi_C = -\phi_T + \phi_0 + 180 \quad (12)$$

8. O ângulo calculado é medido a partir da posição marcada no disco indicando o ponto onde a massa de teste foi montada. Se o resultado der um ângulo positivo este é medido na direção de rotação do disco. Um resultado negativo, é medido no sentido oposto.

3.6 SISTEMAS EMBARCADOS EM FPGA

Os FPGAs (*Field Programmable Gate Arrays*) são circuitos integrados VLSI (*Very Large Scale Integration*), que podem ser reconfigurados em campo, pelo próprio usuário, para executarem tarefas normalmente realizadas por circuitos integrados de aplicação específica (ASICs - *Application Specific Integrated Circuits*).

Em seu trabalho (KOUNTCHEV et al., 2013) relatam que no final da década de 80, a Marinha dos Estados Unidos iniciou um projeto de pesquisa, para o desenvolvimento de um *hardware* de computador com mais de 600.000 portas reprogramáveis, que viria a ser o antecessor do FPGA.

O FPGA vem sendo largamente utilizado em diversas aplicações industriais, como por exemplo, a aquisição e processamento de sinais, no monitoramento de máquinas rotativas de indução, segundo (FRANCO-GASCA et al., 2009) e (CABAL-YEPEZ et al., 2013).

3.6.1 Tecnologia FPGA

O arranjo de portas programáveis em campo, ou simplesmente FPGA (*Field Programmable Gate Array*) são chips de silício, que podem ser eletricamente programados para incorporar praticamente qualquer circuito ou sistema digital. O FPGA é uma tecnologia eletrônica essencialmente implementada em circuitos digitais customizados, em larga escala, por meio de configuração definida por um programa em uma grande quantidade de circuitos integrados, compostos por blocos lógicos configuráveis (CLB) idênticos.

Uma célula CLB pode conter diferentes *Look-Up-Tables* (LUT), *flip-flops* e portas lógicas elementares. O sistema de roteamento do FPGA garante a configuração de reprogramação dos

CLBs, que define cada aplicação, através de uma grande quantidade de redes de canais verticais e horizontais, que podem ser interconectados de qualquer forma possível por meio de interconexões matriciais transistorizadas.

Diferentemente dos ASICs, onde o dispositivo é projetado especificamente para uma aplicação em particular, os FPGAs podem ser reprogramáveis para atender aos requisitos de uma determinada aplicação, ou seja, após sua fabricação o *hardware* tem as suas funcionalidades definidas exclusivamente pelo usuário e não pelo fabricante (DA COSTA, 2011). A estrutura genérica de um FPGA é mostrada na Figura 17.

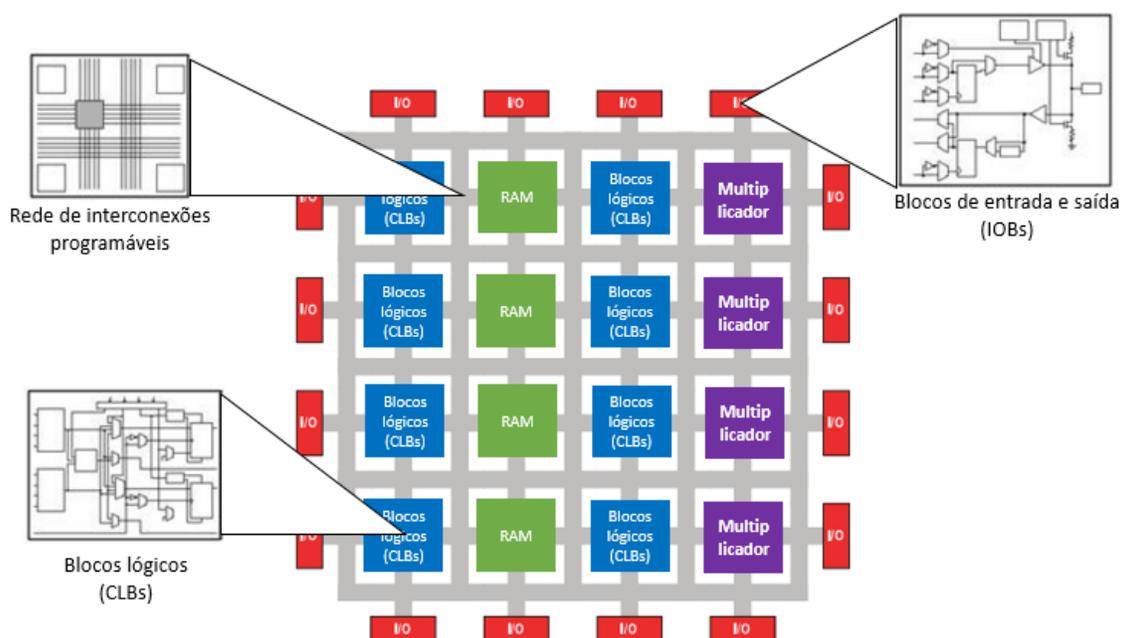


Figura 17- Diferentes partes de um FPGA. (Fonte: *National Instruments*, 2013).

3.6.2 ARQUITETURA FPGA

Os FPGAs têm evoluído para muito além das funcionalidades básicas presente em seus processadores, e incorporado blocos ASICs de funcionalidade comumente utilizadas, como por exemplo, a memória RAM, bloco gerenciador de *clock*, e DSP. A seguir são apresentados os componentes básicos de uma arquitetura FPGA.

3.6.2.1 Blocos lógicos configuráveis - CLBs

Os blocos lógicos configuráveis (CLBs – *Configurable Logic Blocks*) constituem a unidade lógica básica em um FPGA. A quantidade e características podem variar de dispositivo para dispositivo, mas cada CLB consiste de dois elementos básicos: (i) *lookup tables* (LUTs), uma matriz configurável com 4 ou 6 entradas; (ii) *flip-flops* (KOUNTCHEV et al., 2013).

- *Lookup tables* (LUTs): grande parte da lógica em um CLB é implementada usando quantidades muito pequenas de RAM na forma de LUTs. A lógica combinatória (ANDs, ORs, NANDs, XORs, etc) é implementada na forma de tabelas verdade, dentro da memória LUT.
- Flip-flops: são registradores de deslocamento (*shift registers*) booleanos, utilizados para sincronizar lógicas e registrar estados lógicos a cada ciclo de *clock* dentro de um circuito FPGA. Em cada borda de *clock* um *flip-flop* apresenta o valor 1 ou 0 (VERDADEIRO ou FALSO) em sua entrada e o mantém constante até a próxima borda de *clock*.

A matriz de chaveamento é muito flexível e pode ser configurada para lidar com lógica combinacional, *shift registers* ou memória RAM.

3.6.2.2 Redes de interconexão

Enquanto que o bloco CLB fornece a funcionalidade da lógica, a rede de interconexão determina o caminho do sinal entre os CLBs até as entradas e saídas. Os FPGAs possuem um grande número de interconexões configuráveis entre seus blocos e seus condutores internos. O que possibilita uma grande liberdade para realizar conexões entre blocos de acordo com a necessidade da aplicação.

3.6.2.3 Blocos de entrada e saída (IOB)

Os FPGAs fornecem suporte a dezenas de entradas e saídas padrão. As entradas e saídas no FPGA são agrupadas em bancos. Os blocos de entrada e saída, IOBs fornecem interface bidirecional entre os pinos do FPGA e os circuitos internos ao FPGA. Existem três caminhos, ou estados básicos, em um IOB, sendo um caminho de entrada, um caminho de saída e um caminho de três estados.

- O caminho de entrada, traz os dados do mundo externo para o interior do chip;
- O caminho de saída, leva os dados resultantes da lógica interna do interior do chip para o mundo externo;
- O caminho de três estados define quando a porta de saída estará em alta impedância.

3.6.2.4 Bloco multiplicadores

Segundo (PIRES, 2013), os blocos multiplicadores variam em quantidade de operandos e bits. A quantidade destes blocos pode variar de acordo com o modelo do chip FPGA.

3.6.2.5 Blocos de memória RAM

Os blocos de memória RAM integrados ao *chip* estão disponíveis na grande maioria dos FPGAs atuais. Sua função é garantir a memorização de pequenos conjuntos de dados ou para passar valores entre tarefas em paralelo ao longo do percurso do processamento dos sinais. Essa memória pode estar tanto distribuída em pequenas quantidades dentro dos CLBs, quanto em blocos com maior capacidade de armazenamento concentrados em determinadas regiões do *chip*. A memória RAM também é utilizada para a inicialização do chip, ao serem preenchidas com valores iniciais da aplicação específica (XILINX, 2011).

3.6.2.6 Blocos gerenciadores de *clock* (DCM)

O bloco gerenciador de *clock* (DCM) é outro componente que está disponível em praticamente qualquer chip FPGA atual. A principal função do DCM é garantir a estabilidade da frequência e fase do *clock*, que pode sofrer variação devido à influência de fenômenos físicos, que variam em uma aplicação real, tais como temperatura, tensão, corrente, etc. (PIRES, 2013).

3.6.3 Ferramentas de projeto

É por meio de linguagens de descrição de *hardware*, por exemplo, HDL e VHDL, que os projetistas em FPGA definem para o compilar como o circuito deverá ser implementado no FPGA.

3.6.3.1 Ferramentas de síntese de lógica tradicionais

Por muitos anos, linguagens de programação tais como *Assembly*, FORTRAN, Pascal, e C foram utilizadas para descrever programas de computador, que eram de natureza sequencial. Analogamente, no campo do projeto digital, projetistas sentiram a necessidade de uma padronização da linguagem para descrição de *hardware* (circuitos digitais). Assim, surgiram as linguagens de descrição de *hardware* (HDLs). A origem de ambiente de programação para FPGA, conhecido como linguagem de descrição de *hardware* (HDL - *Hardware Description Language*) foi introduzida em 1985.

Em 1987, o Departamento de Defesa Norte Americano fundou um departamento de pesquisa visando criar uma linguagem unificada para descrição e simulação de circuitos digitais, especialmente para emular os ASICs (*Application-Specific Integrated Circuits*). Este enfoque deu origem ao VHDL (*Very High Speed Ingrated Circuit Hadware Description Language*) (KOUNTCHEV et al., 2013).

Embora as linguagens HDLs fossem populares para verificação de lógica, os projetistas tinham que traduzir manualmente um projeto baseado em HDL em um circuito esquemático utilizando interconexões entre as LUTs. O advento da síntese lógica ainda na década de 80 mudou

de maneira drástica a metodologia de projeto. Os circuitos digitais agora podiam ser descritos na operação de um circuito digital (RTL - *Register Transfer Level*), por meio do uso de uma linguagem VHDL. Assim, os projetistas tinham que especificar como os dados fluiriam entre os registradores e como o projeto processaria os dados. Os detalhes relacionados com as LUTs e as interconexões para implementar o circuito foram automaticamente extraídas, por meio das ferramentas de síntese de lógica de descrição RTL (PALNITKAR, 2003).

No entanto, a experiência necessária nestas linguagens para o desenvolvimento de sistemas baseados em FPGA é notoriamente especializada e cresce exponencialmente em termos de dificuldade à medida que o sistema se torna mais complexo.

3.7.3.2 Ferramenta de síntese lógica de alto nível

No passado, a tecnologia FPGA estava à disposição apenas dos engenheiros, que possuíam um alto grau de conhecimento de projeto de *hardware* digital de baixo nível. Segundo (FALCON, 2006) o problema relacionado à complexidade das linguagens tradicionais de projeto em FPGA tem sido focado pela empresa *National Instruments*, que desenvolveu uma linguagem gráfica de programação de alto nível, usada para o desenvolvimento de sistemas de controle e de aquisição de dados, chamada LabVIEW FPGA.

Esta linguagem LabVIEW FPGA converte os diagramas de blocos em circuitos de *hardware* digital. A Figura 18, apresenta o *hardware* de arquitetura de E/S reconfigurável (RIO), baseada em tecnologia FPGA, desenvolvido pela empresa *National Instruments*, que possibilitou o desenvolvimento de um sistema embarcado em FPGA, utilizado neste trabalho.

A arquitetura RIO combina três componentes de *hardware*: (i) um processador de tempo real; (ii) um FPGA e, (iii) entradas e saídas modulares.

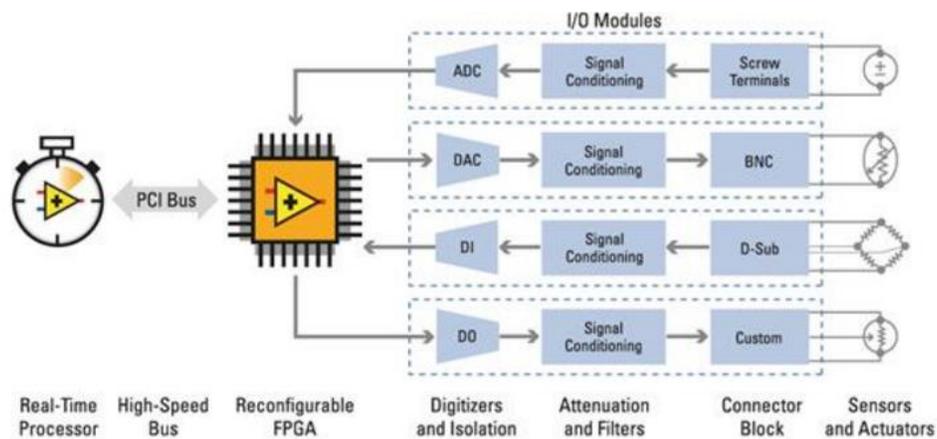


Figura 18. A arquitetura LabVIEW RIO. (Fonte: *National Instruments*, 2013).

Um número crescente de pesquisadores (DA COSTA, 2011) e (DAS et al, 2013) e (HUMPHREYSA et al., 2014) e (LIN et al., 2010) relataram sobre a aplicação desta arquitetura na aquisição e processamento de sinais.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos, que foram aplicados no desenvolvimento deste trabalho.

4.1 MATERIAIS

Para validar o sistema automático de detecção de falhas de desbalanceamento, diversos ensaios práticos foram realizados em uma bancada experimental de testes, desenvolvida especialmente para este propósito, conforme apresentada na Figura 19, que basicamente, é constituída por um microcomputador PC executando um sistema operacional Windows, um controlador embarcado CompactRIO executando um sistema operacional real time, módulo de condicionamento de sinal, um acelerômetro, um sensor fotoelétrico e um motor de indução trifásico.

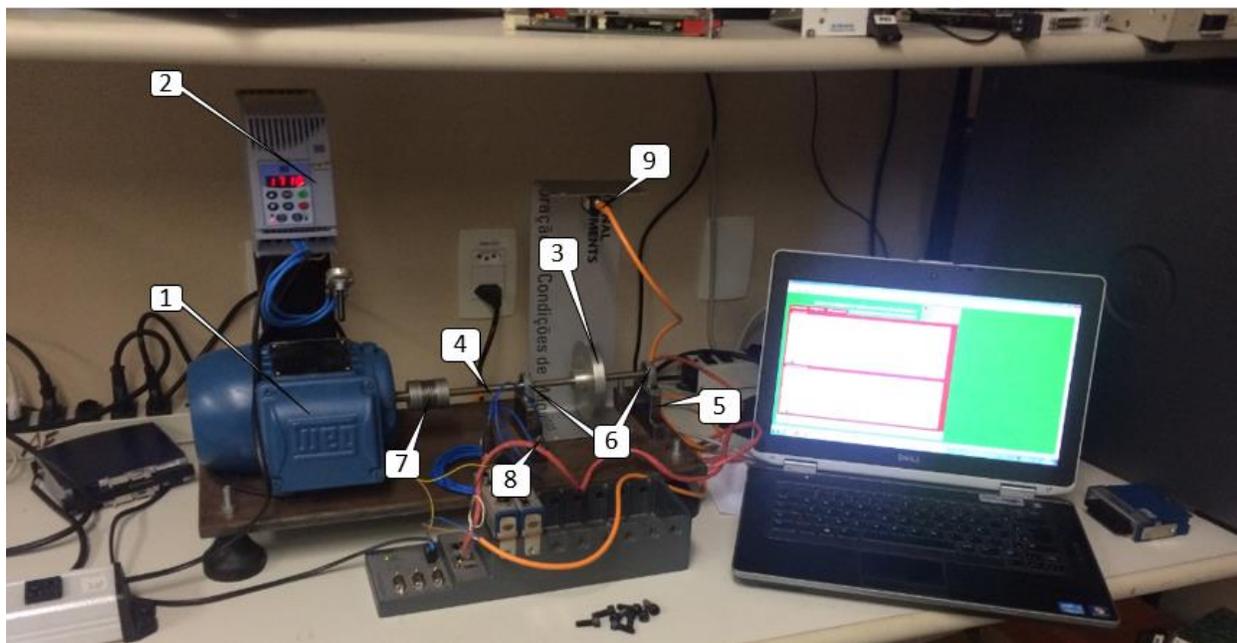


Figura 19. Bancada de testes proposta. (Fonte: Autoria própria).

A bancada tem por finalidade gerar situações de desbalanceamento no eixo de um disco, apoiado em dois mancais de rolamento. Neste trabalho foi proposto a correção do desbalanceamento estático, ou seja, determinação das forças causadas em um único plano. A bancada experimental proposta consiste dos seguintes elementos:

- 1) Motor trifásico de indução de 0,25 cv, rotor de gaiola, 4 polos, tensão nominal de 220/380 V e rotação nominal de 1710 rpm;
- 2) Inversor de frequência para o acionamento, controle e variação de frequência de motor elétrico de indução trifásico, corrente de saída de 1,0 a 33 A (0,25 a 20 cv), e controle vetorial (VVC - Voltage Vector Control).
- 3) Disco rotativo, montado no eixo, com 90 mm de diâmetro e 12 mm de espessura com furos para introdução da massa geradora de desbalanceamento;
- 4) Eixo retificado 8 mm de diâmetro e 250 mm de comprimento;
- 5) Mancal de rolamento;
- 6) Rolamento rígidos de uma carreira de esferas, frequência de referência de 38.000 rpm e carga dinâmica de 351 kgf;
- 7) Acoplamento helicoidal, admite até 5° de desalinhamento angular, frequência de referência de 25.000 rpm, e torque nominal de operação 2,3 N.m;
- 8) Sensor acelerômetro piezoelétrico cerâmico, sensibilidade de 1,02 mV/(m/s²), faixa de frequência entre 0,3 até 15.000 Hz;
- 9) Sensor fotoelétrico para monitorar a fase e a frequência de rotação do eixo.

4.1.1 Bancada experimental de teste

O inversor de frequência é o responsável pelo acionamento do motor. A frequência de rotação do eixo do motor é medida pelo sensor fotoelétrico, via aquisição de pulsos, que por meio de um programa desenvolvido em LabVIEW™, irá informar ao operador a frequência de rotação do motor e sua fase, medida em relação à fase do sinal de vibração, adquirida pelo sensor acelerômetro, instalado sobre o mancal de rolamento. As falhas podem ser injetadas pelo usuário

nos ensaios através da inserção de massas (parafusos) ao disco. Para simulação de falhas de desbalanceamento, optou-se por realizar o balanceamento estático, que foi definido como a excentricidade em relação ao centro de gravidade de um disco, causado por um ponto de massa a uma determinada distância radial ao centro de rotação, conforme descrito no item 3.3 deste trabalho.

Assim sendo, foi instalado um disco rotativo, montado no eixo, com 90 mm de diâmetro e 12 mm de espessura com furos para introdução da massa geradora de desbalanceamento. O balanceamento estático envolveu solucionar primeiramente as forças em um plano e adicionando-se uma massa de correção neste mesmo plano.

4.2 METODOLOGIA DE TESTES

Para implantação da metodologia de testes na bancada experimental foi criado um sistema automático de testes, desenvolvido no ambiente LabVIEW™ e implantado no *hardware* CompactRIO da empresa *National Instruments*, baseado em FPGA. A Figura 20 ilustra o diagrama de blocos do sistema automático de aquisição e tratamento de sinais implantado na bancada de testes proposta.

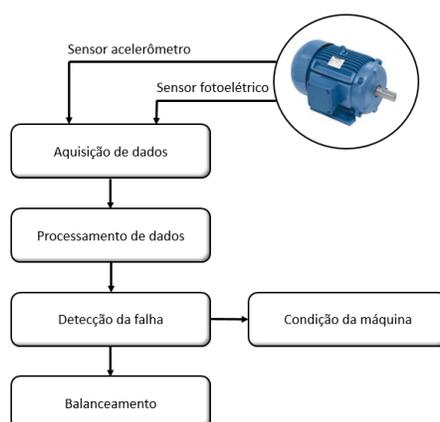


Figura 20. Diagrama de funcionamento do sistema automático de detecção de falhas de desbalanceamento. (Fonte: Autoria própria).

Após a obtenção dos dados correspondentes a vibração, fase e rotação do motor, torna-se necessário realizar uma análise comparativa desses dados, para determinar se existe, ou não, a falha de desbalanceamento. Ao ser detectada a falha por desbalanceamento do disco, é necessário o cálculo do valor da massa para correção e seu ângulo baseado no método apresentado no item 3.3 deste trabalho, que foi implementado no programa do sistema. Esta última etapa indicará a região do disco rotativo, que deverá ser inserida a massa de correção para o balanceamento ótimo da bancada.

4.2.1. Dispositivo para aquisição de dados

Para a aquisição dos sinais elétricos provenientes dos sensores utilizou-se módulos para condicionamento dos sinais adquiridos do motor, denominados DAQ – *Data Acquisition*. Um dispositivo DAQ é composto basicamente por um amplificador, condicionador de sinal, um conversor A/D (análogo para digital) e um ambiente de programação proprietário.

4.2.1.1 Acelerômetro

Um sensor tipo acelerômetro (sensor de vibração) foi utilizado na bancada de testes para medição da vibração do eixo do disco na bancada de teste. Um acelerômetro converte o fenômeno físico de vibração, em um sinal elétrico mensurável, pelo dispositivo de aquisição de dados. Os acelerômetros tipo piezoelétrico são sensores largamente usados, como os transdutores mais indicados para aplicações de medição da vibração em máquinas, devido a diversos fatores, entre os principais destacam-se a sua ampla faixa de frequência e o alcance dinâmico oferecido por estes sensores. A Figura 21 ilustra o acelerômetro utilizado na bancada de testes.



Figura 21. Acelerômetro modelo 352C03 (PCB *Piezotronics*, 2015).

O ponto de interesse neste trabalho, para a medição da vibração, encontra-se no mancal de rolamento da bancada de testes, por este motivo foi especificado a montagem do sensor acelerômetro no ponto indicado na Figura 22.

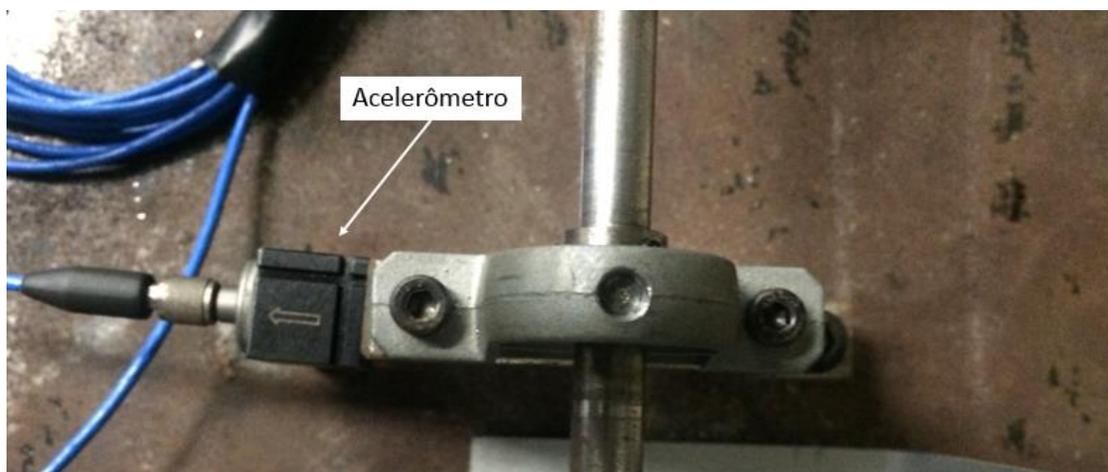


Figura 22. Posição do acelerômetro montado no mancal do rolamento. (Fonte: Autoria própria).

Definido o ponto de interesse de medição, é necessário especificar-se a interface adequada para adquirir os sinais de vibração. A Tabela 1 apresenta as especificações técnicas do sensor acelerômetro.

Tabela 1: Especificações do acelerômetro

Fabricante	PCB Piezotronics	
Modelo	352C03	
	Sistema Inglês	Sistema Internacional
Desempenho		
Sensibilidade	($\pm 10\%$) 10 mV/g	($\pm 10\%$) 1.02 mV/(m/s ²)
Faixa de medição	± 500 g pk	± 4900 m/s ²
Faixa de frequência	($\pm 10\%$) 0.3 to 15000 Hz	($\pm 10\%$) 0.3 to 15000 Hz
Resolução da largura de banda	(1 to 10000 Hz) 0.0005 g rms	(1 to 10000 Hz) 0.005 m/s ² rms
Elétrico		
Tensão de excitação	18 a 30 VCC	18 a 30 VCC
Corrente constante de excitação	2 a 20 mA	2 a 20 mA
Construção física		
Elemento sensor	cerâmica ferroelétrica	cerâmica ferroelétrica

Conforme os dados apresentados na Tabela 2, o dispositivo DAQ utilizada na bancada de teste foi o módulo de entrada analógica modelo NI 9234. Este módulo faz a aquisição de sinais dinâmicos para medições de frequência de vibração, proveniente de sensor piezoelétrico, com eletrônica embarcada (IEPE). Este módulo possui condicionamento de sinais para acelerômetros do padrão IEPE. Cada canal de entrada digitaliza simultaneamente os sinais à taxa máxima de 51,2 kHz por canal, com filtros *antialiasing* integrados, ajustados automaticamente conforme a taxa de amostragem. A bancada de teste necessitou de apenas um canal, entretanto este módulo possui 4 canais disponíveis, que significa poder-se expandir o sistema de aquisição de dados no futuro. A Figura 23 ilustra o módulo utilizado.



Figura 23. Módulo de condicionamento de sinais modelo NI 9234. (FONTE: *National Instruments*, 2013).

Apesar do módulo permitir uma taxa de amostragem máxima de até 51,2 kHz simultaneamente por canal, nesta pesquisa o módulo foi reconfigurado para adquirir a uma taxa bem inferior de 1,66 KS/s, atendendo ao teorema de *Nyquist*, tendo como referência a frequência de rotação da máquina que é de 28,5Hz (1710 rpm). A taxa de amostragem escolhida, de 1,66KS/s atende ao teorema da amostragem, em que a taxa de amostragem deve ser, no mínimo, maior que o dobro da maior frequência contida no sinal a ser amostrado.

4.2.1.2 Sensor fotoelétrico

Um sensor tipo fotoelétrico de presença foi utilizado na bancada de testes para medição da fase e rotação do eixo do disco na bancada. O sensor fotoelétrico tem por finalidade converter um sinal luminoso, podendo ter como interesse na medição tanto a luz quanto à sombra, num sinal elétrico que possa ser processado por um circuito eletrônico. Este tipo de sensor apresenta duas

grandes vantagens para aplicação de medição de velocidade de máquinas rotativas; (i) capacidade de detectar variações muito rápidas de luz; (ii) método não invasivo de monitoramento. Na Figura 24 é apresentado o sensor utilizado na bancada experimental.



Figura 24. Sensor fotoelétrico retro reflexivo modelo BOS 5K-PS-RR10-S75. (Fonte: Balluff, 2016).

O sensor fotoelétrico está montado na direção radial em relação ao eixo e o disco acoplados ao disco. Este é um posicionamento estratégico, que permite o monitoramento da frequência de rotação e seu ângulo de defasagem em relação à fase do sinal de vibração, sendo este último proporcional à posição da massa de correção no disco. A Figura 25 ilustra o posicionamento do sensor na bancada experimental.



Figura 25. Posição do sensor fotoelétrico montado para medir a rotação no disco. (Fonte: Autoria própria).

Para determinar o módulo de condicionamento de sinais adequado, faz-se necessário conhecer as especificações técnicas do sensor fotoelétrico. A Tabela 2 especifica as características técnicas do sensor fotoelétrico a ser utilizado.

Tabela 2: Especificações do sensor fotoelétrico

Fabricante	Allen-Bradley
Modelo	42SM42SMF (Retangular série 7000)
Desempenho	
Faixa de detecção	1 mm - 2 m (Depende do cabo de fibra óptica)
Tempo de resposta	1 ms
Especificações elétrica	
Configuração	Saída complementar N.A./N.F.
Tensão de alimentação	11 a 28 VCC
Corrente de alimentação	46 mA

O módulo de entrada analógica especificado, que atende aos requisitos da Tabela 7, foi o modelo NI 9229 da empresa *National Instruments*. Um módulo de entrada analógica da série C com 4 canais. Este módulo possui alta velocidade, com taxa de amostragem de 50 kS/s, resolução de 24 bits e faixa de entrada de ± 60 V. A Figura 26 ilustra o módulo especificado.



Figura 26. Módulo de entrada de sinais analógicos modelo NI 9229 (FONTE: *National Instruments*, 2015)

4.2.1.3 DISPOSITIVO BASEADO EM FPGA

Para a aquisição de sinais, monitoramento, análise e processamento de sinais da bancada de testes foi utilizada a plataforma de *hardware* CompactRIO da empresa *National Instruments*.

A Figura 27, apresenta o *hardware* de arquitetura de E/S reconfigurável (RIO), baseada em tecnologia FPGA. A arquitetura CompactRIO combina três componentes de *hardware*: (i) um processador de tempo real na CPU do sistema; (ii) um *chip* FPGA embarcado na estrutura e, (iii) espaços para acomodação de até oito módulos de entradas e saídas. O modelo utilizado foi o NI 9074, que é baseado em FPGA e no sistema operacional de tempo real, é a interface física com os sensores, com a finalidade de condicionar os sinais, realizar a aquisição dos dados e realizar as análises e processamentos dos cálculos matemáticos essenciais ao programa de aplicação.

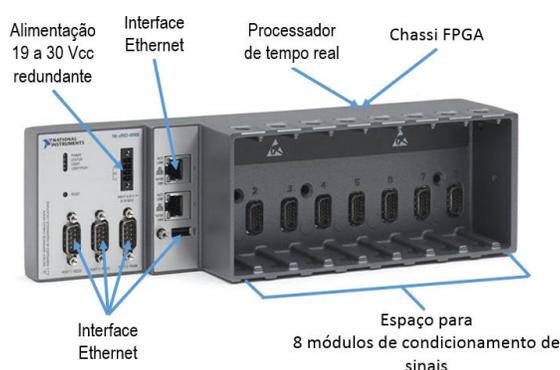


Figura 27. Plataforma CompactRIO™ – Sistema composto por controladora, chassi FPGA e módulos para condicionamento de sinais. (Fonte: Autoria própria).

4.2.2 Ambiente de programação

Nesta sessão é apresentado o programa desenvolvido para medição e cálculo de desbalanceamento, no domínio do tempo, ângulo de defasagem e no domínio da frequência, e identificação e alarme de falha de desbalanceamento em seus estágios iniciais. Para ser possível alcançar os objetivos propostos, foi considerada a arquitetura de um programa em LabVIEW conforme a Figura 28, onde a execução da lógica do sistema é realizada por três seções distintas: aplicação em FPGA, aplicação em processador de tempo real e aplicação Windows.

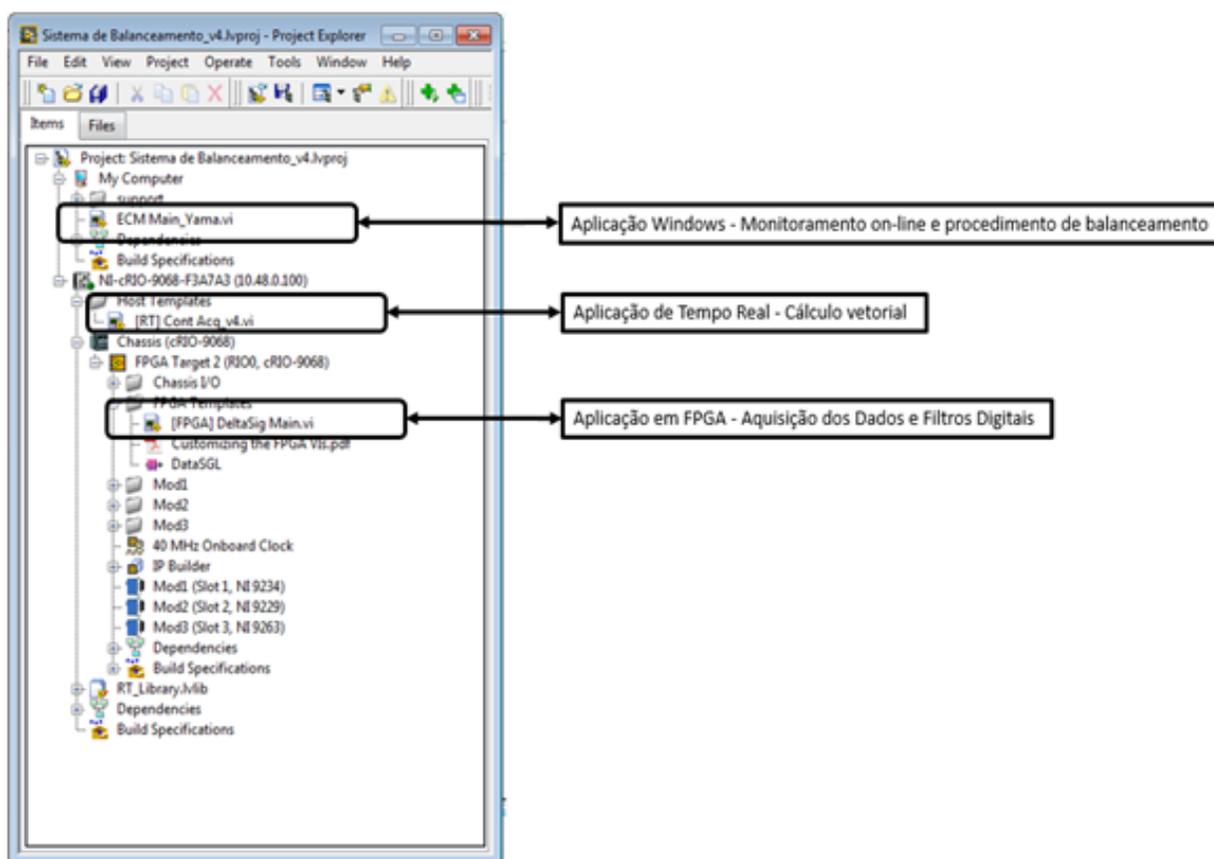


Figura 28. Projeto em LabVIEW™ do programa do sistema de detecção de falhas de desbalanceamento. (Fonte: Autoria própria).

Devido à abordagem baseada em plataforma que permite o uso de um mesmo ambiente de desenvolvimento (IDE) para programar diferentes tecnologias, tais como FPGA, microprocessador com sistema operacional de tempo real e microprocessador com sistema operacional Windows utilizadas neste trabalho, e da ampla variedade de funções matemáticas dedicadas para processamento e análise avançada de sinais, foi selecionado como ambiente de desenvolvimento o LabVIEW™.

4.2.2.1 A aplicação em FPGA: Aquisição dos dados e filtros digitais

A aplicação configurada (embarcada) em dispositivo FPGA, realiza a aquisição de dados, conversão de analógico para digital e transfere estes dados para o processador de tempo real.

Também aplica um filtro passa-faixa, a faixa de frequência foi definida em 10Hz para frequência de corte inferior e superior, de modo a eliminar o ruído, tendo como referência a frequência de rotação da máquina que é de 28,5Hz (1710 rpm). Esta seção do código age como um pré-processamento, reduzindo a quantidade de dados a serem processados no processador de tempo real. Os dados de vibração do acelerômetro e de rotação do sensor fotoelétrico, fixados ao motor são adquiridos pelo FPGA e então enviados para o controlador de tempo real através de um acesso direto à memória (DMA). A Figura 29 destaca a estrutura *While Loop* responsável a leitura dos canais de acelerômetro e sensor fotoelétrico, a configuração dos filtros e os dados sendo escritos na DMA para a transferência ao microprocessador de tempo real.

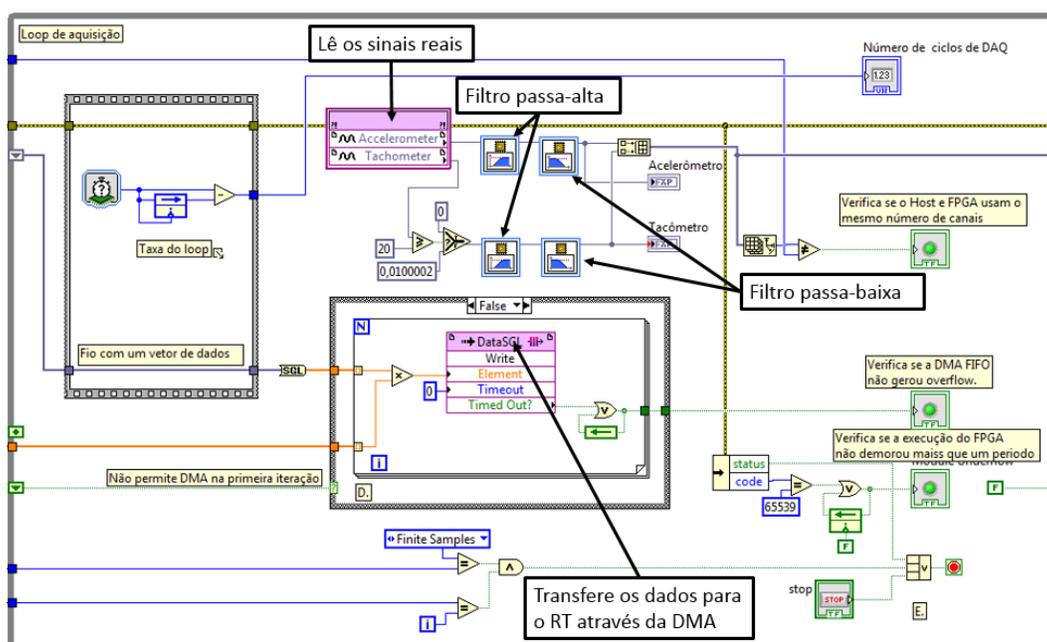


Figura 29. Loop de aquisição de dados no FPGA. (Fonte: Autoria própria).

O resultado desta etapa é a sincronização na aquisição entre os sinais do acelerômetro e do sensor fotoelétrico, que são essenciais para o cálculo do ângulo de defasagem. Além disso, torna-se possível expandir o número de canais do sistema, para monitorar outras máquinas, devido a característica de sincronização e processamento paralelo dos FPGAs.

4.2.2.2 A aplicação de tempo real: Cálculo vetorial

O microprocessador de tempo real executa o programa principal, realiza a leitura dos dados dos dois sensores, adquiridos pelo FPGA, executa o cálculo dos vetores para determinar os valores de fase e a magnitude do sinal, e por fim armazena os cálculos para futuras consultas.

Para desenvolver a aplicação, que permite calcular o valor da massa de correção e o ângulo de fase, foi utilizado o conceito do método vetorial de balanceamento. Os dados de entrada necessários são os valores de fase e a magnitude dos vetores V_0 e V_1 . A Figura 31 apresenta um exemplo de diagrama vetorial de desbalanceamento, que ilustra o cálculo que foi implementado em LabVIEW.

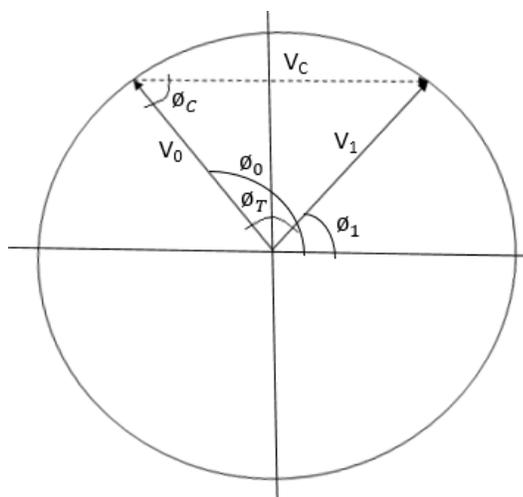


Figura 31. Representação de um exemplo de diagrama de balanceamento completo. (Fonte: Autoria própria).

Onde:

V_0 = Magnitude do vetor vibração inicial, chamado Mag_V0 no programa;

ϕ_0 = Fase do vetor vibração inicial, chamado Fase_V0 no programa;

V_1 = Magnitude do vetor de vibração teste, chamado Mag_V1 no programa;

ϕ_1 = Fase do vetor de vibração teste, chamado Fase_V1 no programa;

ϕ_T = Diferença entre ϕ_0 e ϕ_1 , chamado Fase_T no programa;

ϑ_C = Fase do vetor ângulo de correção, chamado Fase_T no programa;

V_C = Magnitude do vetor de correção, chamado Mag_Vt no programa.

A Figura 32 apresenta o diagrama em bloco da implementação do diagrama vetorial de desbalanceamento, implementado em LabVIEW.

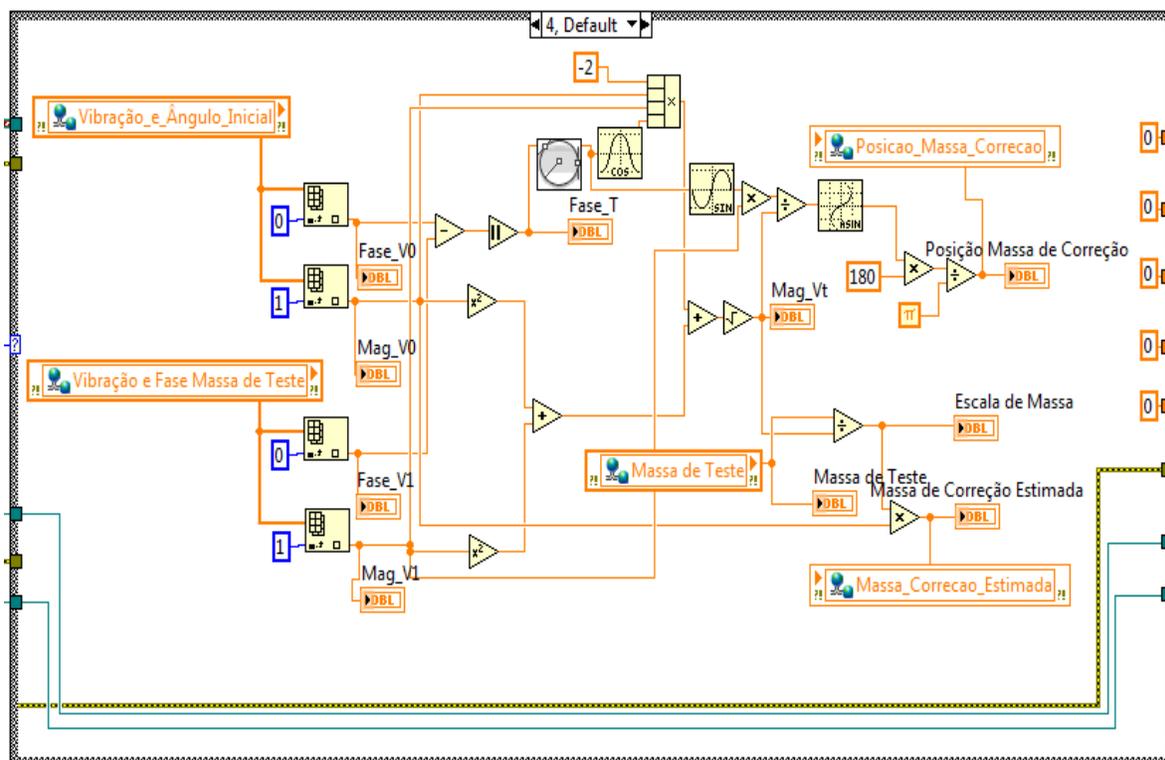


Figura 32. Funções para o cálculo vetorial. (Fonte: Autoria própria).

Após o sistema obter os valores de fase e magnitude dos vetores V_0 e V_1 . Os cálculos para identificar os valores de correção são apresentados a seguir.

Para determinar a magnitude do vetor de correção da massa, foi implementado a lei dos cossenos no triângulo, que tem seus vértices formado pelos vetores V_0 , V_1 e V_T , conforme equação 13.

$$V_T^2 = V_0^2 + V_1^2 - 2 \cdot V_0 \cdot V_1 \cdot \cos(\vartheta_0 - \vartheta_1) \quad (13)$$

Isolando V_T e sabendo que ϑ_T é igual a $(\vartheta_0 - \vartheta_1)$, temos:

$$V_C = \sqrt{V_0^2 + V_1^2 - 2 \cdot V_0 \cdot V_1 \cdot \cos \vartheta_T} \quad (14)$$

Para determinar a posição em que deve ser montada a massa de correção, foi implementado a lei dos senos no triângulo, conforme equação 15.

$$\frac{V_C}{\sin \vartheta_T} = \frac{\vartheta_C}{\sin V_1} \quad (15)$$

Isolando ϑ_C , obtemos a equação 16, que está normalizada para implementação no programa:

$$\vartheta_C = \sin^{-1} \left(\frac{V_C \cdot \sin \vartheta_T}{V_1} \right) \quad (16)$$

A razão entre a massa de teste (M_T) e a magnitude do vetor de correção (V_C), fornece um fator multiplicativo para o vetor de vibração inicial (V_0). Esta expressão permite determinar o valor da massa de correção, M_C , conforme equação 11 apresentada no capítulo 3. Ao final deste procedimento, todos os cálculos e os resultados são apresentados automaticamente na própria interface.

O código fonte completo em LabVIEW™ (VI) da seção de tempo real está disponível no Apêndice A deste trabalho.

4.2.2.3 A aplicação Windows: Monitoramento *on-line* e balanceamento

Durante a operação do sistema, o operador acompanha os procedimentos de testes, por meio de duas telas principais: (i) tela de monitoramento da integridade da máquina, que gera um alarme luminoso, na tela, em caso de níveis de vibrações altos; e (ii) tela para o procedimento de

balanceamento, que guia o operador nas etapas de balanceamento da máquina rotativa. Estas duas telas da aplicação são executadas em um PC, que serão descritas a seguir.

- **Monitoramento *on-line* e detecção de falha de desbalanceamento**

Esta etapa do monitoramento *on-line* do estado do desbalanceamento consiste em detectar a evolução do espectro de frequência e gerar um alarme para que se inicie o procedimento de balanceamento. A Figura 33 apresenta as funções que compõem esta etapa.

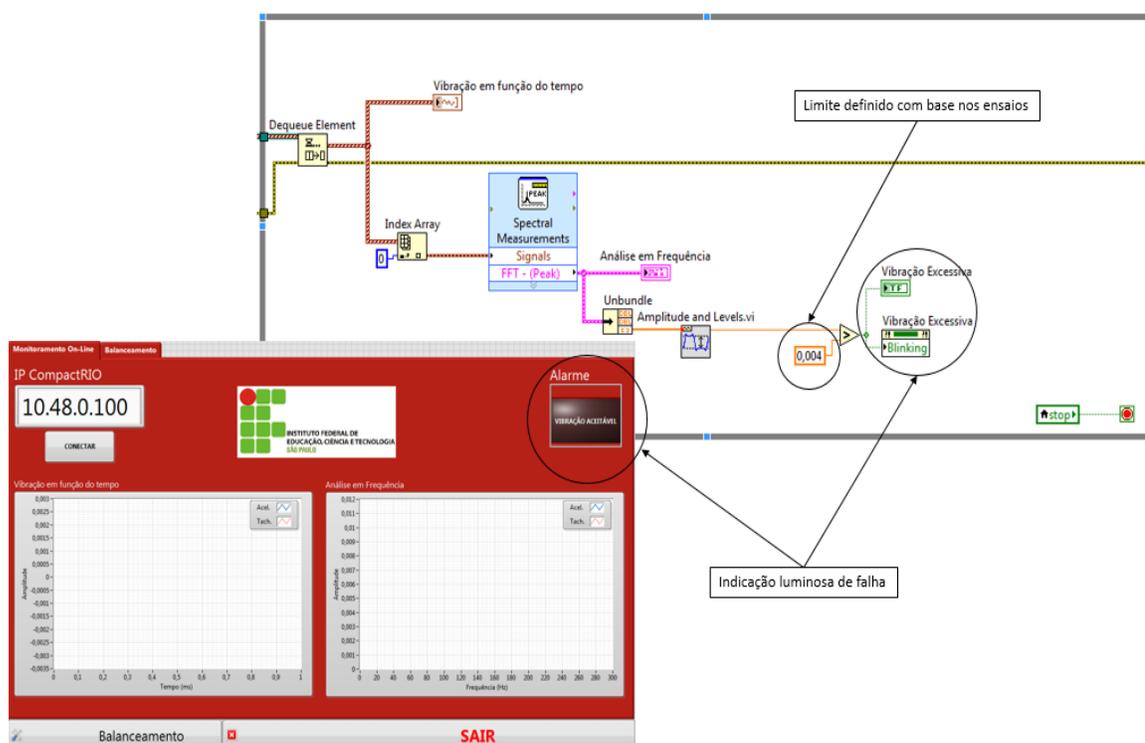


Figura 33. Funções para o monitoramento *on-line* do estado do desbalanceamento. (Fonte: Autoria própria).

Antes de ser executada a rotina apresentada na Figura 33, os dados provenientes do acelerômetro e do sensor fotoelétrico são continuamente adquiridos, através do sistema embarcado CompactRIO e enviados por meio de uma rede de comunicação TCP/IP para o microprocessador (PC). Durante a operação do programa o bloco *Deque Element* tem a função de extrair elementos específicos dos dados coletados. Estes elementos são direcionados para dois pontos distintos: (i)

gráfico de forma de onda chamado “Vibração em função do tempo” e; (ii) para o bloco *Index Array*. O valor numérico 0 no bloco *Index Array* indica que o canal 0, referente ao acelerômetro, é extraído do cluster de dados. O sinal extraído é enviado para o bloco *Spectral Measurements*. Este bloco lê as amostras de dados e realiza uma análise espectral baseada na FFT. O resultado desta análise é direcionado para outros dois pontos: (i) para um gráfico chamado “Análise em Frequência” e, (ii) para o bloco *Unbundle* que extrai a informação de magnitude do espectro do sinal. O sinal de magnitude passa pelo bloco “*Amplitude and Level*” que detecta o valor máximo do espectro. Por fim, uma lógica compara se o valor de vibração excede o limite de vibração estabelecido. Caso o valor seja excedido, é disparado o alarme Vibração Excessiva. Caso o valor seja excedido o sistema de detecção de falhas de desbalanceamento, gera um alarme luminoso de Vibração Excessiva na interface de operação.

- **Procedimento de balanceamento**

A Figura 34 ilustra a operação do programa proposto para o sistema automático de detecção de falhas de desbalanceamento.

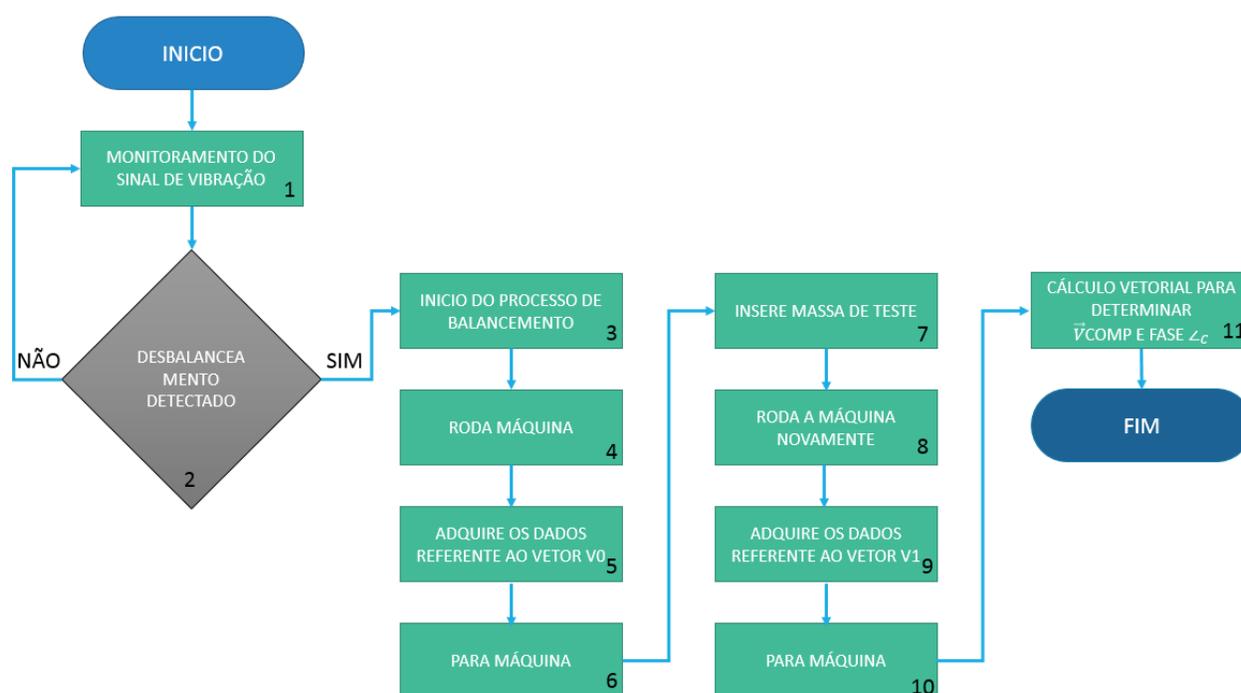


Figura 34. Fluxograma do programa proposto para a bancada de testes. (Fonte: Autoria própria).

Apesar da quantidade de blocos apresentado no fluxograma da Figura 34, que são necessários para a compreensão do funcionamento do sistema de detecção e correção do desbalanceamento, pode-se dividi-lo em três etapas principais, para uma melhor compreensão da lógica de programação: monitoramento do estado do desbalanceamento (1 e 2); aquisição de dados (3 a 10) e o cálculo vetorial e apresentação dos resultados para o valor e posição da massa de correção (11).

Sempre que o sistema detectar uma anomalia, o operador deverá sair da aba de monitoramento e acessar a aba de balanceamento da interface principal, Figura 33. Nesta tela basta o operador informar o valor da massa de teste que será inserido no disco, acionar o botão Balanceamento, no canto inferior esquerdo, para o sistema iniciar o procedimento de balanceamento. Ao acionar o botão Balanceamento, o sistema dá início ao assistente de balanceamento, conforme telas do próprio programa, apresentadas na figura 35.

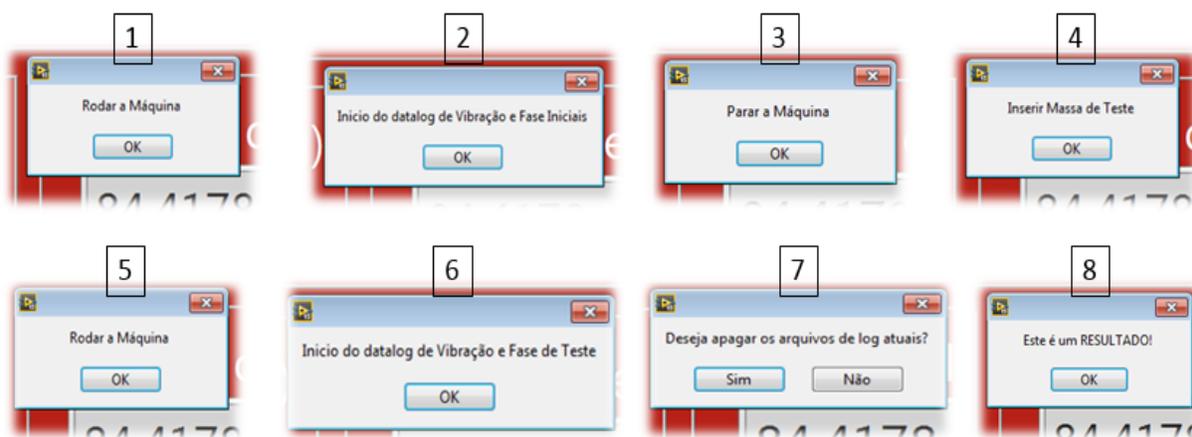


Figura 35. Telas do assistente de balanceamento no LabVIEW. (Fonte: Autoria própria).

O processo apresentado na Figura 35, garante que o operador siga cada etapa de aquisição dos vetores, para obter os dados necessários para cálculo de balanceamento da máquina, evitando assim qualquer inconsistência no resultado, que poderiam surgir caso o operador deixasse uma ou mais etapas sem realizar.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentado os resultados, a partir dos métodos utilizados, que foram descritos no capítulo 4. Apresenta-se o resultado da detecção da falha, bem como os resultados dos balanceamentos sugeridos.

O tipo de análise realizada na bancada experimental é o desbalanceamento mecânico do eixo rotativo, por este ser responsável pela maior parte das ocorrências de falhas desenvolvidas em máquinas rotativas, conforme apresentado na revisão bibliográfica deste trabalho. A falha induzida na bancada experimental foi o balanceamento estático, que ocorre em apenas um plano, conforme descrito na fundamentação teórica.

5.1 DETECÇÃO DE DESBALANCEAMENTO

No primeiro ensaio, a máquina funcionou sem a adição de massas no disco, nesta condição, considerou-se que a máquina estava balanceada.

A seguir são apresentados os gráficos gerados com os sinais provenientes dos dois sensores, analisou-se as características de cada sinal. A Figura 36 apresenta o sinal adquirido pelo sensor fotoelétrico, que é utilizado tanto para determinar a frequência de rotação, quanto seu ângulo de defasagem em relação ao sinal de vibração.

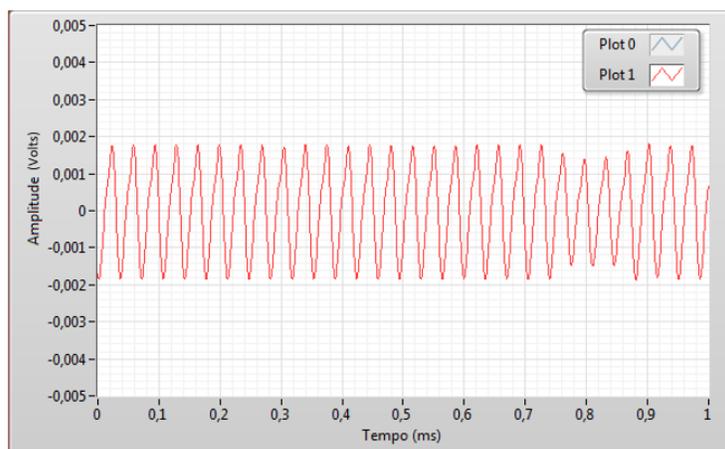


Figura 36. Sinal do sensor fotoelétrico. (Fonte: Autoria própria).

Observa-se pela Figura 36 que o sinal possui uma função periódica, isto permite calcular a frequência de rotação do motor.

A vibração é obtida através do sensor acelerômetro. A Figura 37 apresenta o sinal adquirido pelo sensor acelerômetro na condição considerada balanceada.

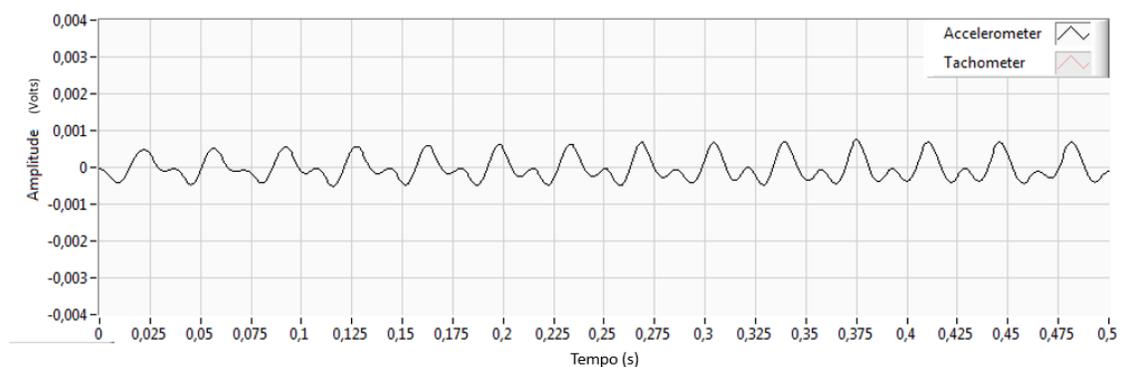


Figura 37. Sinal de vibração sem massa de desbalanceamento medidas pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).

Na Figura 37, pode-se observar que o acelerômetro mediu um sinal com amplitude de pico de aproximadamente 0,55mV, que corresponde à máquina na condição normal.

A Figura 38 apresenta o resultado da FFT para determinar a magnitude do sinal no domínio da frequência. As informações contidas no espectro de vibrações são processadas pelo sistema para identificação de falha de desbalanceamento. O sinal de interesse está contido na frequência de rotação (28,5 Hz), onde ocorre a falha de desbalanceamento.

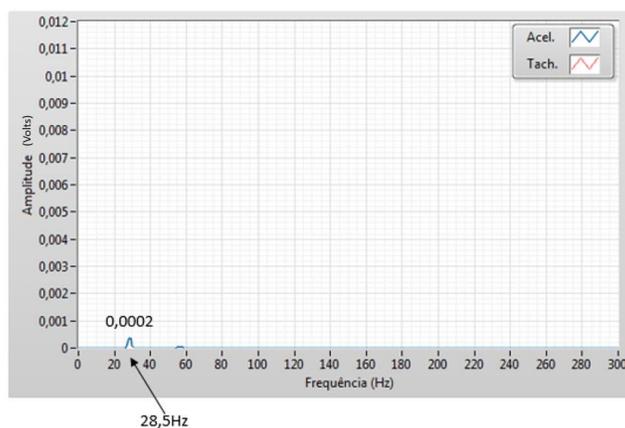


Figura 38. Espectro de vibração sem massa de desbalanceamento medido pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).

A magnitude do espectro na condição inicial, sem falha, ou seja, a máquina balanceada foi de 0,0002 (volts).

5.1.1 Aplicação de massas de desbalanceamento

Para realizar a simulação de falha foram utilizadas massas de desbalanceamento, com valores conhecidos, conforme apresentado na Figura 39.

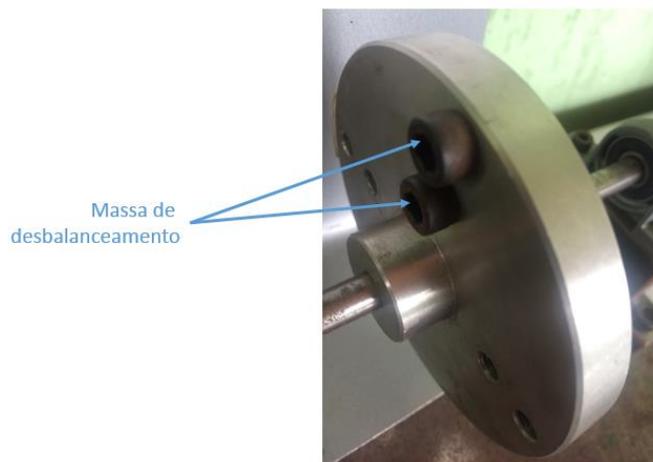


Figura 39. Disco acoplado ao eixo, com duas massas, que geram desbalanceamento. (Fonte: Autoria própria).

O experimento foi realizado inicialmente com uma massa de 0,006 kg, equivalente a um parafuso, acoplado na extremidade do disco da máquina rotativa. Apesar de praticamente não existir nenhuma alteração perceptível para uma pessoa, os resultados do ensaio, apontam uma alteração clara na amplitude de vibração da máquina, medida pelo sistema. Estes resultados são apresentados na Figura 40.

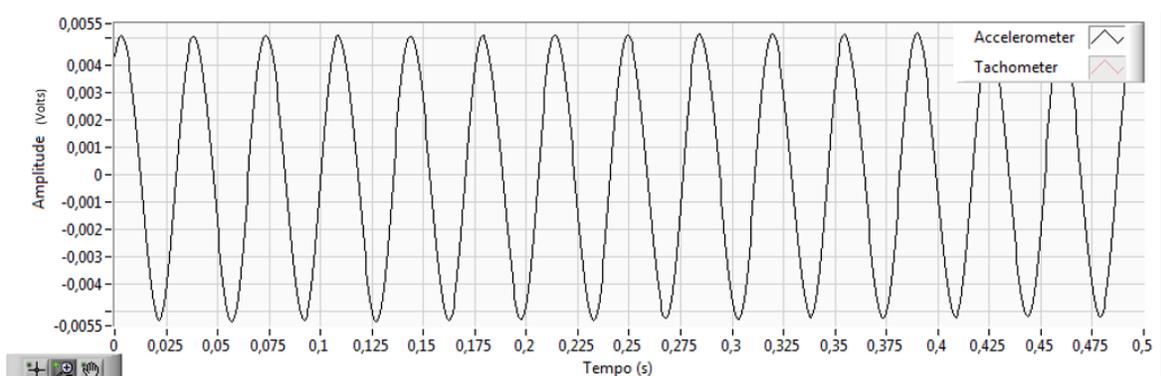


Figura 40. Sinal de vibração com uma massa de desbalanceamento medido pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).

Por meio da comparação da condição inicial, sem a adição de massa desbalanceadora, Figura 37, com a segunda condição em que foi adicionado uma massa desbalanceadora, Figura 40, percebe-se o aumento da amplitude da vibração, que apresenta um pico de aproximadamente 5,5mV. Assim, pode-se verificar que o desbalanceamento produz um aumento do nível de vibração na máquina.

A Figura 41, espectro do sinal de vibração com uma massa de desbalanceamento, apresenta o valor de 0,0056, na frequência de rotação da máquina (28,5 Hz). Isso representa um aumento na amplitude do sinal de vibração, na frequência de rotação da máquina de 0,0054 em relação à máquina em condição inicial balanceada.

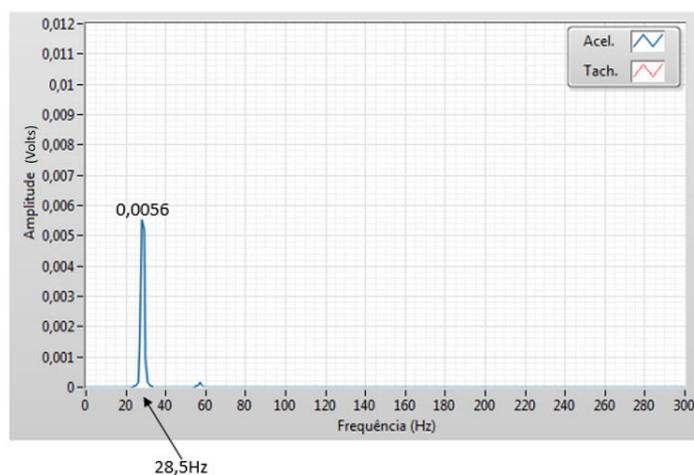


Figura 41. Espectro de vibração com uma massa de desbalanceamento medido pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).

5.1.2 Aplicação de duas massas de desbalanceamento

Um segundo ensaio foi realizado, na bancada de testes, adicionando-se duas massas de desbalanceamento de 0,006kg cada uma, equivalente a dois parafusos acoplado ao disco da máquina rotativa, como mostrado na montagem ilustrada na Figura 38. Os resultados podem ser observados na Figura 42.

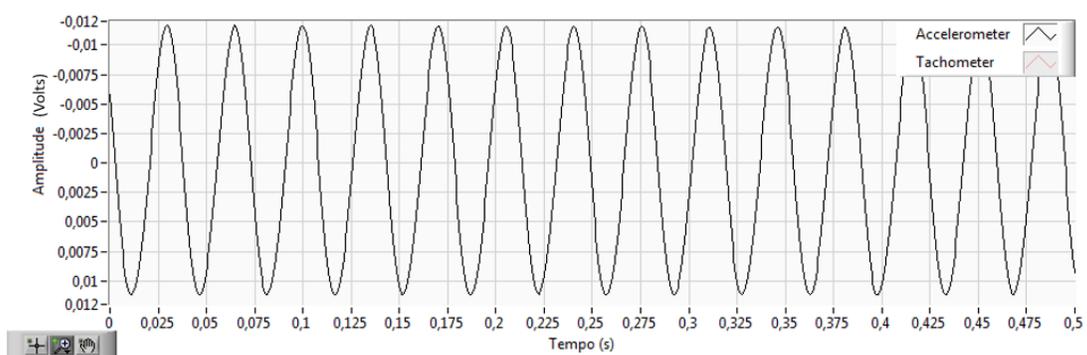


Figura 42. Sinal de vibração com duas massas de desbalanceamento medido pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).

Neste segundo experimento, observa-se uma alteração maior no gráfico do sinal de vibração da máquina. Conforme indicado na Figura 42, os níveis de vibração são elevados, o acelerômetro mediu um sinal com amplitude de pico de aproximadamente 11,5mV. A amplitude neste experimento foi aproximadamente 2 vezes maior, em comparação ao experimento com apenas uma massa (5,5mV), e mais de 20 vezes maior que a amplitude da máquina considerada balanceada (0,55mV). A Figura 43 apresenta o gráfico do espectro de vibração obtido neste ensaio.

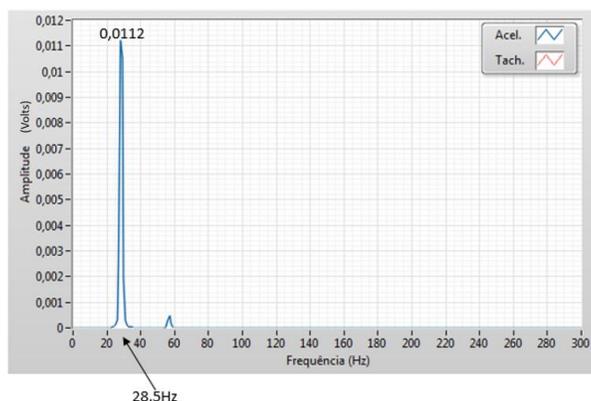


Figura 43. Espectro de vibração com duas massas de desbalanceamento medido pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).

Comparando-se os espectros de vibração para as três condições, balanceado, desbalanceado com uma massa e desbalanceado com duas massas, o último gráfico do espectro de vibração (Figura 43) apresenta o caso mais crítico. Observa-se que o espectro aumenta sua amplitude, sempre na mesma frequência de rotação do motor (28,5 Hz).

5.2 CORREÇÃO DO DESBALANCEAMENTO

Tendo sido possível identificar a correlação entre desbalanceamento e aumento da amplitude da vibração, o próximo passo foi implementar uma modelagem matemática, que permitisse ao sistema detectar a falha de maneira automática. Foi inserido uma lógica para comparar se o pico do espectro é maior ou igual a 0,004, que permite detectar vibrações incipientes

na máquina. O valor de limite mínimo para o alerta luminoso foi definido observando-se os valores experimentais dos ensaios realizados neste capítulo.

Como foi identificado falha causada por desbalanceamento na máquina, o próximo passo foi realizar o cálculo de correção deste desbalanceamento. Nesta etapa a algoritmo desenvolvido teve a finalidade de realizar os cálculos do ângulo e do valor da massa, que deve ser montada no disco para corrigir a falha. Conforme apresentado no subcapítulo 4.2.2.2, no algoritmo desenvolvido usou-se o método do cálculo vetorial, para determinar o balanceamento ótimo da máquina rotativa. A Figura 44 apresenta a interface de usuário do programa, que realiza e apresenta os dados de correção do desbalanceamento.



Figura 44. Interface para cálculos do ângulo e do valor da massa de correção. (Fonte: Autoria própria).

Para a determinação dos valores do ângulo de correção (θ_C) e massa de correção (M_C), faz-se necessário o conhecimento dos valores de fase e magnitude dos vetores V_0 e V_1 . A cada procedimento de balanceamento o sistema armazena dois arquivos na memória do sistema, um

referente à vibração inicial, vetor V_0 , e outro com a fixação da massa de teste, vetor V_1 . O cálculo do balanceamento depende somente desta informação contida no campo chamado, Massa de Teste (kg), conforme apresentado na Figura 44. Os resultados são apresentados nos campos, Ângulo de Correção ($^\circ$), e no campo Massa de Correção (kg).

Para validação do sistema de balanceamento, foram realizados ensaios com algumas massas de desbalanceamento com diferentes valores e em diferentes posições inseridas no disco. O ensaio consiste em inserir uma massa de valor conhecido, para simular o efeito de falha. A esta condição foi atribuída a vibração inicial, vetor V_0 . Ao ser solicitado pelo sistema a adição da massa de teste, será inserido outra massa de valor conhecido, ou massa de teste, que irá gerar o vetor V_1 . Foram realizados os ensaios e os resultados podem ser observados na tabela 3.

Tabela 3: Dados obtidos experimentalmente de correção do desbalanceamento

	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4
Rotação da máquina (rpm)	1710	1710	1710	1710
Massa Inicial, M_0 (kg)	0,003	0,0055	0,006	0,008
Vetor de Vibração Inicial, V_0	0,0019	0,0043	0,0031	0,0047
Ângulo Inicial, \angle_0 ($^\circ$)	114,5	288	8,5	6
Massa de Teste, M_T (kg)	0,0042	0,008	0,0055	0,0030
Vetor de Teste, V_T	0,0038	0,0072	0,0058	0,0059
Ângulo Teste, \angle_T ($^\circ$)	66,3	333,5	314,6	32,6
Massa de Correção, M_C (kg)	0,0027	0,0065	0,0039	0,0057
Ângulo de Correção, \angle_C ($^\circ$)	78	81,2	-86,3	77,7

Para validar a correção do desbalanceamento pelo sistema foi escolhido uma das quatro soluções dos ensaios, neste caso optou-se pelos resultados apresentados no Ensaio 3 da Tabela 3.

Para a verificação foi necessário retirar a Massa de Teste com massa de 0,0055 kg, e que é a referência de ângulo 0. Após retirar a massa de teste foi inserido a Massa de Correção com massa de 0,0039 kg, na posição $86,3^\circ$ em relação à referência 0 no sentido de rotação do motor. A massa foi inserida na posição 90° , por se tratar da posição mais próxima disponível no disco para inserção da Massa de Correção. O resultado é apresentado na Figura 45, onde é sobreposto os sinais de vibração com a massa inicial de valor 0,006 Kg e o sinal correspondente à fixação da massa de correção de valor 0,0039 na posição 90° .

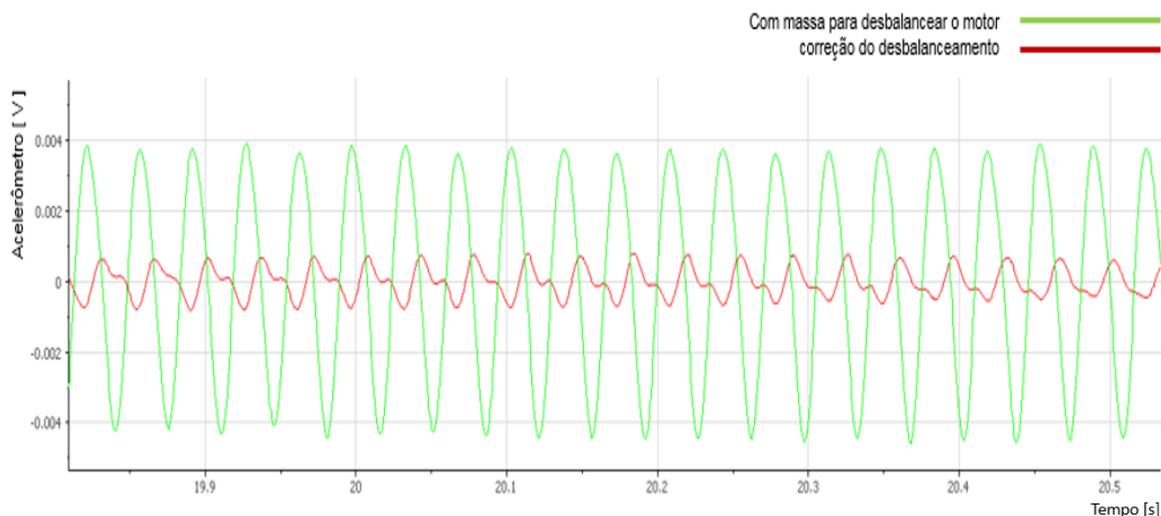


Figura 45. Comparação entre o sinal com massa desbalanceadora e o sinal de correção do desbalanceamento medidos pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).

Ao comparar situação normal de operação da máquina, em que não existem massas acopladas ao disco, conforme apresentado na Figura 37, com o resultado do sinal gerado ao inserir a massa de correção, é possível perceber uma semelhança na amplitude dos sinais voltando para níveis à baixo de 0,001 V de pico a pico.

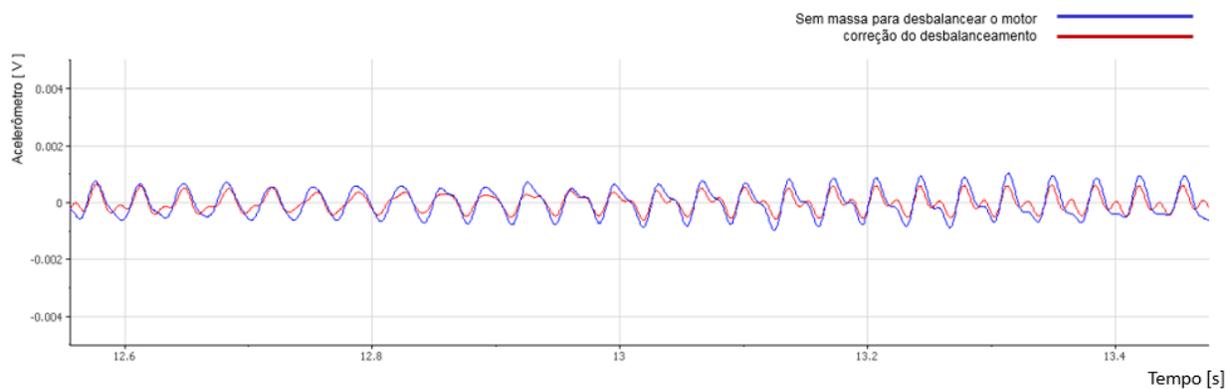


Figura 46. Comparação entre o sinal sem massa desbalanceadora e o sinal de correção do desbalanceamento medidos pelo acelerômetro. (Fonte: Autoria própria).

Através da Figura 46 foi observado que ao inserir a massa de correção no local indicado pelo sistema, foi possível reduzir, de maneira eficaz, a vibração devido à falha de desbalanceamento, aos níveis próximos ao de uma máquina rotativa considerada balanceada.

6 CONCLUSÃO

A aplicação de plataforma baseada em FPGA demonstrou-se viável na detecção de falha de desbalanceamento em máquinas rotativas de indução, por meio da implementação de filtros e de análises espectrais, uma vez que os ensaios realizados apresentaram resultados satisfatórios sobre as condições de funcionamento da máquina rotativa.

Para validação do sistema de monitoramento, análise de dados e balanceamento, foi proposto o desenvolvimento de uma bancada experimental de testes, que permitiu simular falhas de desbalanceamento incipientes em máquinas rotativas de indução. A bancada experimental permite gerar situação normal de operação e simular a situação de desbalanceamento no eixo de rotação da máquina.

Nos ensaios experimentais embarcou-se um algoritmo desenvolvido em LabVIEW para a representação vetorial das grandezas medidas, obteve-se a determinação satisfatória da massa e o ângulo de correção, a qual foi validada na própria bancada experimental de testes.

Este trabalho propôs um estudo sobre análise de vibrações a partir de análises FFT (espectros de frequência) e do desenvolvimento de uma bancada experimental para detecção de falha de desbalanceamento estático, ou em um único plano. Os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, uma vez que se obteve uma redução no nível de vibração da máquina de 8 vezes (desbalanceada) em relação ao balanceamento da máquina, obtido com a massa de teste, como pôde ser observado na figura 45 do ensaio 3.

Considerando os resultados, de forma complementar, o sistema pode ser aplicado como ferramenta didática em que um maior número de pessoas treinadas, independente da larga experiência no diagnóstico de falhas, possam analisar e determinar perfeitamente as condições de funcionamento da máquina rotativa.

6.1 FUTUROS TRABALHOS

O foco deste trabalho foi a identificação e correção de falhas de desbalanceamento, entretanto existem inúmeras fontes mecânicas, magnéticas e elétricas de falhas em máquinas e

métodos para detecção destas, sendo o estudo e implantação de algoritmos para detecção de cada uma destas falhas uma proposta de futuros trabalhos.

Outra sugestão é implementar algoritmos baseados em redes neurais artificiais (RNAs) e lógica Fuzzy, para detecção automática de falhas de desbalanceamento.

REFERÊNCIAS

ALGULE, S. R.; HUJARE, D. P. Experimental Study of Unbalance in Shaft Rotor System Using Vibration Signature Analysis. **International Journal of Emerging Research and Technology**, v. 3, n. 4, p. 124-130, Abril 2015. ISSN ISSN 2349-4409.

ALMEIDA, M. T. **Análise de vibrações na manutenção preditiva de motores elétricos**. Fupai, 1996.

ALMEIDA, F.C.L. **Diagnóstico automático de falhas em grupos geradores hidroelétricos utilizando técnicas preditivas de manutenção e redes neurais artificiais**. Dissertação de Mestrado. UNESP, 2008.

AMARO, C. M. G. **Sistema especialista para diagnóstico de máquinas de plataformas offshore por análise de vibração**. Dissertação de Mestrado. UFRJ, 2006.

ARAÚJO, R. S. Desgaste prematuro e falhas recorrentes em rolamentos de motores de indução trifásicos alimentados por inversores de frequência. Tese de doutorado. UFMG, 2011.

BALLUFF. **Optosensoren Reflexionslichtschranke BOS 5K-RR10**. Disponível em: <<http://usa.balluff.com/manuals/BOS%20Photoelectrics/BOS%205K-..-RR10-.pdf>>. Acesso em 07/01/2016.

BENBOUZID, H. M. Induction motor's faults detection and localization using stator current. **IEEE Transaction on Power Electronics**, 06 August 2002. 14-22.

BOUKAKA S, TEIAR H, CHAOUI H, SICARD P (2014). FPGA implementation of an adaptive fuzzy logic controller for PMSM. **Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)**, 7th **IET International Conference on, Manchester**, 8-10 April 2014. 1-6

BRÜEL & KJÆER. **Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers**, 1989. Disponível em: <<http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/handbook>>. Acesso em 12/10/2015.

BRÜEL & KJÆER. **Static and Dynamic Balancing of Rigid Rotors**, 1989. Disponível em: <<https://www.withfriendship.com/images/d/15802/fft-fast-fourier-transform.gif>>. Acesso em 17/09/2015.

CABAL-YEPEZ, E., OSORNIO-RIOS, R.A., ROMERO-TRONCOSO, R.J., RAZO-HERNANDEZ, J.R., LOPEZ-GARCIA, R. FPGA-Based Online Induction Motor Multiple-Fault

Detection with Fused FFT and Wavelet Analysis. **International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs**, Quintana Roo, 9-11 December 2009. 101-106.

CABAL-YEPEZ E, GARCIA-RAMIREZ A, ROMERO-TRONCOSO R, GARCIA-PEREZ A, OSORNIO-RIOS R. (2013). Reconfigurable Monitoring System for Time-Frequency Analysis on Industrial Equipment through STFT and DWT. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 01 October 2012. 760–771.

CARDOSO, A. J. M., SILVA, J. L. H. Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended park's vector approach. **Industrial Electronics Society, 31st Annual Conference of IEEE, IECON 2005**, 6-10 November 2005.

DA COSTA, CESAR; MATHIAS, MAURO HUGO. **Análise de Vibrações Mecânicas com FPGA**. Saber Eletrônica, v. 44, p. 52-56, 2008.

DA COSTA, C. **Desenvolvimento de um sistema de instrumentação de medição de vibração mecânica em máquinas rotativas, em tempo real, embarcado em FPGA**. Tese de Doutorado. Guaratinguetá: UNESP-FEG, 2011.

DA SILVA, G. D, PEREIRA, L A, FERNANDES, D. (2010). An automated system for incipient fault detection and diagnosis in induction motors based on MCSA. **Industrial Technology (ICIT), 2010 IEEE International Conference on**, 14-17 March 2010. 1227-1232.

DAS A, MAHAPATRA K. (2013) Real-Time Implementation of Fast Fourier Transform (FFT) and Finding the Power Spectrum Using LabVIEW and CompactRIO. **Communication Systems and Network Technologies (CSNT), 2013 International Conference on**, 6-8 April 2013. 169-173.

DIAS, A. S. (2009). Detecção de Falhas em Máquinas Rotativas. **IV Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte e Nordeste de Educação e Tecnologia**, Belém, 2009.

FALCON JS, TRIMBORN M. Graphical programming for field programmable gate arrays: applications in control and mechatronics. **American Control Conference: IEEE**, Minneapolis, MN, 14-16 June 2006.

FRANCO-GASCA LA, DE JESÚS ROMERO-TRONCOSO R, HERRERA-RUIZ G, DEL ROCÍO PENICHE-VERA R. FPGA based failure monitoring system for machining processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 15 June 2007. 676-686.

GONGORA, W. S. **Uma abordagem neural no diagnóstico de falhas em rolamentos de motores de indução trifásicos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

GRISEL, R., DUMARTIN, T., & CIRRINCIONE, G. (Maio de 2004). VHDL implementation of a neural diagnosis system: application to induction machine fault detection. **Industrial Electronics, 2004 IEEE International Symposium**, 4-7 May 2004. 217-222 vol. 1.

HUMPHREYS A I, EISENBLÄTTER B G, O'DONNELLA G E. FPGA based monitoring platform for condition monitoring in cylindrical grinding. **6th CIRP International Conference on High Performance Cutting**, 2014. 448-453.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1940-1: **Mechanical vibration - Balance quality requirements for rotors in a constant (rigid) state; Part 1** - Specification and verification of balance tolerances. Geneva, 2003.

JOVER RODRIGUEZ PV, ARKKIO A. Detection of stator winding fault in induction motor using fuzzy logic. **Applied Soft Computing**, March 2008. 1112-1120.

KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 4th ed., Editora Globo: Newnes, 44p.; 1979.

KOUNTCHEV R., IANTOVICS B. **Advances in Intelligent Analysis of Medical Data and Decision Support Systems**. Volume 473. Bulgaria, Romênia: Springer London Dordrecht Heidelberg NewYork, 2013.

KUMAR, R. S., KUMAR, K. V., & RAY, D. K. Fuzzy Logic based fault detection in induction machines using LabVIEW. **IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security**, September 2009.

LAGO, D. F.; GONÇALVES, C. A. Manutenção preditiva de um redutor usando análise de vibrações e de partículas de desgaste. 16° POSMEC, **16° Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, Uberlândia, Dezembro 2006.

LIN T, XIE Y, TANG J. Design of compactRIO-based acquisition system. **Environmental Science and Information Application Technology (ESIAT), 2010 International Conference on: IEEE**, 17-18 July 2010. 678-681.

MENNA, A. R. **Deteção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibração em banda larga: um caso prático de aplicação em uma população de equipamentos rotativos**. Dissertação de Mestrado. PROMEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

MEOLA, T. **Monitoramento em tempo real da qualidade de sinais de vibração, utilizando inteligência artificial**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Introdução à tecnologia FPGA**, 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/6984/pt/>>. Acesso em 21/08/2015.

NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é aquisição de dados?**, 2012. Disponível em National Instruments: <<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>>. Acesso 20/08/2015.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Soluções: Monitoramento de condição na linha de produção**, 2013. Disponível em: <<http://www.ni.com/mcm/general/pt/>>. Acesso em 09/10/2015

NATIONAL INSTRUMENTS. **Fundamentos da tecnologia FPGA**, 2013. Disponível em <<http://www.ni.com/white-paper/6983/pt/>>. Acesso em 03/11/2015.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Conceitos básicos da amostragem analógica**, 2014. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3016/pt/>>. Acesso em 19/11/2015.

National Instruments. Download do Guia, 2012. Disponível em: <ni.com/dataacquisition>. Acesso em 12/10/2015.

OBAID, R. R.; HABETLER, T. G.; TALLAM, R. M. Detecting load unbalance and shaft misalignment using stator current in inverter-driven induction motors. **Electric Machines and Drives Conference**, 1-4 June 2003. 1454-1458.

OLIVEIRA JR., H. A. **Lógica difusa - Aspectos Práticos e Aplicações**. 1a. Edição. Editora Interciência, 1999.

PALNITKAR S. **Verilog HDL: A Guide to Digital Design and Synthesis**. Second Edition, ed. Prentice Hall PTR, 2003. ISBN-10: 0132599708.

PCB PIEZOTRONICS. **Accelerometers/Vibration Sensors**. Disponível em: <<http://www.pcb.com/products.aspx?m=352C03>>. Acesso em 23/11/2015.

PIRES R. **Apostila de Lógica Configurável (FPGA)**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. 2013. 02-07.

RAMALHO, G. L.; PEREIRA, A. H.; FILHO, P. P.; MEDEIROS, C. M. Detecção de falhas em motores elétricos através da classificação de padrões de vibração utilizando uma rede neural elementar. **HALOS**, 2014.

RANDALL, R. B. **Vibration-based Condition Monitoring**, ed. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. 2010. ISBN: 9780470747858

RIMOLA, B. D. **Análise dinâmica de plataformas de aço para produção de petróleo com base na consideração do efeito da interação solo-estrutura**. Dissertação de mestrado. UERJ, Rio de Janeiro, 2010.

SALLEM, M. A.; DIWAKAR, G.; SATYANARAYANA, M. R. S. Detection of unbalance in rotating machines using shaft deflection measurement during its operation. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, n. 3, Outubro 2012. 08-20. ISSN 2278-1684.

SAGHAFINIA A, KAHOURZADE S, MAHMOUDI A, HEW WP, UDDIN M.N. On line trained fuzzy logic and adaptive continuous wavellet transform based high precision fault detection of IM with broken rotor bars. **Industry Applications Society Annual Metting (IAS), 2012 IEEE**, Las Vegas, 7-11 October 2012. 1–8.

SANTOS, J. T. **Análise Modal Experimental de Eixos Trincados**, xvi, 133p., mm, Dissertação de mestrado. ENM/FT/UnB, Brasília, 2007.

SILVA, B. T. V. **Bancada para análise de vibração: análise de falhas em máquinas rotativas**. Dissertação de mestrado. UNITAU, Taubaté, 2012.

SOUSA, W. S. **Desenvolvimento de um sistema aplicativo em labview para o monitoramento de máquinas rotativas com um módulo de balanceamento de rotores**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Pará, 2005.

SPAMER, F. R. **Técnicas preditivas de manutenção de máquinas rotativas**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

VANNI, R. K., JR, G. B., LEMOS, M. A., MARQUES, M. A., & ROSA, L. C. Expert System to Detect Incipient Faults in Rotating Machines Using Fuzzy Logic and Virtual Instrumentation. **International Journal of Computer Theory and Engineering**, December, 2012.

XILINX. **What is a FPGA?**, 2011. Disponível em: <<http://www.xilinx.com/fpga/>>. Acesso em 2015.

YEPEZ EC, RODRIGUEZ MV, TRONCOSO RJR, PEREZ AG, RIOS RAO, VIDALES HM, SALAS RA. FPGA- based entropy neural processor for on line detection of multiple combined faults on induction motors. **Mech. Sys. Signal Process**, 30 July 2012. 123–130. 30:123-130.

ZARRAGA, S. **Multi-function 3D Laser Scanner**, 2010. Disponível em: <<https://www.withfriendship.com/images/d/15802/fft-fast-fourier-transform.gif>>. Acesso em 21/01/2016.

APÊNDICE

APÊNDICE A – O código fonte completo em LabVIEW™ (VI) da seção de tempo real

