

ADRIANO ORSONI DINIZ

MONITOR DE VIBRAÇÃO CONTÍNUA COM USO DE ACELERÔMETRO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase
em eletrônica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Evandro Luís Linhari Rodrigues

São Carlos
2011

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

D585m Diniz, Adriano Orsoni
Monitor de vibração contínua com uso de acelerômetro /
Adriano Orsoni Diniz ; orientador Evandro Luís Linhari
Rodrigues. -- São Carlos, 2011.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em
Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola
de Engenharia de São Carlos da Universidade
de São Paulo, 2011.

1. Vibrações. 2. Acelerômetro. 3. Fourier. 4. FFT.
5. MC9S08JM60. 6. DEMOJM. I. Título.

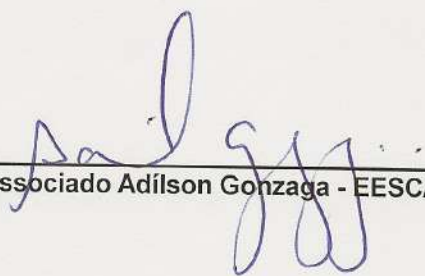
FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Adriano Orsoni Diniz

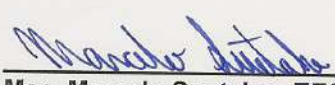
Título: "Monitor de Vibração Contínua com Uso de Acelerômetros"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 25/05/2011,

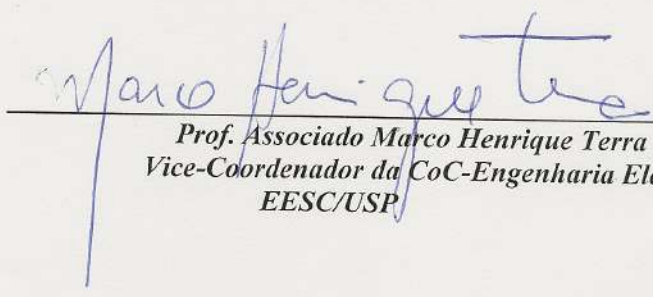
com NOTA 9,5 (NOVE, CINCO), pela comissão julgadora:



Prof. Associado Adílson Gonzaga - EESC/USP



Msc. Marcelo Suetake - EESC/USP



Prof. Associado Marco Henrique Terra
Vice-Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica
EESC/USP

Resumo

A condição ideal desejada para o funcionamento de uma máquina é a de que toda a energia da fonte de alimentação seja convertida em trabalho útil. Contudo, na prática existem vários fenômenos responsáveis pela perda de energia, entre os quais se destaca a vibração mecânica. Por ser também responsável pelo aceleramento do desgaste das peças mecânicas, a vibração mecânica tende a se agravar com o tempo de operação da máquina. É possível diminuir a intensidade das vibrações presentes, mas não eliminá-las totalmente. Dessa forma, faz-se necessário o monitoramento das vibrações, para o estudo de seus efeitos e influências, visando o controle de qualidade e a previsibilidade de manutenção. O projeto desenvolvido consiste em uma plataforma embarcada capaz de monitorar vibrações contínuas. O módulo de hardware utilizado é o kit DEMOJM, fabricado pela empresa PE Micro, dotado do microprocessador MC9S08JM60, da empresa Freescale, e do sensor acelerômetro MMA7260QT. O procedimento de monitoramento consiste na captação do sinal de aceleração das vibrações e sua posterior conversão para o domínio da frequência, por meio do processamento matemático da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Para o desenvolvimento do código-fonte do microprocessador foi utilizado o software CodeWarrior 6.1 Special Edition, disponibilizado pela empresa Freescale. Uma interface de usuário gráfica (GUI) para a apresentação dos sinais e dos resultados dos cálculos também foi criada, utilizando o software Microsoft Visual C# 2010 Express, da empresa Microsoft.

Palavras-chave: vibração, acelerômetro, Fourier, FFT, MC9S08JM60, DEMOJM.

Abstract

The ideal condition desired for the operation of a machine is that all the power supply's energy be converted into useful work. However, in practice there are various phenomena responsible for the loss of energy, among which stands out the mechanical vibration. Because it is also responsible for accelerating the wear of mechanical parts, mechanical vibration tends to get worse with the operating time of the machine. It is possible to reduce the intensity of present vibrations, but not to eliminate them completely. Thus, it makes the vibration monitoring necessary, to the study of its effects and influences, aiming the quality control and maintenance predictability. The developed project consists of an embedded platform capable of monitoring continuous vibrations. The hardware module used is the DEMOJM kit, manufactured by PE Micro, endowed with the MC9S08JM60 microprocessor, from Freescale, and with the MMA7260QT accelerometer sensor. The monitoring procedure consists of the vibration's acceleration signal capture and its subsequent conversion to the frequency domain, by the mathematical processing of the Fast Fourier Transform (FFT). The CodeWarrior 6.1 Special Edition software, available from Freescale, was used to develop the source code of the microprocessor. A graphical user interface (GUI) for signs and calculations' results presentation was also created, using the Microsoft Visual C # 2010 Express software, from Microsoft.

Keywords: vibration, accelerometer, Fourier, FFT, MC9S08JM60, DEMOJM.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Anéis de um rolamento de rolos cilíndricos.....	13
Figura 1.2: Hélice desgastada pelo processo de cavitação.....	16
Figura 1.3: Analisador e coletor de dados de vibração VSA-1215, da Datastick System.....	17
Figura 2.1: Oscilação mecânica em uma corda de violão.....	23
Figura 2.2: Esquema de modelagem mecânica.....	24
Figura 2.3: Modelagem de sistemas com 1(a), 2(b) e 3(c) graus de liberdade.....	25
Figura 2.4: Modelo de máquina elétrica rotativa.....	27
Figura 2.5: Rolamentos.....	30
Figura 2.6: Espectro para problemas nos rolamentos (baixas frequências).....	30
Figura 2.7: Modelo de acelerômetro piezelétrico.....	35
Figura 2.8: Estrutura construída com a tecnologia MEMS.....	36
Figura 3.1: Motor DC de 12V com potenciômetro e terminais de alimentação.....	46
Figura 3.2: Motor DC de 12V com circuito de controle.....	47
Figura 3.3: Motor DC de 12V com adesivo para leitura de velocidade.....	47
Figura 3.4: Montagem da placa de aquisição sobre o motor DC de 12V.....	48
Figura 3.5: Motor DC de 1700W.....	49
Figura 3.6: Chapa com dados do motor DC de 1700W.....	49
Figura 3.7: Ligações de controle para o motor DC de 1700W.....	50
Figura 3.8: Montagem da placa com blindagem sobre o motor DC de 1700W.....	50
Figura 3.9: Montagem completa do motor DC de 1700W com interface gráfica.....	51
Figura 3.10: Chapa com dados do motor síncrono (1ª parte).....	52
Figura 3.11: Chapa com dados do motor síncrono (2ª parte).....	52
Figura 3.12: Montagem da placa sobre o motor de indução (diagonal).....	53
Figura 3.13: Montagem da placa sobre o motor de indução (superior).....	54
Figura 3.14: Chapa com dados do motor de indução (1ª parte).....	54
Figura 3.15: Chapa com dados do motor de indução (2ª parte).....	55
Figura 3.16: Montagem completa do motor de indução com interface gráfica.....	55
Figura 3.17: Carga resistiva para testes do motor de indução (frente).....	56
Figura 3.18: Carga resistiva para testes do motor de indução (lateral).....	57
Figura 3.19: Inversor de frequência.....	58
Figura 3.20: Forma de onda da saída do inversor de frequência em 60,2Hz.....	58

Figura 3.21: Forma de onda da saída do inversor de frequência em 45,6Hz.....	59
Figura 3.22: Forma de onda da saída do inversor de frequência em 75,2Hz.....	59
Figura 4.1: Espectro do eixo X para o motor DC de 12V à velocidade de 1156rpm.....	69
Figura 4.2: Espectro do eixo Y para o motor DC de 12V à velocidade de 1156rpm.....	70
Figura 4.3: Espectro do eixo X para o motor DC de 12V à velocidade de 2995rpm.....	70
Figura 4.4: Espectro do eixo Y para o motor DC de 12V à velocidade de 2995rpm.....	71
Figura 4.5: Espectro do eixo X para o motor DC de 12V à velocidade de 3460rpm.....	71
Figura 4.6: Espectro do eixo Y para o motor DC de 12V à velocidade de 3460rpm.....	72
Figura 4.7: Espectro do eixo X para o motor DC de 12V à velocidade de 3641rpm.....	72
Figura 4.8: Espectro do eixo Y para o motor DC de 12V à velocidade de 3641rpm.....	73
Figura 4.9: Espectro do eixo X para o patamar de ruído retirado sobre a bancada.....	75
Figura 4.10: Espectro do eixo X para o patamar de ruído retirado sobre o motor.....	76
Figura 4.11: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 300W.....	77
Figura 4.12: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 300W.....	78
Figura 4.13: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 300W.....	78
Figura 4.14: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 600W.....	80
Figura 4.15: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 600W.....	81
Figura 4.16: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 600W.....	81
Figura 4.17: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 900W.....	82
Figura 4.18: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 900W.....	82
Figura 4.19: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 900W.....	83
Figura 4.20: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 1200W.....	83
Figura 4.21: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 1200W.....	84
Figura 4.22: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 1200W.....	84
Figura 4.23: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 1500W.....	85
Figura 4.24: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 1500W.....	85
Figura 4.25: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 1500W.....	86
Figura 4.26: Espectro do eixo X para o motor síncrono à velocidade de 1800rpm.....	87
Figura 4.27: Espectro do eixo Y para o motor síncrono à velocidade de 1800rpm.....	88
Figura 4.28: Espectro do eixo X para o motor de indução à 1790rpm (com blindagem).....	91
Figura 4.29: Espectro do eixo Y para o motor de indução à 1790rpm (com blindagem).....	91
Figura 4.30: Espectro do eixo X do motor de indução à 1813rpm (inversor em 60,4Hz).....	92
Figura 4.31: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1813rpm (inversor em 60,4Hz).....	92
Figura 4.32: Espectro do eixo X do motor de indução à 1790rpm (sem blindagem).....	93

Figura 4.33: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1790rpm (sem blindagem).....	93
Figura 4.34: Espectro do eixo X do motor de indução à 1806rpm (inversor em 60,2Hz).....	94
Figura 4.35: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1806rpm (inversor em 60,2Hz).....	94
Figura 4.36: Espectro do eixo X do motor de indução à 1798rpm (1 carga).....	97
Figura 4.37: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1798rpm (1 carga).....	98
Figura 4.38: Espectro do eixo X do motor de indução à 1783rpm (2 cargas em paralelo).....	98
Figura 4.39: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1783rpm (2 cargas em paralelo).....	99
Figura 4.40: Espectro do eixo X do motor de indução à 1770rpm (3 cargas em paralelo).....	99
Figura 4.41: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1770rpm (3 cargas em paralelo).....	100
Figura 4.42: Espectro do eixo X do motor de indução à 1758rpm (4 cargas em paralelo).....	100
Figura 4.43: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1758rpm (4 cargas em paralelo).....	101
Figura 4.44: Espectro do eixo X do motor de indução à 1343rpm (em 44,9Hz com blindagem)....	104
Figura 4.45: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1343rpm (em 44,9Hz com blindagem)....	104
Figura 4.46: Espectro do eixo X do motor de indução à 2240rpm (em 75,0Hz com blindagem)....	105
Figura 4.47: Espectro do eixo Y do motor de indução à 2240rpm (em 75,0Hz com blindagem)....	105
Figura 4.48: Espectro do eixo X do motor de indução à 1366rpm (em 45,6Hz sem blindagem)....	106
Figura 4.49: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1366rpm (em 45,6Hz sem blindagem)....	206
Figura 4.50: Espectro do eixo X do motor de indução à 2246rpm (em 75,2Hz sem blindagem)....	107
Figura 4.51: Espectro do eixo Y do motor de indução à 2246rpm (em 75,2Hz sem blindagem)....	107
Figura 1: Kit de desenvolvimento DEMOJM.....	155
Figura 2: Princípio de funcionamento do MMA7260QT.....	160
Figura 3: Estrutura do MMA7260QT.....	161
Figura 4: Foto do MMA7260QT.....	163
Figura 1: Gerenciador de criação de projeto.....	167
Figura 2: Programador com ambiente de depuração.....	168

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Leitura binária reversa.....	41
Tabela 4.1: Primeira comparação arranjos de saída de FFT do sistema e do Matlab.....	63
Tabela 4.2: Segunda comparação entre arranjos de saída de FFT do sistema e do Matlab.....	63
Tabela 4.3: Valores esperados e obtidos das comparações de velocidade do motor DC de 12V.....	74
Tabela 4.4: Valores de erro absoluto sobre unidades de escala do espectro para cada velocidade....	74

Tabela 4.5: Valores esperados e obtidos das comparações de velocidade do motor DC de 1700W...	79
Tabela 4.6: Valores esperados e obtidos das comparações de velocidade do motor síncrono.....	88
Tabela 4.7: Valores esperados e obtidos das comparações de velocidade do motor de indução.....	95
Tabela 4.8: Valores de erro para as configurações com e sem blindagem.....	96
Tabela 4.9: Valores esperados e obtidos para mudanças de carga do motor de indução.....	102
Tabela 4.10: Valores dos erros relativos para as configurações de carregamento.....	102
Tabela 4.11: Valores esperados e obtidos para mudanças de frequência do motor de indução.....	108
Tabela 4.12: Valores de erros para as configurações com variação de frequência, com e sem blindagem.....	109
Tabela 1: Teste de comparação de velocidade em 1156rpm.....	127
Tabela 2: Teste de comparação de velocidade em 2995rpm.....	127
Tabela 3: Teste de comparação de velocidade em 3460rpm.....	128
Tabela 4: Teste de comparação de velocidade em 3641rpm.....	129
Tabela 5: Teste de presença de ruído com a placa sobre o motor.....	129
Tabela 6: Teste com carga de 300W (mínima).....	130
Tabela 7: Teste com carga de 600W.....	131
Tabela 8: Teste com carga de 900W.....	132
Tabela 9: Teste com carga de 1200W.....	134
Tabela 10: Teste com carga de 1500W.....	135
Tabela 11: Teste de comparação de velocidade em 1800rpm.....	136
Tabela 12: Teste com blindagem e motor sem carga a 1790rpm (rede elétrica de 60Hz).....	138
Tabela 13: Teste com blindagem e motor sem carga a 1813rpm (inversor em 60,4Hz).....	139
Tabela 14: Teste sem blindagem e motor sem carga a 1790rpm (rede elétrica de 60Hz).....	140
Tabela 15: Teste sem blindagem e motor sem carga a 1806rpm (inversor em 60,2Hz).....	142
Tabela 16: Teste com blindagem e motor a 1798rpm com 1 carga (inversor em 60,4Hz).....	143
Tabela 17: Teste com blindagem e motor a 1783rpm com 2 cargas (inversor em 60,4Hz).....	144
Tabela 18: Teste com blindagem e motor a 1770rpm com 3 cargas (inversor em 60,4Hz).....	145
Tabela 19: Teste com blindagem e motor a 1758rpm com 4 cargas (inversor em 60,4Hz).....	147
Tabela 20: Teste com blindagem e motor sem carga a 1343rpm (inversor em 44,9Hz).....	148
Tabela 21: Teste com blindagem e motor sem carga a 2240rpm (inversor em 75,0Hz).....	150
Tabela 22: Teste sem blindagem e motor sem carga a 1366rpm (inversor em 45,6Hz).....	151
Tabela 23: Teste sem blindagem e motor sem carga a 2246rpm (inversor em 75,2Hz).....	152
Tabela 1: Lógica de seleção da sensibilidade.....	161

Sumário

Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	ix
Sumário.....	xi
1. Introdução.....	13
1.1. Justificativa.....	16
1.2. Objetivo.....	20
1.3. Organização do Trabalho.....	21
2. Fundamentos Teóricos.....	23
2.1. Vibração Mecânica.....	23
2.1.1. Manutenção de máquinas e sistemas eletromecânicos.....	26
2.1.2. Transdutores para o monitoramento de vibrações.....	31
2.2. Sensor acelerômetro.....	34
2.3. Análise de Fourier.....	37
3. Materiais e equipamentos.....	45
3.1. Motor DC de 12V.....	45
3.2. Motor DC de 1700W.....	48
3.3. Motor síncrono.....	51
3.4. Motor de indução.....	53
3.5. Carga resistiva.....	56
3.6. Inversor de frequência.....	57
4. Metodologia e Resultados.....	61
4.1. Escolha do microprocessador.....	61
4.2. Desenvolvimento do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	62
4.3. Desenvolvimento dos códigos-fonte da interface gráfica e do microprocessador.....	65
4.3.1. Tarefa de aquisição do arranjo de leituras.....	65
4.3.2. Tarefa de envio sincronizado dos pacotes de dados.....	66
4.4. Testes sobre motores.....	67
4.4.1. Testes sobre o motor DC de 12V.....	68
4.4.2. Testes sobre o motor DC de 1700W.....	76
4.4.3. Testes sobre o motor síncrono.....	87

4.4.4. Testes sobre o motor de indução.....	89
5. Discussão dos resultados.....	111
5.1. Desenvolvimento dos códigos-fonte da FFT, do microprocessador e da interface gráfica...	111
5.2. Testes sobre os motores.....	112
5.2.1. Testes de comparação de velocidade.....	112
5.2.2. Testes de presença de ruído.....	113
5.2.3. Testes de mudança de carga.....	113
5.2.4. Testes de mudança de frequência com o inversor de frequência.....	114
6. Conclusões e trabalhos futuros.....	115
Referências Bibliográficas.....	117
APÊNDICE A – Código-fonte desenvolvido da FFT.....	121
APÊNDICE B – Tabelas de dados de saída do sistema para os testes.....	127
1. Tabelas dos testes sobre o motor DC de 12V.....	127
2. Tabelas dos testes sobre o motor DC de 1700W.....	130
3. Tabelas dos testes sobre o motor síncrono.....	136
4. Tabelas dos testes sobre o motor de indução.....	138
ANEXO A – Módulo de desenvolvimento DEMOJM.....	155
1. Linha de microprocessadores Flexis JM.....	156
2. Acelerômetro MMA7260QT.....	159
ANEXO B – Software de desenvolvimento CodeWarrior 6.1 Special Edition.....	165

1. Introdução

Toda expressão de movimento mecânico apresenta componentes de vibração mecânica, sejam desejadas ou indesejadas. Alguns sistemas como, por exemplo, aqueles vinculados à transmissão e recepção de áudio, têm na vibração seu princípio fundamental de funcionamento. Tanto estruturas orgânicas, como o tímpano e as cordas vocais, quanto seus equivalentes eletromecânicos, o microfone e o falante, operam ao captar ou gerar vibrações mecânicas no ar. Porém, também existem situações nas quais a presença de vibrações é indesejada, como no funcionamento de máquinas rotativas (motores, geradores, turbinas e outras). Nestas situações as vibrações são responsáveis pelo comprometimento da qualidade das operações que as máquinas rotativas desempenham, como também pela aceleração do desgaste de peças, como rolamentos, acoplamentos e outras estruturas. Para ilustrar este efeito, são apresentados na Fig. 1.1 os anéis interno e externo de um rolamento de rolos cilíndricos, retirado de [1]. Os danos sobre o anel interno foram causados e agravados pelo movimento vibratório dos rolos.



Figura 1.1: Anéis de um rolamento de rolos cilíndricos.

Uma das frentes do estudo de vibrações em sistemas eletromecânicos busca a criação de métodos para minimizar a intensidade dessas vibrações e para minimizar seus efeitos danosos. São de fato várias abordagens, das quais podem ser destacados alguns exemplos na lista a seguir:

- o estudo de novos materiais (compostos, polímeros, ligas metálicas e outros);
- o comportamento destes materiais sob a influência da vibração (resistência, durabilidade, frequência

natural e outras características);

- técnicas de fabricação de peças (para aumento da precisão e controle da qualidade);
- técnicas de fabricação dos sistemas (transporte e armazenamento das peças, manuseio na linha de montagem, acoplamento entre peças, transporte e manuseio do sistema montado e outros);
- novos projetos de sistemas eletromecânicos (mais simples, baratos, robustos e de mais fácil manutenção);
- técnicas de preparação de fundações (base sobre a qual os sistemas operam).

Apesar de todos os esforços orientados à minimização das vibrações, é sabido que a completa eliminação das mesmas é uma meta inalcançável. Essa condição porém não deve desestimular a busca de melhores soluções, mas exatamente o contrário, deve estimular o 'convívio' com a vibração. Em termos práticos significa buscar conhecer o sinal vibratório da forma mais detalhada e precisa possível, especialmente as seguintes características:

- o evento (a interação mecânica) que gerou o sinal (a localização, frequência e amplitude da interação);
- o comportamento (a propagação) do sinal por todas as partes da máquina;
- o tempo necessário para que o sistema alcance o equilíbrio;
- as consequências resultantes sobre cada uma das partes.

Com respeito ao comportamento do sinal, é necessário acompanhar as mudanças de características de determinadas componentes do sinal vibratório, como a alteração na amplitude da componente, o deslocamento no espectro de frequências e alteração no tempo de atenuação. Estas variações indicarão as alterações estruturais do próprio sistema (alterações nas peças cujas interações geram o sinal e alterações nas demais partes, por onde o sinal se propaga).

Desta necessidade de se conhecer minuciosamente o sinal vibratório surge uma outra frente de estudo, a do monitoramento de vibração. Esta frente de estudo coopera com as demais, proporcionando ferramentas para que possam avaliar e quantificar seus avanços. Mas o monitoramento de vibração também tem um fim em si mesmo, quando os dados fornecidos são analisados e utilizados para melhorar as condições de operação e os critérios de manutenção das máquinas. De posse dos dados sobre as várias condições de operação de um sistema eletromecânico, torna-se possível determinar a condição mais favorável de funcionamento do sistema, otimizando os resultados do trabalho executado e estendendo este tempo de funcionamento. Alguns exemplos de situações podem ser de operação:

- normal;
- com sobrecarga;

- com interferências na rede de alimentação;
- com interferências elétricas externas;
- com interferências eletromagnéticas externas;
- com interferências mecânicas externas.

Semelhantemente, os critérios de manutenção podem ser otimizados, tornando-se mais específicos para cada máquina e para cada condição de operação. Definida a condição de operação mais eficiente, pode-se investir em práticas de manutenção orientadas à detecção de falhas em tempo de operação, ao invés de baseadas em cronogramas periódicos ou na situação quando, pelo agravamento da falha, ocorre a interrupção do funcionamento da máquina.

Por meio da medição e análise das vibrações de uma máquina durante o serviço normal de produção detecta-se, com antecipação, a presença de falhas que podem ser corrigidas antes que causem mais danos e antes que seu custo de recuperação seja mais elevado. Alguns exemplos de falhas em máquinas e em peças mecânicas são:

- rolamentos deteriorados;
- engrenagens defeituosas;
- acoplamentos desalinhados;
- rotores desbalanceados;
- vínculos desajustados;
- eixos deformados;
- lubrificação deficiente;
- folga excessiva em buchas;
- falta de rigidez;
- problemas aerodinâmicos;
- problemas hidráulicos;
- cavitação.

Para ilustrar um destes exemplos, é apresentada na Fig. 1.2 a foto de uma hélice que sofreu desgaste por cavitação, obtida em [2]. A perda desproporcional de material das pás ocasiona o desequilíbrio na distribuição da massa da hélice e no desbalanceamento do movimento de rotação. Através do monitoramento da evolução do sinal vibratório (acompanhando as mudanças no espectro de vibração) seria possível diagnosticar o desbalanceamento e, por conseguinte, o desgaste.



Figura 1.2: Hélice desgastada pelo processo de cavitação.

A partir do estudo das bases teóricas da vibração mecânica em máquinas, incluindo as respostas vibratórias em condição normal de operação e as respostas vibratórias na presença de falhas em peças mecânicas, é possível realizar análises comparativas de grande confiabilidade. O projeto desenvolvido, por não compreender um estudo extenso destas respostas vibratórias de falhas, propõe-se a apresentar uma implementação simples de monitor de vibrações, incluindo primariamente os sistemas de aquisição, processamento e visualização do sinal vibratório. As análises serão baseadas na comparação entre testes semelhantes, com variações de parâmetros.

1.1. Justificativa

O aparelho empregado para monitorar vibrações é conhecido como monitor de vibrações. No mercado existem vários modelos de monitores de vibrações, desde os mais simples, que apenas realizam a conversão do sinal temporal para o domínio da frequência (apresentando a frequência de vibração fundamental em um display numérico), até aqueles mais complexos, que agregam funcionalidades para a manipulação, análise e visualização de dados (com *displays* de imagens em cores, para apresentar espectros completos e customizáveis).

Algumas das funcionalidades extras dos modelos mais complexos estão relacionadas a:

- transferência de dados (como com a implementação dos protocolos de comunicação RS232, USB, IRDA e outros);
- armazenamento de dados (com tamanhos da memória interna variados, expansibilidade por meio de

cartões de memória, composição da estrutura de dados armazenada e outras);

- comparações com padrões (avaliação do espectro obtido tendo como referência leituras anteriores ou leituras desejáveis);
- emissão de alertas (sinalização visual, sonora ou por software sobre a ocorrência de um determinado evento, como ultrapassagem de limites de ruído, falhas no sistema monitorado e outros).

Estas funcionalidades enriquecem o monitoramento e a análise, mas são evoluções técnicas que não estão relacionadas à função principal propriamente.

Um exemplo de equipamento comercial é o analisador e coletor de dados de vibração VSA-1215, da empresa Datastick System [3]. Este modelo foi projetado para o funcionamento conjunto com um PDA (*Personal Digital Assistant*), oferecendo as funcionalidades de armazenamento, transmissão e visualização de dados já disponíveis neste tipo de utilitário. Uma foto do VSA-1215, obtida em [4], é apresentada na Fig. 1.3. Nesta foto o monitor está acoplado ao PDA Palm TX [5], fazendo uso de seus recursos de processamento, apresentação gráfica e interface de comandos.



Figura 1.3: Analisador e coletor de dados de vibração VSA-1215, da Datastick System.

Alguns modelos de monitores de vibrações também agregam outros tipos de sensores, compondo estações completas para vários tipos de monitoramentos diferentes, com sensores de temperatura, pressão e outros. Mas não levando em consideração estas especificações e as funcionalidades alheias à função

principal de um monitor de vibrações, é possível comparar os vários modelos disponíveis no mercado por meio de alguns parâmetros de classificação, como a portabilidade, autonomia, número de canais de aquisição, faixa de frequência de monitoramento, grandezas monitoradas, faixa dinâmica, sensibilidade, tipo de detecção do sinal, condições de temperatura e umidade suportadas e outros. Esta lista de características será explorada com base no exemplo do modelo VSA-1215 [3].

A portabilidade refere-se à possibilidade de transportar manualmente o monitor de um local para outro, a fim de ser utilizado em vários sistemas e contextos. Isso depende de outros parâmetros, como peso e dimensões físicas do equipamento, além da praticidade de instalação a cada novo sistema monitorado. Uma alternativa utilizada é a desassociação entre o monitor e o transdutor (o elemento sensível), de modo que cada sistema já tenha seu próprio transdutor instalado, para que o sinal seja recebido sem a necessidade de uma nova instalação, mas apenas da conexão. Também existem os modelos fixos, que são instalados definitivamente em cada máquina, com a missão de executar o monitoramento constantemente. No exemplo do VSA-1215 a operação é portátil e com o transdutor desassociado, permitindo a simples conexão a cada sistema monitorado.

A autonomia é a capacidade do equipamento para realizar a análise sem interrupções, associada à sua fonte de alimentação. Equipamentos portáteis geralmente são alimentados por meio de baterias, que lhes dão a autonomia de algumas horas. Para esse caso, deve-se avaliar o tempo necessário de monitoramento do sistema eletromecânico, seu ciclo de trabalho. Caso a autonomia do monitor seja inferior ao tempo necessário de monitoramento, deve-se contar com unidades extras de baterias carregadas. Para equipamentos fixos, normalmente é utilizada a própria fonte de alimentação do sistema monitorado, a rede elétrica instalada. No exemplo do VSA-1215 a alimentação é realizada por baterias, com tempo de funcionamento estimado em 8 horas.

O número de canais de aquisição corresponde ao número de leituras simultâneas sobre as quais o monitor pode trabalhar. Dependendo do tipo de transdutor utilizado e das necessidades de monitoramento sobre determinado sistema eletromecânico, vários sinais de vibração devem ser captados em diferentes localidades do sistema. Deve-se considerar que o poder de processamento do monitor é um recurso fixo e finito, que é distribuído no acompanhamento dos sinais captados em todos os canais. Dessa forma, quanto maior for o número de canais utilizados, maior será o tempo necessário para a conclusão dos cálculos. Caso a aplicação apresente restrições de tempo de conclusão, será necessário diminuir a precisão de cada cálculo realizado para cumprir o limite de tempo estabelecido. No exemplo do VSA-1215 existe apenas um canal de aquisição.

A faixa de frequência de monitoramento é a faixa do espectro sobre a qual o monitor trabalha, geralmente iniciada em poucas unidades de Hertz, indo até alguns milhares ou dezenas de milhares de Hertz. A faixa de frequência pode ser condicionada ao transdutor, limitada pela capacidade de leitura de sua estrutura sensível interna ou pela capacidade de saída (conversão da variação da grandeza mecânica em variação de uma grandeza elétrica). A faixa de frequência também pode ser limitada por uma opção de projeto, visando atender uma aplicação da qual não se esperam/desejam componentes de frequência superior

a um determinado limiar (a fim de alcançar maior eficiência, permitindo monitoramentos mais precisos sobre uma faixa menor de frequências). No exemplo do VSA-1215 a faixa de frequências pode ser selecionada para melhor resolução, sendo máxima em 1kHz.

As grandezas monitoradas são as referências mecânicas da ocorrência da vibração, que podem ser o deslocamento, a velocidade ou a aceleração. A grandeza mecânica também está condicionada ao transdutor, cujo princípio de funcionamento é diretamente baseado em apenas uma delas. A maioria dos modelos de monitores de vibrações utiliza apenas uma das grandezas mecânicas, especialmente quando o transdutor está localizado em seu interior. Contudo, existem modelos de monitores de vibrações que são compatíveis com duas ou três grandezas mecânicas (com vários tipos de transdutores), a fim de atender a um maior número de aplicações. Cada grandeza mecânica é mais adequada a uma faixa de frequência, sendo o deslocamento mais adequado para a análise de vibrações de baixas frequências, a aceleração para vibrações de altas frequências e a velocidade para frequências intermediárias. Assim, a escolha da grandeza (do tipo de transdutor) torna a solução mais eficiente. No exemplo do VSA-1215 existe a compatibilidade com sensores de aceleração e velocidade.

A faixa dinâmica é o módulo da amplitude da grandeza mecânica que pode ser medido. Quanto mais intensa for a vibração esperada, maior deve ser a faixa dinâmica utilizada, para que não ocorra a saturação do sinal captado. A sensibilidade é a medida da variação da grandeza elétrica para cada unidade de variação da grandeza mecânica. Quanto menos intensa for a vibração esperada (maior necessidade de precisão na medição da amplitude), maior deve ser a sensibilidade utilizada, para que componentes de pequeno módulo de amplitude e pequenas variações de amplitude não passem despercebidas. A faixa dinâmica e a sensibilidade são outras características do transdutor, que devem ser previstas nas etapas de condicionamento e digitalização do sinal (escolha do ganho do circuito de amplificação do sinal elétrico, escolha do ganho linear ou seletivo em frequência, escolha do tamanho da palavra binária para representar cada amostra e da taxa de amostragem). No exemplo do VSA-1215 o transdutor de aceleração tem sensibilidade nominal de 100mV/g, ajustável entre 10mV/g até 10.000mV/g. Sua faixa dinâmica é de 130dB no total, com níveis de medição selecionáveis para 50g, 20g, 10g, 5g, 2g e 1g.

O tipo de detecção do sinal é o modo de representação do sinal captado, que pode ser RMS, pico real, pico-a-pico real, pico equivalente ou pico-a-pico equivalente. O modo RMS baseia-se na leitura da energia total do sinal alternado, equivalendo a um sinal contínuo. Os modos pico e pico-a-pico são para sinais contínuos e alternados, respectivamente. Os modos real e equivalente representam o sinal com fidelidade ou segundo uma escala conveniente, respectivamente. Existem modelos de monitores já programados para apenas um tipo de detecção, como também existem modelos preparados para todos os tipos, bastando ser selecionado.

As condições de temperatura e umidade que podem ser suportadas, entre outras adversidades do ambiente, dependem de características construtivas do equipamento, como isolamento (capacidade de não ser atingido pelas variações do ambiente), dissipação (capacidade de desfazer-se das influências das variações) e robustez (capacidade de continuar funcionando e de não comprometer a correteza da análise

com o agravamento das condições ambientais). Dependendo da aplicação, deve-se escolher o monitor de vibrações também por sua capacidade para suportar estas interferências. Ainda, dependendo de outras variáveis do ambiente, o monitor deve ter uma construção preparada para situações imprevistas, como choques mecânicos (colisões com peças que podem desprender-se durante a vibração ou explosões), contato com materiais corrosivos ou em temperaturas muito diferentes da ambiente e outras.

Além de todos estes parâmetros de classificação dos monitores de vibrações, também a operação da Transformada de Fourier que executam pode ser parametrizada. Alguns parâmetros são faixa de frequência de cálculo, número de linhas de resolução, tipos de janelamento, tipos de escala de visualização e tipos de médias. A faixa de frequência de cálculo é o tamanho da janela espectral em análise, sendo menor a precisão do cálculo quanto maior for a faixa. O número de linhas de resolução é o número de entradas e saídas da transformada, que será mais precisa e de computação mais pesada quanto maior for o número de linhas. Os tipos de janelamento referem-se à ênfase ou atenuação dada a determinadas frequências da faixa calculada, podendo ser retangular (de ênfase igual para todas), *hanning* (ênfase para as frequências centrais) e vários outros tipos. Os tipos de escala referem-se à proporção da visualização dos componentes dos cálculos, que pode ser em Hertz ou RPM para a frequência, em unidade física ou decibel (dB) para a amplitude e linear ou logarítmica para ambas. Os tipos de médias podem ser linear, exponencial ou *peak-hold*, usadas para construir uma única análise espectral a partir de blocos do sinal. No exemplo do VSA-1215 a FFT tem número de linhas de resolução selecionáveis entre 3200, 1600, 800 e 400. Os tipos de janelamento suportados são retangular (uniforme), *hanning*, *hamming*, *flattop*, *blackman* e *bartlett*. As escalas suportadas são Hertz ou CPM (RPM) para a frequência e as métricas inglesa ou internacional para a amplitude. Os tipos de médias suportados são linear ou *peak-hold*, com 1, 2, 4 ou 8 médias.

O projeto desenvolvido não se propõe a apresentar uma solução comercialmente competitiva frente às soluções já disponíveis no mercado, nem está associado a outros projetos industriais pré-existentes. Dessa forma também não visa atender à solução de uma aplicação específica, mas apenas explorar as capacidades do kit de desenvolvimento DEMOJM, a fim de conhecer suas vantagens e limitações quando utilizado como base para a construção de um monitor de vibrações.

1.2. Objetivo

Utilizar o *kit* de desenvolvimento DEMOJM, fabricado pela empresa PE Micro [6], dotado do microprocessador MC9S08JM60 e do sensor acelerômetro MMA7260QT, ambos fabricados pela empresa Freescale Semiconductor [7], para a construção de um monitor de vibrações contínuas. Os resultados dos cálculos deverão ser apresentados em interface gráfica para computador pessoal de mesa. A codificação, depuração e tradução do algoritmo embarcado, a ser gravado no microprocessador, será realizada no software CodeWarrior 6.1 Special Edition, disponibilizado juntamente com o *kit* DEMOJM. A interface gráfica será construída por meio do software Microsoft Visual C# 2010 Express, da empresa Microsoft [8].

A interface entre a placa de circuito do *kit* e o computador será implementada via protocolo de comunicação USB [9].

1.3. Organização do Trabalho

O corpo do texto do trabalho está organizado em 6 capítulos, segundo os seguinte tópicos:

- O capítulo 2 aborda os fundamentos teóricos necessários ao entendimento do projeto, contendo tópicos sobre vibração mecânica, manutenção de máquinas e equipamentos eletromecânicos, sensores acelerômetros e Transformada de Fourier;
- O capítulo 3 apresenta os materiais e equipamentos utilizados na realização do projeto;
- O capítulo 4 apresenta a metodologia de trabalho nas etapas de construção do monitor de vibrações, desde a implementação do algoritmo da Transformada de Fourier até o desenvolvimento sobre o *kit* DEMOJM, com a implementação da interface gráfica e da interface de comunicação USB;
- O capítulo 5 contém as discussões dos resultados apresentados no capítulo 4;
- O capítulo 6 aponta as conclusões e possíveis aprimoramentos e expansões para o projeto.

2. Fundamentos Teóricos

Para a estruturação do projeto são necessárias algumas bases teóricas referentes à aplicação e à solução. São os fundamentos teóricos de vibração mecânica, do sensor acelerômetro e da Transformada de Fourier, que se seguem nos tópicos adiante.

2.1. Vibração Mecânica

A vibração mecânica é definida como a oscilação mecânica de um corpo em relação a uma posição de referência. Como oscilação, pode ser descrita pelos parâmetros de amplitude e frequência. O primeiro parâmetro corresponde ao módulo da intensidade da oscilação em um determinado instante de tempo. Tratando-se de uma oscilação mecânica, a amplitude do sinal vibratório pode ser representada pelas grandezas mecânicas 'deslocamento' (medida em unidades de milímetros, mm), 'velocidade' (em mm/s) ou 'aceleração' (em mm/s² ou fração/múltiplo da aceleração da gravidade, g).

O segundo parâmetro corresponde ao número de ciclos do movimento que ocorrem no intervalo de tempo de um segundo, medido em unidades de Hertz (Hz) [10]. Na prática é utilizado o conceito de frequência fundamental, uma vez que a vibração mecânica geralmente consiste de uma composição de sinais oscilatórios de inúmeras frequências, que ocorrem simultaneamente. A ilustração de uma oscilação mecânica em uma corda de violão, retirada de [11], é apresentada na Fig. 2.1.

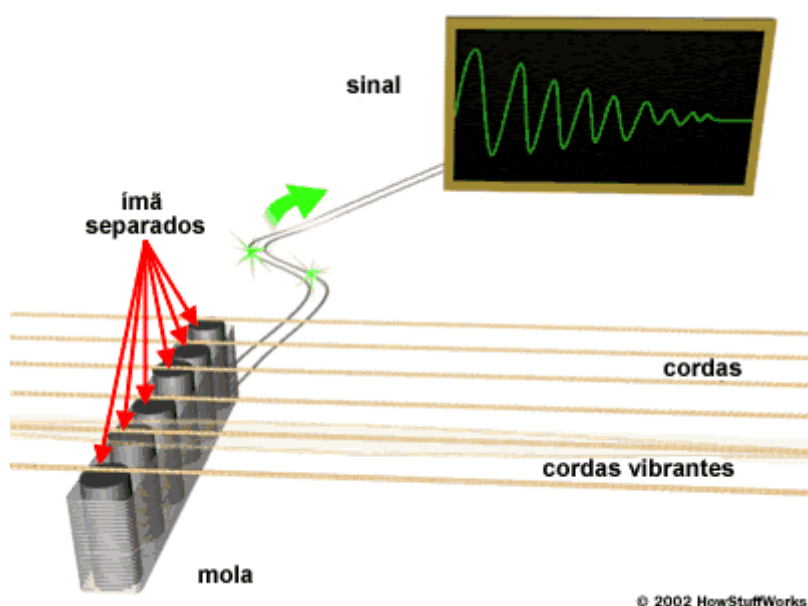


Figura 2.1: Oscilação mecânica em uma corda de violão.

A vibração também pode ser entendida como a conversão recursiva e repetitiva entre as energias

mecânicas cinética e potencial. Dessa forma as propriedades mais importantes do sistema mecânico estudado são sua inércia, elasticidade e amortecimento. Estas propriedades estão relacionadas à capacidade de armazenar energia cinética, à capacidade de armazenar energia potencial elástica e às perdas de energia decorrentes das resistências passivas, respectivamente.

A modelagem do sistema mecânico por meio destas propriedades é fundamental para o estudo posterior de seu comportamento vibratório, sendo a inércia, a elasticidade e o amortecimento representados por massas, molas e amortecedores, respectivamente. Uma ilustração de um esquema simplificado de modelagem mecânica com estes elementos, retirada de [12], é apresentado na Fig. 2.2.

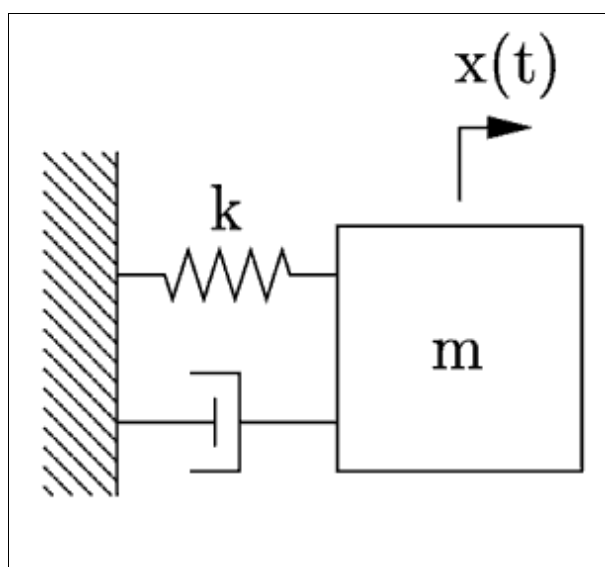


Figura 2.2: Esquema de modelagem mecânica.

O sistema pode ser decomposto em vários desses elementos, buscando alcançar um modelo que alie a maior fidelidade com a maior simplicidade possível. E para efeitos de representação, estes elementos não possuem propriedades em comum, ou seja, a massa não apresenta deformação ou dissipação de energia, a mola não apresenta massa ou dissipação de energia e o amortecedor não apresenta massa ou deformação [13].

Uma das principais características de fidelidade que a modelagem deve representar, ainda que aumente a complexidade do modelo final, é o número de graus de liberdade do sistema. O comportamento do movimento vibratório não depende apenas da atuação da excitação externa, mas também da constituição do sistema em questão, de sua susceptibilidade à excitação externa. O grau de liberdade pode ser definido como uma determinada possibilidade de movimento, como uma articulação. Desse modo, a soma de todos os graus de liberdade constitui um arranjo de possibilidades (probabilidades) de combinações de movimento. Quanto maior for o número de graus de liberdade, maior será o número de movimentos possíveis e maior será a repercussão do sinal vibratório que se propaga no sistema. Uma ilustração para exemplificar a modelagem de graus de liberdade, retirada de [13], é apresentada na Fig. 2.3.

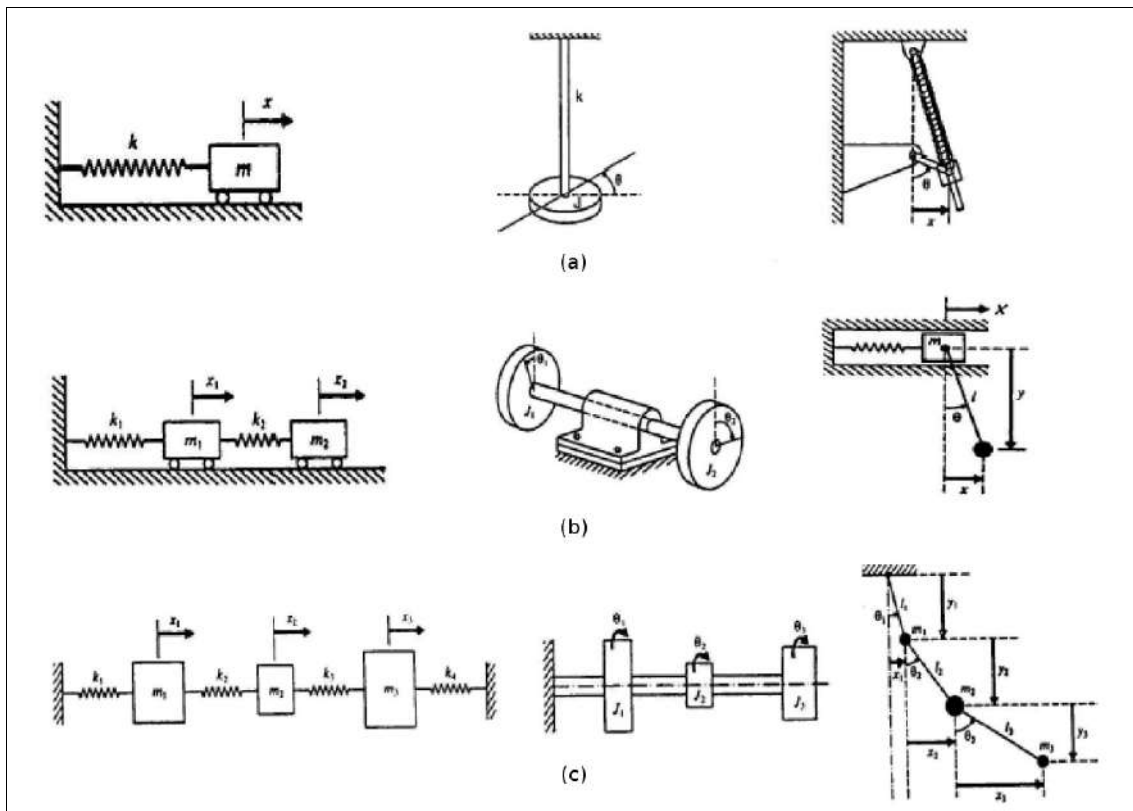


Figura 2.3: Modelagem de sistemas com 1(a), 2(b) e 3(c) graus de liberdade.

Outra ferramenta de análise do movimento vibratório é a sua classificação quanto à presença de excitação, quanto à linearidade, quanto à existência de amortecimento e quanto à previsibilidade. Quanto à presença de excitação, a vibração pode ser classificada como 'forçada' ou 'livre'. A primeira é dada quando a vibração é gerada/mantida pela aplicação de uma força ou torque externos. A segunda é dada quando, cessada a excitação externa, o corpo ainda apresenta condições de movimento.

A linearidade está relacionada à existência de proporcionalidade entre a excitação externa e a resposta vibratória. Assim, quanto à linearidade a vibração pode ser classificada como 'linear' ou 'não-linear'. A primeira é dada quando a soma das vibrações apresenta intensidade, frequência e orientação proporcionais à soma das excitações. A segunda é dada quando essa relação não ocorre.

A perda de energia durante o movimento vibratório configura o amortecimento. Assim, quanto à existência de amortecimento a vibração pode ser classificada como 'amortecida' ou 'não-amortecida'. A primeira é dada quando um movimento vibratório livre tende a se extinguir (o sistema tende ao equilíbrio estático) ou quando um movimento vibratório forçado tem sua energia reposta pela excitação externa (a energia perdida é compensada pela energia adquirida). A segunda é dada quando um movimento vibratório livre perdura indefinidamente ou quando um movimento vibratório forçado acumula energia indefinidamente.

A atuação da excitação externa determina a evolução do movimento vibratório, de forma que o conhecimento dessa atuação torna o movimento previsível. Assim, quanto à previsibilidade a vibração pode

ser classificada como 'determinística' ou 'aleatória'. A primeira é dada quando a atuação (magnitude e orientação) da excitação externa pode ser conhecida em qualquer instante de tempo. A segunda é dada quando essas características da atuação da excitação externa não podem ser conhecidas simultaneamente e em todos os instantes de tempo, ficando a análise limitada ao estudo estatístico da energia.

2.1.1. Manutenção de máquinas e sistemas eletromecânicos

A manutenção tem os objetivos de assegurar que as máquinas e os sistemas eletromecânicos apresentem bom funcionamento (produzam os resultados esperados) e de prolongar este bom funcionamento (estender a vida útil de peças e do conjunto em sua totalidade). O conhecimento necessário para realizar a manutenção sobre uma máquina é o mesmo conhecimento que foi necessário para construí-la. Isso porque cada modelo/projeto apresenta as suas peculiaridades, ainda que seja baseado em elementos comuns a todas as máquinas, ou a todas as categorias de máquinas (motores, geradores, compressores, bombas e outras). Assim, de posse do conhecimento de base sobre estes elementos comuns, é possível partir para o aprofundamento no estudo das características particulares e realizar para cada máquina e aplicação uma manutenção eficaz.

A grande maioria das máquinas que compõem as plantas industriais são elétricas rotativas, como os motores elétricos e geradores elétricos. Sob o aspecto construtivo, as máquinas elétricas rotativas são constituídas das seguintes partes fundamentais [14]:

- Estator, para sustentação do núcleo e dos enrolamentos do estator. É uma parte que não executa movimento (estática) e que geralmente é externa;
- Rotor, para agrupar os enrolamentos do rotor e realizar a transmissão da energia convertida. A conversão da energia elétrica para energia mecânica acontece por meio da interação magnética entre os dois enrolamentos, e a transmissão da energia mecânica por meio do eixo do rotor;
- Entreferro de ar, para ligação magnética entre o estator e o rotor.

Contando com os respectivos enrolamentos, o estator e o rotor também são formados por três partes cada um, que representam uma função elétrica no processo. São:

- Núcleo magnético, constituído de chapas de material de alta permeabilidade magnética, como o ferro. A alta permeabilidade magnética permite o alcance de uma maior intensidade de campo magnético com a mesma corrente nas bobinas. As chapas utilizadas são de espessura fina e coladas umas às outras, com material isolante entre elas. Essa construção busca diminuir as perdas de energia, sobretudo por corrente de Foucault, que seriam maiores em um núcleo maciço equivalente;
- Enrolamentos, que são bobinas espalhadas ao redor do núcleo magnético, para captação do fluxo

magnético que passa neles;

- Isolamento elétrico, presente entre as espiras de cada bobina, entre bobinas e entre o núcleo e sua respectiva bobina. O isolamento tende a se deteriorar com as variações térmicas, permitindo a fuga de corrente e formação de faíscas.

Uma ilustração de um modelo de máquina elétrica rotativa, adaptado de [15], é apresentada na Fig.2.4.

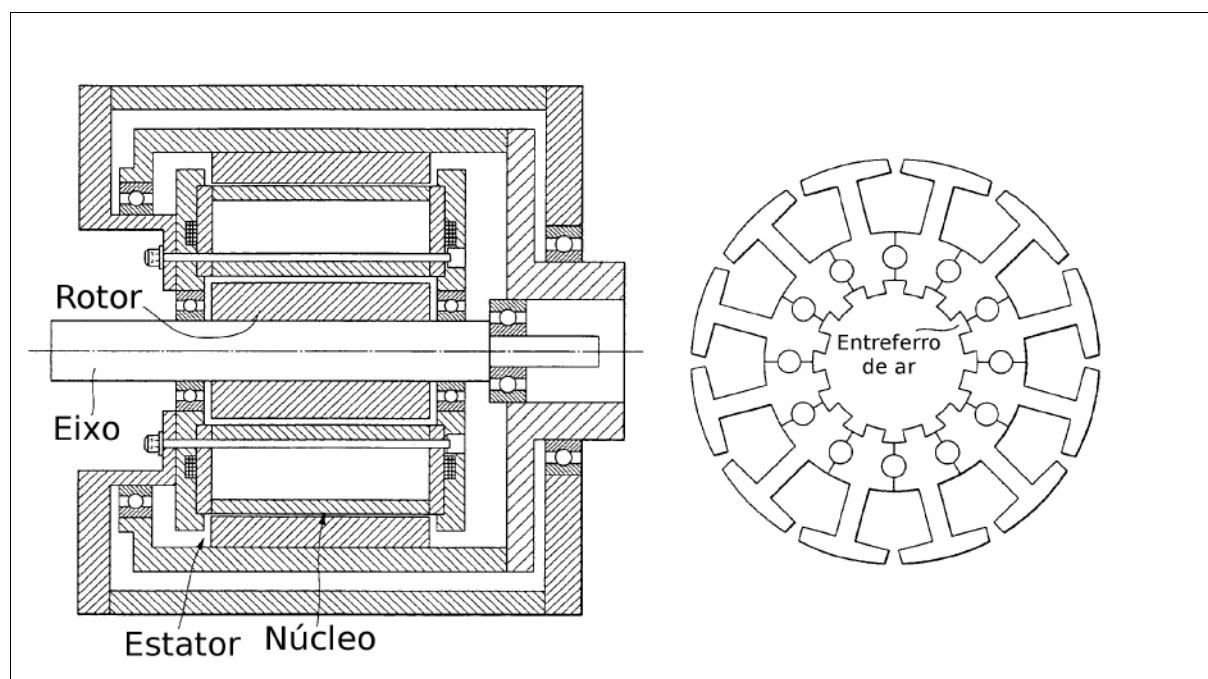


Figura 2.4: Modelo de máquina elétrica rotativa.

A premissa de funcionamento (a geração de torque mecânico) acontece por meio das relações de atração e repulsão entre os polos magnéticos, formados no estator e no rotor pela circulação dos fluxos magnéticos no interior dos enrolamentos. Cerca de 98% da energia elétrica é consumida no enrolamento do estator, também chamado de armadura, onde circula a corrente de carga (aquela que varia quanto o eixo recebe um torque externo, uma carga mecânica). O restante da energia é consumido no enrolamento do rotor, também chamado de enrolamento de campo, onde circula a corrente de magnetização (ou corrente de excitação, aquela que apenas cria o campo magnético e é independente do torque externo, sendo geralmente contínua). Para que a geração de torque seja contínua é necessário que os números de polos magnéticos gerados no rotor e no estator sejam os mesmos.

A ocorrência de defeitos no estator (como pontos de curto entre bobinas e desbalanceamento de forças magnéticas), no rotor (como trincamentos ou quebras de barras) e no entreferro de ar (variações no entreferro causadas por excentricidades do rotor) afetam diretamente a corrente de carga, introduzindo componentes de corrente harmônicos (alheios à corrente de frequência fundamental de 60Hz). Uma vez que

esta corrente está diretamente relacionada ao fluxo magnético no interior da máquina, suas alterações concorrerão na geração de vibrações torcionais do eixo, com as mesmas componentes de frequência do sinal elétrico. Assim, além do monitoramento da corrente de carga propriamente, o monitoramento da vibração na carcaça da máquina permite a constatação de defeitos nestes elementos [14].

É notável que o trabalho de monitoramento destes sinais são voltados ao acompanhamento da máquina durante sua operação. Se durante seu funcionamento for constatado algum defeito, deve-se avaliar a sua extensão e estabelecer as medidas necessárias para solucioná-lo, antes que venha a se agravar e a encarecer a sua correção. A este tipo de manutenção, baseada em sinais de funcionamento, é dado o nome de preditiva [16]. É consenso que a manutenção preditiva é o tipo de manutenção mais eficaz, em questão de custos de execução, economia de recursos (peças, tempo de produção), tempo de solução e outros parâmetros. Ainda assim, os demais tipos de manutenção ainda são utilizados, e o conhecimento sobre estes tipos auxiliam na compreensão da superioridade da manutenção preditiva.

Os tipos de manutenção, além da preditiva, são a corretiva e a preventiva. Também pode ser considerado um quarto tipo, a manutenção sensitiva, baseada no uso dos sentidos humanos (do próprio operador da máquina ou do técnico de manutenção) para a avaliação e coleta de informações importantes sobre o sistema. A manutenção sensitiva é de grande valia, auxiliando no diagnóstico de defeitos que podem ser notados pela acuidade dos sentidos humanos (visão, audição, olfato e tato). Porém, a manutenção sensitiva pode também constituir-se como um método dentro dos três primeiros tipos de manutenção, por não contradizer nenhum dos três princípios respectivos. Assim, não deverá ser contada como um quarto tipo, de forma a que ela poderá ainda ser utilizada em qualquer que seja o tipo de manutenção escolhido.

A manutenção corretiva, como sugerido pelo nome, está baseada na correção de falhas já consumadas. Seu princípio está na realização de consertos e substituições de peças defeituosas quando estas já levaram a máquina a parar de funcionar. Este tipo de manutenção gera um alto custo para a indústria, pois as falhas podem ocorrer a qualquer momento, em qualquer peça, de qualquer uma das máquinas, de qualquer uma das linhas de produção. Assim, a manutenção não pode ser prevista, podendo faltar alguns recursos para a sua pronta realização (técnicos disponíveis, peças sobressalentes e outros). A dada linha de produção poderá ficar parada por mais tempo que o necessário, comprometida até que uma unidade substituta seja posicionada ou a unidade estragada seja concertada. Assim, também os prejuízos financeiros advindos do atraso serão maiores. Apesar de ser uma modalidade de manutenção pouco indicada nos dias atuais, continua sendo muito utilizada.

A manutenção preventiva caracteriza-se pela intervenção periódica. A manutenção é realizada em intervalos de tempo regulares, quando a máquina é desligada para ter suas peças defeituosas substituídas e para passar por procedimentos como recalibragem, lubrificação, limpeza e outros. O intervalo de tempo entre uma intervenção e outra é definido por meio de estimativas da vida útil normal de cada peça e dos reajustes. Vários fabricantes já fornecem em folhas de dados os tempos de vida útil mínima e esperada para cada componente, o que pode ser complementado pela experiência de especialistas e pelo histórico de manutenções. Certamente que o desgaste das peças da máquina não é um processo absolutamente aleatório,

para que não se possa construir uma noção de período de manutenção. Mas também não é um processo absolutamente determinístico, o que incorre no problema de falhas imprevistas, o mesmo da manutenção corretiva. Para tentar superar esta deficiência, cria-se um outro problema, o de uma manutenção superdimensionada. Nesta situação, peças que teriam ainda uma vida útil estendida são substituídas sem necessidade, levando a um prejuízo para a indústria. Nota-se que esta prática acaba sendo apenas uma tentativa, e não uma garantia de que as falhas imprevistas serão eliminadas. E que todas estas dificuldades advêm da falta do controle real do estado dos componentes da máquina.

Já a manutenção preditiva baseia-se na aquisição de sinais do sistema que possam permitir a avaliação das suas condições de funcionamento. Podem ser captados os sinais de vibração, temperatura, ruído sonoro, ruído elétrico, análise de óleo e partículas, ultrassom e outros, para análise e planejamento de manutenção. É necessário que os equipamentos de coleta de dados sejam confiáveis e robustos, capazes de suportar os rigores do trabalho diário, em ambientes agressivos. A manutenção preditiva vem encontrando aceitação crescente na indústria, vista a economia resultante dessa prática de manutenção, que é maior tanto quanto maiores forem o valor unitário da máquina ou as perdas decorrentes de interrupções de produção, causadas por paradas para reparos.

Especificamente, a vantagem do monitoramento de sinais de vibração para diagnóstico de defeitos reside na riqueza de informações que este tipo de sinal carrega. Não apenas em detalhamento de cada defeito, mas também em número de defeitos que pode apontar, especialmente de máquinas rotativas, que constituem a grande maioria do parque de máquinas das indústrias. Na manutenção preditiva via monitoramento da vibração a condição de operação da máquina é avaliada contínua ou periodicamente. A época de revisão da máquina é determinada quando se prevê que padrões inaceitáveis de vibração serão atingidos.

Toda máquina apresenta um determinado padrão de vibração, devido à operação e às fontes externas. Entretanto, uma parcela destas vibrações é causada por pequenos defeitos mecânicos ou excitações secundárias perturbadoras, que diminuem a qualidade do desempenho da máquina. Qualquer acréscimo no nível de vibração de uma máquina é o primeiro sinal de agravamento de um defeito. São muitas as causas que provocam vibrações, sendo que as mais comuns são: desbalanceamento, desalinhamento angular, paralelo e eixo empenado. Por meio da análise do espectro de frequências comparado com o espectro da máquina em funcionamento normal, é possível identificar os problemas citados, realizando manutenções preditivas e estimando o momento apropriado para a troca das peças desgastadas.

Um exemplo comum para as máquinas elétricas rotativas é a dos rolamentos nos mancais. As vibrações causadas pelos rolamentos manifestam-se inicialmente na região de altas frequências e posteriormente, com a evolução dos defeitos, nas frequências fundamentais dos elementos internos. Uma dificuldade específica deste exemplo é o comportamento vibratório dos mancais, que se dá em faixas de frequência abaixo da frequência de rotação do rotor. Se a velocidade de rotação for baixa (de baixa frequência), o monitoramento das vibrações (e dos defeitos) dos rolamentos terá uma complexidade inerente à dificuldade da medição de baixas frequências. Uma ilustração de rolamentos, obtida em [17], é apresentada na Fig. 2.5. Uma ilustração de um espectro de frequências, obtida em [18], indicando problemas nos

rolamentos (com componentes abaixo de 2 Hz) é apresentada na Fig. 2.6.



Figura 2.5: Rolamentos.

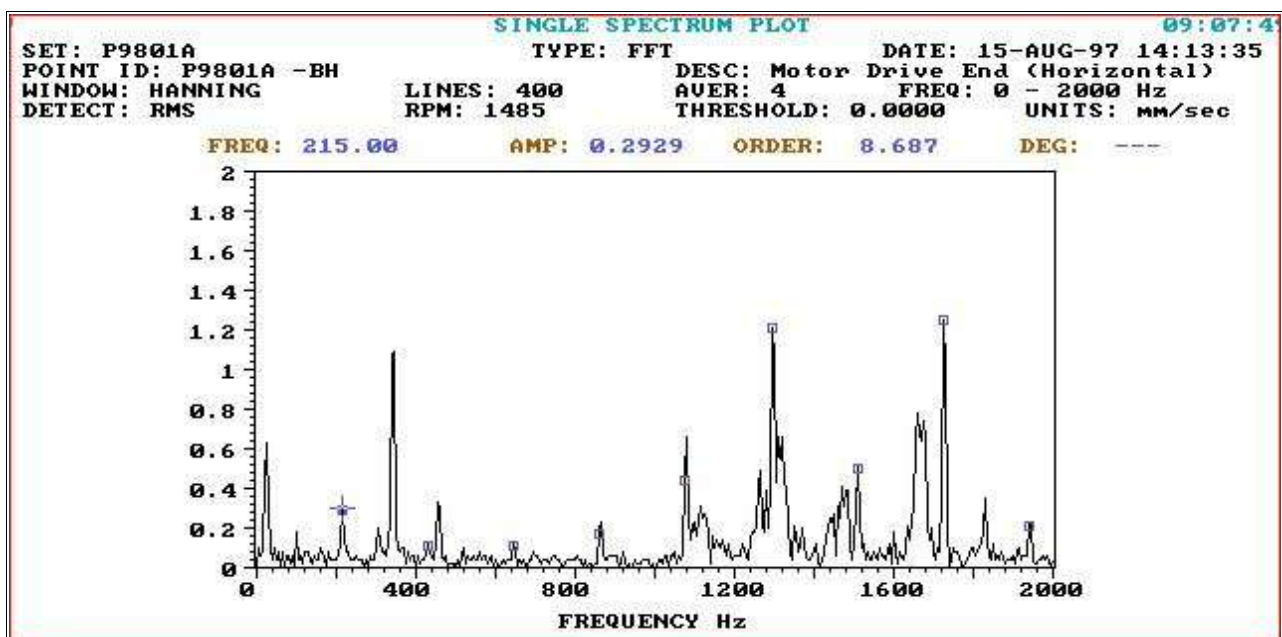


Figura 2.6: Espectro para problemas nos rolamentos (baixas frequências).

Para que a qualidade da medição não seja restringida por estas dificuldades, deve ser traçada uma estratégia (metodologia) para a realização dela. Dado que a vibração de uma máquina elétrica está intimamente relacionada com sua montagem, deve-se buscar efetuar as medições dos sinais sob condições reais de instalação e funcionamento [19]. Contudo, dependendo destas condições, acaba sendo necessário efetuar tais medições com a máquina desacoplada, sob condições de ensaio, determinadas de forma que permitam a reprodução (repetição dos ensaios) e a obtenção de métricas de comparação.

Sabendo também que uma fonte de vibração na máquina dá origem a uma perturbação que se

propaga por toda a sua estrutura, deve-se escolher o ponto (ou os pontos) de detecção, onde serão colocados os transdutores. Esta escolha visa otimizar o procedimento de coleta do sinal, com o compromisso de minimizar a atenuação (coletar o mais próximo da fonte) e evitar as interferências (tanto em matéria de sinais, como de outros agentes). Para o exemplo dos mancais, as medições da vibração devem ser efetuadas nas proximidades do eixo, em três direções perpendiculares, com a máquina funcionando na posição que ocupa sob condições normais (com eixo na orientação horizontal ou vertical).

2.1.2. Transdutores para o monitoramento de vibrações

As grandezas mecânicas que permitem a qualificação e a quantificação do sinal vibratório são o deslocamento, a velocidade e a aceleração. Entre os três possíveis sinais, que podem ser captados pela variação destas três grandezas, esperam-se similaridades na forma e no período (frequência), com diferenças apenas entre as fases [13]. Estas grandezas já representam todas as formas cabíveis de medição, mas a partir da conversão proporcional delas para outros tipos de grandezas, sobretudo as elétricas, surgem novas possibilidades para a manipulação dos dados de leitura. As grandezas elétricas para conversão geralmente são corrente elétrica, diferença de potencial elétrico (tensão) e fluxo magnético.

Ao elemento capaz de realizar essa conversão da grandeza mecânica para uma grandeza elétrica é dado o nome de transdutor. Existem tipos específicos de transdutores para cada grandeza mecânica de entrada e também para cada grandeza elétrica de saída, de tal forma que as combinações entre os tipos de entrada e os tipos de saída dão o número possível de categorias de transdutores diferentes. Dentro de cada uma dessas categorias existem também sub-categorias, definidas pelos diferentes princípios de funcionamento.

O transdutor deve estar em contato com o sistema vibratório para medir/converter a variação da grandeza mecânica. Quando em sua saída são adicionados circuitos elétricos apropriados, torna-se possível um primeiro processamento analógico do sinal elétrico resultante, como amplificação, filtragem, adição ou subtração entre sinais de fontes distintas, avanço/atraso em fase, deslocamento de nível (inserção ou eliminação de off-set) e outros. Ao conjunto de operações analógicas realizadas é dado o nome de condicionamento de sinal. Uma segunda etapa de processamento digital também pode ser adicionada posteriormente, para conversão do sinal analógico em uma representação digital (sinal digital). Esta representação é qualificada segundo sua taxa de amostragem e o número de níveis de quantificação utilizados para dividir a faixa de amplitude contínua. A partir da digitalização o sinal pode ser armazenado e manipulado (processado) em um computador. Ao conjunto formado por transdutor e circuitos de processamento e transmissão é dado o nome de sensor [20].

A seleção do transdutor mais adequado deve ser orientada pela aplicação que se deseja atingir. Alguns aspectos e características da aplicação visada devem ser levados em consideração para dirigir a escolha da grandeza mecânica que deverá ser medida, da grandeza elétrica que deverá ser obtida e outras

especificações. Para a escolha da grandeza mecânica, devem ser levadas em conta as faixas de frequência e amplitude das vibrações que se pretende monitorar. Isso porque cada grandeza é mais apropriada para determinadas faixas de frequência e amplitude. Em baixas frequências, a amplitude de deslocamento normalmente é alta, o que faz com que os transdutores de deslocamento sejam mais adequados para medir os sinais vibratórios. Em altas frequências, as amplitudes de deslocamento são baixas e as amplitudes de aceleração são altas, fazendo com que os transdutores de aceleração apresentem maior sensibilidade. Os transdutores de velocidade são de aplicação geral, pois apresentam desempenho razoável tanto em baixas como em altas frequências.

Para a escolha da grandeza elétrica, devem ser levados em conta os tipos de interferência aos quais o sistema monitorado estará submetido. Quando há interferência de campos magnéticos externos, a escolha do fluxo magnético como grandeza elétrica torna-se a menos adequada. Quando existe a possibilidade de que grandes variações de temperatura atinjam o transdutor, a escolha da corrente elétrica (e indiretamente da resistividade elétrica) como grandeza elétrica torna-se a menos adequada. Quando há carregamento elétrico estático nas proximidades da saída do transdutor (gerado por atrito, fuga de corrente ou desencapamento de fios, violando o terminal de aterramento), a escolha da diferença de potencial elétrico torna-se a menos adequada. Também as interferências mecânicas, como choques e pressionamentos, devem ser levados em consideração, para a escolha de transdutores suficientemente robustos.

Outro aspecto relevante na escolha do transdutor é o seu tamanho frente ao tamanho do sistema monitorado. O tamanho do transdutor influencia em suas características de medição (em sua construção) e em suas demais características físicas (peso, inércia e outras). Estas características físicas introduzem erros na medição da vibração, dado que o transdutor precisa ser vibrado com o sistema. Caso este erro seja superior a um nível tolerável, mesmo que as características de medição atendam aos requisitos, o uso deste modelo de transdutor torna-se inviável.

Alguns dos principais tipos de transdutores são o de resistência variável, eletrodinâmico, transformador diferencial linear variável (do termo em língua inglesa *linear variable differential transformer*, LVDT) e piezelétrico. A partir de seus princípios de funcionamento particulares, cada tipo de transdutor apresenta variações das características delineadas anteriormente. O primeiro deles, o transdutor de resistência variável, tem seu princípio de funcionamento baseado na leitura de sua variação de resistividade, proporcional ao movimento do sistema ao qual está ligado. Este resistor pode ser um bloco de material semiconductor ou um extensômetro. A variação da resistividade ocorre a partir da deformação dessas estruturas, que podem ser aplicadas sobre uma construção elástica entre o sistema e uma base de referência (fixa). Assim, a deformação da construção elástica (e do transdutor) será proporcional ao deslocamento do sistema em vibração, fazendo deste um transdutor de deslocamento. A leitura da variação de resistividade se dá indiretamente, por meio da leitura de tensão ou corrente em uma ponte de resistores, à qual o transdutor também deve estar associado.

O segundo tipo, o transdutor eletrodinâmico, tem seu princípio de funcionamento baseado na leitura da variação de tensão produzida pelo movimento relativo de um solenoide em um campo magnético. Esta

variação de tensão é proporcional à velocidade deste movimento relativo, fazendo do transdutor eletrodinâmico um transdutor de velocidade. O solenoide pode ser mantido fixo, enquanto o campo magnético varia pelo movimento de seu gerador (um ímã ou um eletromagneto). Também o inverso pode ser construído, dependendo apenas de qual das estruturas está ligada ao sistema em vibração, e qual está ligada à base de referência.

O terceiro tipo, o LVDT, tem seu princípio de funcionamento baseado na leitura do módulo e da polaridade da tensão entre os terminais das bobinas secundárias do transformador. O transformador é composto de um núcleo magnético móvel, com três bobinas fixas que cercam o núcleo. A bobina primária fica localizada na parte central do núcleo, com um sinal alternado de referência aplicado entre seus terminais. As bobinas secundárias ficam nas extremidades do núcleo cada uma, posicionadas em oposição de fase. Dessa forma, quando o núcleo estiver simetricamente posicionado em relação às bobinas secundárias (em posição de equilíbrio) a diferença de tensão entre seus terminais será nula. Quando o núcleo se movimentar, o acoplamento magnético de uma bobina secundária com a bobina primária será melhorado, em detrimento do acoplamento magnético entre a bobina primária e a outra bobina secundária. Assim, a diferença de tensão entre os terminais das bobinas secundárias será proporcional ao deslocamento do núcleo (à assimetria) e com polaridade em acordo com a direção do deslocamento. Dessa forma, o LVDT é um transdutor de deslocamento.

O quarto tipo, o transdutor piezelétrico, tem seu princípio de funcionamento baseado na propriedade piezelétrica de alguns materiais, como o quartzo, turmalina e outros materiais naturais ou sintéticos. A propriedade piezelétrica é a da geração de cargas elétricas (diferença de potencial elétrico) entre os terminais do material quando este sofre compressão mecânica ou deformação. Assim, a tensão de saída será proporcional à força aplicada sobre o material. Se essa força é gerada pela interação do material com uma massa externa, será também proporcional à aceleração dessa massa. Dessa forma, o transdutor piezelétrico é um transdutor de aceleração.

Além das diferentes grandezas mecânicas e elétricas que envolvem, os diferentes princípios de funcionamento de cada um desses tipos de transdutores também agregam vantagens e deficiências específicas. A começar pelo transdutor de resistência variável, nota-se que suas vantagens estão na simplicidade e baixo custo de fabricação, mas suas desvantagens estão na precisão do casamento de resistores (da ponte) e na necessidade de alimentação externa (com sua sensibilidade proporcional ao valor da tensão de alimentação). Para o transdutor eletrodinâmico as vantagens são sua faixa de aplicação estendida em frequência e a independência de fonte de alimentação (se for utilizado um ímã), com a desvantagem da menor robustez (visto que variações e deformações no solenoide levariam a leituras erradas). Para o LVDT as vantagens são a insensibilidade à variação de temperatura e o alto valor da tensão de saída, com as desvantagens da restrição ao seu uso em aplicações de altas frequências (dada a elevada massa do núcleo magnético) e a necessidade do gerador de sinal alternado para a bobina primária. Para o transdutor piezelétrico as vantagens são o tamanho compacto, alta robustez, alta sensibilidade e independência de fonte de alimentação, com a desvantagem da limitação para baixas frequências.

Existem diversos outros tipos de transdutor que podem ser utilizados como transdutores de vibração, nas categorias transdutor de deslocamento, transdutor de velocidade e transdutor de aceleração. Para o projeto foi utilizado um sensor de aceleração, que também pode ser chamado de acelerômetro. Por essa escolha de projeto, os tipos de acelerômetros serão tratados em mais detalhes no capítulo seguinte.

2.2. Sensor acelerômetro

Como sugerido pelo nome, sensor acelerômetro é um elemento sensível capaz de apresentar a variação de uma grandeza elétrica e/ou mecânica como resposta à sua aceleração. A aceleração é uma grandeza vetorial, com módulo e direção, que pode ser compreendida como a variação da grandeza vetorial velocidade. A unidade de quantificação no Sistema Internacional é o metro por segundo por segundo (m/s^2), mas quando relacionado ao sensoriamento, a unidade mais utilizada é a aceleração da gravidade (g), que corresponde a $9,807 \text{ m/s}^2$ aproximadamente. O uso de múltiplos ou frações da aceleração da gravidade simplifica a compreensão da faixa de operação do sensor, uma vez que cada aplicação está envolvida a uma faixa [21].

O uso do acelerômetro é útil para o estudo de situações com padrões de aceleração específicos, como em impactos (choques), queda-livre, inclinação, vibração e aceleração/desaceleração. Existem vários exemplos de aplicações que correspondem a cada uma dessas situações. Para situações de choque, tem-se o uso no acionamento de *air-bags* e pedometria (contagem de passos). Para queda-livre, tem-se a proteção de discos rígidos e a proteção de equipamentos eletrônicos portáteis em geral. Para inclinação, tem-se o uso em controladores de jogos eletrônicos e em outros equipamentos, como entrada de comandos do usuário. Para vibração, tem-se o monitoramento de atividades sísmicas e monitoramento de máquinas, para manutenção preventiva. Finalmente, para aceleração/desaceleração, tem-se a detecção de gestos e gravador de eventos, como em manipulação de mercadorias e em sistemas automotivos. Cada um desses exemplos é também referenciado por uma faixa de aceleração na qual opera, desde $1g$ a $2g$ para aplicações de detecção de queda-livre e inclinação, até $100g$ e $250g$ para acionamento de *air-bag* e detecção de choque, respectivamente [22].

A faixa de aceleração pode também ser chamada de excursão dinâmica, que corresponde à máxima amplitude em módulo de aceleração que o sensor pode medir sem introduzir distorções ou ceifamento do sinal. A escolha do modelo de sensor depende desta e de outras especificações, como resposta em frequência, sensibilidade, número de eixos e atributos mecânicos (dimensões, massa, encapsulamento, robustez a choques e outras condições de operação). A resposta em frequência determina a máxima frequência do sinal de aceleração que o sensor é capaz de reproduzir sem inferir em erro por *aliasing*. A sensibilidade é a amplitude de variação da grandeza elétrica/mecânica ocorrida com a variação de uma unidade de aceleração, tal que o sensor seja mais preciso quanto maior for sua sensibilidade. O número de eixos pode ser de 1, 2 ou 3, correspondendo à capacidade de sensorar na reta, no plano ou no espaço. Os atributos mecânicos do próprio sensor introduzem erros na medição, uma vez que o corpo do sensor também é dotado de massa,

inércia, elasticidade e dimensões, que precisam ser desprezíveis em relação ao sistema estudado, para minimizar estes erros. Pela necessidade da acoplagem ao sistema estudado, deve-se conhecer as condições de operação durante a leitura do sinal, como temperatura, pressão, presença de substâncias e gases, ocorrência de intervenções mecânicas e outros eventos que podem impedir o correto funcionamento do sensor.

Para satisfazer estes requisitos de cada aplicação existem várias opções de tipos de acelerômetros, de princípios de construção diferentes, com respostas representadas pela variação de grandezas diferentes. Os principais tipos são o acelerômetro capacitivo, piezoelétrico, piezorresistivo e térmico. O capacitivo tem como princípio de construção o uso de barras fixadas em uma extremidade, permitindo a deflexão e consequente variação da capacitância entre elas. O piezoelétrico baseia-se no uso de cristais com a propriedade piezoelétrica, de gerar uma diferença de potencial elétrico entre seus terminais na ocorrência de deformação, ocasionada neste caso pela aceleração. Uma ilustração representando a estrutura do acelerômetro piezoelétrico, retiradas de [23], é apresentada na Fig. 2.7. Uma ilustração representando a estrutura do acelerômetro capacitivo pode ser encontrada no Apêndice A, que trata do componente utilizado no projeto.

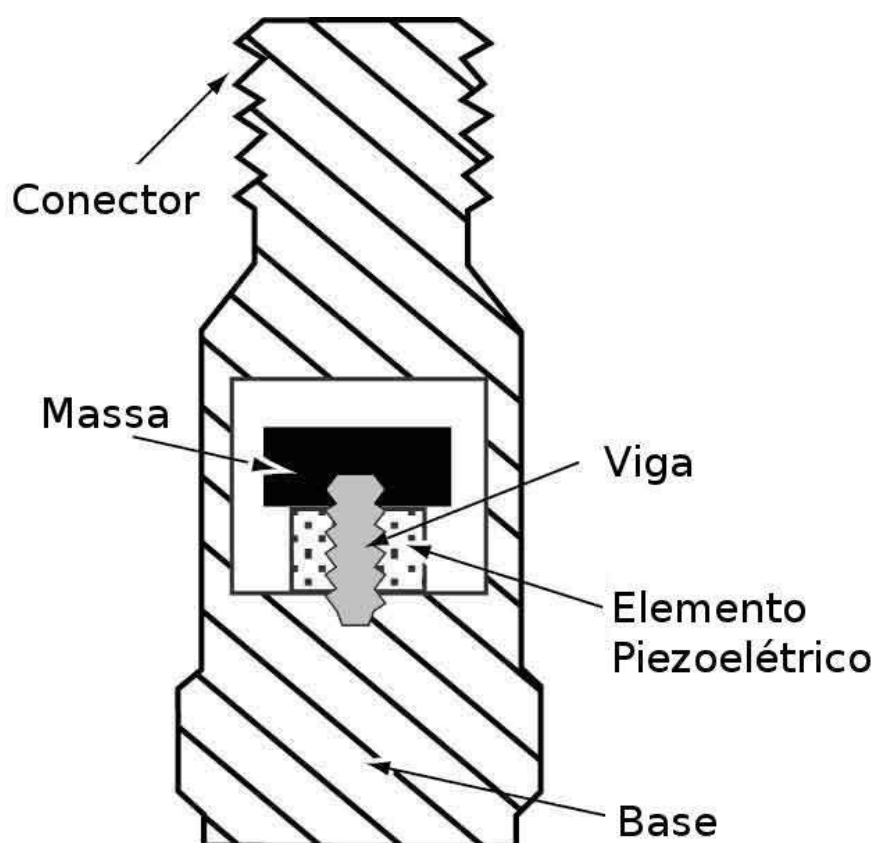


Figura 2.7: Modelo de acelerômetro piezoelétrico.

O piezorresistivo, semelhante ao piezoelétrico, introduz uma alteração de resistividade entre seus terminais quando sofre deformação no eixo respectivo. O térmico aproveita-se da alteração na simetria da condução por convecção quando a fonte de calor é acelerada, levando a diferenças entre os termorresistores

posicionados simetricamente ao redor da fonte. Cada um desses tipos de acelerômetros apresenta vantagens e desvantagens para cada aplicação, com respeito aos parâmetros mencionados. Para um mesmo tipo é possível também a construção de vários modelos, que se aproveitam de avanços técnicos e na tecnologia de fabricação.

A tecnologia mais avançada para a manufatura de sensores acelerômetros é chamada 'Sistemas micro-eleto-mecânicos', da sigla em língua inglesa MEMS. Como sugerido pelo nome, esta tecnologia compreende técnicas para a confecção de estruturas em escala micrométrica, tendo como base os mesmos procedimentos utilizados na fabricação de circuitos eletrônicos. Assim também é possível integrá-los em projetos de circuitos. E utilizando também os avanços em projetos de circuitos integrados de aplicação específica, da sigla ASIC, é possível integrar em um mesmo encapsulamento a estrutura MEMS do sensor com circuitos auxiliares para condicionamento de sinais, filtragem de frequências, compensações de erros, conversão A/D e outras tarefas. O resultado é um sensor de mais alta confiabilidade e com maior facilidade de uso em projetos diversos. Uma ilustração com uma estrutura construída com esta tecnologia de manufatura, retirada de [24], é apresentada na Fig. 2.8.

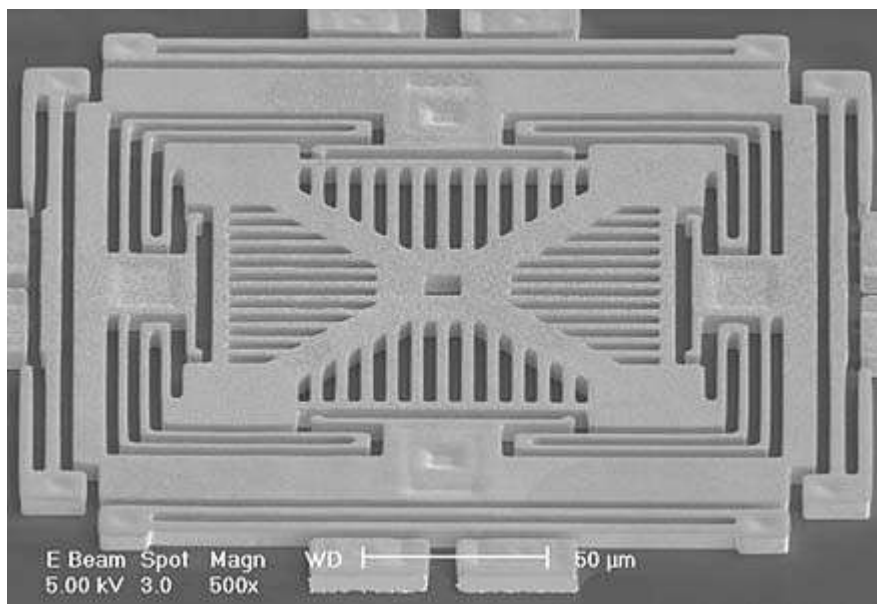


Figura 2.8: Estrutura construída com a tecnologia MEMS.

2.3. Análise de Fourier

A análise de Fourier baseia-se na teoria de que qualquer sinal periódico é composto pela soma de seus infinitos harmônicos, formando uma série trigonométrica [25]. Assim, um sinal $x(t)$ de período T pode ser expresso pela notação

$$x(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) .$$

As constantes a_0 , a_k e b_k são os coeficientes de Fourier, dados por

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt ,$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) dt , \quad k \geq 1 \quad \text{e}$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(\frac{2\pi k t}{T}\right) dt , \quad k \geq 1 .$$

O k -ésimo coeficiente corresponde à frequência $\omega_k = \frac{2\pi k}{T}$. A distância entre harmônicos é de

$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T}$. Assim, conforme o valor de T aumenta, mais próximos tornam-se as componentes. Com

$T \rightarrow \infty$, a série de Fourier dá lugar à integral de Fourier. As componentes da transformada de Fourier de $x(t)$ são dados por

$$A(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(\omega t) dt \quad \text{e}$$

$$B(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin(\omega t) dt .$$

A integral de Fourier, também chamada transformada inversa de Fourier, é dada por

$$x(t) = 2 \int_0^{\infty} A(\omega) \cos(\omega t) d\omega + 2 \int_0^{\infty} B(\omega) \sin(\omega t) d\omega \quad .$$

No estudo de vibrações randômicas utiliza-se a notação complexa

$$e^{i\theta} = \cos(\theta) + i \sin(\theta) \quad ,$$

a partir da qual define-se $X(\omega)$, a transformada de Fourier de $x(t)$, e sua inversa como

$$\begin{aligned} X(\omega) &= A(\omega) - i B(\omega) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad e \end{aligned}$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad .$$

Comumente, o estudo de vibrações randômicas também utiliza a discretização, processo por meio do qual o sinal analógico contínuo é representado por amostras de amplitude tomadas em intervalos de tempo regulares, sendo cada amostra digitalizada para o valor inteiro binário mais próximo, segundo o número de bits utilizado. Assim, dado um sinal discretizado em N amostras $\{x_r\}$, $r = 0, 1, 2, \dots, (N-1)$, obtêm-se a transformada discreta de Fourier e sua inversa por

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r e^{-i(2\pi k r/N)} \quad , \quad k=0, 1, 2, \dots, (N-1)$$

$$x_r = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{i(2\pi k r/N)} \quad , \quad r=0, 1, 2, \dots, (N-1)$$

Pela equação da transformada é possível notar que X_k é periódico, tal que para valores de k maiores que $(N-1)$ e para valores negativos obtêm-se $X_{N+k} = X_k$ e $X_{-k} = X_k^*$, respectivamente. Também deve ser levado em consideração que os coeficientes de Fourier corretos correspondem a metade dos índices, ou seja, para $k = 0, 1, 2, \dots, N/2$. Acima desses índices passam a ser representadas componentes de frequência

superior à metade da frequência de amostragem, introduzindo erro por *aliasing*. Para obter uma representação completa, deve-se garantir que o intervalo de amostragem Δ seja tal que a frequência de amostragem $1/\Delta$ seja maior que duas vezes a máxima frequência do sinal amostrado, a frequência de Nyquist.

Também pode-se observar pela equação da transformada discreta a necessidade de N^2 multiplicações para o cálculo direto de todos os seus coeficientes. Para reduzir o número de multiplicações necessárias para $N \cdot \log_2(N)$ e tornar o cálculo mais eficiente, foi criado um algoritmo computacional chamado de Transformada Rápida de Fourier, da sigla em língua inglesa FFT. Sua lógica está baseada na divisão do sinal discretizado de N amostras em duas sequências de $N/2$ amostras cada. É possível calcular a transformada da sequência original a partir das transformadas das duas sequências novas.

Para demonstrar pela apresentação de equações, sejam definidas as sequências $\{y_r\}$ e $\{z_r\}$, a partir da sequência de N amostras $\{x_r\}$, tais que

$$y_r = x_{2 \cdot r} \quad , \quad r = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$$

$$z_r = x_{2 \cdot r + 1} \quad , \quad r = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$$

A sequência $\{y_r\}$ corresponde aos elementos de índice par da sequência $\{x_r\}$, enquanto a sequência $\{z_r\}$ corresponde aos elementos de índice ímpar da mesma. As respectivas transformadas discretas são

$$Y_k = \frac{1}{(N/2)} \sum_{r=0}^{N/2-1} y_r e^{-i \cdot \frac{2\pi k r}{(N/2)}} \quad , \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$$

$$Z_k = \frac{1}{(N/2)} \sum_{r=0}^{N/2-1} z_r e^{-i \cdot \frac{2\pi k r}{(N/2)}} \quad , \quad k = 0, 1, 2, \dots, (N/2 - 1)$$

Expandindo a transformada discreta da sequência original $\{x_r\}$ é possível notar que

$$\begin{aligned} X_k &= \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} x_r \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi k r}{N}} \\ &= \frac{1}{N} \left[\sum_{r=0}^{N/2-1} x_{2 \cdot r} \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi k (2 \cdot r)}{N}} + \sum_{r=0}^{N/2-1} x_{2 \cdot r + 1} \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi k (2 \cdot r + 1)}{N}} \right] \\ &= \frac{1}{N} \left[\sum_{r=0}^{N/2-1} y_r \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi k r}{(N/2)}} + e^{-i \cdot \frac{2\pi k}{N}} \cdot \sum_{r=0}^{N/2-1} z_r \cdot e^{-i \cdot \frac{2\pi k r}{(N/2)}} \right] \end{aligned}$$

Substituindo pelas expressões das transformadas de $\{y_r\}$ e $\{z_r\}$, tem-se

$$X_k = \frac{1}{2} [Y_k + e^{-i(2\pi k/N)} Z_k] , \quad k=0,1,2,\dots,(N/2-1)$$

A partir da propriedade de periodicidade, na qual $Y_{N/2+k} = Y_k$ e $Z_{N/2+k} = Z_k$, pode-se obter a transformada discreta de $\{x_r\}$ para os demais valores de k , pela equação

$$X_{N/2+k} = \frac{1}{2} [Y_k - e^{-i(2\pi k/N)} Z_k] , \quad k=0,1,2,\dots,(N/2-1)$$

Se o número de amostras N for uma potência de 2 ($N = 2^R$, R um número inteiro positivo), a sequência original pode ser dividida em N sequências de um único elemento, cujas transformadas são os próprios elementos. Os cálculos são realizados entre pares de elementos, como apresentado nas equações anteriores, resultando em um novo par que é uma combinação do anterior. Para simplificar a expressão, usa-se a substituição $W^k = (e^{i(2\pi/N)})^k$.

Para a execução do algoritmo em uma plataforma computacional, é necessário levar em consideração algumas questões de ordem prática. Uma delas é a ordenação dos elementos da sequência original. Os pares de elementos para os cálculos são formados fora da ordem original, fazendo-se necessária a ordenação antes que as combinações sejam propriamente iniciadas. Se o valor de N fosse igual a 16, com elementos de índice $[0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15]$, a ordem dos índices dos elementos para o início dos cálculos deveria ser $[0, 8, 4, 12, 2, 10, 6, 14, 1, 9, 5, 13, 3, 11, 7, 15]$. Essa lógica de reordenação corresponde à leitura binária reversa dos índices, a partir da representação binária de cada um, de tal forma que os bits mais significativos sejam considerados os menos significativos, e vice-versa. A inversão para o exemplo de $N = 16$ é apresentado em Tab. 2.1.

Tabela 2.1: Leitura binária reversa.

Sequência original	Representação binária	Representação reversa	Sequência reversa
0	'0000'	'0000'	0
1	'0001'	'1000'	8
2	'0010'	'0100'	4
3	'0011'	'1100'	12
4	'0100'	'0010'	2
5	'0101'	'1010'	10
6	'0110'	'0110'	6
7	'0111'	'1110'	14
8	'1000'	'0001'	1
9	'1001'	'1001'	9
10	'1010'	'0101'	5
11	'1011'	'1101'	13
12	'1100'	'0011'	3
13	'1101'	'1011'	11
14	'1110'	'0111'	7
15	'1111'	'1111'	15

Outra questão é o cálculo dos valores de W^k . Partindo das N sequências de um único elemento cada, o valor de k também é único e igual a zero, de forma que $W^k=1$. Porém, com o prosseguimento dos cálculos das combinações, torna-se necessário o cálculo de W^k para vários valores de k , o que corresponde a um grande trabalho computacional. Para evitar a repetição em cada etapa, uma alternativa é armazenar W^k para $k = 0, 1, \dots, (N/2 - 1)$. Porém, uma vez que esses valores não serão usados isoladamente, mas na multiplicação com o segundo elemento de cada par, deve-se buscar também a simplificação destas operações [26]. Considerando que este segundo elemento seja um número complexo, da forma $H = A + i \cdot B$ (A e B

números reais), e simplificando a notação de W^k para $W^k = C(k) + i \cdot S(k)$, onde $C(k) = \cos(\frac{2\pi k}{N})$

e $S(k) = \sin(\frac{2\pi k}{N})$, tem-se que

$$W^k \cdot H = [C(k) \cdot A - S(k) \cdot B] + i \cdot [C(k) \cdot B + S(k) \cdot A],$$

equivalendo a quatro multiplicações reais e duas somas reais para obter o resultado complexo. Para reduzir o número de multiplicações para três, ao custo de mais uma soma, deve-se realizar as manipulações

trigonométricas

$$C(k) = 1 - S(k) \cdot T(k) \quad \text{e}$$

$$S(k) = [1 + C(k)] \cdot T(k) \quad ,$$

onde $T(k) = \tan\left(\frac{\pi k}{N}\right)$. Definindo-se a variável auxiliar $V = B + T(k) \cdot A$, o cálculo dos termos de $W^k \cdot H$ pode ser simplificado em

$$\Re(W^k \cdot H) = A - S(k) \cdot V$$

$$\Im(W^k \cdot H) = V + \Re(W^k \cdot H) \cdot T(k)$$

Com a eliminação do uso de $C(k)$, faz-se necessário armazenar apenas os valores de $S(k)$ e $T(k)$.

Porém, com a identidade trigonométrica $S\left(\frac{1}{2} \cdot N - k\right) = S(k)$ é suficiente armazenar os valores de $S(k)$ correspondentes para $k = 1, \dots, N/4$, sendo os demais obtidos diretamente. Os valores de $T(k)$ podem ser obtidos pela combinação das equações

$$T(k) = \frac{1 - C(k)}{S(k)} \quad \text{e}$$

$$C(k) = S\left(\frac{1}{4} \cdot N - k\right) \quad , \quad k = 1, 2, \dots, \frac{1}{4} \cdot N \quad ,$$

resultando em

$$T(k) = \frac{1 - S\left(\frac{1}{4} \cdot N - k\right)}{S(k)} \quad , \quad k = 1, 2, \dots, \frac{1}{4} \cdot N \quad .$$

Para $k = 0$ tem-se $T(k) = S(k) = 0$. Os demais valores de $T(k)$, para $k = N/4 + 1, \dots, N/2 - 1$, podem ser obtidos pela equação

$$T\left(\frac{1}{2} \cdot N - k\right) = \frac{1 + S\left(\frac{1}{4} \cdot N - k\right)}{S(k)} \quad , \quad k = 1, 2, \dots, \frac{1}{4} \cdot N - 1$$

O cálculo direto de $S(k)$ é realizado para valores definidos de k , tornando possível a utilização da relação trigonométrica

$$\text{sen}(\theta) = \frac{\text{sen}(\theta + \phi) + \text{sen}(\theta - \phi)}{2 \cdot \cos(\phi)}$$

para aproveitar os senos já calculados. Partindo de $S(0) = 0$ e $S(N/4) = 1$ é possível calcular $S(N/8)$. Para o próximo deve-se dividir θ e ϕ pela metade, tal que, dado $z_n = 2 \cdot \cos(\phi_n)$, para $\phi_{n+1} = \frac{1}{2} \phi_n$ o próximo termo será $z_{n+1} = (2 + z_n)^{1/2}$. Assim, para o exemplo em que $N = 16$, é necessário o cálculo de $(N/4 + 1) = 5$ valores de senos, que são

$$S(0) = 0, \quad S\left(\frac{1}{4}N\right) = 1$$

$$S\left(\frac{1}{8}N\right) = \frac{S\left(\frac{1}{4}N\right) + S(0)}{z_1}$$

$$S\left(\frac{1}{16}N\right) = \frac{S\left(\frac{1}{8}N\right) + S(0)}{z_2} \quad \text{e} \quad S\left(\frac{3}{16}N\right) = \frac{S\left(\frac{1}{4}N\right) + S\left(\frac{1}{8}N\right)}{z_2}.$$

Esta alternativa para o cálculo dos senos é chamada Método de Buneman, por meio de $(R - 2) = 2$ etapas.

A última simplificação está no cálculo de uma FFT real tendo como base uma FFT para uma sequência de números complexos. Dada a sequência de N números complexos $\{h_j\}$, com $h_j = a_j + i \cdot b_j$, tem-se que sua transformada discreta é

$$H_k = \sum_{j=0}^{N-1} (a_j + i \cdot b_j) \cdot W^{j \cdot k} = A_k + i \cdot B_k, \quad k = 0, 1, \dots, N-1$$

sendo A_k e B_k as respectivas transformadas de $\{a_j\}$ e $\{b_j\}$. Como a_j e b_j são números reais, então

$$A_{N-k}^* = A_k \longleftrightarrow A_{N-k} = A_k^* ,$$

$$B_{N-k}^* = B_k \longleftrightarrow B_{N-k} = B_k^* \text{ e}$$

$$H_{N-k}^* = A_k - i \cdot B_k$$

Assim

$$A_k = \frac{1}{2} [H_k + H_{N-k}^*] \text{ e } B_k = \frac{i}{2} [H_{N-k}^* - H_k]$$

A partir dessa propriedade, dada uma sequência de N números reais $\{f_j\}$, é possível formar uma sequência de $N/2$ números complexos $\{h_j\}$ tal que $h_j = f_{2 \cdot j} + i \cdot f_{2 \cdot j + 1}$. Assim, a transformada discreta da sequência real completa é

$$\begin{aligned} F_k &= \sum_{j=0}^{\frac{1}{2}N-1} f_{2 \cdot j} (W^2)^{j \cdot k} + \sum_{j=0}^{\frac{1}{2}N-1} f_{2 \cdot j + 1} (W^2)^{j \cdot k} W^k , \quad k = 0, 1, \dots, N/2 - 1 \\ &= \frac{1}{2} [H_k + H_{\frac{1}{2}N-k}^*] + \frac{i}{2} [H_{\frac{1}{2}N-k}^* - H_k] W^k \end{aligned}$$

O restante da sequência, para $k = N/2 + 1, \dots, N - 1$ é dado pela relação

$$F_{N-k} = F_k^* .$$

Dada a periodicidade da transformada, o termo restante pode ser calculado por

$$F_{\frac{1}{2}N} = \frac{1}{2} [H_0 + H_{\frac{1}{2}N}^*] - \frac{i}{2} [H_{\frac{1}{2}N}^* - H_0] .$$

3. Materiais e equipamentos

Para a execução dos objetivos propostos, incluindo ensaios e testes, foram utilizados os seguintes equipamentos, materiais e ferramentas:

- *Kit* de desenvolvimento DEMOJM, da PE Micro;
- Software CodeWarrior 6.1 Special Edition, da Freescale Semiconductor;
- Software Microsoft Visual C# 2010 Express, da Microsoft [8];
- Software Matlab, da MathWorks [27];
- Motor de Corrente Contínua (DC) de 12V;
- Motor de Indução educativo, da empresa Equacional;
- Motor Síncrono educativo, da empresa Equacional;
- Motor de Corrente Contínua (DC) de 1700W;
- Carga resistiva com fonte de corrente;
- Inversor de frequência;
- Osciloscópio digital TDS 210, da Tektronix [28];
- Tacômetro Foto/Contato Digital MDT 2238A, da Minipa [29].

Dados sobre os softwares Matlab e Microsoft Visual C# 2010 Express e sobre o osciloscópio e o tacômetro podem ser encontrados nas referências indicadas. Descrições mais detalhadas do *kit* DEMOJM e do software CodeWarrior 6.1 Special Edition podem ser encontradas no Anexo A e no Anexo B, respectivamente. As descrições dos motores utilizados para testes seguem nas seções adiante.

3.1. Motor DC de 12V

As características construtivas deste motor não são conhecidas por causa da ausência de folhas de dados acompanhando sua montagem com os circuitos de controle. Apenas sua velocidade máxima de rotação (de 3641rpm) e sua tensão de alimentação (de 12V) puderam ser obtidas, através dos experimentos na bancada.

O controle da velocidade de rotação é realizado pelo ajuste manual de posição de um potenciômetro, associado a um circuito de controle, que podem ser visualizados na Fig. 3.1 e na Fig. 3.2, respectivamente. Em seu eixo encontra-se acoplado uma placa circular com cortes em suas bordas, que foi utilizada para auxiliar a tarefa leitura da velocidade de rotação, com a fixação de um adesivo. Esta estrutura pode ser visualizada na Fig. 3.3.

Alguns defeitos podem ser notados através da observação de seu funcionamento: desbalanceamento acentuado do eixo e não linearidade de resposta ao acionamento do potenciômetro. O primeiro defeito é mais facilmente observado em altas velocidades de rotação, indicado pelo deslocamento radial e axial da placa. O segundo defeito é mais facilmente observado durante a partida, porque um maior deslocamento do potenciômetro é necessário para vencer a inércia (levando também a uma velocidade mínima mais distante de zero). Por estas razões apenas os testes mais simples foram realizados com este motor. Também segue adiante uma ilustração da montagem com a placa, que foi colocada diretamente sobre o motor, na Fig. 3.4.

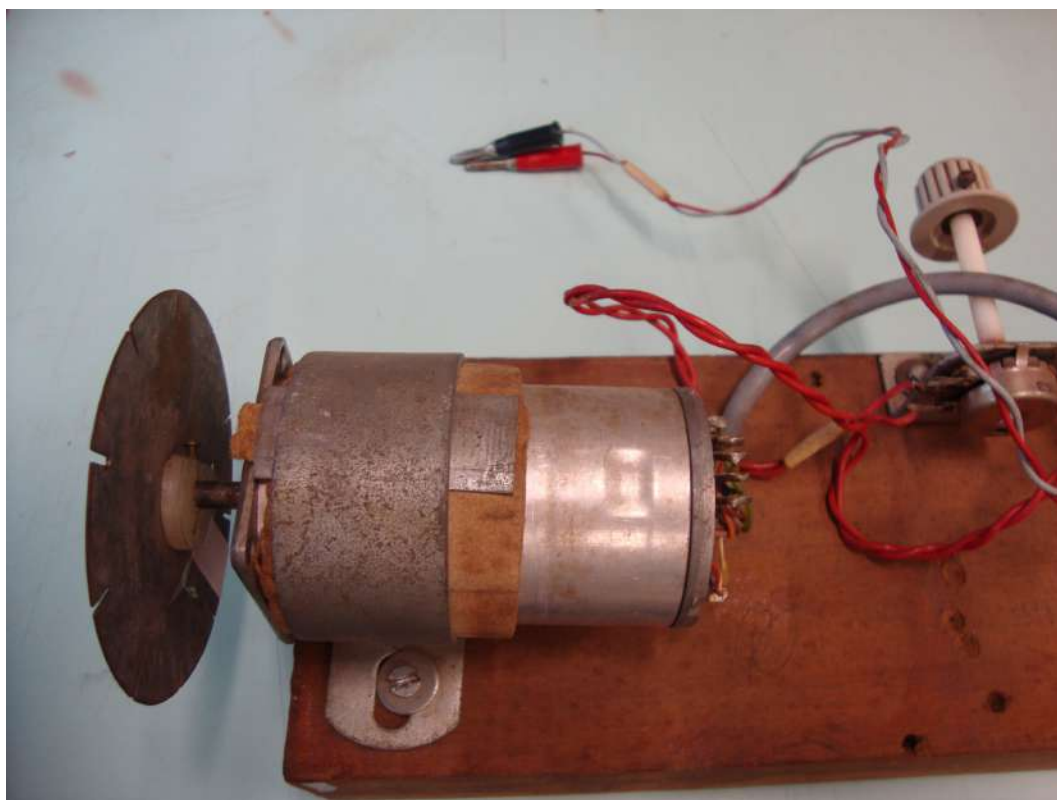


Figura 3.1: Motor DC de 12V com potenciômetro e terminais de alimentação.

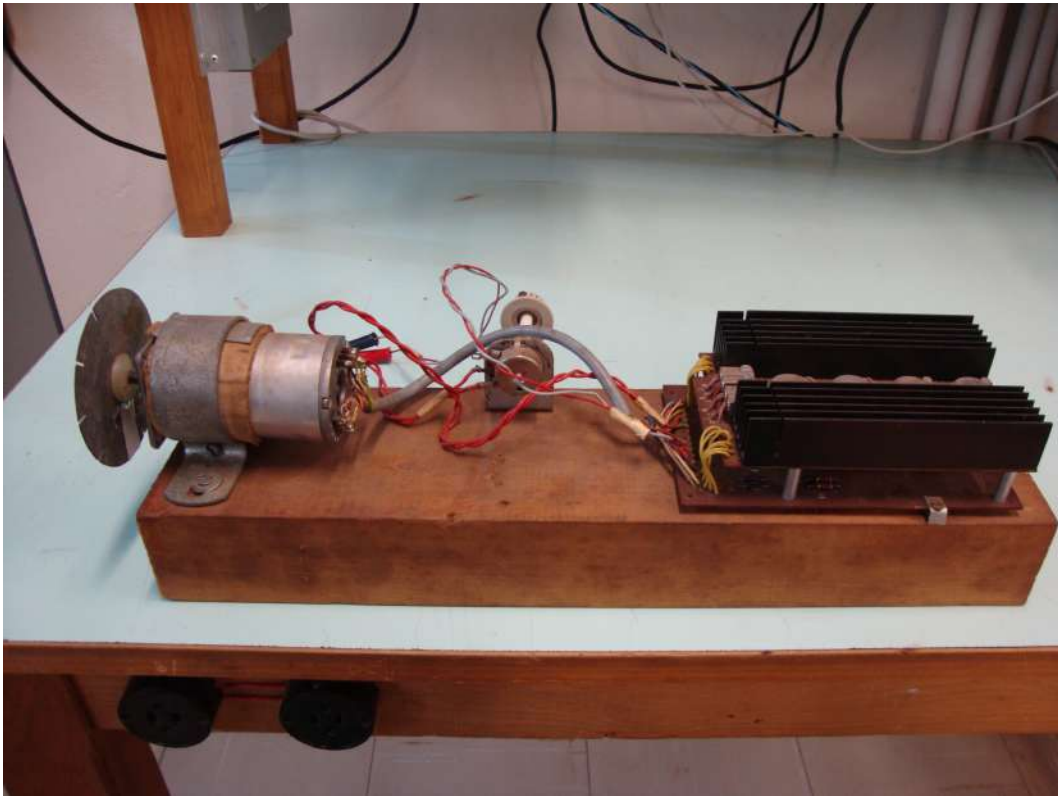


Figura 3.2: Motor DC de 12V com circuito de controle.

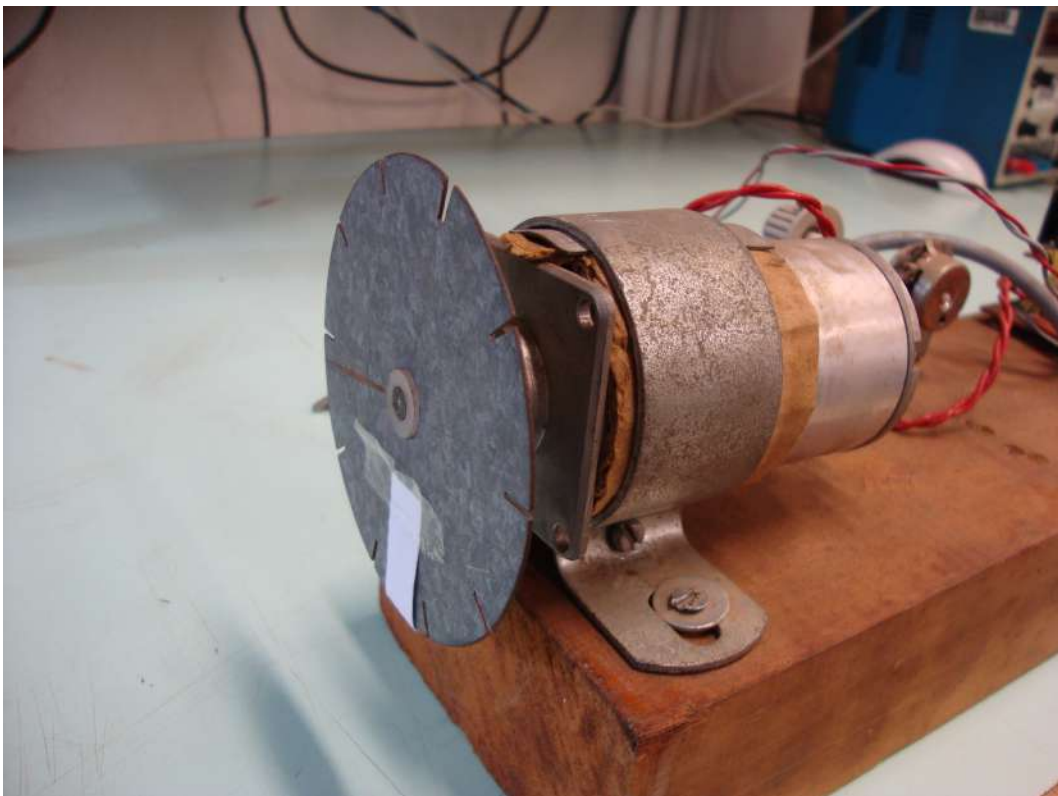


Figura 3.3: Motor DC de 12V com adesivo para leitura de velocidade.

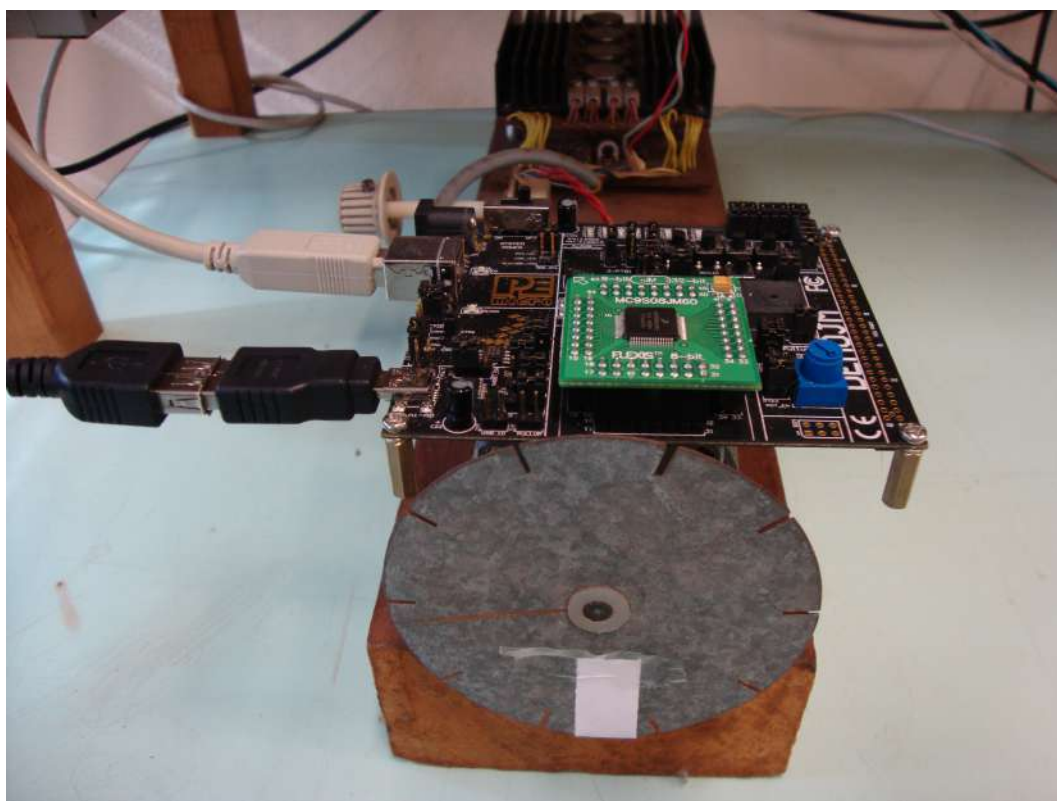


Figura 3.4: Montagem da placa de aquisição sobre o motor DC de 12V.

3.2. Motor DC de 1700W

O motor DC de 1700W foi fabricado pela Anel Equipamentos Elétricos LTDA. As principais características construtivas são apresentadas na chapa metálica afixada no motor, na Fig. 3.6, com destaque para o número de polos (4 polos), tensão nominal de alimentação (220V) e corrente máxima (9,1A). Todos os testes foram realizados com a placa de aquisição inserida na caixa metálica de blindagem e à velocidade de rotação de 1800rpm. Uma ilustração com o motor e conexões de configuração é apresentada na Fig. 3.5. A montagem com a placa inserida na caixa de blindagem sobre o motor é apresentada na Fig. 3.8 e na Fig. 3.9. Foi utilizada fita adesiva para auxiliar a fixação da caixa sobre o motor, evitando sua movimentação.

O controle de velocidade é realizado por um *chopper* de frequência de chaveamento de 2kHz. Parte do ruído esperado nos espectros de análise são devidos ao erro de chaveamento no *chopper*. Uma ilustração com outra perspectiva da montagem e com as conexões do *chopper* e dos circuitos de controle (com interface para o computador de controle) é apresentada na Fig. 3.7.

A carga mínima que pode ser aplicada ao eixo é de 300W, por causa da inércia de acoplamento com o motor responsável pelo carregamento. O carregamento total não deve aproximar-se do limite nominal de potência de 1700W, para que não ocorra um fluxo de corrente elevado, que danifique o motor.

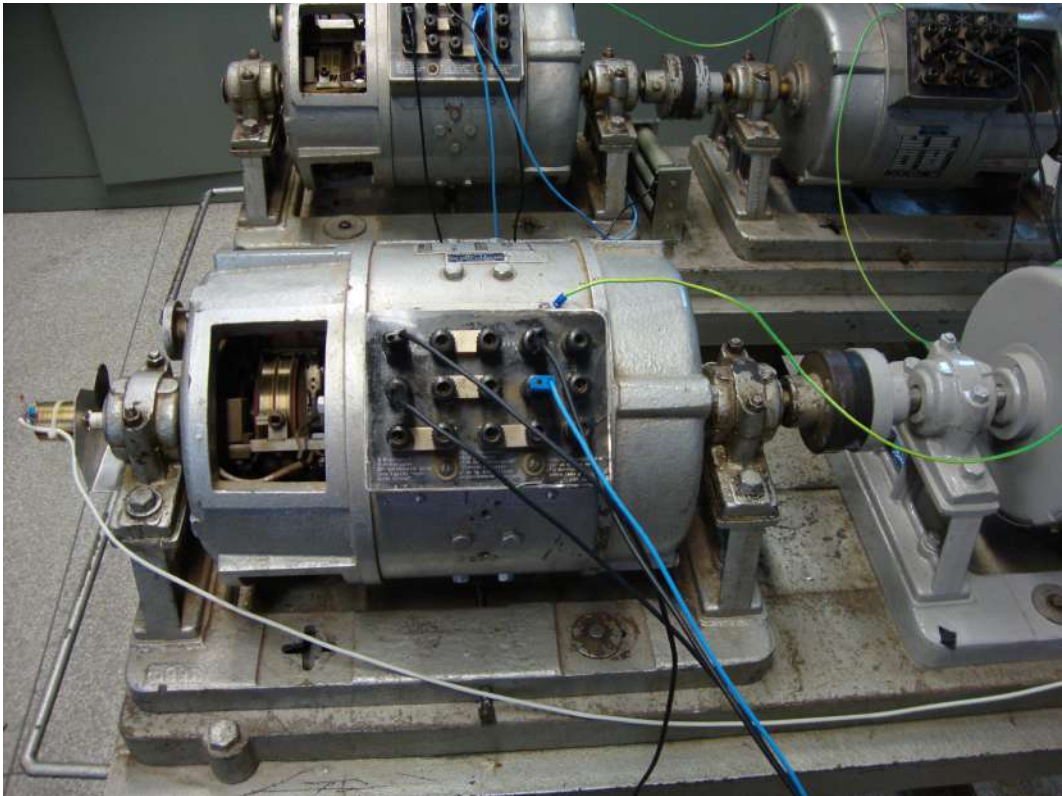


Figura 3.5: Motor DC de 1700W.



Figura 3.6: Chapa com dados do motor DC de 1700W.

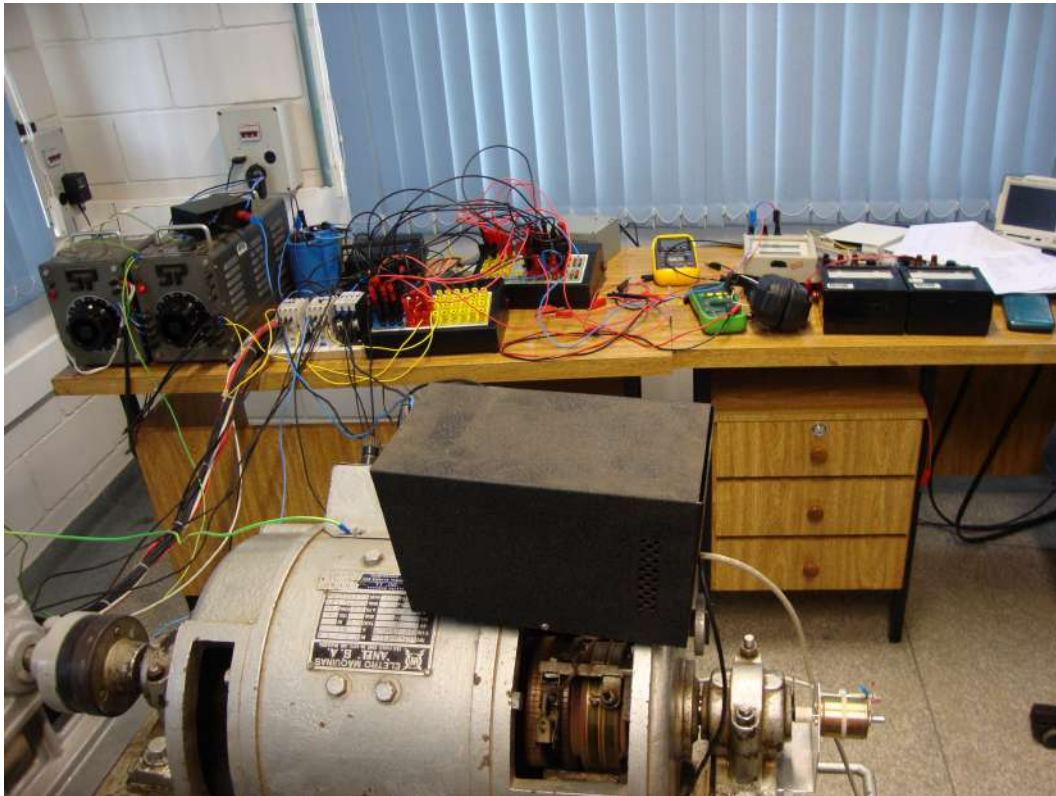


Figura 3.7: Ligações de controle para o motor DC de 1700W.

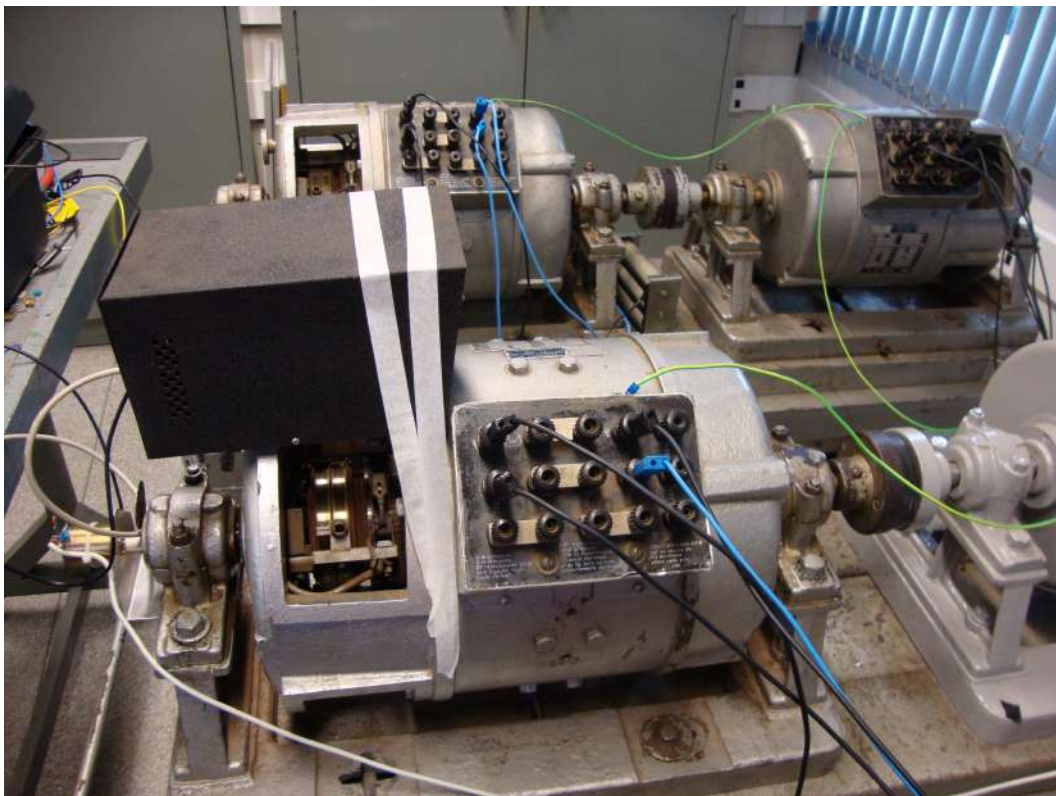


Figura 3.8: Montagem da placa com blindagem sobre o motor DC de 1700W.

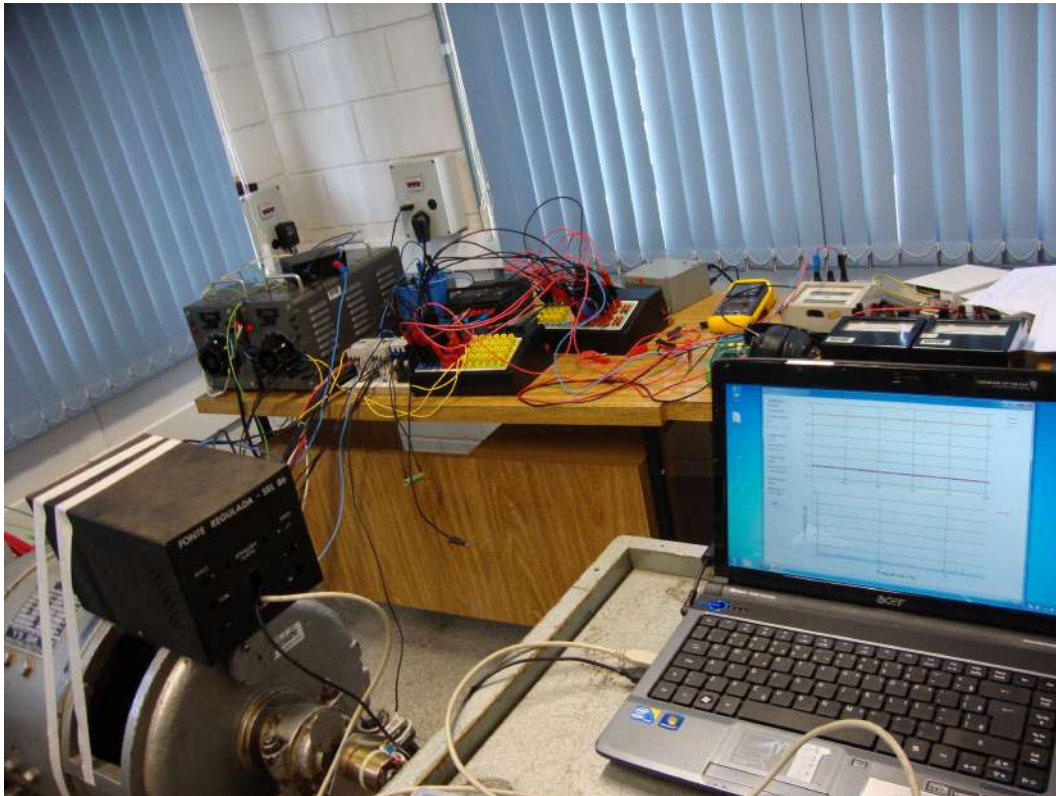


Figura 3.9: Montagem completa do motor DC de 1700W com interface gráfica.

3.3. Motor síncrono

O motor síncrono foi fabricado pela Equacional. É um motor voltado para fins educacionais, contendo seções na carcaça para tornar possível a visualização de sua estrutura interna. Dessa forma também não é um motor que atenda às exigências de um motor industrial. As principais características construtivas são apresentadas na chapa metálica afixada no motor, na Fig. 3.10 e Fig. 3.11, com destaque para a tensão nominal de alimentação (220V) e a frequência de operação (60Hz). A construção do motor e da montagem para testes pode ser obtida através das imagens do motor de indução, uma vez que são externamente muito semelhantes.

Sua velocidade de rotação sem sincronismo é de 1495rpm, mas com sincronismo é de 1800rpm. E sob a aplicação de carregamento ocorre faiscamento em suas bobinas internas, o que impediu a realização de testes de carregamento (pois o sistema de aquisição era automaticamente desligado na presença deste ruído eletromagnético, mesmo que inserido na caixa metálica de blindagem). O faiscamento é causado pelo elo magnético de alimentação, gerado pela ligação das duas fontes de alimentação (trifásica e contínua). Isso porque estas fontes, apesar de serem independentes entre si, estão dentro de um mesmo equipamento.



Figura 3.10: Chapa com dados do motor síncrono (1ª parte).

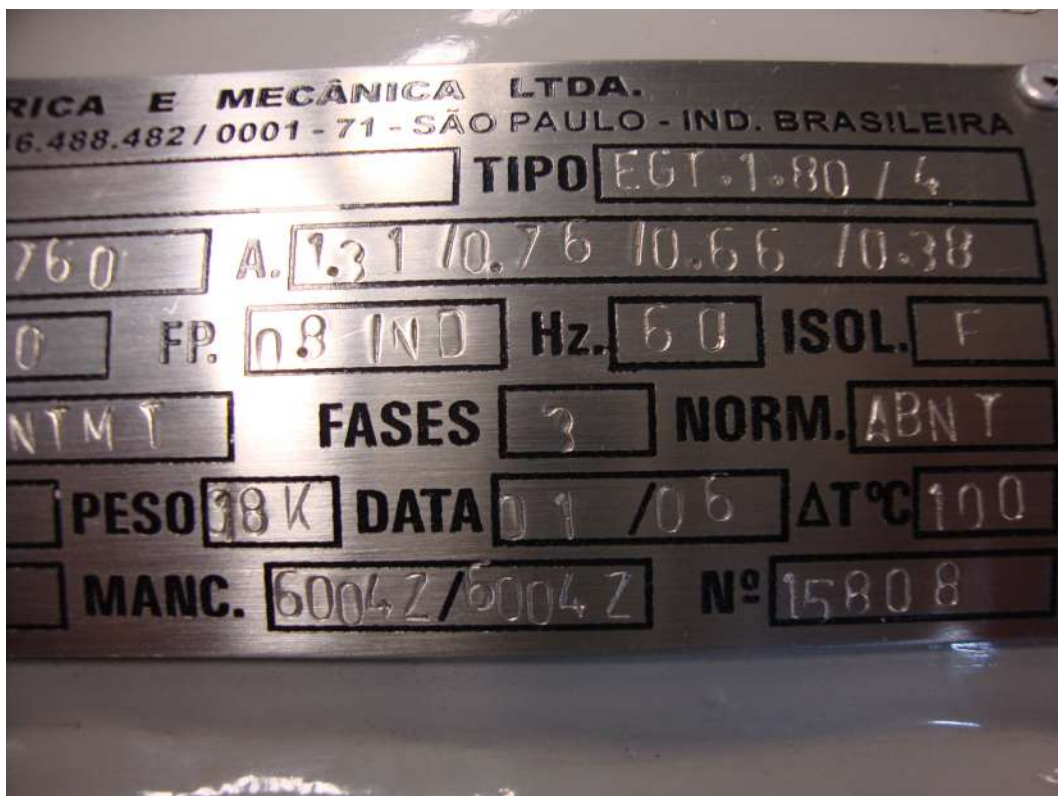


Figura 3.11: Chapa com dados do motor síncrono (2ª parte).

3.4. Motor de indução

O motor de indução foi também fabricado pela Equacional. À semelhança do motor síncrono, trata-se de um motor voltado para fins educacionais (contendo seções na carcaça para tornar possível a visualização de sua estrutura interna). Ilustrações de diferentes perspectivas da montagem com a placa são apresentadas na Fig. 3.12, Fig. 3.13 e Fig. 3.16. As principais características construtivas são apresentadas na chapa metálica afixada no motor, na Fig. 3.14 e Fig. 3.15, semelhantes às do motor síncrono.

Sua velocidade de rotação está sujeita à entrada de frequência da fonte de alimentação trifásica (a única necessária, ao contrário do motor síncrono). E dessa forma é possível a aplicação do carregamento, dentro dos limites de potência suportados pelo motor.

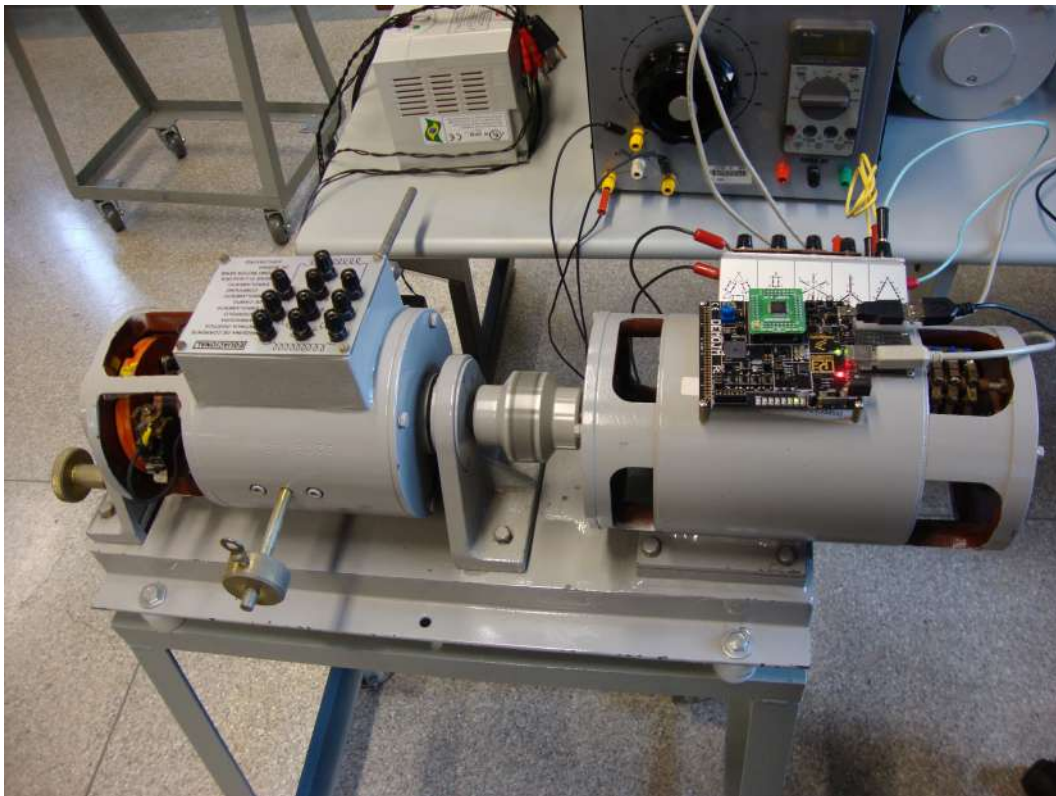


Figura 3.12: Montagem da placa sobre o motor de indução (diagonal).

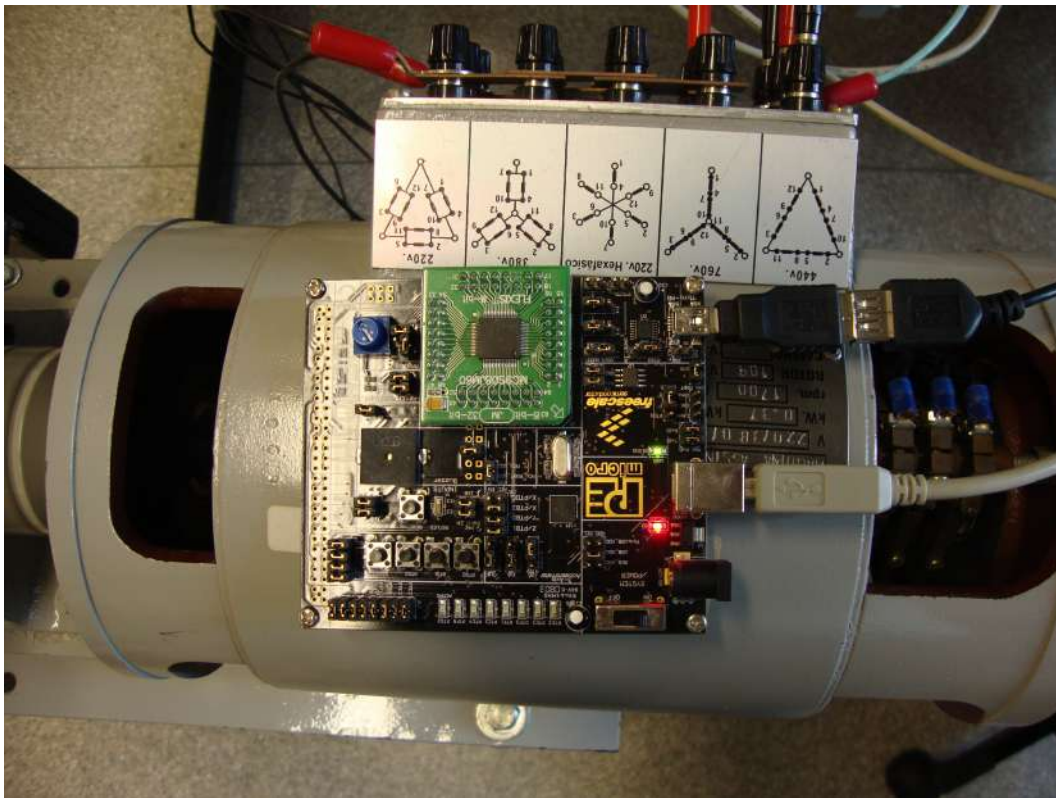


Figura 3.13: Montagem da placa sobre o motor de indução (superior).



Figura 3.14: Chapa com dados do motor de indução (1ª parte).



Figura 3.15: Chapa com dados do motor de indução (2ª parte).

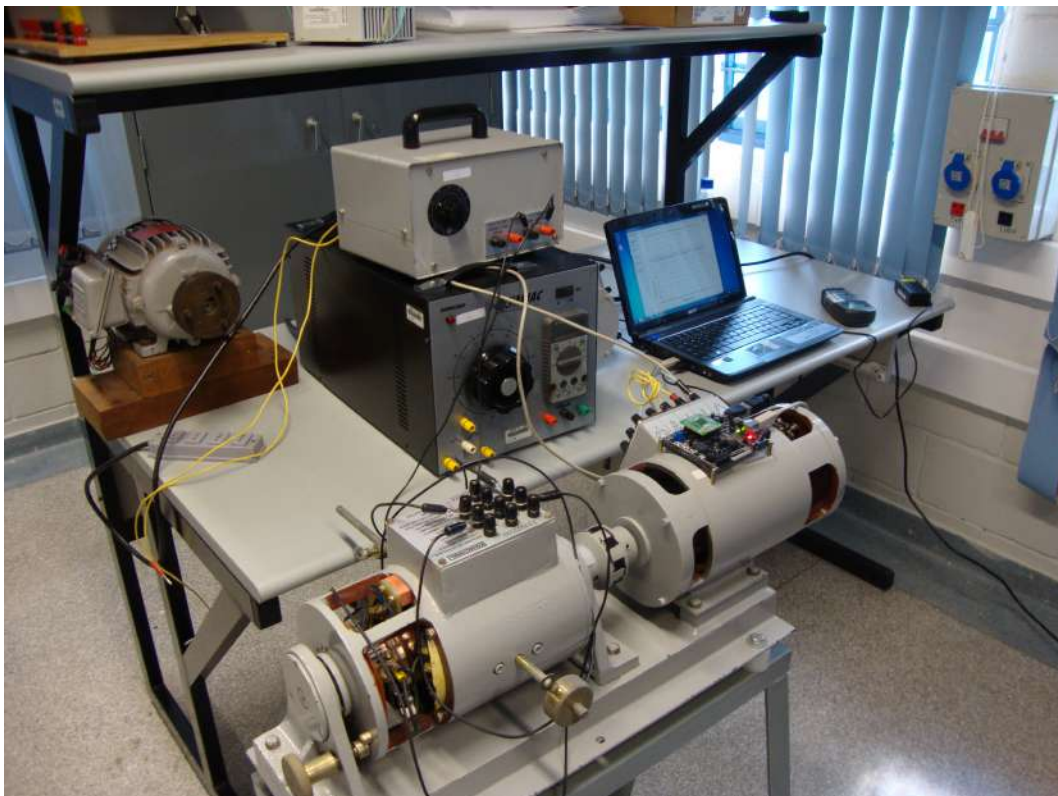


Figura 3.16: Montagem completa do motor de indução com interface gráfica.

3.5. Carga resistiva

A carga resistiva utilizada no teste de carregamento do motor de indução (e na tentativa de teste do motor síncrono) foi também fabricado pela Equacional. Trata-se de uma fonte de corrente contínua alimentando de 1 a 6 resistores chaveados de 512Ω em paralelo. Assim, o aumento da carga ocorre pelo aumento do número de resistores ativados em paralelo, diminuindo a resistência interna total da fonte de corrente e permitindo uma maior transferência de potência para a saída.

Ilustrações da carga resistiva em diferentes perspectivas são apresentadas na Fig. 3.17 e Fig. 3.18. Na primeira é possível visualizar a estrutura de chaves e os terminais de ligação, que permitem diversas configurações de conexão. Na segunda é possível visualizar o interior da caixa, com os resistores posicionados na vertical.

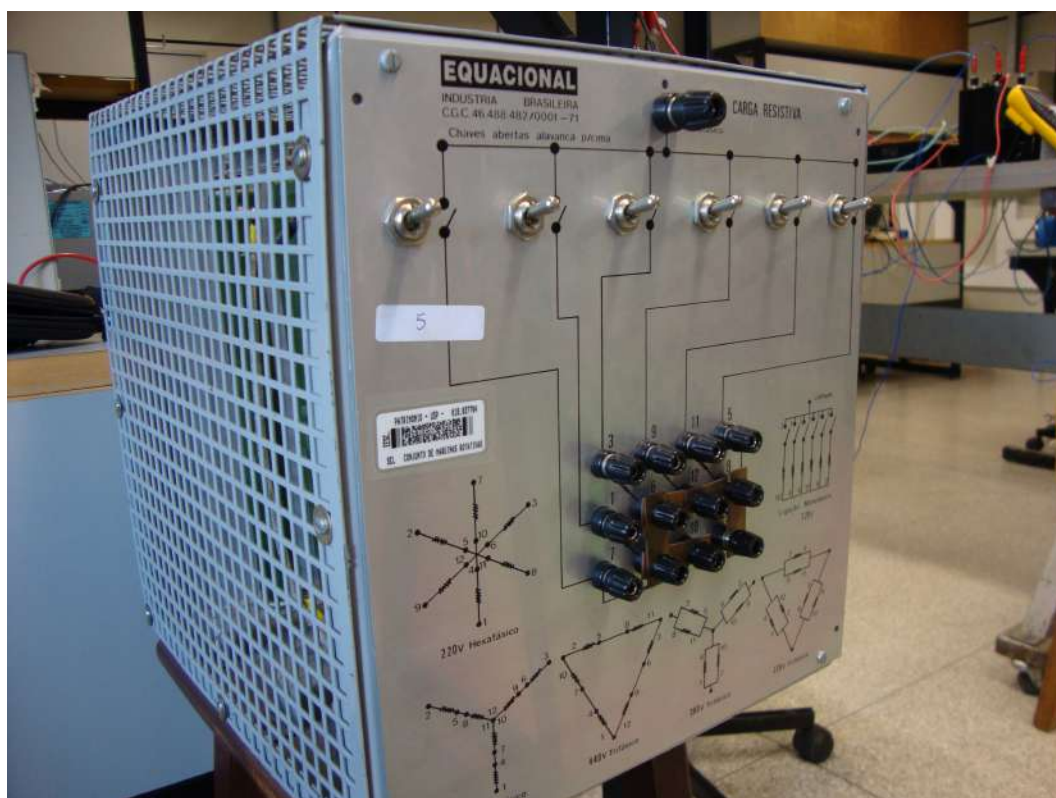


Figura 3.17: Carga resistiva para testes do motor de indução (frente).



Figura 3.18: Carga resistiva para testes do motor de indução (lateral).

3.6. Inversor de frequência

O inversor de frequência utilizado no teste de mudança de frequência do motor de indução foi fabricado pela Eletrônica Santerno. Trata-se de um inversor monotrifásico (entrada monofásica e saída trifásica) de 4,5kVA. Para os testes envolvendo o inversor foram utilizadas frequências próximas aos valores de 60Hz (como da rede elétrica), 45Hz e 75Hz. Uma ilustração do inversor é apresentada na Fig. 3.19.

Através do osciloscópio foi possível visualizar os sinais de saída do inversor nas frequências de 60,2Hz, 45,6Hz e 75,2Hz, apresentados na Fig. 3.20, Fig. 3.21 e Fig. 3.22, respectivamente. Foi possível observar como o inversor constrói o sinal senoidal, através do chaveamento em alta frequência. Também as figuras apresentam a frequência do cursor do osciloscópio, de 59,88Hz, 45,45Hz e 75,19Hz, respectivamente, atestando a precisão do valor indicado no visor do equipamento.



Figura 3.19: Inversor de frequência.

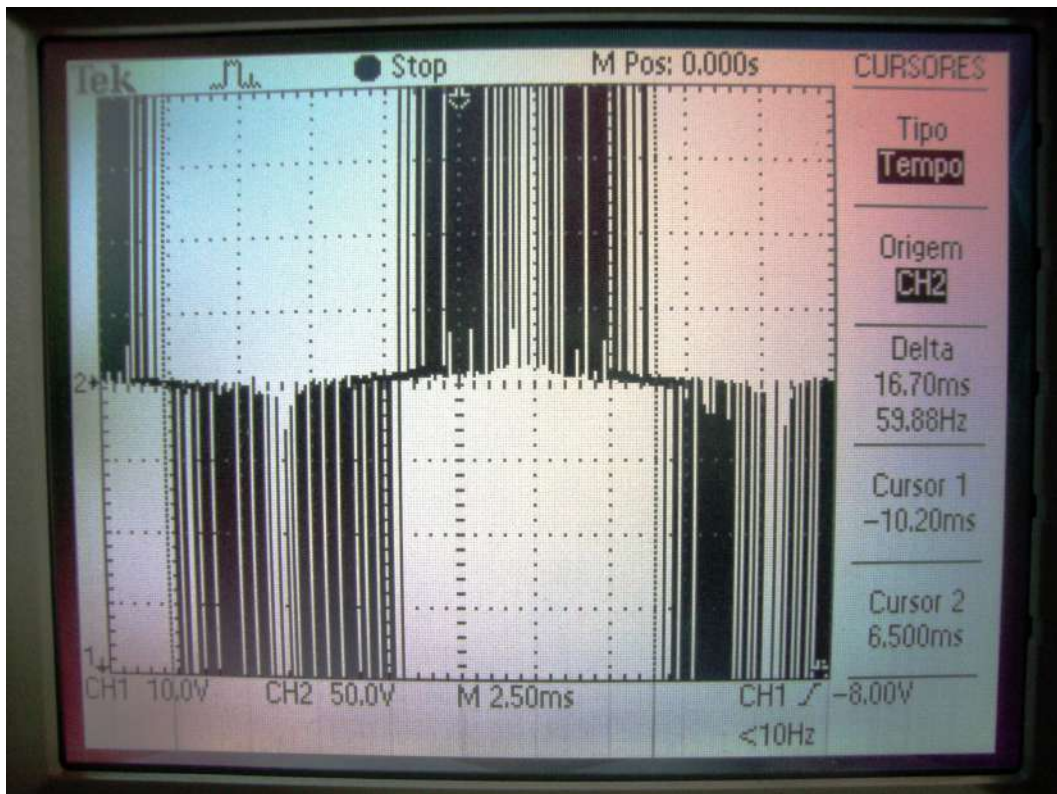


Figura 3.20: Forma de onda da saída do inversor de frequência em 60,2Hz.



Figura 3.21: Forma de onda da saída do inversor de frequência em 45,6Hz.

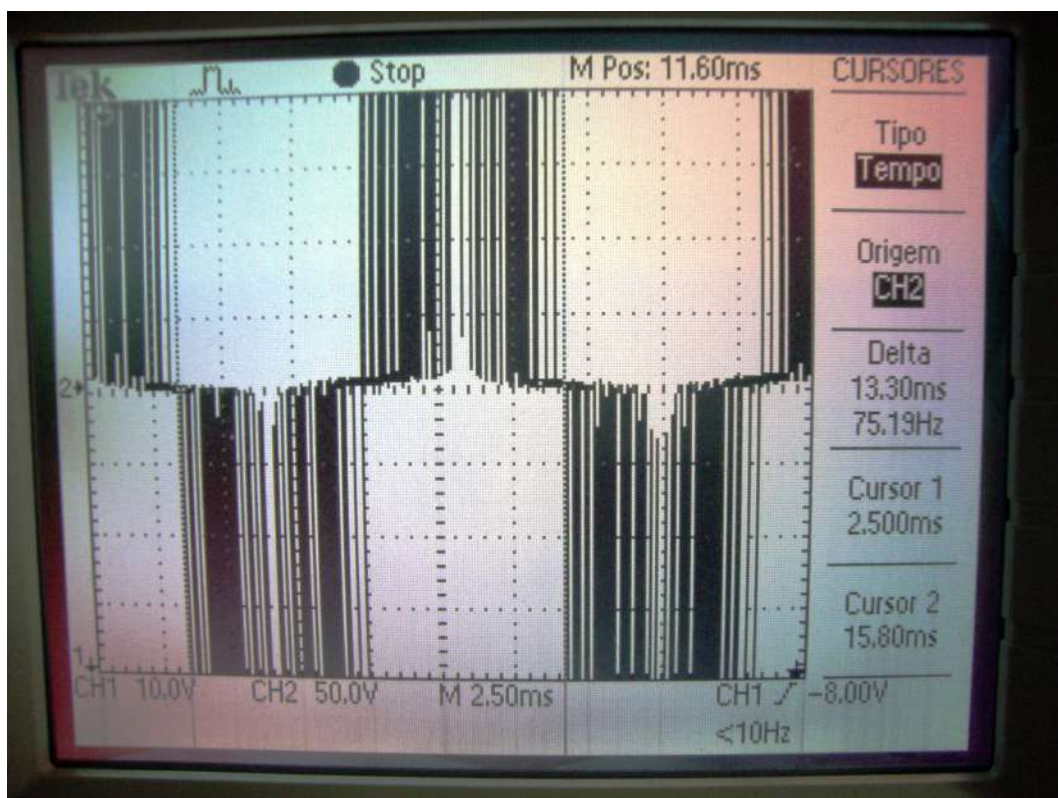


Figura 3.22: Forma de onda da saída do inversor de frequência em 75,2Hz.

4. Metodologia e Resultados

Com a descrição dos materiais utilizados, as seções a seguir apresentarão a sequência de desenvolvimento, iniciando com as primeiras considerações da aplicação e do *kit* DEMOJM, abordando por fim os testes sobre os motores.

4.1. Escolha do microprocessador

O *kit* DEMOJM oferece a possibilidade de escolha entre 2 modelos de microprocessadores, sendo um de 8-bits (MC9S08JM60) e outro de 32-bits (MCF51JM128). A escolha do microprocessador de 32-bits seria mais vantajosa, em comparação à escolha do modelo de 8-bits, caso houvesse uma demanda maior por poder de processamento e espaço de memória para a aplicação. A complexidade da programação seria aproximadamente equivalente entre ambos, por causa das facilidades oferecidas pelo software CodeWarrior 6.1 Special Edition (descritas em mais detalhes no Anexo B).

Um empecilho para a utilização do microprocessador de 32-bits seria sua implementação do protocolo de comunicação USB. Esta implementação oferece mais recursos que a versão simplificada presente no microprocessador de 8-bits, possibilitando a criação de novas funções. Mas implica também em um aumento significativo de complexidade, desnecessário para atender as exigências fundamentais da aplicação. Este aumento de complexidade foi uma consideração de grande peso na escolha do microprocessador de 8-bits.

Outra consideração seria o aumento de custo com a escolha do microprocessador de 32-bits. Seria um fator de grande peso caso o projeto desenvolvido tivesse como objetivo a montagem de protótipos de *hardware*. Porém, uma vez que foi utilizada uma plataforma já montada (o *kit* DEMOJM), este fator oferece menor impacto para o projeto. Isso porque o incremento de custo não seria apenas notável no valor unitário do componente, mas também no processo de desenvolvimento, especialmente pela maior demanda de tempo necessário caso fossem implementadas as funcionalidades extras.

Dentre as limitações da escolha do microprocessador de 8-bits, a quantidade restrita de memória foi a que mais influenciou a direção do projeto. Essa limitação foi notada apenas em estágios mais avançados do projeto, de compilação do algoritmo da FFT no microprocessador. Na estratégia inicial do projeto não foi levado em consideração o fato de que a representação de números em ponto flutuante exige muito mais espaço de memória que a representação de números inteiros. Uma vez que o algoritmo da FFT utiliza operações em ponto flutuante, não foi possível adicioná-lo ao *software* do microprocessador, como havia sido inicialmente idealizado. Pela falta de memória integrada, foi necessário anexar o algoritmo da FFT ao

software do computador pessoal, a ser executado juntamente com a interface gráfica.

Com essa realocação de tarefas entre o microprocessador e o computador pessoal, couberam ao microprocessador apenas quatro rotinas: configuração da comunicação USB, aquisição de leituras do sensor acelerômetro, temporização para controle da frequência de amostragem e envio sincronizado de pacotes de dados.

4.2. Desenvolvimento do algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Implementações do algoritmo da FFT podem ser facilmente encontradas através de várias referências [30, 31 e 32], cada uma com suas peculiaridades. Algumas implementações são genéricas, aplicáveis para qualquer conjunto numérico, enquanto outras são voltadas para conjuntos específicos, como números complexos, reais, primos e outros, buscando maior eficiência.

A associação de algumas soluções apresentadas nestas referências poderiam atender às exigências da aplicação (trabalho com números reais e execução em um microprocessador). Mas para o projeto não foram utilizadas nenhuma destas referências, nem porções de *software* escritas por estes autores. Para o desenvolvimento do *software* da FFT do projeto foi utilizada apenas a base matemática apresentada no capítulo 2, segundo [26]. Essa estratégia foi adotada para que fosse obtido um controle maior sobre as características do algoritmo.

Adicionalmente, visando facilitar a execução de testes sobre este *software* em particular, optou-se por escrevê-lo e executá-lo em um computador pessoal, através do ambiente de programação DEV-C++, da Bloodshed. A escolha da linguagem de programação C para sua codificação foi orientada pela estratégia de divisão de tarefas. Dado que a linguagem C seria utilizada na criação do *software* para o microprocessador, o seu uso para a codificação do algoritmo da FFT facilitaria a migração posterior.

Para tornar o algoritmo escalável (ajustável a diferentes tamanhos de arranjos de entrada) foram definidas as constantes globais relacionadas ao número de entradas da FFT. Assim, para alterar o número de iterações e a lógica de combinação de elementos em cada iteração, bastaria alterar os valores destas constantes. Como o projeto não prevê o escalamento da FFT em tempo de execução, também a alocação de memória (dependente destas constantes) não é realizada em tempo de execução (é realizada estaticamente, e não dinamicamente). Uma vez definida a melhor escala, de acordo com as limitações do *kit* de desenvolvimento e com os objetivos da aplicação, o valor das constantes globais não deverá ser alterado.

Após a conclusão da codificação, foram realizados testes de aproximação, para conferir quão precisa era a resposta do algoritmo. Como base de comparação foi utilizada a função $fft(n)$, do software Matlab, associada ao comando *format longG*, para que a resposta da função fosse dada em números com 15 ou 16 dígitos após o ponto decimal. Como entrada para os cálculos foram utilizados arranjos de 256 números reais,

obtidos de leituras do acelerômetro do *kit*. Na Tab. 4.1 e Tab. 4.2 seguem 2 exemplos de comparações das respostas. Esta precisão de 15 ou 16 dígitos após o ponto decimal não tem significado para a aplicação, mas apenas para a percepção do resultado do teste de precisão.

Tabela 4.1: Primeira comparação arranjos de saída de FFT do sistema e do Matlab.

Índice	Arranjo de entrada	Arranjo de saída (Matlab)	Arranjo de saída (Algoritmo do projeto)
1	0	5.270496	5.270496
2	0.047058	0.105678266503857	0.105678266503857
3	0.023529	0.0990027525524624	0.0990027525524625
4	0.023529	0.0779132876205034	0.0779132876205037
5	0.023529	0.230429282005374	0.230429282005374
6	0.023529	0.139469665966677	0.139469665966677
7	0	0.191594805380077	0.191594805380078
...	...	...	...
122	0	0.152584360082646	0.152584360082646
123	0.023529	0.227056422221917	0.227056422221917
124	0.023529	0.12542602037031	0.12542602037031
125	0.023529	0.123475093595358	0.123475093595358
126	0.023529	0.237476807335017	0.237476807335016
127	0.023529	0.0929705309154814	0.0929705309154815
128	0.023529	0.107845720810035	0.107845720810035
129	0	0.0941160000000001	0.0941160000000001
130	0.023529	-	-
131	0.023529	-	-
...	...	-	-
254	0	-	-
255	0.023529	-	-
256	0.023529	-	-

Tabela 4.2: Segunda comparação entre arranjos de saída de FFT do sistema e do Matlab.

Índice	Arranjo de entrada	Arranjo de saída (Matlab)	Arranjo de saída (Algoritmo do projeto)
1	1.01174700000000	259.383696	259.383696
2	1.01174700000000	0.138371751183216	0.138371751183216

3	1.01174700000000	0.243098631138065	0.243098631138065
4	0.98821800000000	0.201359042226626	0.201359042226627
5	1.01174700000000	0.16637643680945	0.16637643680945
6	1.01174700000000	0.189707910571475	0.189707910571475
7	1.01174700000000	0.216886060211663	0.216886060211663
...	...	...	...
122	1.01174700000000	0.0533619768510719	0,0533619768510718
123	1.01174700000000	0.125662437090046	0,125662437090046
124	1.01174700000000	0.266864673374874	0,266864673374874
125	1.01174700000000	0.0826339286803986	0,0826339286803989
126	1.01174700000000	0.0549087634425464	0,0549087634425463
127	1.01174700000000	0.0900451137045528	0,0900451137045523
128	1.01174700000000	0.100716665637501	0,100716665637501
129	1.01174700000000	0.0941160000000139	0,0941160000000139
130	1.01174700000000	-	-
131	1.01174700000000	-	-
...	...	-	-
254	1.01174700000000	-	-
255	1.01174700000000	-	-
256	1.01174700000000	-	-

A quantidade de números do arranjo de entrada resulta em um arranjo de saída cuja quantidade de números é igual à sua metade mais 1, ou seja, 129 números de saída. Isso porque a saída é um arranjo de números complexos, com o dobro de números da entrada, se consideradas as componentes reais e as componentes imaginárias a parte. Como o interesse da aplicação está sobre o módulo de cada número complexo, a quantidade de índices é reduzida pela metade, o que é igual à quantidade da entrada. Ainda, como este arranjo de módulos é simétrico em relação ao valor do meio (a segunda metade é igual ao inverso da primeira metade), pode ser reduzido outra vez.

Neste arranjo de saída o primeiro número corresponde à componente DC (frequência igual a zero), enquanto o último corresponde à frequência máxima, igual à metade da frequência de amostragem do sinal do acelerômetro. Assim, os valores intermediários das tabelas correspondem aos valores intermediários de frequência igualmente espaçados.

Pelos valores apresentados nas tabelas é possível notar que as respostas oferecidas pela função do Matlab e pelo algoritmo do projeto são muito próximas. A maioria dos números é igual em todos os dígitos, sendo que os valores diferentes são divergentes apenas no dígito menos significativo, em uma ou algumas

unidades. Essa pequena diferença é causada por erros de arredondamento nos cálculos em ponto flutuante de dupla precisão, cujo impacto é desprezível para a aplicação do projeto.

Conforme apresentado no item 4.1, não foi possível a integração do código-fonte do algoritmo da FFT no código-fonte do microprocessador. Mas, com a migração do algoritmo para o corpo da interface gráfica, houveram vantagens para a execução da aplicação. A primeira vantagem foi a diminuição das exigências de eficiência, tanto no uso do espaço de memória, como no tempo de computação dos cálculos. Outra vantagem foi a simplificação da transmissão de dados, reduzindo significativamente o volume de dados que precisariam ser enviados para a interface gráfica. Com relação à aproximação dos valores da resposta, a vantagem foi a garantia de que precisão alcançada não sofreria o risco de ser perdida, pelas limitações intrínsecas que a representação do microprocessador traria.

4.3. Desenvolvimento dos códigos-fonte da interface gráfica e do microprocessador

Tomando como base o tutorial apresentado em [33], foram desenvolvidos em paralelo os *softwares* para a o computador pessoal (a interface gráfica), através do software Microsoft Visual C# 2010 Express, e para o microprocessador, através do software CodeWarrior 6.1 Special Edition. Para o *software* da interface gráfica foi utilizada a biblioteca SimpleUSB.dll, uma versão simplificada da biblioteca que descreve o protocolo USB para o sistema operacional. Para o *software* do microprocessador foram utilizadas algumas porções do código escrito neste tutorial, referentes à implementação do protocolo de comunicação USB. A única modificação sobre estas porções de código visaram o aumento do tamanho do pacote de dados, de 8 bytes para 64 bytes, a fim de diminuir o número de pacotes a serem enviados (e de diminuir o tempo de latência, causado pelos *handshakes* necessários para o envio de cada pacote).

Com o protocolo de comunicação já implementado e modularizado através de funções e registradores específicos, foi necessária apenas a codificação da aquisição do arranjo de leituras do acelerômetro e da lógica de envio sincronizado dos pacotes de dados. As considerações mais importantes sobre estas duas tarefas seguem nos subitens adiante.

4.3.1. Tarefa de aquisição do arranjo de leituras

O funcionamento da aquisição do arranjo de leituras estaria baseado em dois valores estáticos, um para a quantidade de entradas e outro para a taxa de amostragem. Os valores estáticos estabelecidos foram de 1024 leituras (para a quantidade de entradas) e de 860,0922Hz aproximadamente (para a taxa de amostragem). Estes valores foram escolhidos de acordo com a restrição imposta pelo acelerômetro do *kit*,

cuja resposta em frequência está limitada em 350Hz.

Com a taxa de amostragem de 860Hz é assegurada a proteção contra erros por *aliasing*, pois é bem superior aos 700Hz exigidos pela Teorema de Nyquist. Ao obter os arranjos de 1024 leituras, aumenta-se a segurança contra *leakage* (erros por espalhamento de energia no espectro calculado), uma vez que no algoritmo do projeto não foi utilizado nenhum 'janelamento' (multiplicação da janela de leituras por outra janela, para atenuação das leituras periféricas), mas apenas a janela retangular (ou seja, atribuição de mesma ênfase para todas as leituras do arranjo). Como a taxa de amostragem é constante, um aumento na quantidade de leituras por arranjo resulta em um aumento do número de ciclos (períodos) capturados por janela. Com um arranjo de 1024 leituras são capturados mais ciclos (períodos) do sinal, compensando essa falta de janelamento.

Outra vantagem do aumento do número de leituras por arranjo é o aumento da resolução do espectro de saída. Com 1024 leituras, obtém-se uma saída de 513 pontos da FFT para uma faixa de 430Hz, proporcionando uma gradação de 0,8399Hz por ponto, aproximadamente. Esse aumento de resolução facilita a identificação das componentes mais relevantes de frequência, aumentando a precisão da resposta.

Uma última consideração importante sobre a taxa de amostragem é o erro de temporização, ou seja, se o tempo entre duas leituras consecutivas é o mesmo para qualquer par escolhido. Para ter ideia deste erro foram usados os 2 temporizadores de 16-bits do microprocessador, uma para a contagem do tempo necessário para a realização de cada leitura, enquanto outro para a contagem do tempo necessário para a realização de todas as 1024 leituras (para provar a operação correta do anterior). Também foram alocados registradores para armazenarem a menor e a maior contagem do primeiro temporizador, a fim de se conhecer a amplitude máxima da diferença. Os valores encontrados para os tempos mínimo e máximo de amostragem entre duas amostras consecutivas foram de 1,116ms e 1,120ms, aproximadamente. O tempo base de amostragem (tomado entre a 1ª e a 2ª amostras) foi de 1,121ms. Este tempo, maior que o tempo máximo de amostragem, é o utilizado para o cálculo da extensão do espectro.

4.3.2. Tarefa de envio sincronizado dos pacotes de dados

Na comunicação entre dois dispositivos através do protocolo USB existem os papéis de *host* e *device*. O primeiro é o responsável pelo gerenciamento da comunicação, podendo iniciar uma transferência a qualquer momento, enquanto o segundo precisa necessariamente receber uma 'autorização' (sinalização) para poder enviar um pacote de dados. No sistema do projeto a comunicação é realizada entre a interface gráfica (*host*) e o microprocessador (*device*).

Como o microprocessador desempenha a função principal (realizar a coleta de dados) e a interface gráfica realiza uma função auxiliar (apresentar estes dados), seria lógico que os papéis de *host* e *device*

fossem invertidos. Mas como o microprocessador de 8-bits escolhido é capaz de atuar apenas com o papel de *device* (limitação de sua implementação arquitetural do protocolo USB), foi necessário submeter a aplicação à necessidade de uma sinalização da interface gráfica para cada pacote de dados que o microprocessador precisar enviar.

Sabendo que o tamanho do pacote é de 64 bytes (64 leituras) e que devem ser enviadas 3072 leituras (1024 leituras para cada um dos 3 eixos do acelerômetro), são necessários 48 pacotes. A interface gráfica envia juntamente com a sinalização o índice do próximo pacote, de 1 até 48 repetidamente. O microprocessador transmite, a cada sinalização, a porção correspondente do arranjo de leituras, enviando em sequência as leituras do eixo X, eixo Y e eixo Z.

Ainda um último pacote é enviado, após os 48 primeiros, contendo informações da temporização da taxa de amostragem em 6 bytes. Os 58 bytes restantes ficam disponíveis para possíveis expansões futuras da aplicação, como envio de dados dos botões e do potenciômetro do *kit*, ou ainda de outros periféricos que podem ser conectados, ou ainda outros dados de execução que podem ser de interesse.

Após o recebimento dos 59 pacotes, a interface gráfica realiza os cálculos das três FFTs, uma para cada eixo. Também realiza os cálculos sobre os dados de temporização, multiplicando sobre os valores dos contadores a constante em ponto flutuante que representa o valor temporal de cada contagem (constante também previamente conhecida, de acordo com as configurações de frequência de operação dos temporizadores).

4.4. Testes sobre motores

Após a conclusão da etapa de codificação dos dois módulos, iniciou-se uma sequência de testes sobre os motores apresentados no capítulo 3. Os testes realizados podem ser classificados em 4 tipos, sendo que nem todos os tipos de testes foram realizados sobre todos os motores. Os tipos são:

- teste de comparação da velocidade de rotação;
- teste de presença de ruído;
- teste de mudança de carga;
- teste de mudança de frequência com o inversor de frequência.

Os dois primeiros tipos podem ser considerados testes de precisão, pois tem bases externas de comparação, que são a leitura da velocidade de rotação pelo tacômetro óptico e o patamar zero de ruído (ausência de ruído), respectivamente. Os outros dois tipos não tem bases externas de comparação, mas

apenas bases internas (comparações entre os diferentes resultados, obtidos através das mudanças de parâmetros dentro de cada tipo de teste).

O teste de comparação da velocidade de rotação não tem o objetivo de analisar o comportamento dos motores apenas, mas também de analisar o correto funcionamento do sistema de aquisição e processamento. Sob este ponto de vista os motores em operação foram utilizados como ferramentas para testar o sistema desenvolvido, e não o contrário. A base para esta inversão está no princípio de que existe uma componente no espectro de vibração do motor cujo valor de frequência é igual à sua frequência de rotação. Mesmo que esta componente não seja predominante, é esperado que esteja presente quando o motor entrar em regime. Assim, comparando as frequências apresentadas pelo tacômetro óptico com as frequências das componentes do espectro gerado relativas à velocidade de rotação, seria possível inclusive averiguar a precisão da resposta do sistema.

O teste de presença de ruído, de maneira semelhante, visa estudar o sinal vibratório presente no ambiente de testes, mas com os motores desligados. A importância deste teste é conhecer a influência da interferência do ambiente sobre o objeto principal de teste, o motor em operação. Assim, apenas os dois tipos restantes são voltados para a análise direta das condições de operação dos motores.

É importante ressaltar que não foi incorporada ao sistema nenhuma lógica de análise, mas apenas as tarefas de realizar a conversão e a apresentação do sinal de vibração, nos domínios do tempo e da frequência. Assim, todas as análises seriam realizadas externamente pelos padrões encontrados visualmente na janela gráfica e nas tabelas numéricas de valores da saída.

Outra limitação está na visualização das imagens dos espectros gerados no eixo Z. Essa dificuldade é causada pelo elevado nível DC (frequência zero) presente neste eixo, causado pelo módulo da aceleração da gravidade. Salvo quando for notificado o contrário, não serão apresentadas as imagens dos espectros deste eixo.

Os testes realizados sobre cada motor, discriminados por seus tipos, seguem nas seções adiante.

4.4.1. Testes sobre o motor DC de 12V

O motor DC de 12V tem a vantagem de alcançar maiores velocidades de rotação, se comparado aos outros utilizados, tornando-o ideal para o teste de comparação de velocidade. Além desta categoria também foram realizados testes de presença de ruído.

- Testes de comparação da velocidade de rotação:

Para este motor foram realizadas comparações de 4 velocidades de rotação diferentes, iguais a 1156rpm, 2995rpm, 3460rpm e 3641rpm, de acordo com as leituras apresentadas pelo tacômetro óptico. Estes valores compreendem uma faixa prática para a análise, entre a velocidade máxima alcançada pelo motor e a velocidade limite, na qual o nível de vibração torna-se muito baixo para ser visualizado.

As imagens dos espectros dos eixos X e Y para cada velocidade de rotação são apresentadas adiante. Para a velocidade de 1156rpm são apresentados os espectros dos eixos X e Y na Fig. 4.1 e na Fig. 4.2, respectivamente. Para a velocidade de 2995rpm são apresentados os espectros dos eixos X e Y na Fig. 4.3 e na Fig. 4.4, respectivamente. Para a velocidade de 3460rpm são apresentados os espectros dos eixos X e Y na Fig. 4.5 e na Fig. 4.6, respectivamente. Para a velocidade de 3641rpm são apresentados os espectros dos eixos X e Y na Fig. 4.7 e na Fig. 4.8, respectivamente.

As respectivas tabelas com os principais valores numéricos de saída são apresentadas na seção referente ao motor DC de 12V, no Apêndice B.

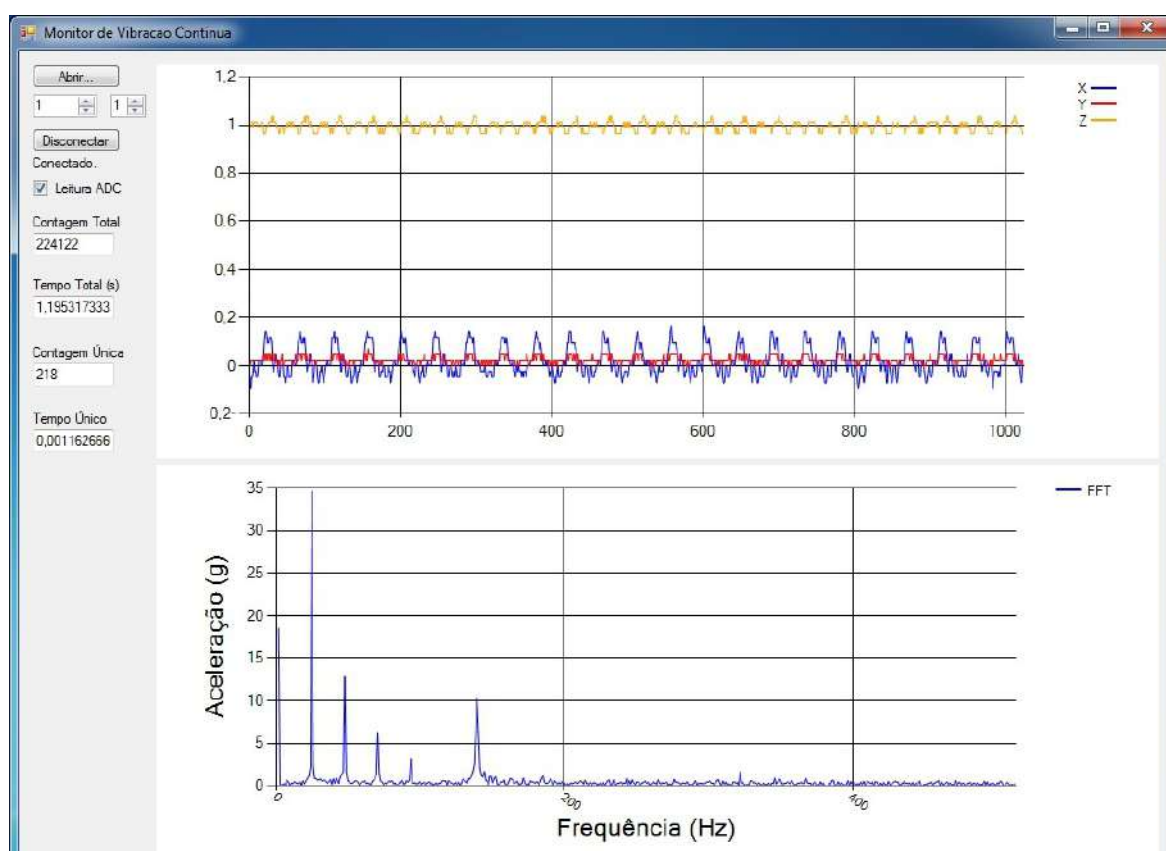


Figura 4.1: Espectro do eixo X para o motor DC de 12V à velocidade de 1156rpm.

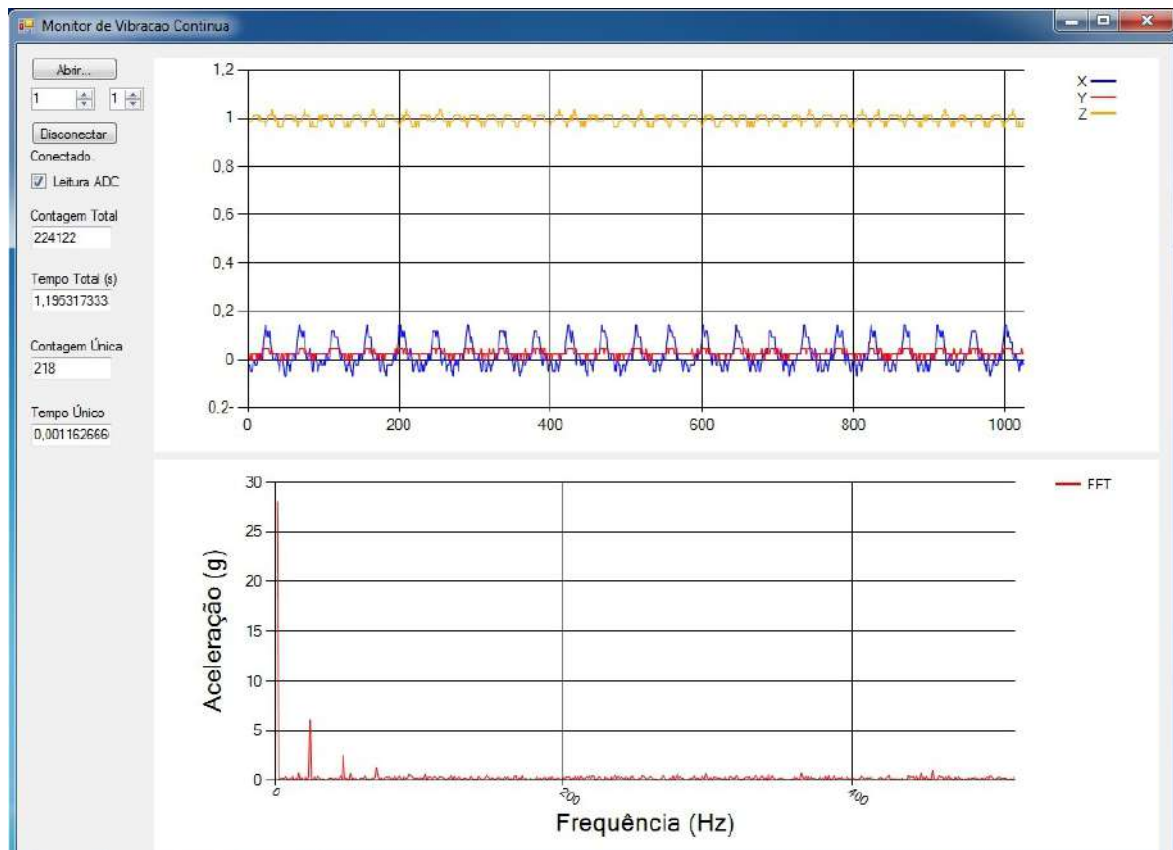


Figura 4.2: Espectro do eixo Y para o motor DC de 12V à velocidade de 1156rpm.

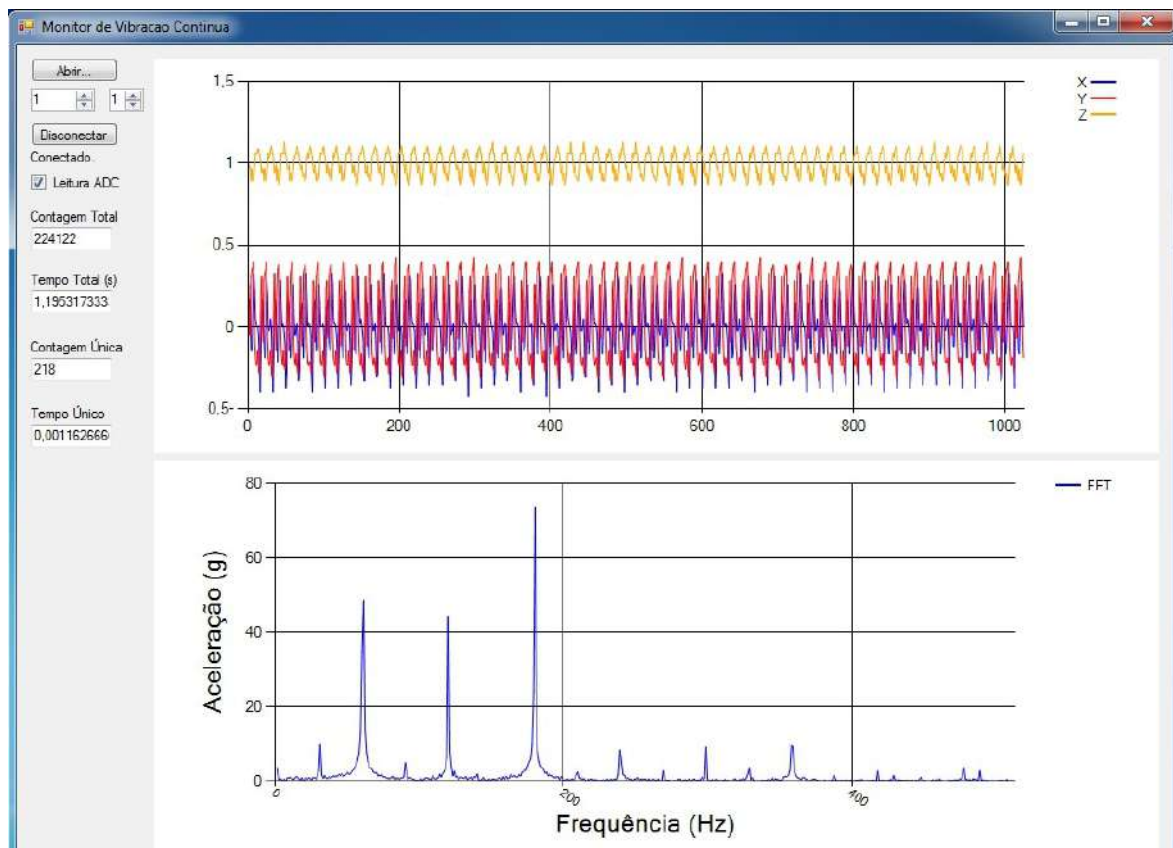


Figura 4.3: Espectro do eixo X para o motor DC de 12V à velocidade de 2995rpm.

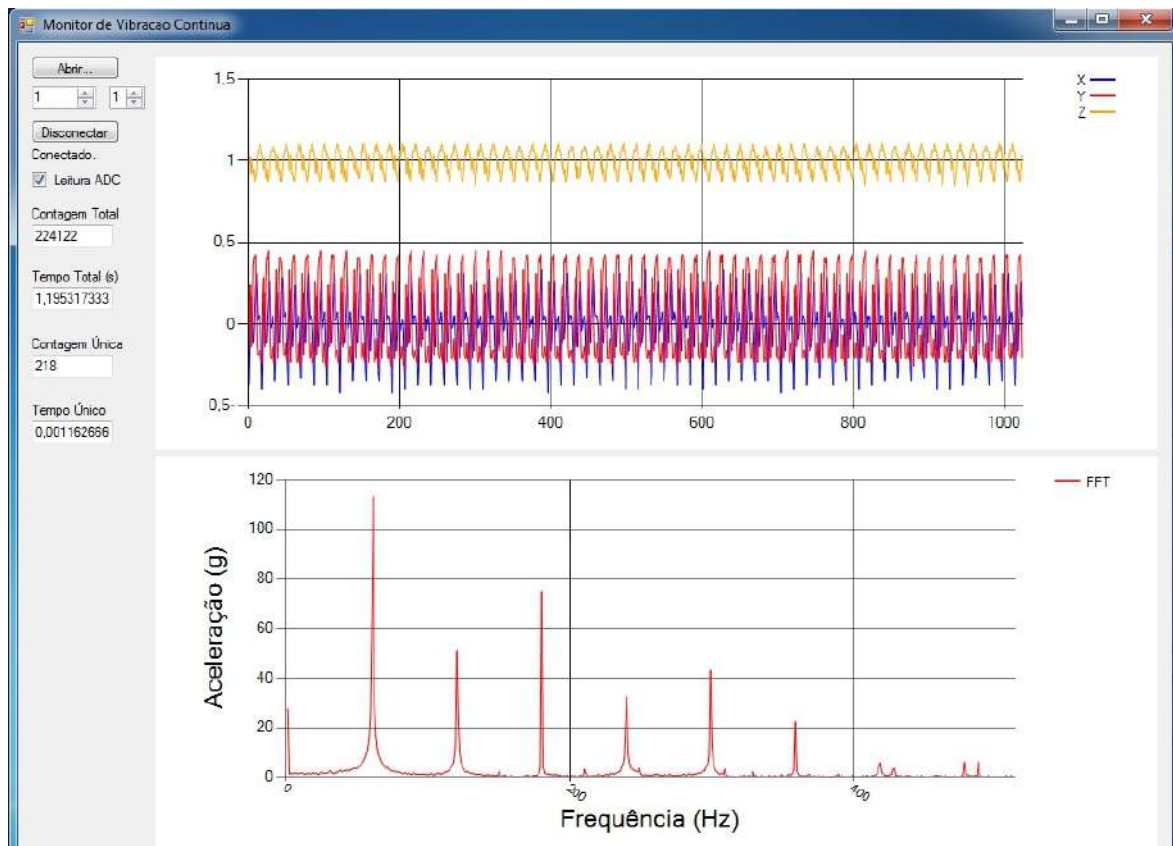


Figura 4.4: Espectro do eixo Y para o motor DC de 12V à velocidade de 2995rpm.

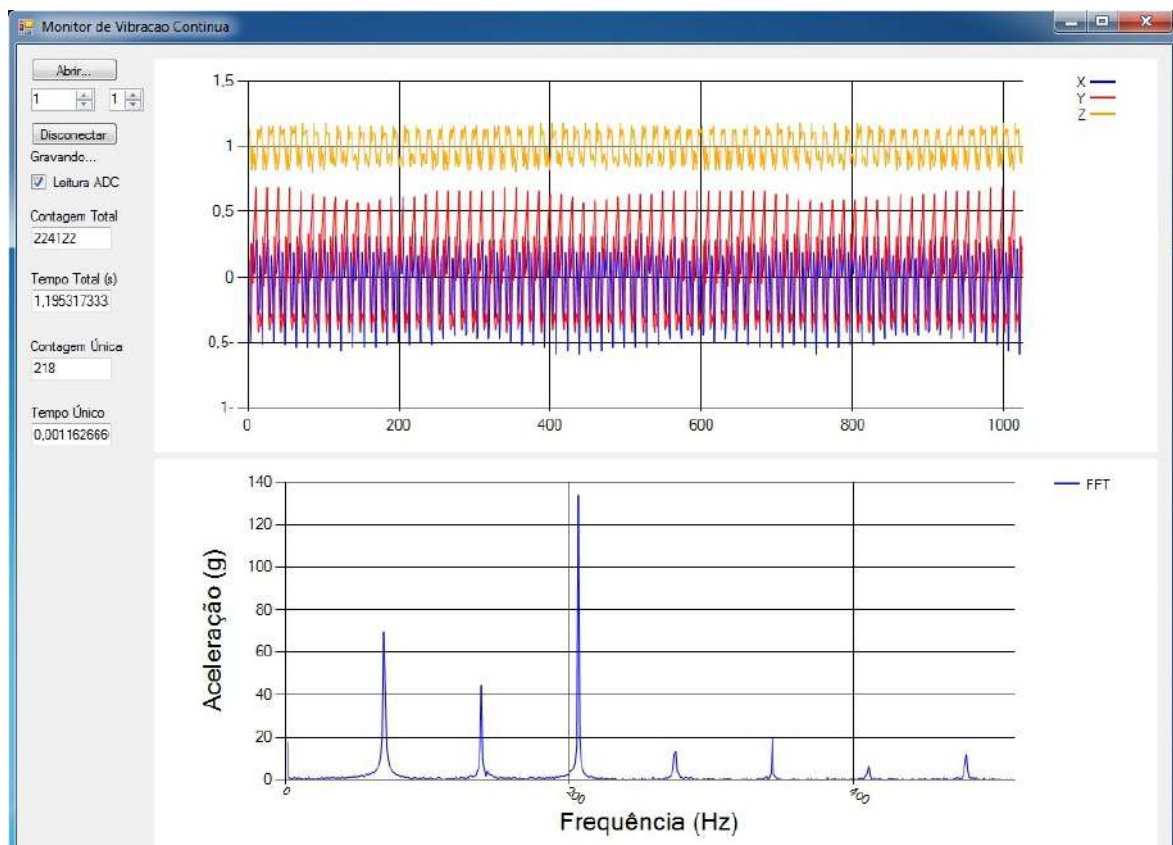


Figura 4.5: Espectro do eixo X para o motor DC de 12V à velocidade de 3460rpm.

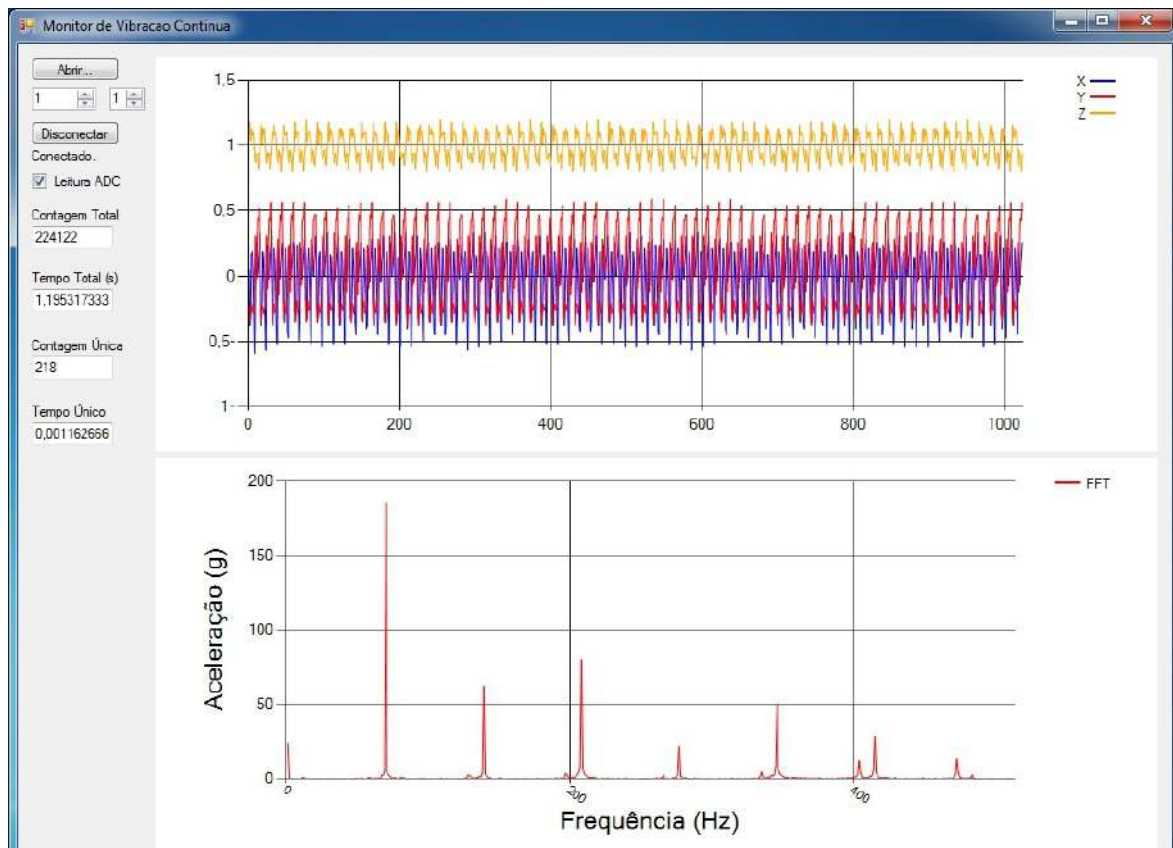


Figura 4.6: Espectro do eixo Y para o motor DC de 12V à velocidade de 3460rpm.

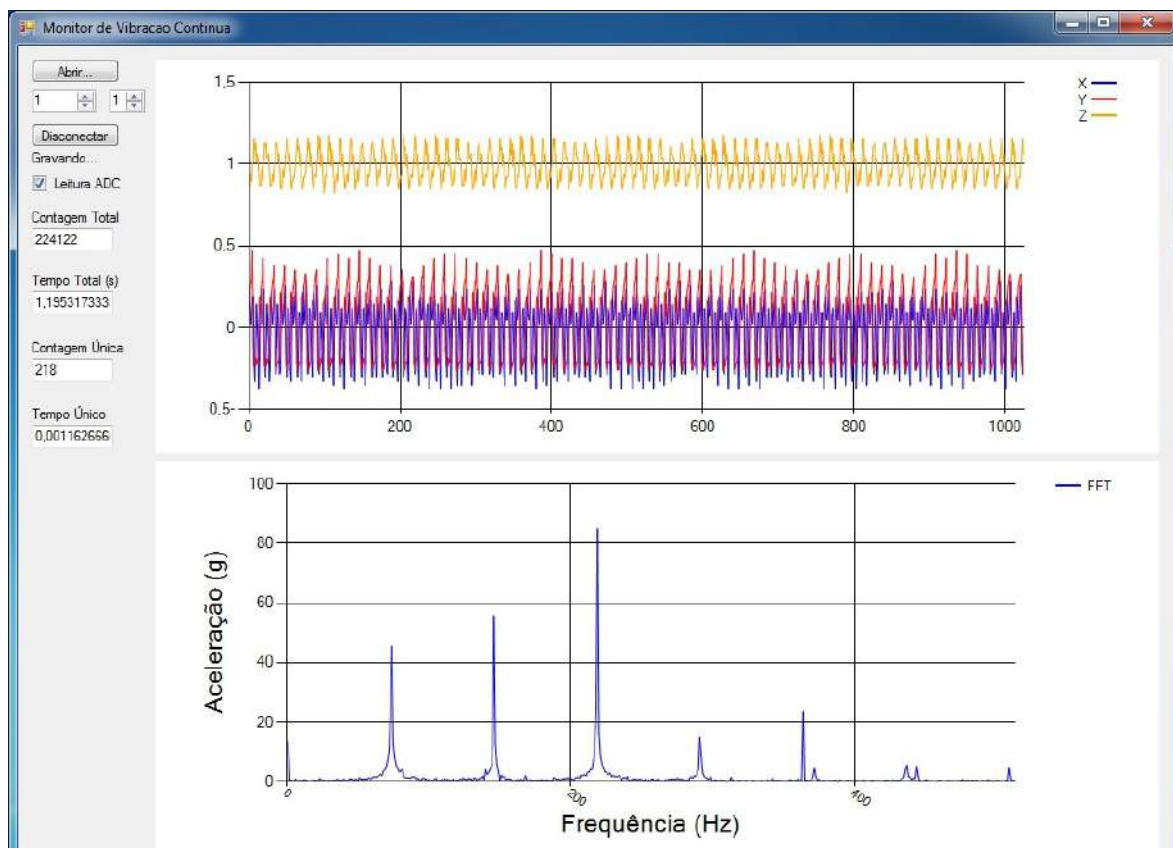


Figura 4.7: Espectro do eixo X para o motor DC de 12V à velocidade de 3641rpm.

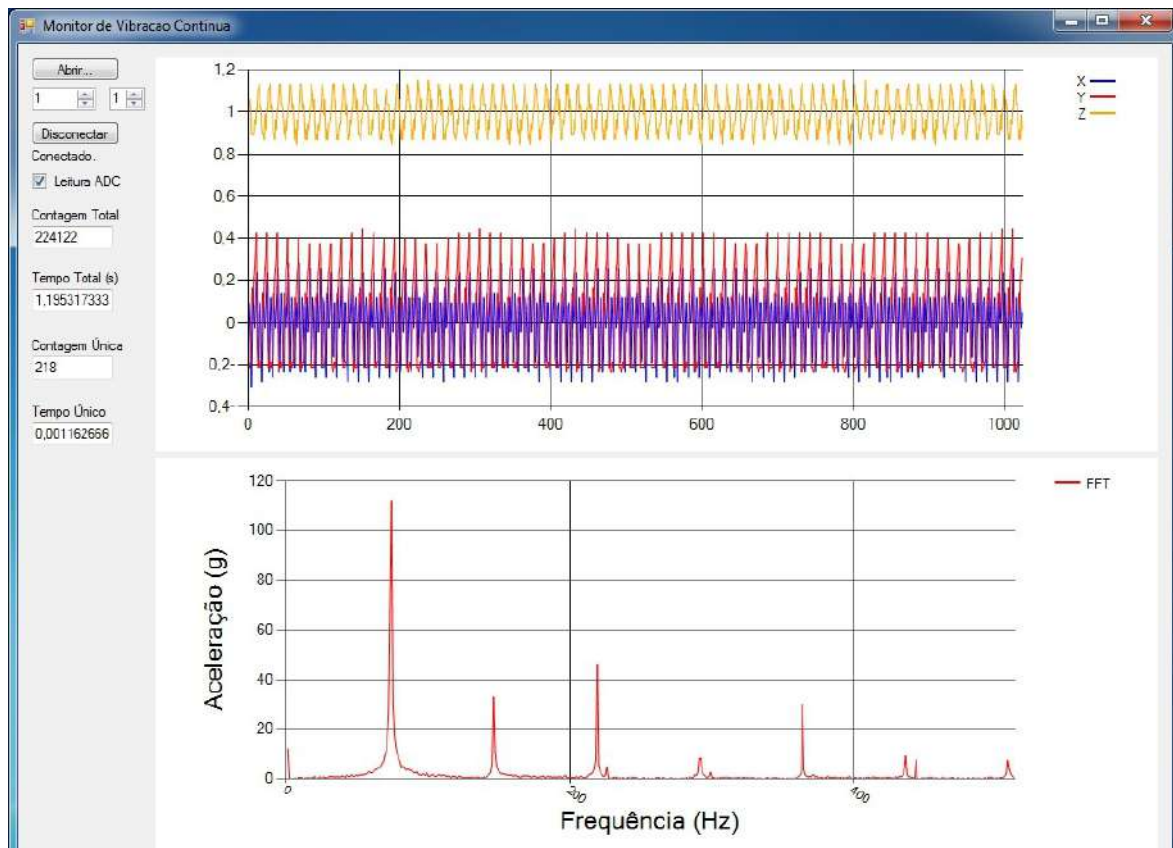


Figura 4.8: Espectro do eixo Y para o motor DC de 12V à velocidade de 3641rpm.

A partir das imagens apresentadas é possível notar que, com o aumento da velocidade, ocorre a diminuição do número de harmônicas que podem ser visualizadas. Também é possível notar que, para a velocidade de 1156rpm, existem menos harmônicas visíveis, graças à baixa amplitude do nível de vibração. Assim, apenas as harmônicas principais são suficientemente expressivas para serem visualizadas.

Com a gradação de 0,8399Hz por ponto do espectro, era esperado que os picos das componentes de velocidade de 1156rpm, 2995rpm, 3460rpm e 3641rpm (equivalentes em Hertz a 19,2666Hz, 49,9166Hz, 57,6667Hz e 60,6833Hz, respectivamente) fossem encontrados em 22,9392, 59,4317, 68,6590 e 72,2507, respectivamente. As componentes harmônicas mais evidentes seriam esperadas nos respectivos múltiplos desses pontos.

Para uma melhor visualização dos resultados, segue adiante a Tab. 4.3 com os valores esperados e os valores obtidos para as 4 velocidades testadas. Os valores esperados são baseados nos valores de velocidade, obtidos pelas leituras do tacômetro digital, enquanto os valores obtidos estão nas tabelas referentes ao motor DC de 12V no Apêndice B.

Tabela 4.3: Valores esperados e obtidos das comparações de velocidade do motor DC de 12V.

Valores para 1156rpm		Valores para 2995rpm		Valores para 3460rpm		Valores para 3641rpm	
Esperados	Obtidos	Esperados	Obtidos	Esperados	Obtidos	Esperados	Obtidos
22,9392	23	59,4317	60	68,6590	69	72,2507	73
45,8784	46	118,8634	119	137,3179	137	144,5013	145
68,8177	69	178,2950	179	205,9769	206	216,7520	218
91,7569	92	237,7267	238	274,6359	275	289,0027	290
137,6354	138	297,1584	298	343,2948	343	361,2533	363
-	-	356,5901	358	411,9538	412	433,5040	436
-	-	416,0217	417	480,6128	480	505,7546	508
-	-	475,4534	477	-	-	-	-

É possível notar que a diferença máxima entre valores esperados e obtidos é inferior a meia unidade (0,42Hz) para a velocidade de 1156rpm, inferior a 1 unidade (0,84Hz) para 3460rpm, inferior a 2 unidades (1,68Hz) para 2995rpm e inferior a 2,5 unidades (2,10Hz) para 3641rpm. A Tab. 4.4 apresenta os valores de erro absoluto, baseados em unidades de escala do espectro.

Tabela 4.4: Valores de erro absoluto sobre unidades de escala do espectro para cada velocidade.

Erro para 1156rpm	Erro para 2995rpm	Erro para 3460rpm	Erro para 3641rpm
2,18%	1,68%	2,91%	3,46%

É possível notar que, com o avanço das componentes harmônicas, os pontos logo anteriores ganharam maior ênfase relativa (amplitude relativa), indicando que o pico real está entre os 2 pontos consecutivos de maior amplitude. Assim, a diferença real é menor que a aproximação da tabela.

- Testes de presença de ruído:

Foram obtidas leituras em 2 situações, em ambas com o motor desligado e desconectado da fonte de alimentação. Na primeira, a placa de aquisição foi posicionada sobre a bancada de apoio, ao lado do motor, enquanto na segunda a placa foi posicionada sobre o motor. Imagens dos espectros do eixo X para cada situação seguem adiante. Para a situação da placa sobre a bancada é apresentado o espectro do eixo X na Fig. 4.9. Para a situação da placa sobre o motor é apresentado o espectro do eixo X na Fig. 4.10.

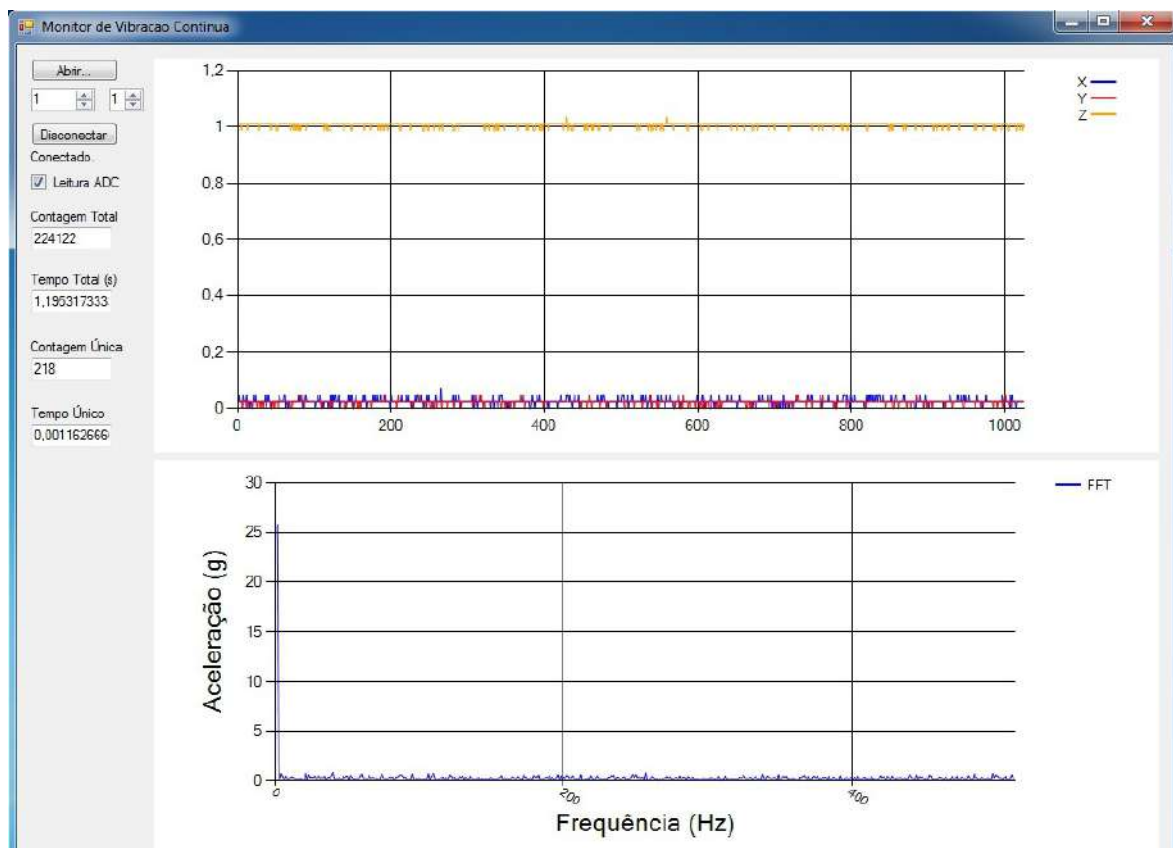


Figura 4.9: Espectro do eixo X para o patamar de ruído retirado sobre a bancada.

Através da Fig. 4.9 é possível notar que o nível real de ruído é diferente de zero, com amplitude baixa e uniforme para todas as frequências, indicando que não há interferência externa significativa.

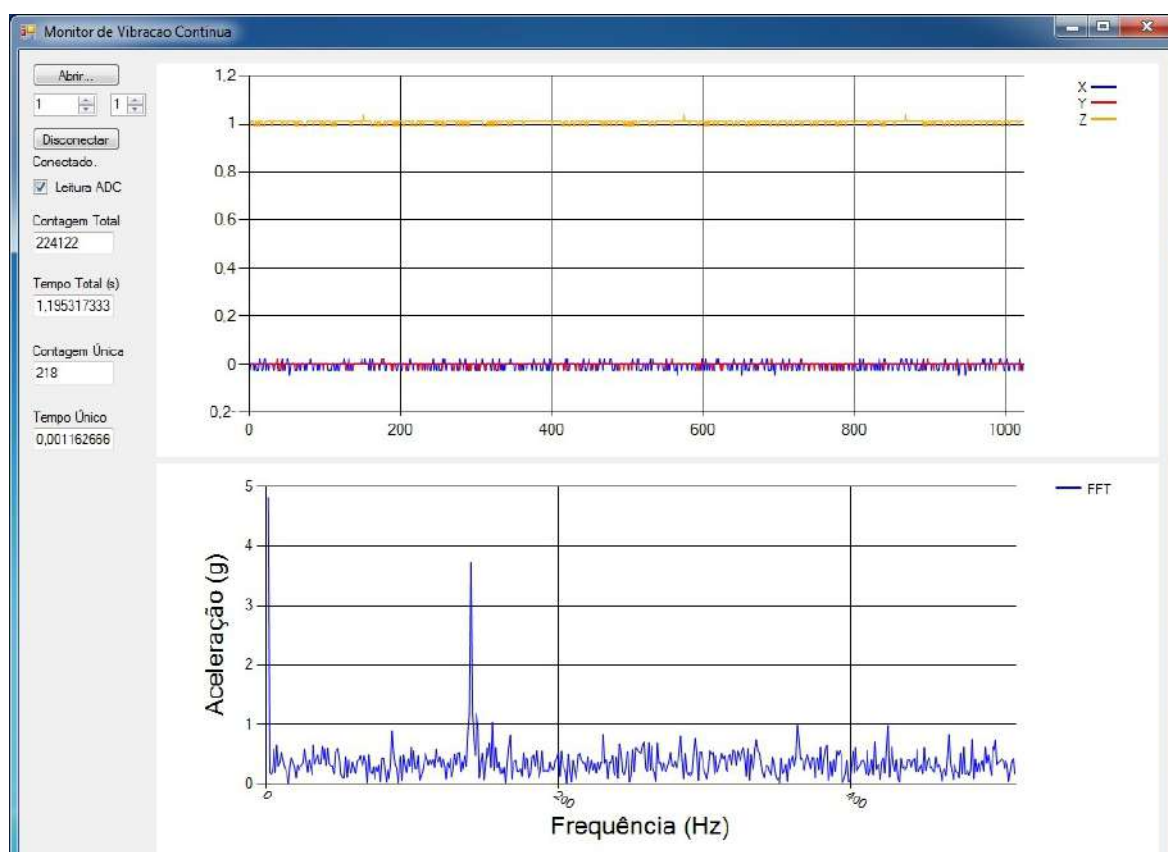


Figura 4.10: Espectro do eixo X para o patamar de ruído retirado sobre o motor.

Através da Fig. 4.10 é possível notar a presença de uma componente muito superior em comparação às demais. Uma tabela com o valor numérico e a posição desta componente é apresentada na seção referente ao motor DC de 12V, no Apêndice B.

Com a gradação de 0,8399Hz por ponto do espectro, é possível concluir que a componente em destaque é a de 116,7461Hz ou 7005rpm, aproximadamente.

4.4.2. Testes sobre o motor DC de 1700W

Sobre o motor DC de 1700W foram realizados os testes de comparação de velocidade e de mudança de carga. Para as análises foi aproveitada sua característica de velocidade de rotação constante, fixada em 1800rpm pelo controle do *chopper*. Graças ao grande porte deste motor, os níveis de vibração foram também muito mais elevados no eixo Z, permitindo uma visualização mais clara do espectro neste eixo.

Para a realização dos testes a placa foi inserida em uma caixa metálica, para blindagem contra possíveis interferências eletromagnéticas. Ao fim dos testes foi observada que a blindagem não foi eficiente para seu propósito inicial, mas foi útil para a análise de sua interferência sobre os resultados finais (como

seria um teste de ruído).

- Testes de comparação da velocidade de rotação:

Para a realização deste teste foi utilizada apenas uma leitura, com a configuração de carga mínima de 300W. Foram realizadas comparações até a sétima harmônica, número considerado suficiente do total de 13 harmônicas. Seguem adiante as imagens dos espectros dos eixos X, Y e Z na Fig. 4.11, Fig. 4.12 e Fig. 4.13, respectivamente. A respectiva tabela com os principais valores numéricos de saída é apresentada na seção referente ao motor DC de 1700W, no Apêndice B.

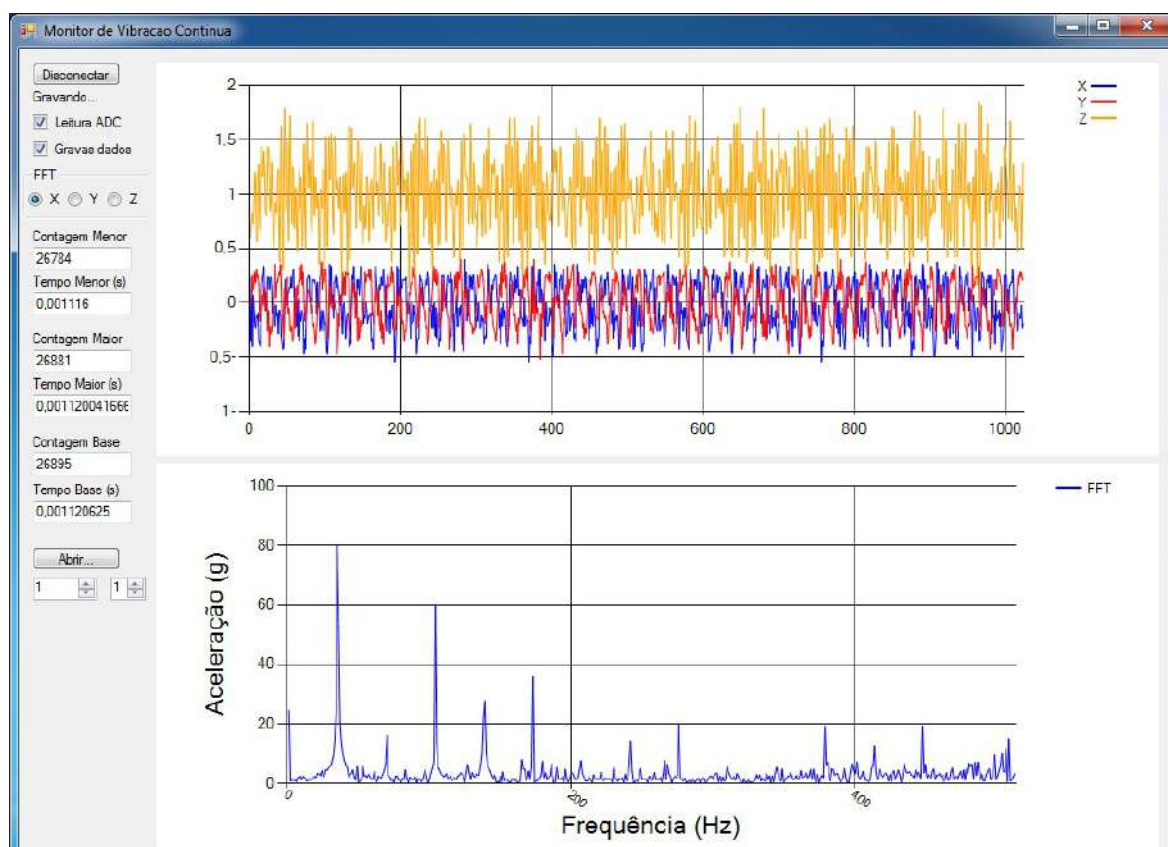


Figura 4.11: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 300W.

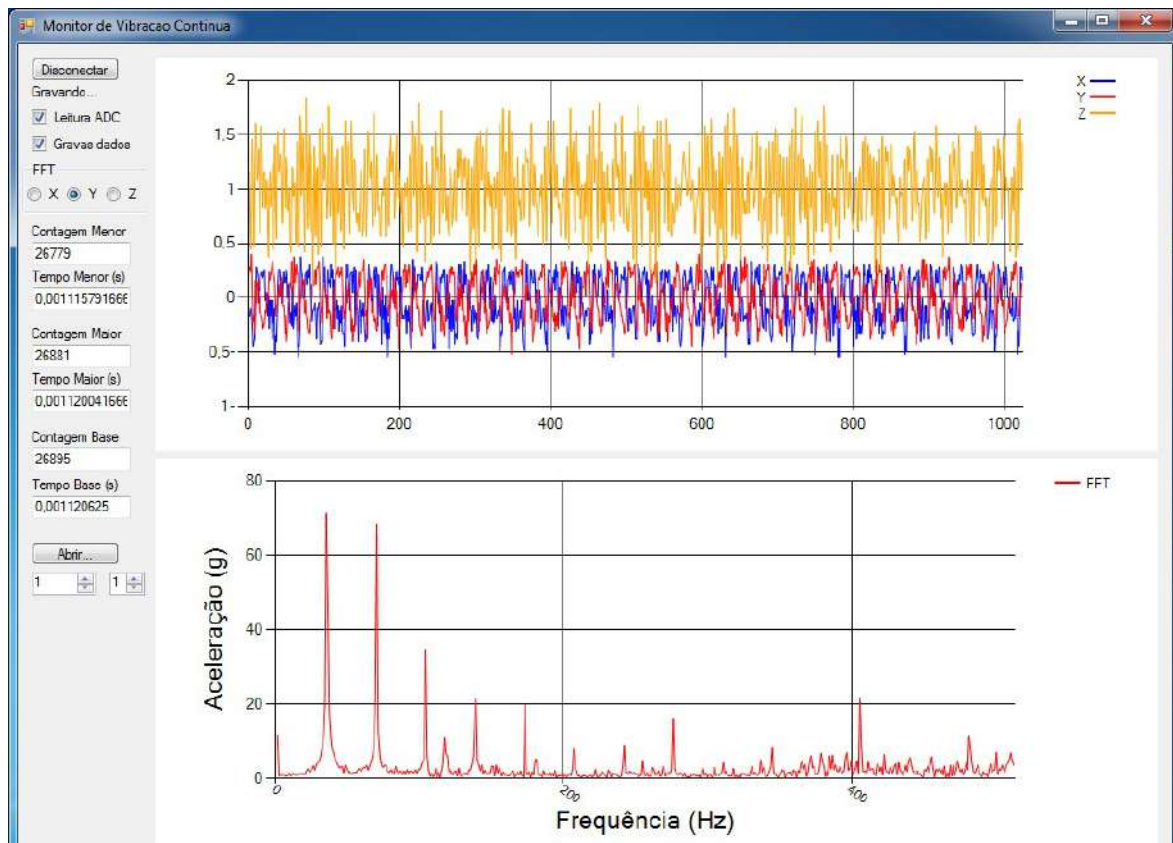


Figura 4.12: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 300W.

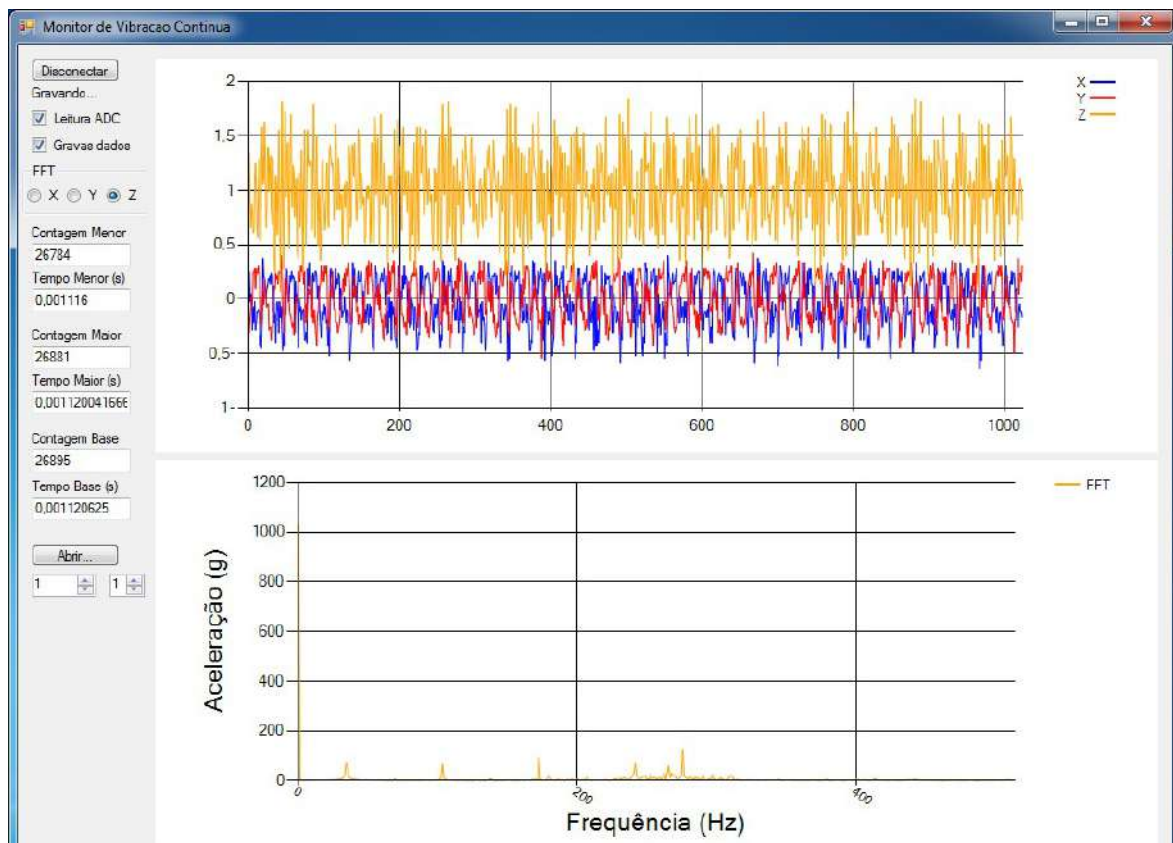


Figura 4.13: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 300W.

Com a gradação de 0,8399Hz por ponto do espectro, era esperado que o pico da componente de velocidade (equivalente em Hertz a 30Hz) fosse encontrado em 35,7185. As componentes harmônicas mais evidentes seriam esperadas nos respectivos múltiplos desse ponto. Para uma melhor visualização dos resultados, segue adiante uma tabela com os valores esperados para a velocidade de 1800rpm e os valores obtidos.

Tabela 4.5: Valores esperados e obtidos das comparações de velocidade do motor DC de 1700W.

Valores esperados	Valores obtidos
35,7185	34
71,4371	69
107,1556	103
142,8742	138
178,5927	172
214,3112	206
250,0298	241
285,7483	275

É possível notar que a diferença entre o valor esperado e o valor encontrado é gradativamente maior. Através dos valores adjacentes é possível notar que o valor real da base está em 34,4 aproximadamente, equivalente à velocidade de rotação de 28,8926Hz (1734rpm). A diferença é de 66rpm para baixo dos 1800rpm esperados, o que representa um erro de 3,67%.

- Testes de mudança de carga:

Para este teste foram usados 5 valores diferentes de carga, de 300W, 600W, 900W, 1200W e 1500W. O primeiro valor de carga é o menor possível, por causa da resistência intrínseca no acoplamento com o motor que aplica o carregamento.

Seguem adiante as imagens dos espectros dos eixos X, Y e Z, respectivamente, para as configurações de carga de 600W, 900W, 1200W e 1500W. Para a configuração de carga de 300W são utilizadas as mesmas imagens e tabela do teste anterior. Para a configuração de carga de 600W são apresentados os espectros dos eixos X, Y e Z na Fig. 4.14, na Fig. 4.15 e na Fig. 4.16, respectivamente. Para a configuração de carga de 900W são apresentados os espectros dos eixo X, Y e Z na Fig. 4.17, na Fig. 4.18 e na Fig. 4.19, respectivamente. Para a configuração de carga de 1200W são apresentados os espectros dos eixo X, Y e Z na

Fig. 4.20, na Fig. 4.21 e na Fig. 4.22, respectivamente. Para a configuração de carga de 1500W são apresentados os espectros dos eixo X, Y e Z na Fig. 4.23, na Fig. 4.24 e na Fig. 4.25, respectivamente.

As respectivas tabelas com os principais valores numéricos de saída são apresentadas na seção referente ao motor DC de 1700W, no Apêndice B.

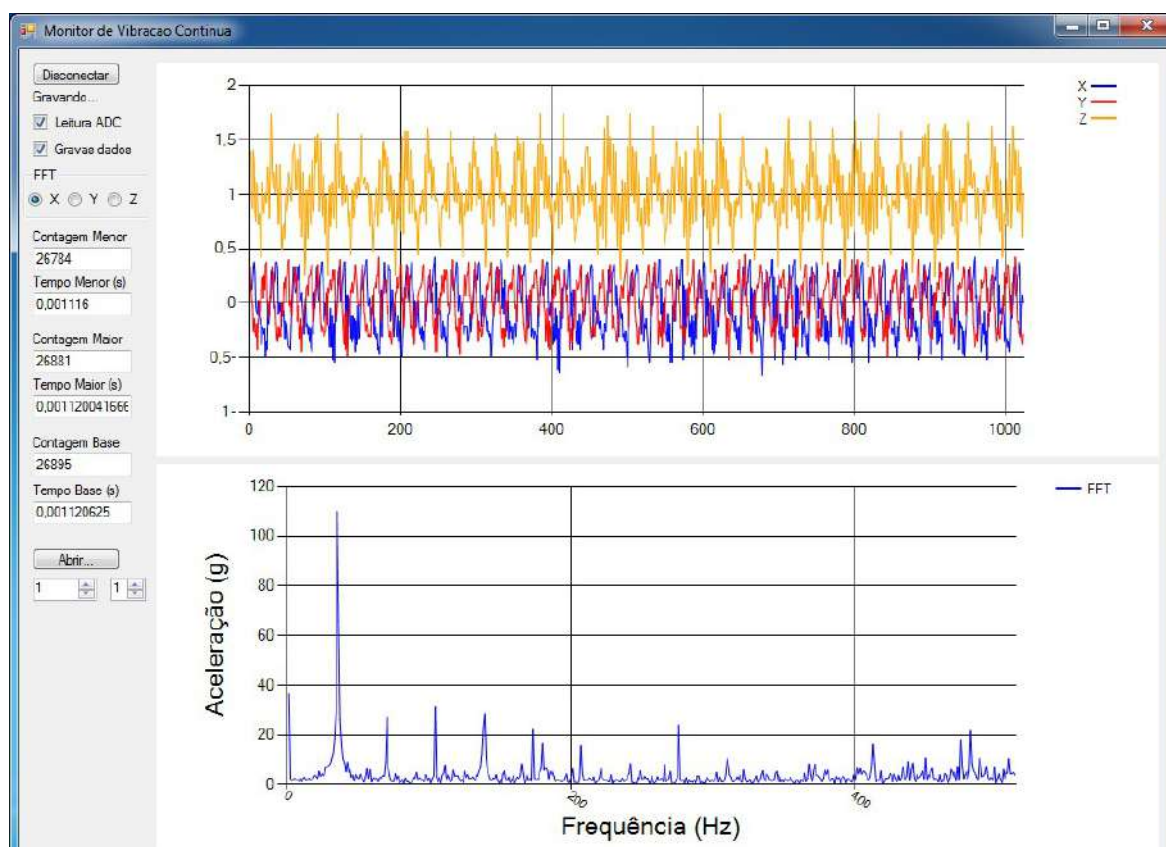


Figura 4.14: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 600W.

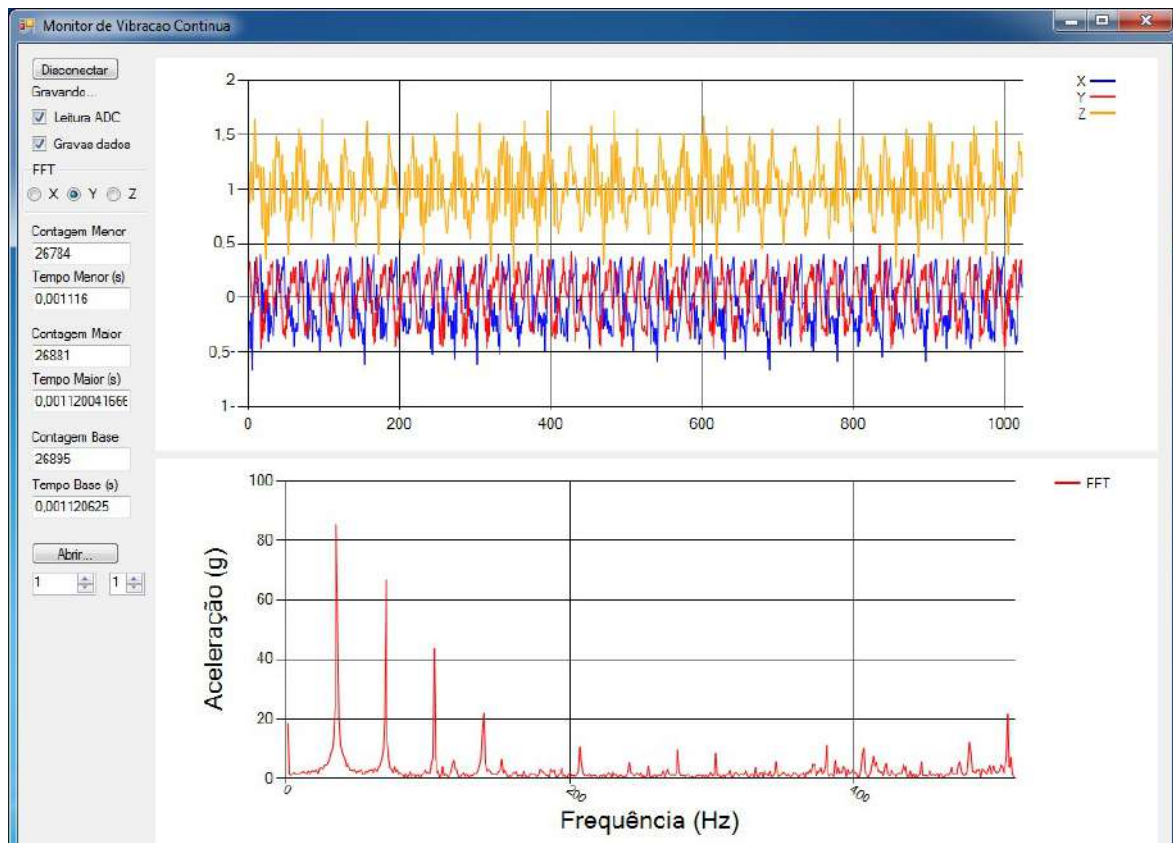


Figura 4.15: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 600W.

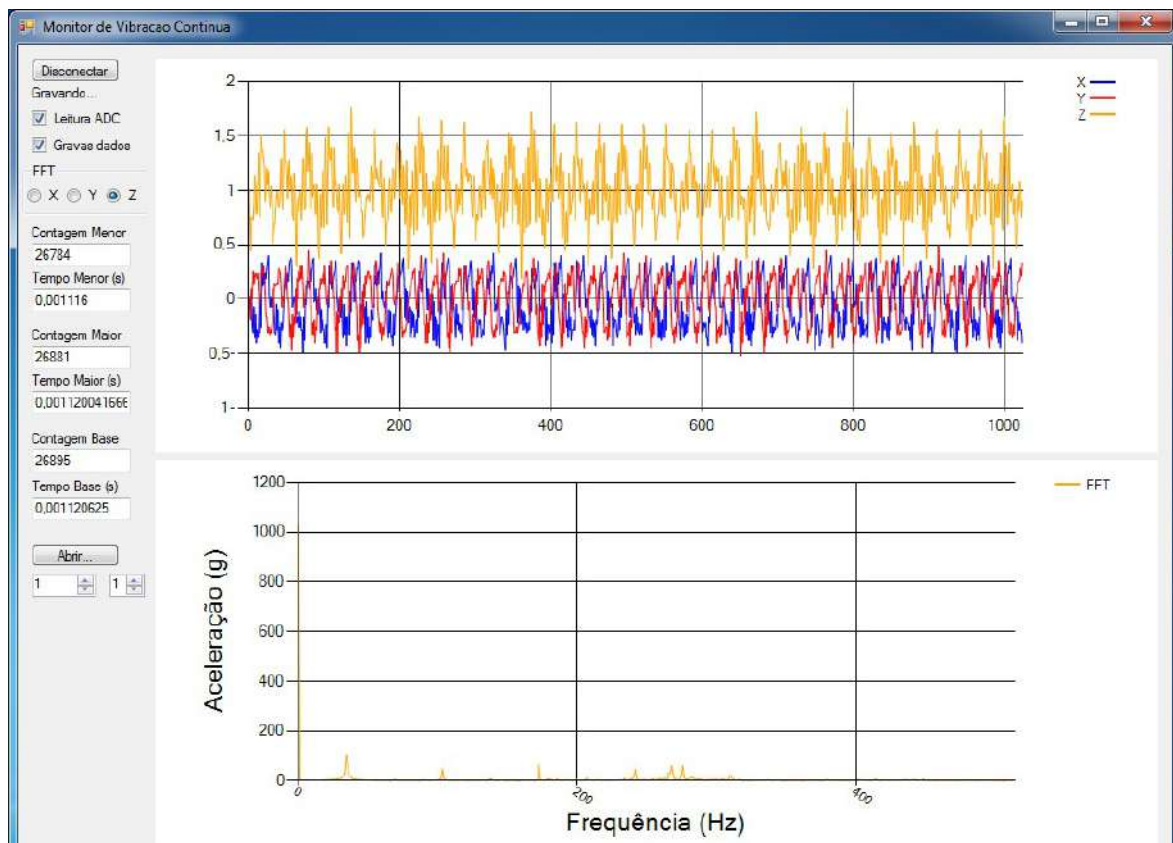


Figura 4.16: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 600W.

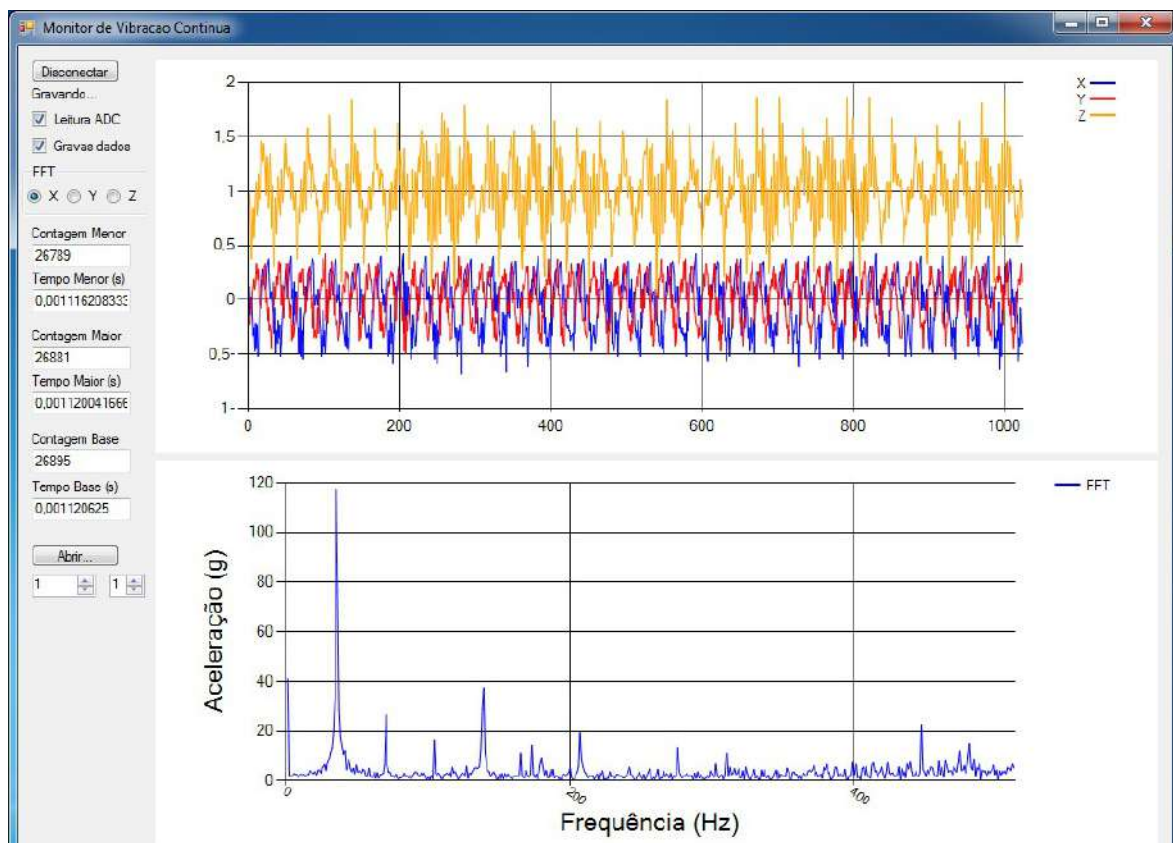


Figura 4.17: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 900W.

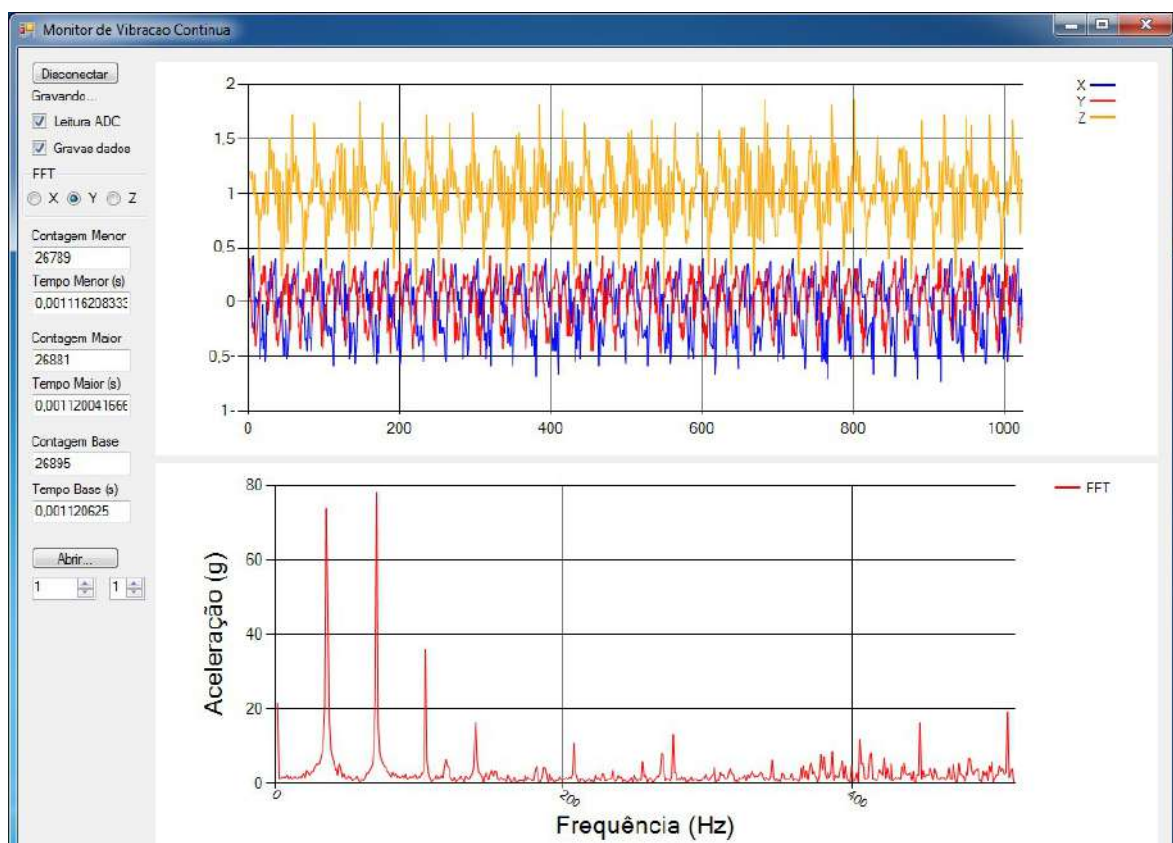


Figura 4.18: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 900W.

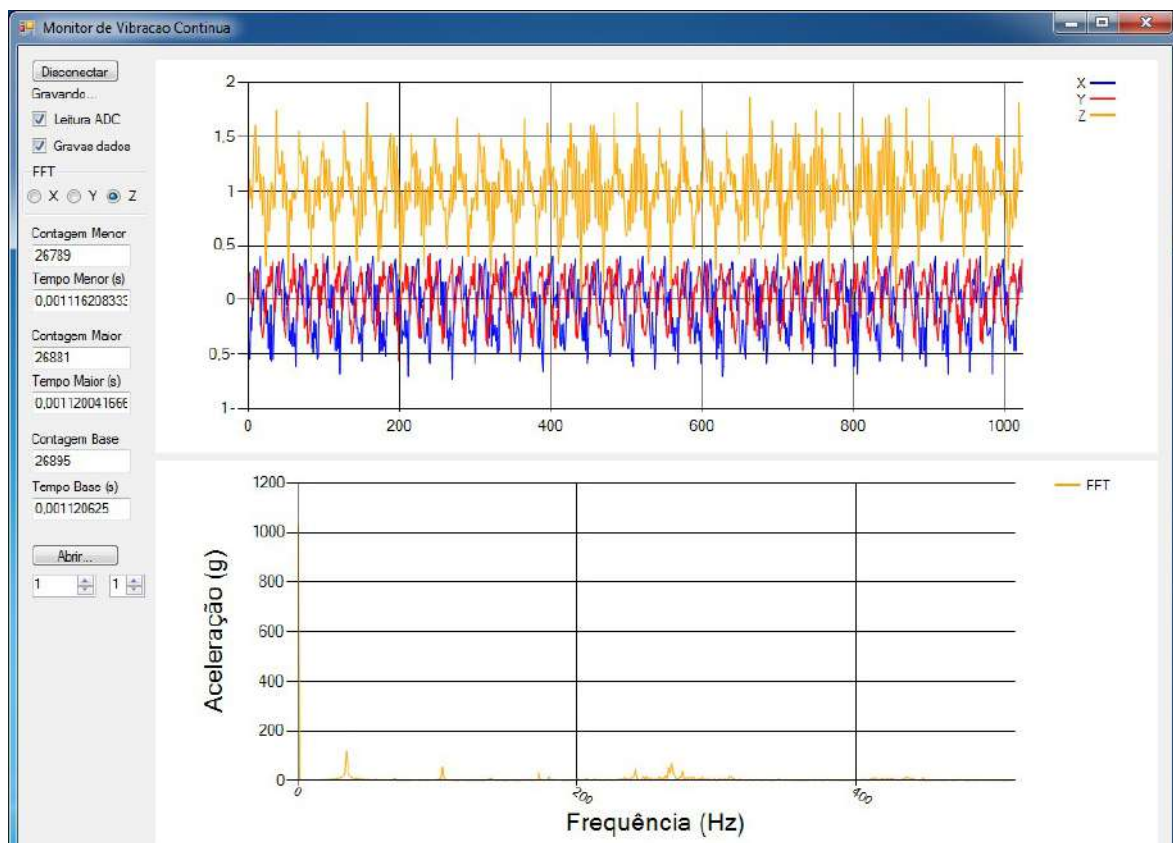


Figura 4.19: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 900W.

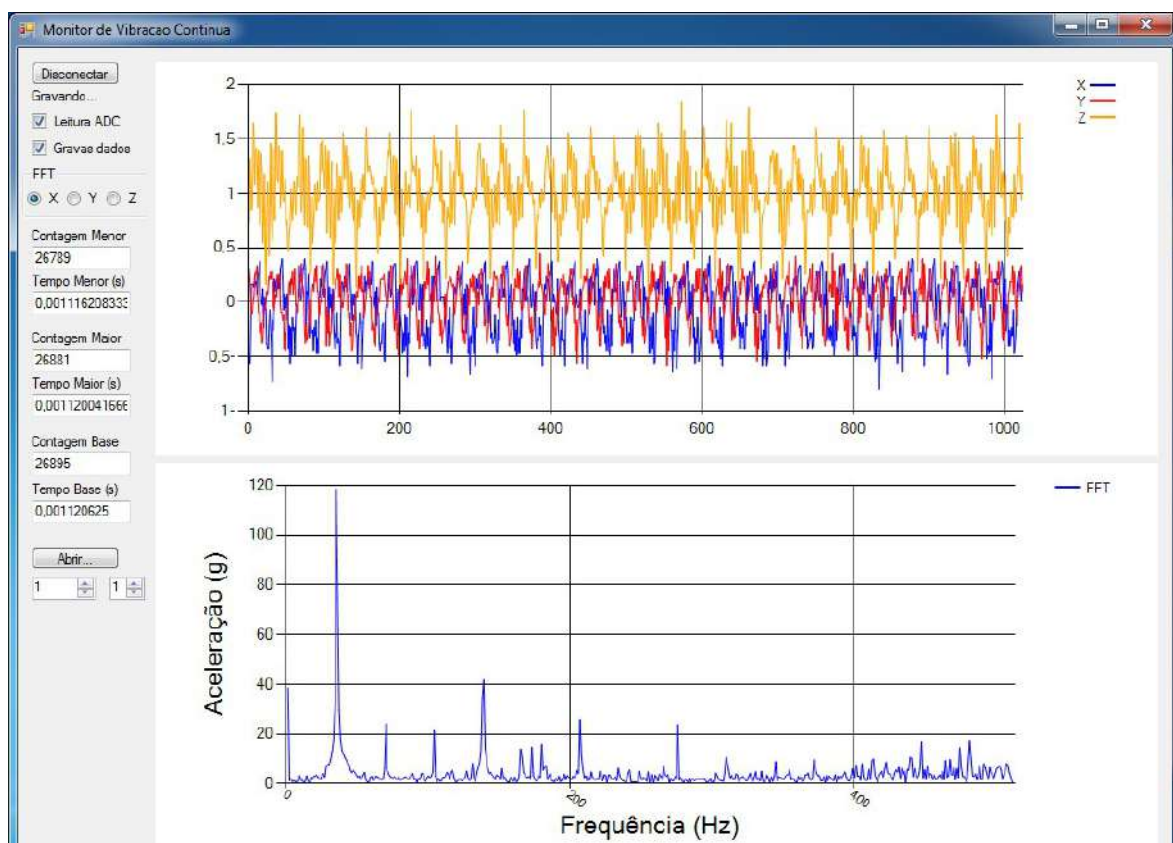


Figura 4.20: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 1200W.

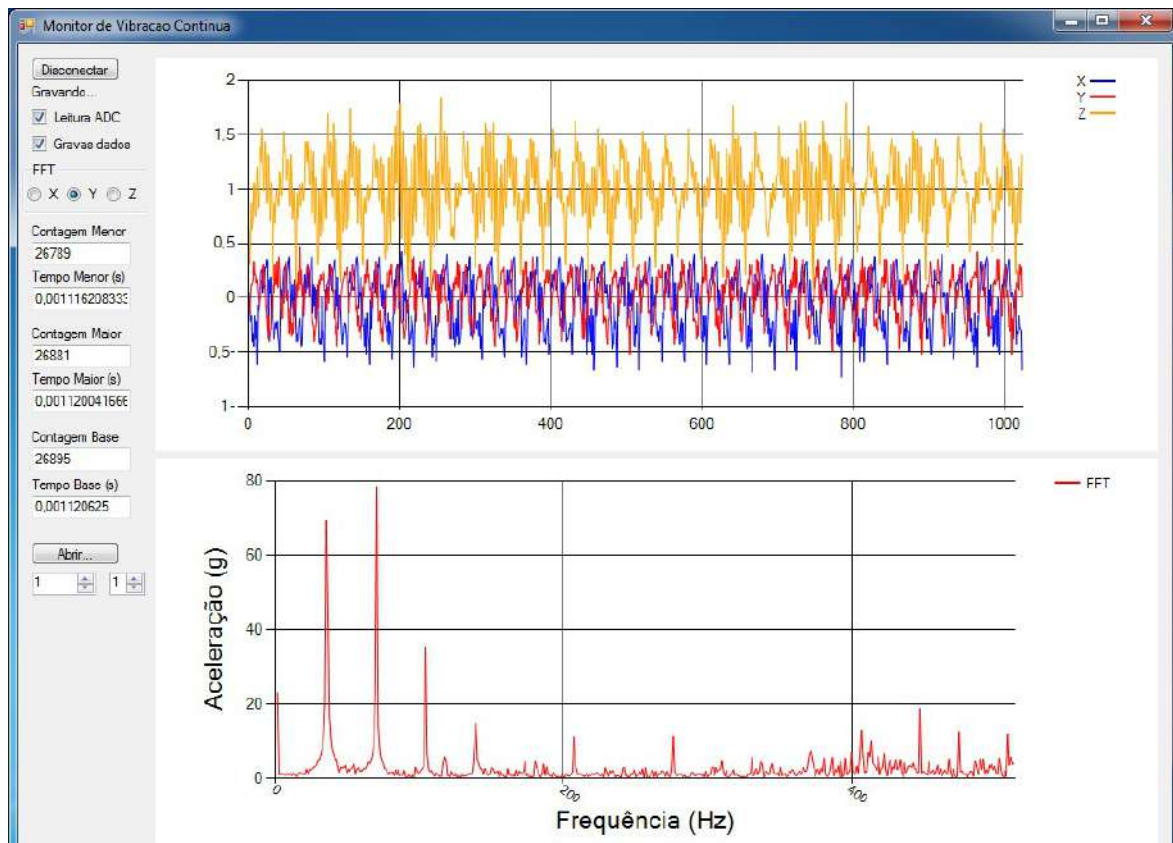


Figura 4.21: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 1200W.

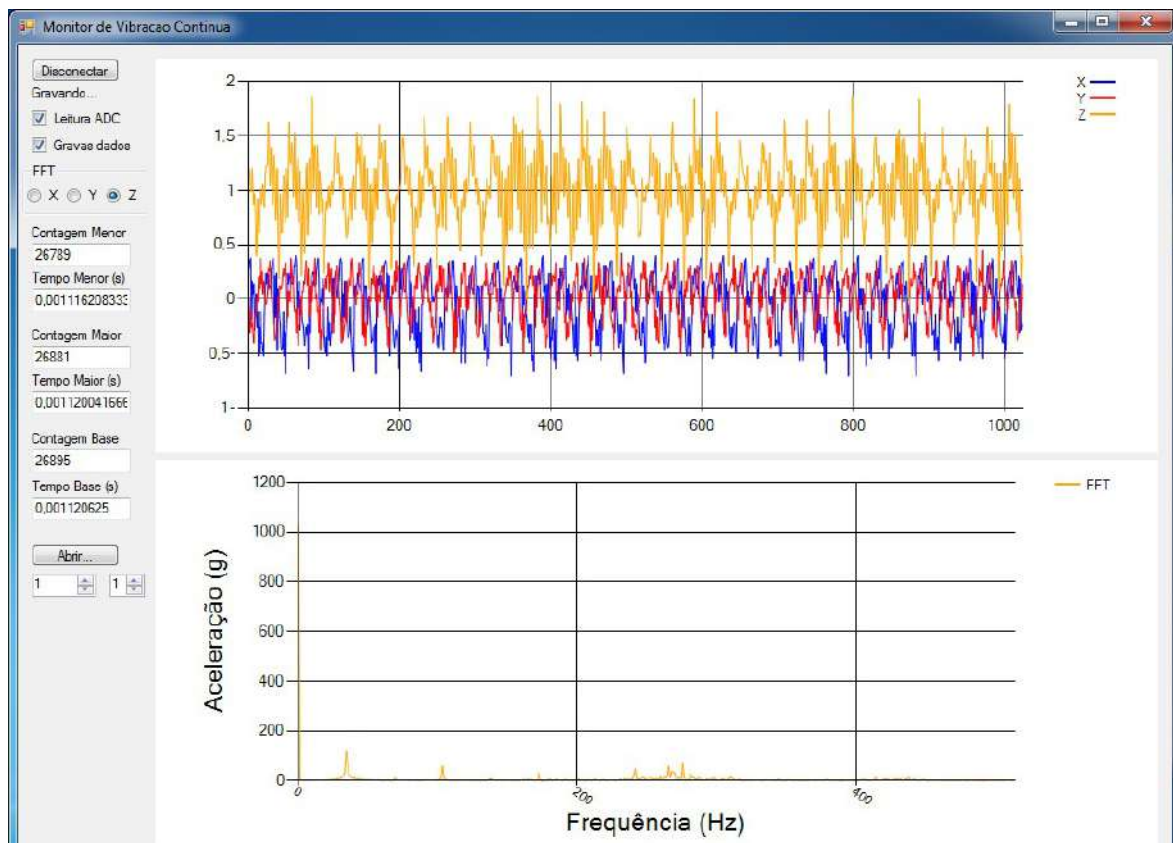


Figura 4.22: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 1200W.

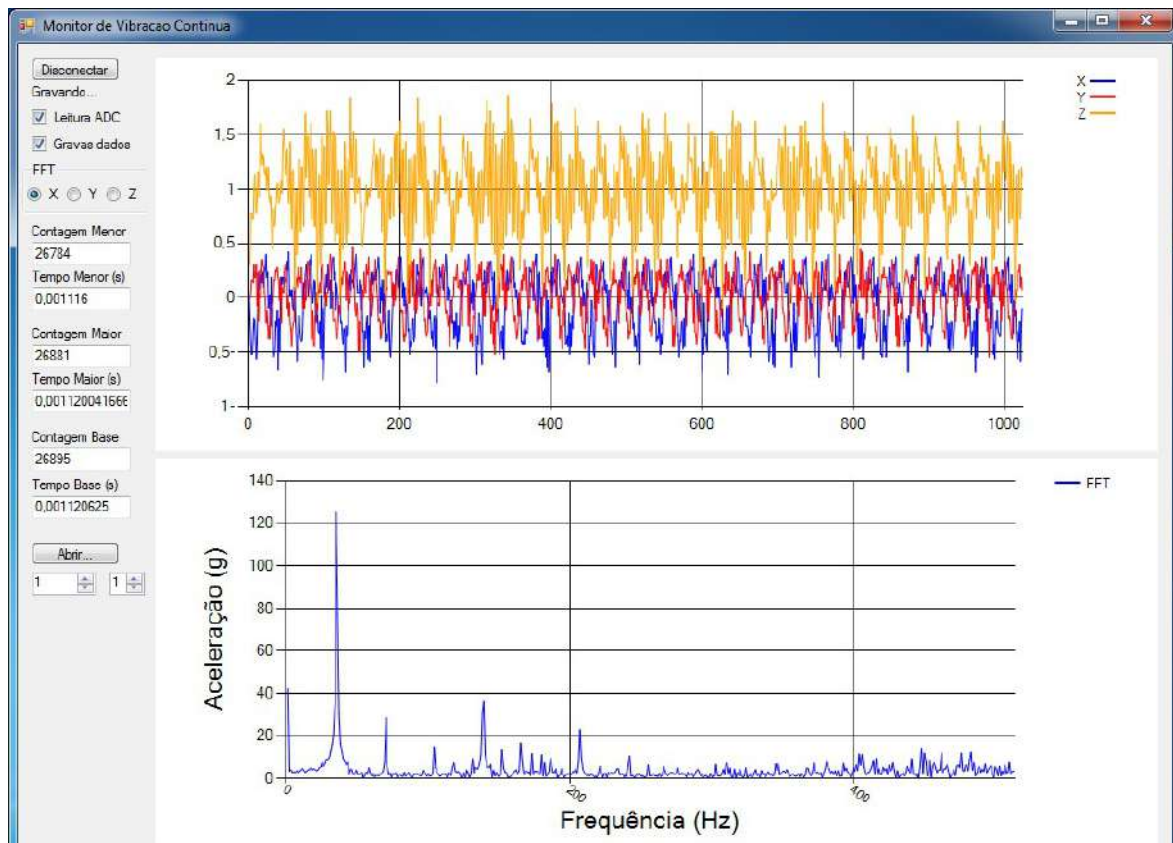


Figura 4.23: Espectro do eixo X para o motor DC de 1700W com carga de 1500W.

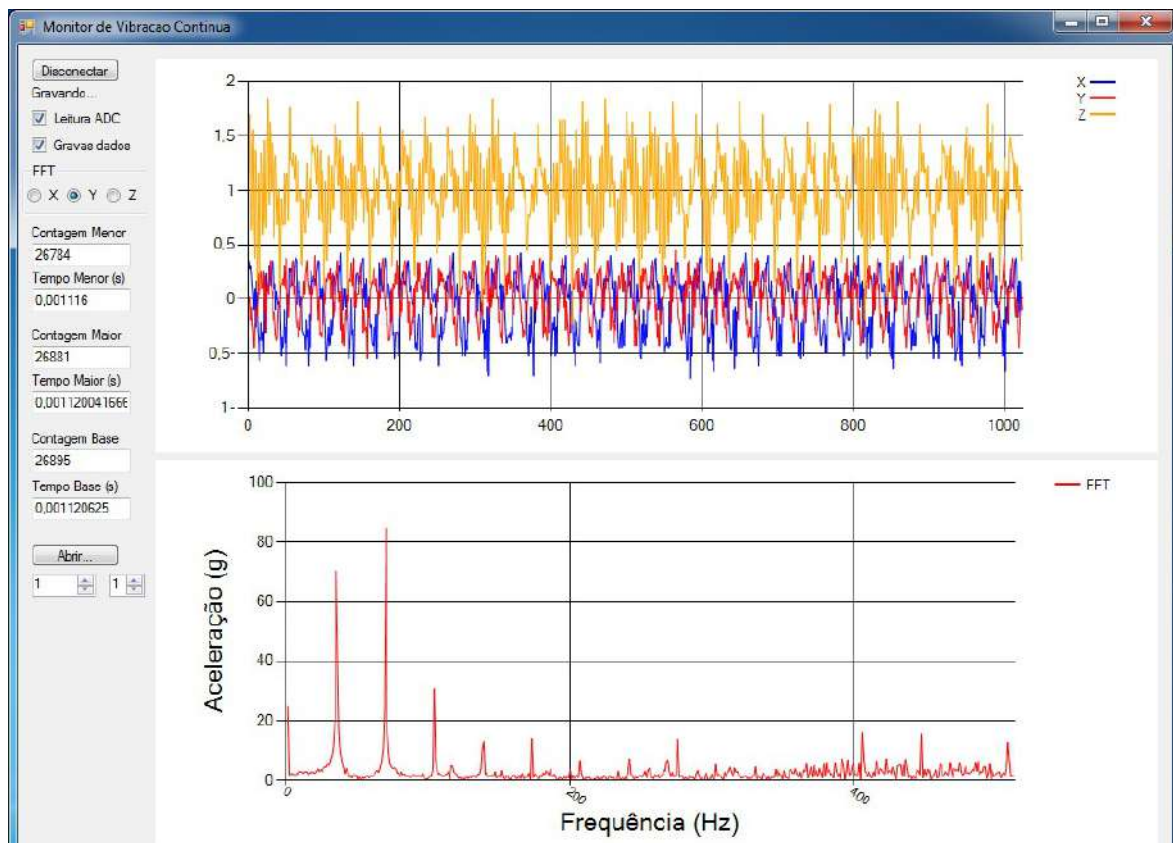


Figura 4.24: Espectro do eixo Y para o motor DC de 1700W com carga de 1500W.

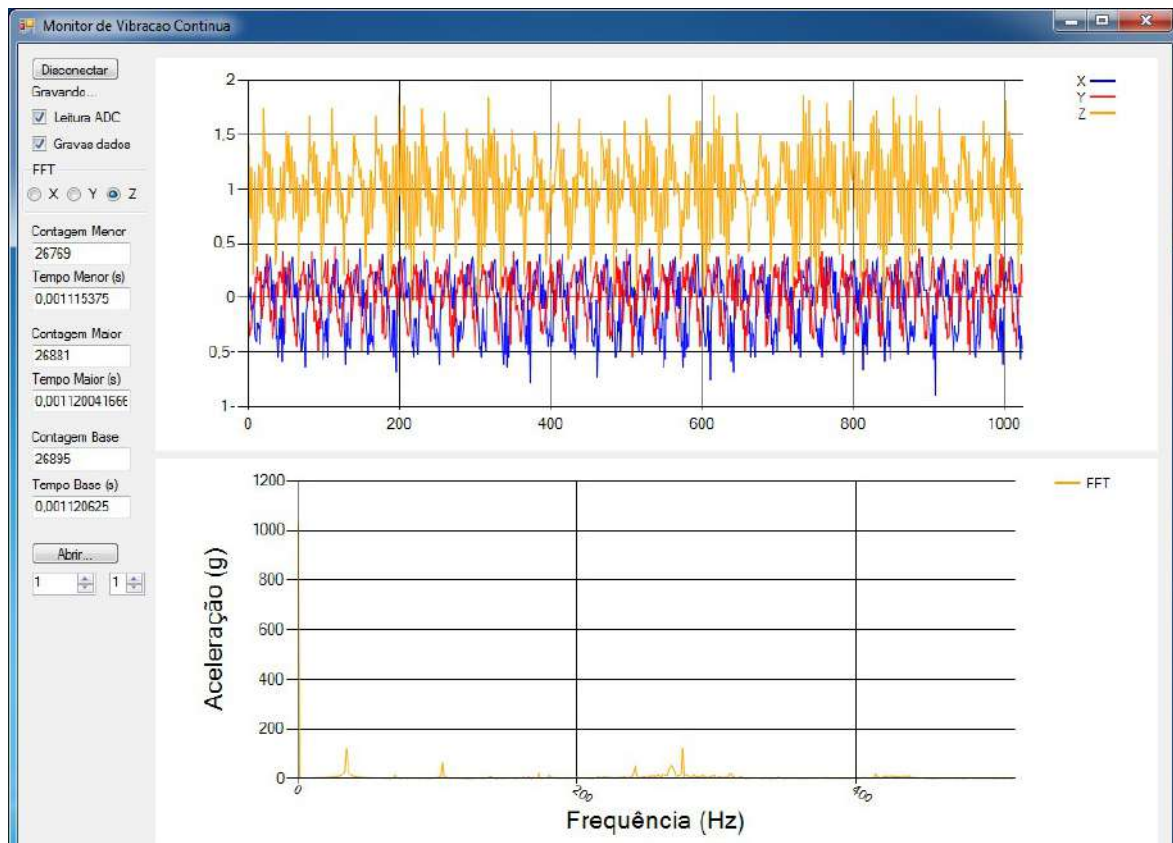


Figura 4.25: Espectro do eixo Z para o motor DC de 1700W com carga de 1500W.

Através da visualização da sequência das ilustrações (do comportamento das componentes nos espectros de mesmo eixo) e dos valores das tabelas (apresentadas na seção referente ao motor DC de 1700W no Apêndice B), principalmente dos espectros do eixo Z, é possível notar que, com o aumento gradual da carga, ocorreu:

1. um gradual aumento do nível da componente fundamental nos eixos X e Z;
2. uma gradual diminuição dos níveis das 2^a, 4^a e 6^a harmônicas nos eixos X e Z;
3. um ganho de ênfase da 1^a harmônica sobre a componente fundamental no eixo Y;
4. a manutenção constante da velocidade (frequência) de rotação, o que é uma característica própria do motor DC.

4.4.3. Testes sobre o motor síncrono

Para o motor síncrono foi realizado apenas o teste de comparação de velocidade, apesar de ter sido considerada a possibilidade da realização de testes de mudança de carga. Foram realizadas tentativas de implementação desta categoria de testes, mas por causa do elevado nível de ruído eletromagnético, causado pelo faiscamento do motor acoplado (que exerce o carregamento do motor síncrono), ocorria o desligamento automático do microprocessador da placa de aquisição. Mesmo com a criação de uma blindagem, ao inserir a placa em uma caixa metálica, não foi possível solucionar esta restrição de funcionamento da placa. Assim, a placa foi retirada da caixa para a realização do teste.

- Testes de comparação da velocidade de rotação:

Para o motor síncrono foi realizada apenas 1 comparação de velocidade, uma vez que, graças ao sincronismo com a rede de alimentação, sua única velocidade de rotação é de 1800rpm. Seguem adiante imagens dos espectros dos eixos X e Y na Fig. 4.26 e na Fig. 4.27, respectivamente. A tabela com os valores numéricos de saída mais relevantes é apresentada na seção referente ao motor síncrono, no Apêndice B.

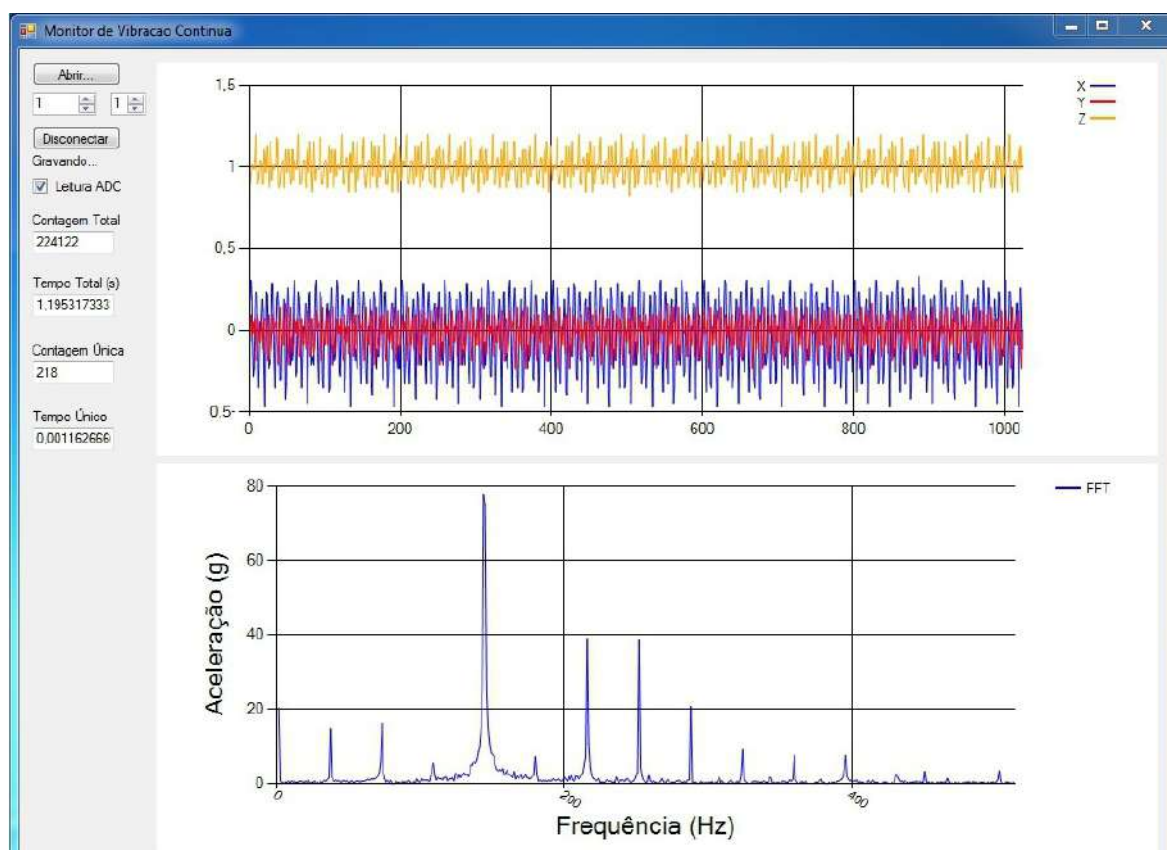


Figura 4.26: Espectro do eixo X para o motor síncrono à velocidade de 1800rpm.

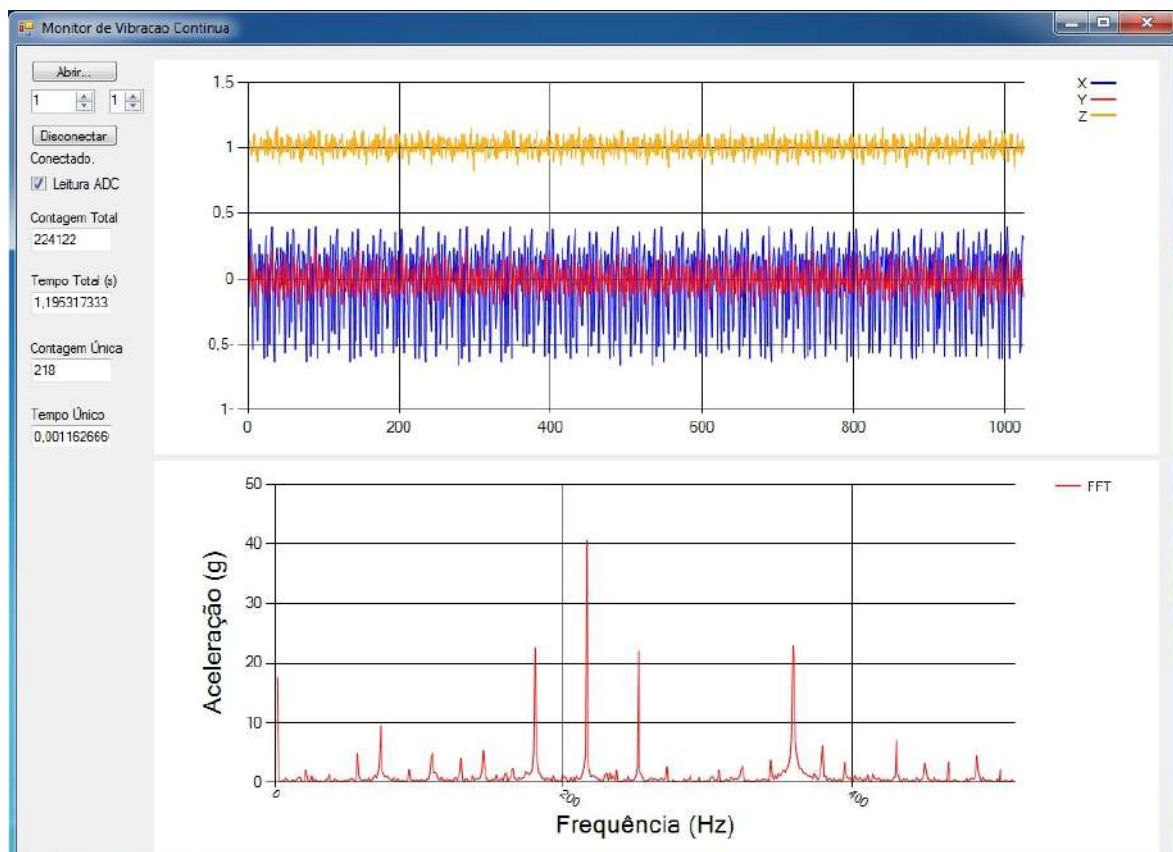


Figura 4.27: Espectro do eixo Y para o motor síncrono à velocidade de 1800rpm.

Com a gradação de 0,8399Hz por ponto do espectro, era esperado que o pico da componente de velocidade de 1800rpm (equivalente a 30Hz) fosse encontrado em 35,7185. As 13 componentes harmônicas mais evidentes seriam esperadas nos respectivos múltiplos desse ponto. Para uma melhor visualização dos resultados, segue adiante uma tabela com os valores esperados para a velocidade de 1800rpm e os valores obtidos.

Tabela 4.6: Valores esperados e obtidos das comparações de velocidade do motor síncrono.

Valores esperados	Valores obtidos
35,7185	36
71,4371	72
107,1556	108
142,8742	143
178,5927	179
214,3112	215

250,0298	251
285,7483	287
321,4668	323
357,1854	359
392,9039	394
428,6225	430
464,3401	466
500,0595	502

É possível notar através da Tab. 4.6 a ocorrência um aumento gradual da diferença entre valor esperado e valor obtido, indicando que a velocidade de rotação real é ligeiramente superior aos 1800rpm esperados. Essa diferença entre o valor esperado e o valor encontrado é sempre inferior a 2 unidades, ou seja, inferior a 1,68Hz. Assim, o erro absoluto sobre unidades de escala do espectro é inferior a 5,6% e o erro médio é próximo à metade deste valor.

4.4.4. Testes sobre o motor de indução

Ao contrário do motor síncrono, o motor de indução permite a alteração da velocidade de rotação através da substituição da rede de alimentação pelo inversor de frequência (a alteração da frequência da fonte de sinal do campo leva à alteração da velocidade de rotação).

Buscando evitar possíveis interferências eletromagnéticas, os testes foram realizados com a placa de aquisição fixada no interior de uma caixa metálica. Porém, como esta adição mostrou-se por fim desnecessária para a proteção contra interferências eletromagnéticas (por não ocorrerem os faiscamentos observados no motor síncrono), foi possível utilizar este conjunto de testes como base de comparação para a presença de ruído (a interferência ocasionada pelo aumento da massa do sistema de aquisição). Assim, a base para todos os testes foi com o uso da caixa de blindagem, sendo apresentada a opção sem blindagem apenas para o teste de comparação de velocidade e mudança de frequência do inversor.

O teste de comparação de velocidade foi realizado com o motor sem carregamento e em uma combinação de 2x2 configurações, com ou sem a caixa metálica de blindagem e ligado à rede de alimentação de 60 Hz ou ao inversor de frequência em 60,4Hz (com blindagem) ou 60,2Hz (sem blindagem).

Para os testes de mudança de frequência com o inversor de frequência foram escolhidos os valores de 44,9Hz, 60,4Hz e 75,0Hz com blindagem e 45,6Hz, 60,2Hz e 75,2Hz sem blindagem.

Para os testes de mudança de carga foi utilizada como fonte de carregamento um conjunto de resistores em paralelo, em 5 configurações diferentes de carga. Estes testes foram realizados somente com blindagem.

- Testes de comparação da velocidade de rotação:

Para a configuração com o motor ligado à rede de alimentação de 60Hz a leitura da velocidade de rotação através do tacômetro óptico foi de 1790rpm (apesar de serem esperados 1800rpm), com e sem blindagem. Para a configuração com o motor ligado ao inversor de frequência em 60,4Hz (com blindagem) a leitura da velocidade de rotação através do tacômetro óptico foi de 1813rpm (apesar de serem esperados 1812rpm). Para a configuração com o motor ligado ao inversor de frequência em 60,2Hz (sem blindagem) a velocidade de rotação esperada é, portanto, 1806rpm.

Seguem adiante as imagens dos eixos X e Y para as configurações com e sem blindagem, respectivamente. Para a configuração com ligação na rede elétrica, com blindagem e velocidade de 1790rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.28 e na Fig. 4.29, respectivamente. Para a configuração com ligação no inversor em 60,4Hz, com blindagem e velocidade de 1813rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.30 e na Fig. 4.31, respectivamente. Para a configuração com ligação na rede elétrica, sem blindagem e velocidade de 1790rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.32 e na Fig. 4.33, respectivamente. Para a configuração com ligação no inversor em 60,2Hz, sem blindagem e velocidade de 1806rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.34 e na Fig. 4.35, respectivamente. As respectivas tabelas com os principais valores numéricos de saída são apresentadas na seção referente ao motor de indução, no Apêndice B.

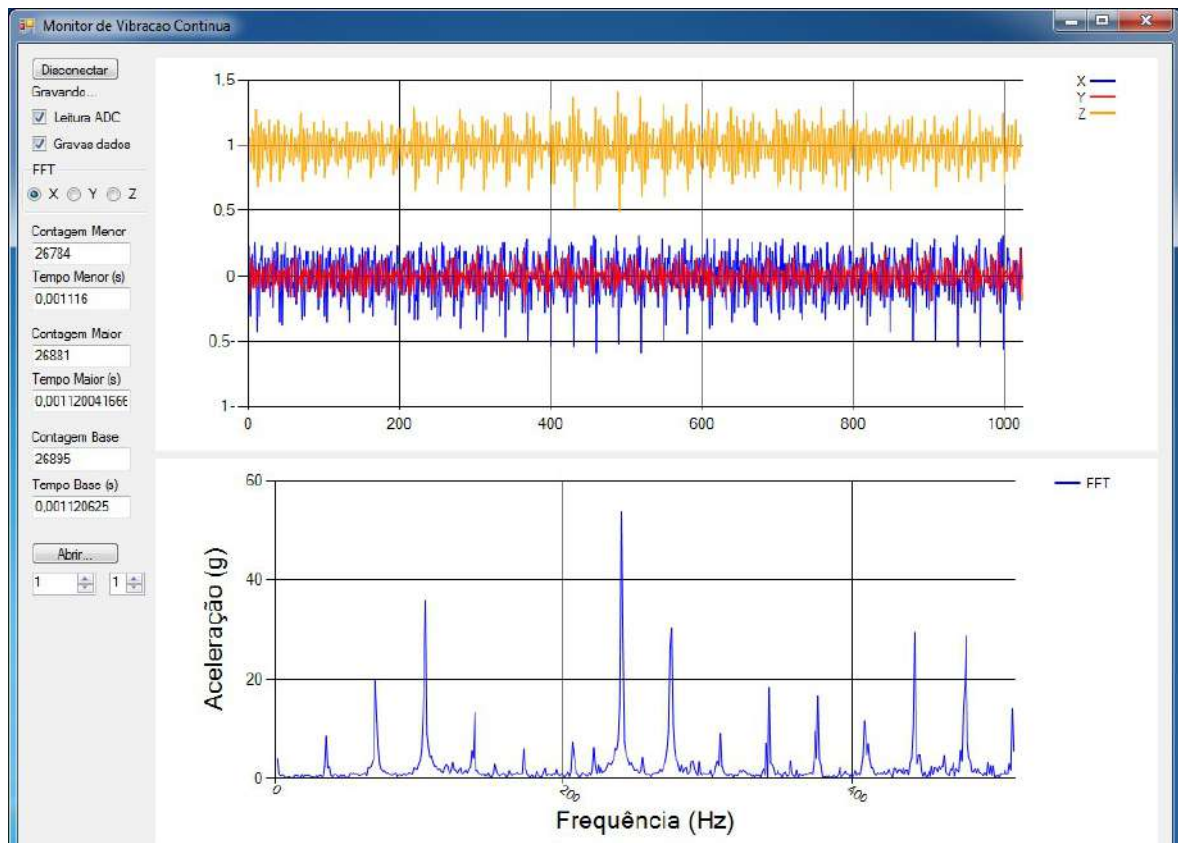


Figura 4.28: Espectro do eixo X para o motor de indução à 1790rpm (com blindagem).

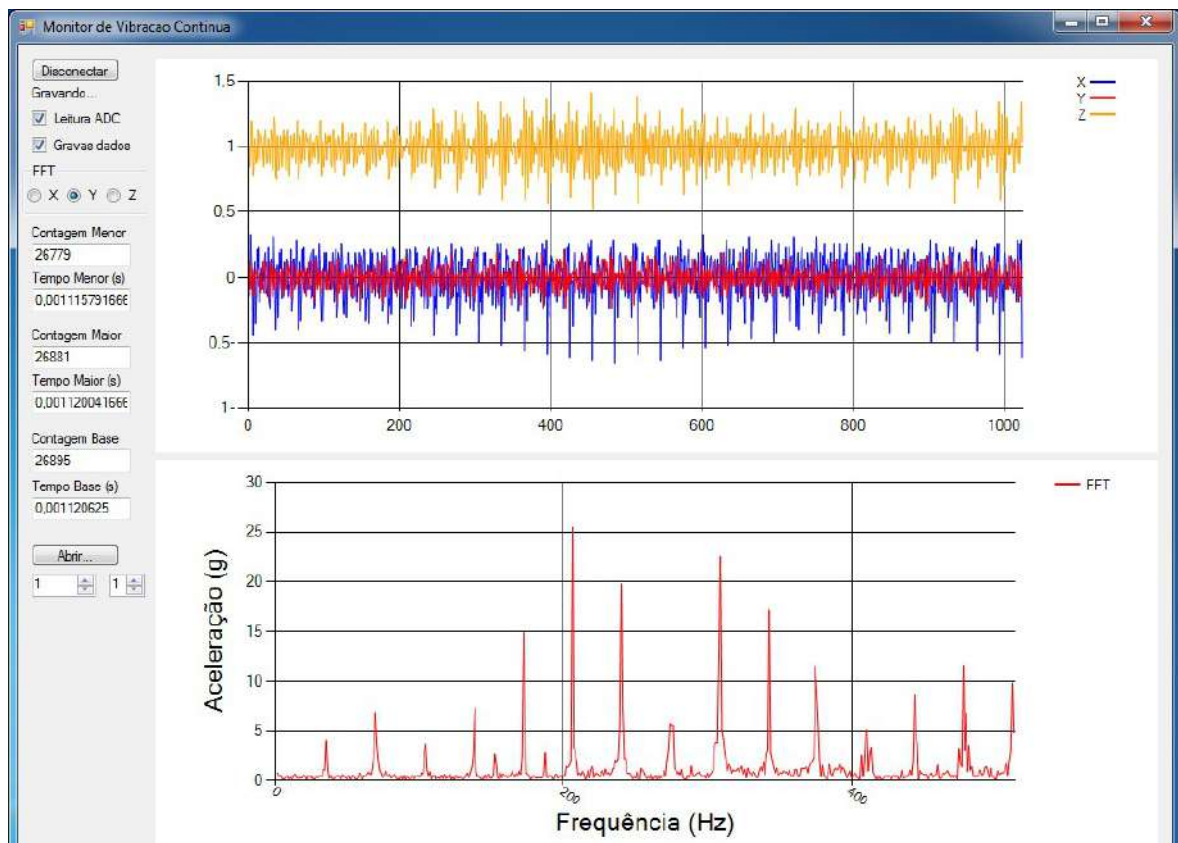


Figura 4.29: Espectro do eixo Y para o motor de indução à 1790rpm (com blindagem).

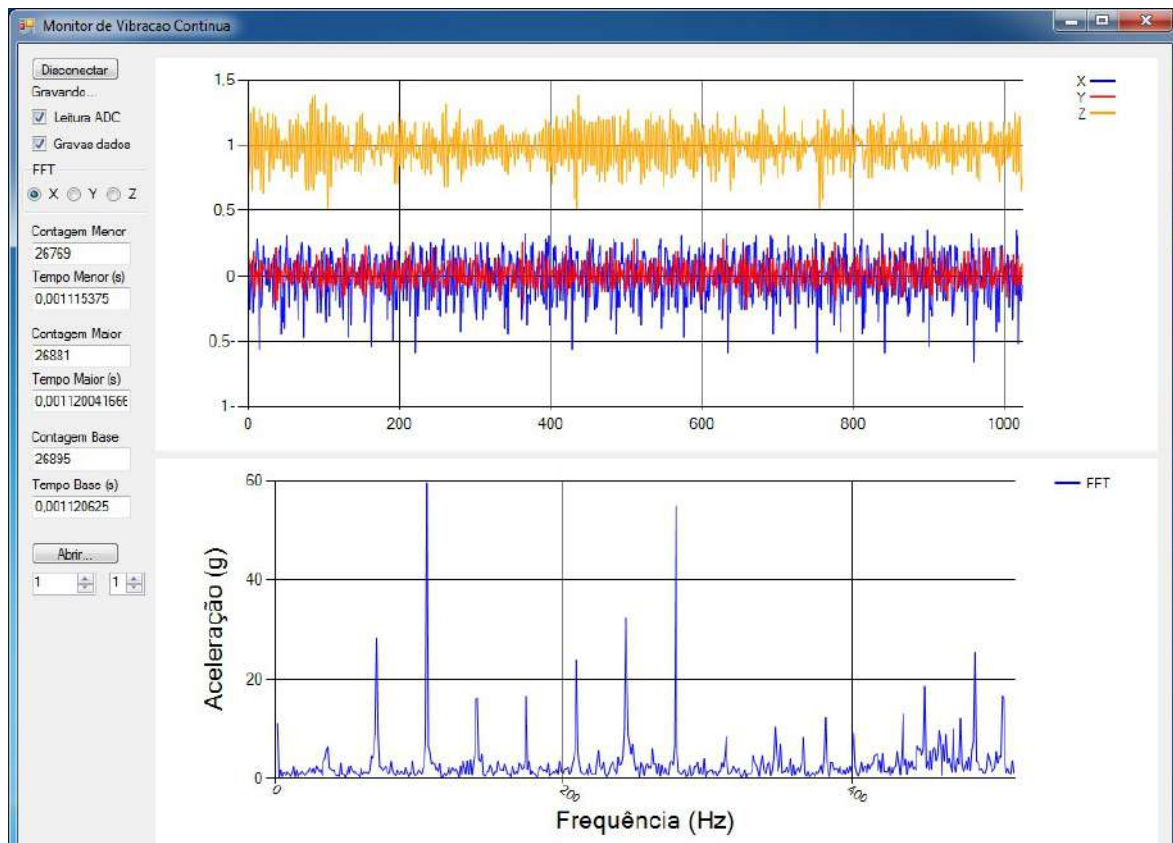


Figura 4.30: Espectro do eixo X do motor de indução à 1813rpm (inversor em 60,4Hz).

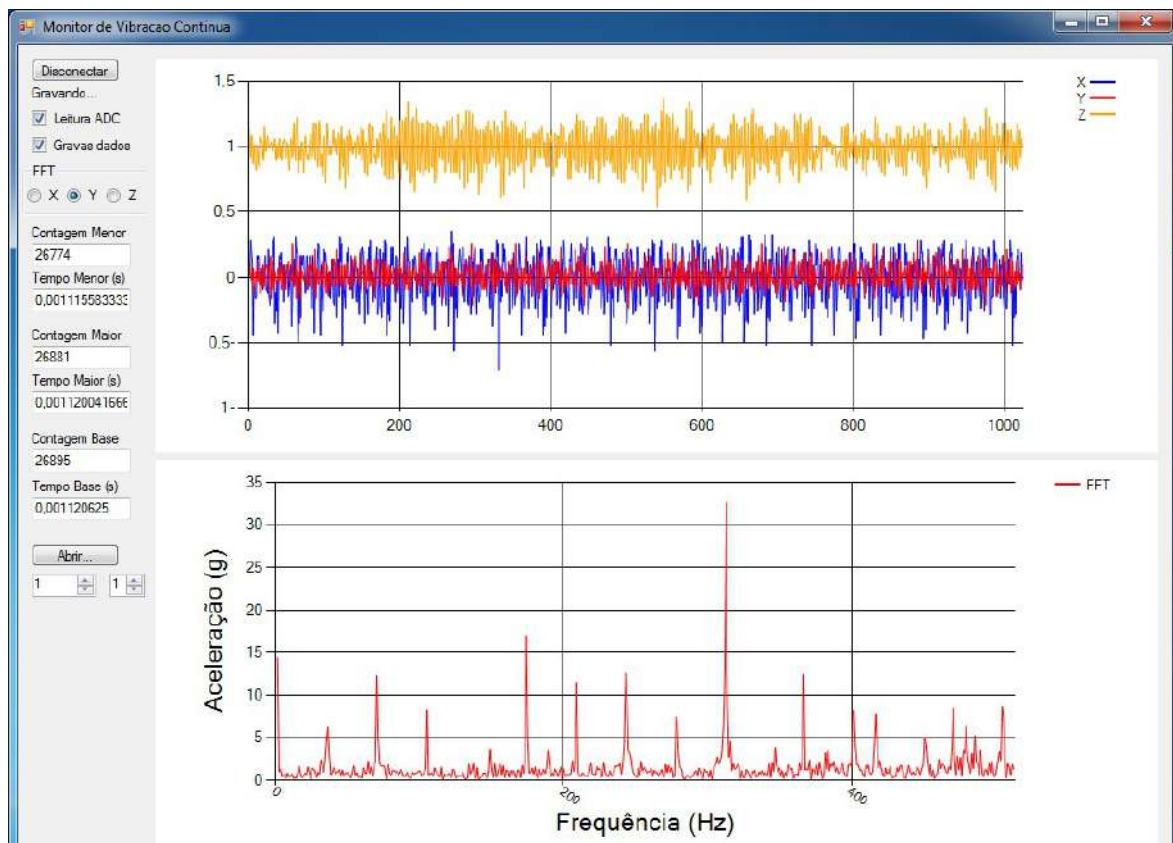


Figura 4.31: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1813rpm (inversor em 60,4Hz).

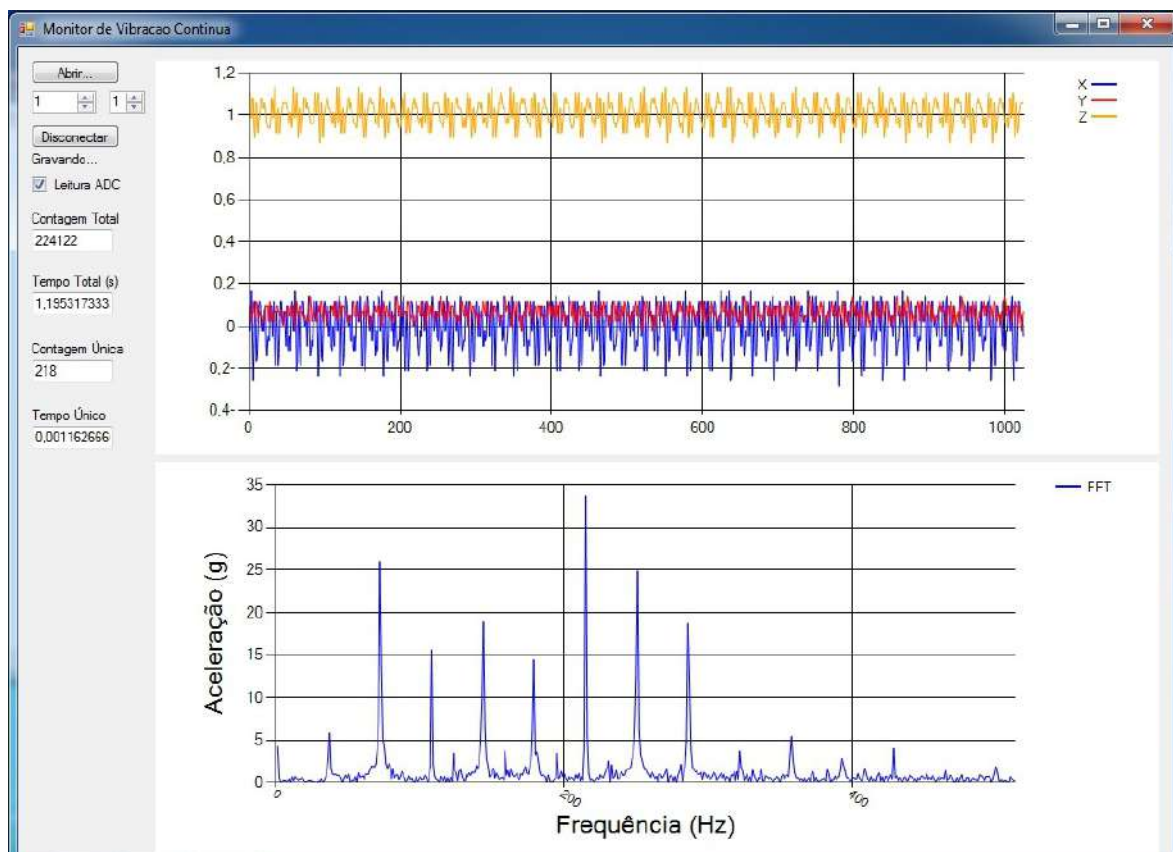


Figura 4.32: Espectro do eixo X do motor de indução à 1790rpm (sem blindagem).

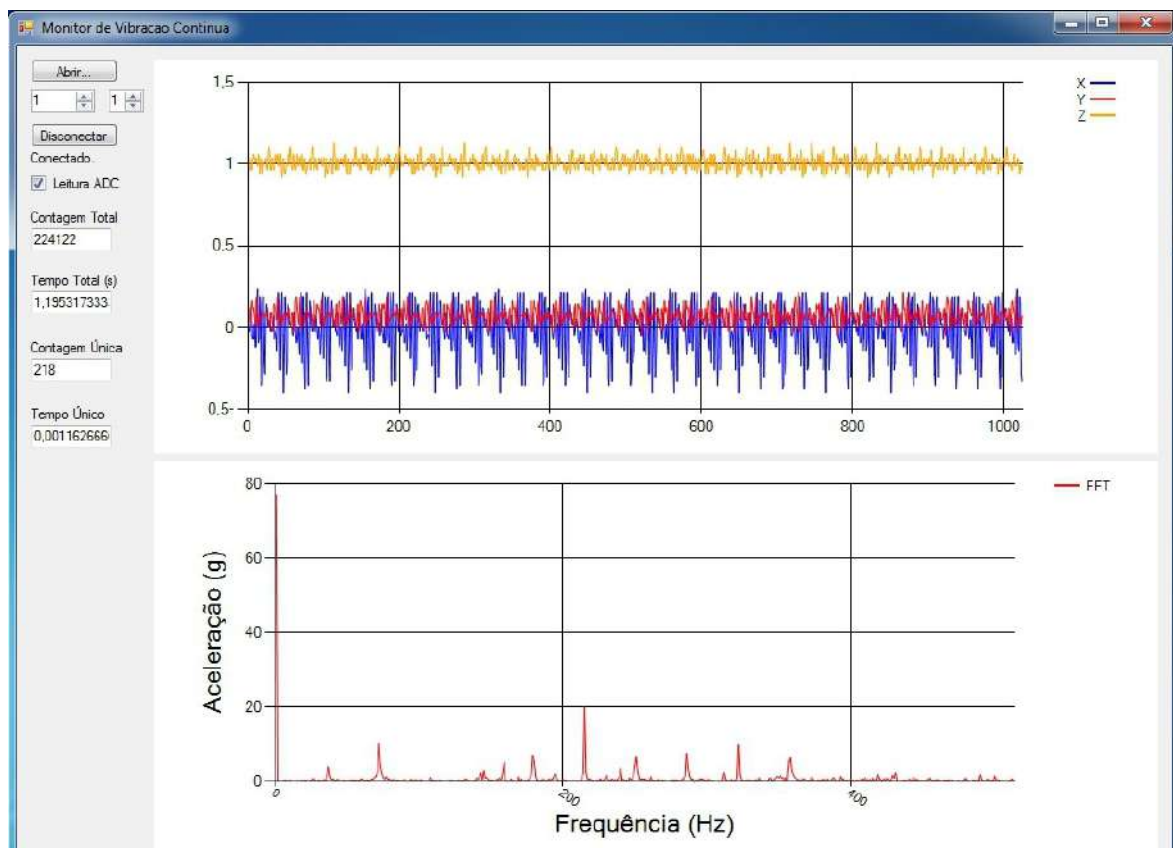


Figura 4.33: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1790rpm (sem blindagem).

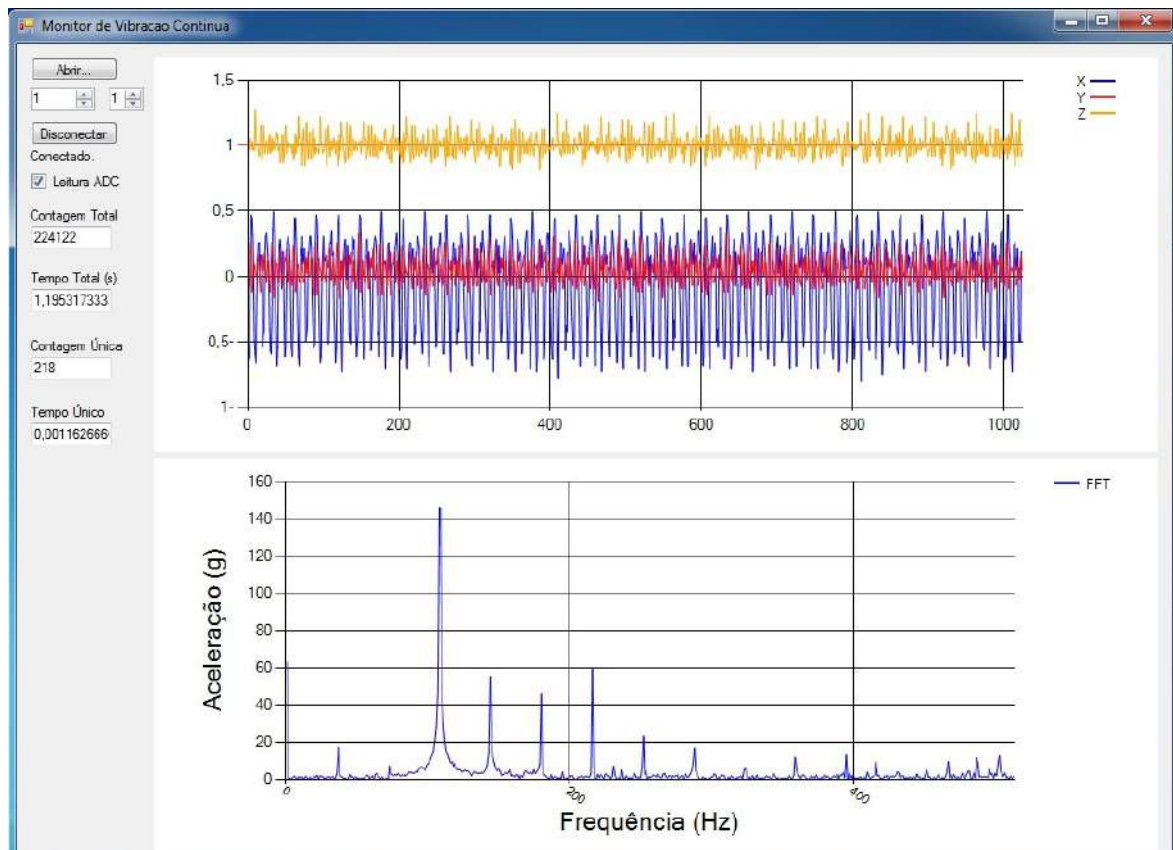


Figura 4.34: Espectro do eixo X do motor de indução à 1806rpm (inversor em 60,2Hz).

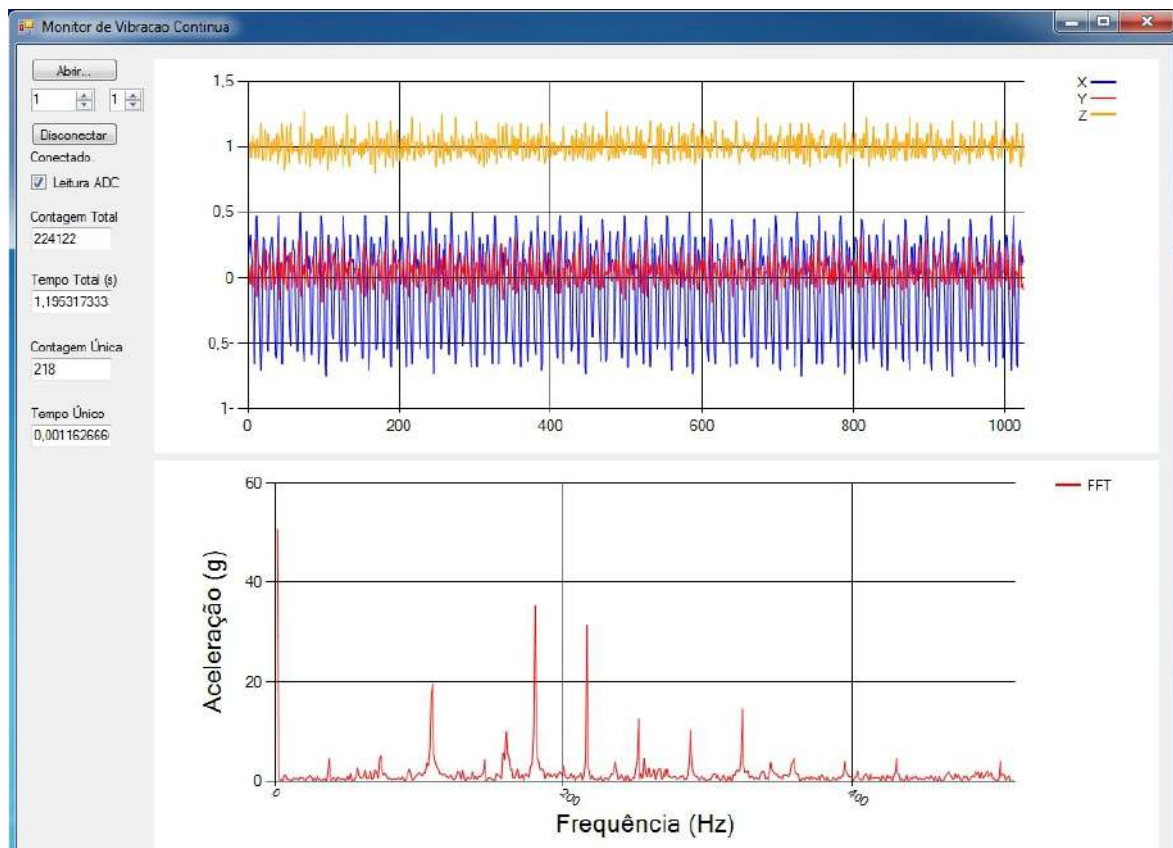


Figura 4.35: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1806rpm (inversor em 60,2Hz).

É possível realizar comparações entre os espectros do eixo X e entre os espectros do eixo Y para as configurações com ligação na rede elétrica (entre a configuração com e sem blindagem, ou seja, entre a Fig. 4.28 e a Fig. 4.32 para o eixo X e entre a Fig. 4.29 e a Fig. 4.33 para o eixo Y). É possível notar que as relações de amplitude entre as harmônicas são diferentes e que a amplitude geral das harmônicas na configuração com blindagem é maior que na configuração sem blindagem. Para as configurações com ligação no inversor de frequência também é possível realizar comparações semelhantes, observando que também as relações de amplitude entre harmônicas são diferentes, mas que a amplitude geral das harmônicas na configuração com blindagem é menor que na configuração sem blindagem.

Com a gradação de 0,8399Hz por ponto do espectro, era esperado que os picos das componente de velocidade de 1790rpm, 1806rpm e 1813rpm (equivalentes em Hertz a 29,8333Hz, 30,1Hz e 30,2167Hz, respectivamente) fossem encontrados em 35,5201, 35,8376 e 35,9765, respectivamente. As componentes harmônicas mais evidentes seriam esperadas nos respectivos múltiplos desses pontos. Para uma melhor visualização dos resultados, segue adiante uma tabela com os valores esperados para as duas configurações e os valores obtidos.

Tabela 4.7: Valores esperados e obtidos das comparações de velocidade do motor de indução.

Com blindagem				Sem blindagem			
Ligação na rede		Ligação no inversor		Ligação na rede		Ligação no inversor	
Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos
35,5201	34	35,9765	35	35,5201	36	35,8376	36
71,0402	68	71,9530	69	71,0402	71	71,6752	72
106,5603	103	107,9295	104	106,5603	107	107,5128	108
142,0804	137	143,9060	139	142,0804	143	143,3504	143
177,6005	171	179,8825	173	177,6005	178	179,1880	179
213,1206	205	215,8590	208	213,1206	214	215,0256	215
248,6407	239	251,8355	242	248,6407	250	250,8632	251
284,1608	273	287,8120	277	284,1608	285	286,7008	257
319,6809	308	323,7885	312	319,6809	321	322,5384	323
355,2010	342	359,7651	346	355,2010	357	358,5760	359
390,7211	376	395,7416	381	390,7211	392	394,2136	395
426,2412	409	431,7181	415	426,2412	428	430,0512	430

461,7613	443	467,6946	450	461,7613	464	465,8888	466
497,2814	478	503,6711	485	497,2814	499	501,7264	502
532,8015	511	-	-	-	-	-	-

É possível notar através da Tab. 4.7 que para as configurações com blindagem ocorre um erro gradativamente crescente, indicando que a velocidade prevista não corresponde à velocidade obtida. As velocidades obtidas estão em 34,23 e 34,67, aproximadamente, correspondendo a 28,75Hz e 29,12Hz (ou 1725rpm e 1747rpm), respectivamente. Portanto existe uma diferença de 65rpm e 66rpm para baixo, respectivamente.

Para as configurações sem blindagem é possível notar que, na primeira, a diferença entre o valor esperado e o valor encontrado é sempre inferior a 2 unidades (inferior a 1,68Hz), salvo na penúltima harmônica, cuja leitura não é muito clara, por ser a componente de menor relevância. Mas para a segunda (cuja comparação não depende da leitura do tacômetro óptico, mas da precisão do inversor de frequência), a diferença entre o valor esperado e o valor encontrado é sempre inferior a meia unidade (inferior a 0,42Hz), salvo na décima harmônica, a componente de menor relevância (apesar de ser possível prever que sua localização está dentro da margem, aproximadamente em 394,5, através das leituras adjacentes dos 3 eixos).

A Tab. 4.8 apresenta os valores de erro relativo para as configurações com blindagem e os valores de erro absoluto (baseados em unidades de escala do espectro) para as configurações sem blindagem.

Tabela 4.8: Valores de erro para as configurações com e sem blindagem.

Com blindagem		Sem blindagem	
Ligação na rede	Ligação no inversor	Ligação na rede	Ligação no inversor
3,63%	3,63%	5,63%	1,40%

- Testes de mudança de carga:

Este conjunto de testes foi realizado com o motor já acoplado ao inversor de frequência em 60,4Hz (somente com blindagem). A fonte de carregamento utilizada foi um conjunto chaveado de 6 resistores de 512Ω em paralelo, alimentados por uma fonte de corrente. Dessa forma, é possível usar de 1 até 6 resistores em paralelo, levando a um aumento da carga (da tensão de saída) proporcional ao aumento do número de resistores utilizados.

Foram usadas 4 configurações diferentes de carregamento, com 1, 2, 3 e 4 resistores em paralelo (além da configuração sem carga, já apresentada no teste anterior). Com o aumento do carregamento ocorre

uma redução da velocidade de rotação, característica do motor de indução. As velocidades obtidas através do tacômetro óptico para cada configuração são 1798rpm, 1783rpm, 1770rpm e 1758rpm, respectivamente.

Seguem adiante as imagens dos eixos X e Y para cada configuração. Para a configuração com 1 carga e velocidade de 1798rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.36 e na Fig. 4.37, respectivamente. Para a configuração com 2 cargas em paralelo e velocidade de 1783rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.38 e na Fig. 4.39, respectivamente. Para a configuração com 3 cargas em paralelo e velocidade de 1770rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.40 e na Fig. 4.41, respectivamente. Para a configuração com 4 cargas e velocidade de 1758rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.42 e na Fig. 4.43, respectivamente.

As respectivas tabelas com os principais valores numéricos de saída são apresentadas na seção referente ao motor de indução, no Apêndice B.

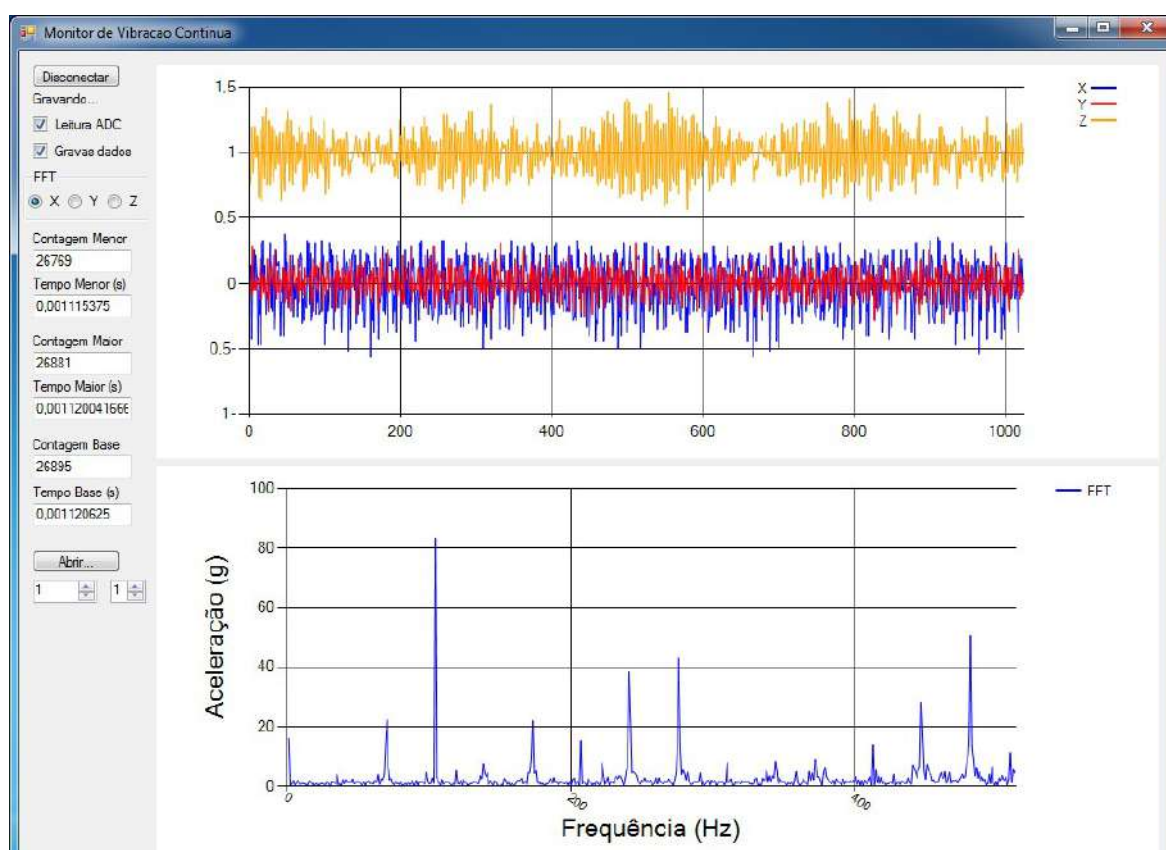


Figura 4.36: Espectro do eixo X do motor de indução à 1798rpm (1 carga).

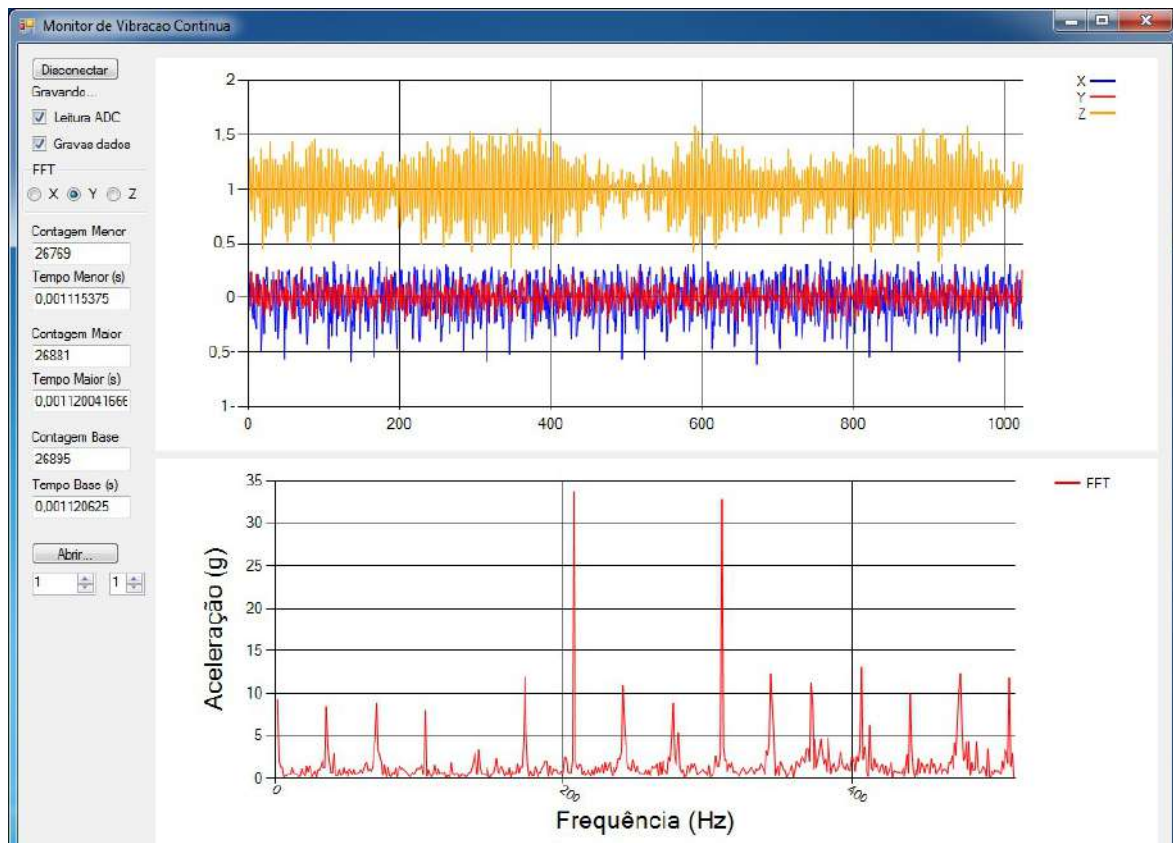


Figura 4.37: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1798rpm (1 carga).

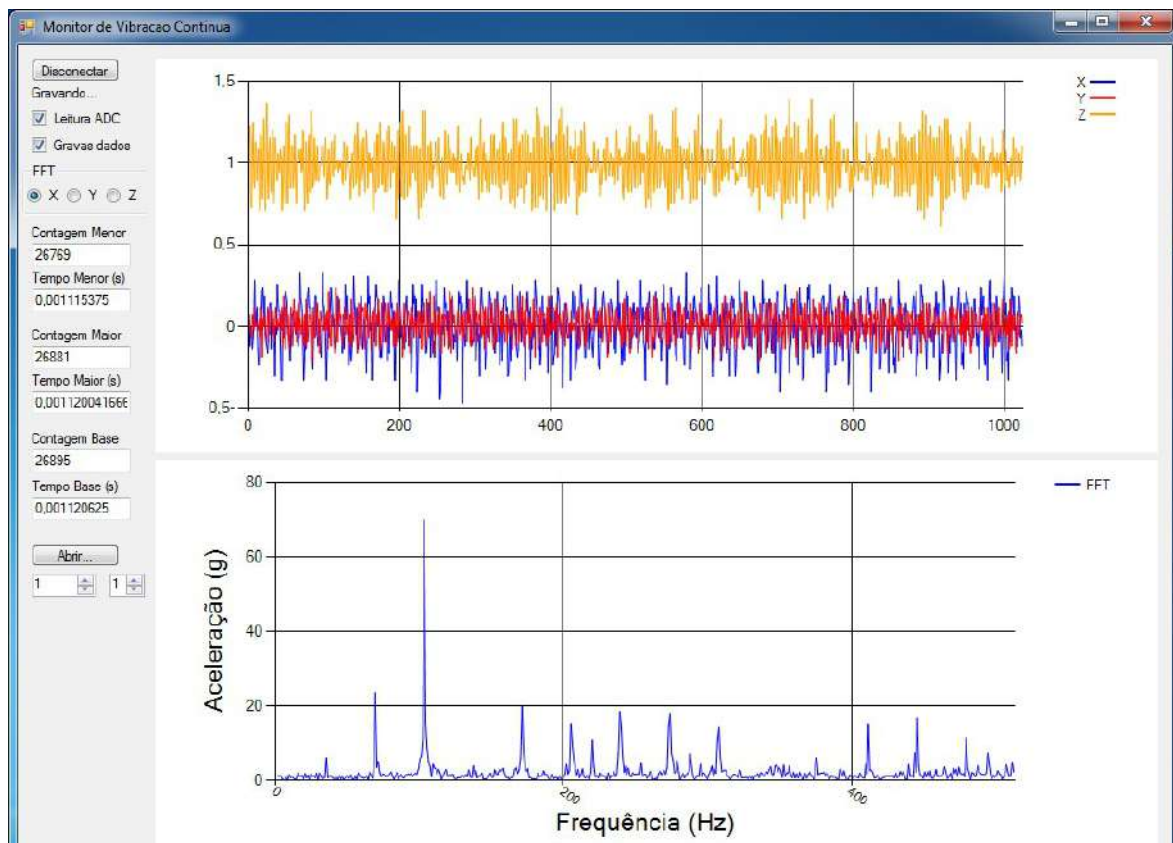


Figura 4.38: Espectro do eixo X do motor de indução à 1783rpm (2 cargas em paralelo).

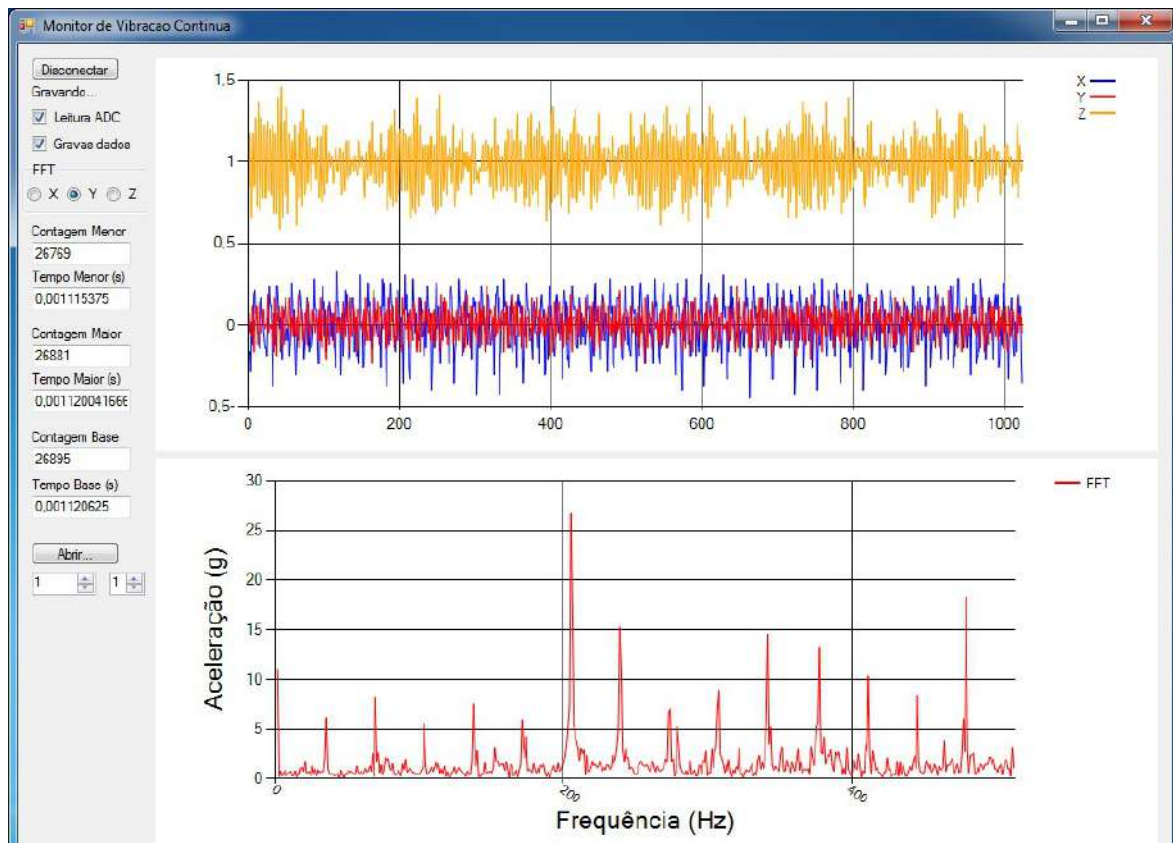


Figura 4.39: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1783rpm (2 cargas em paralelo).

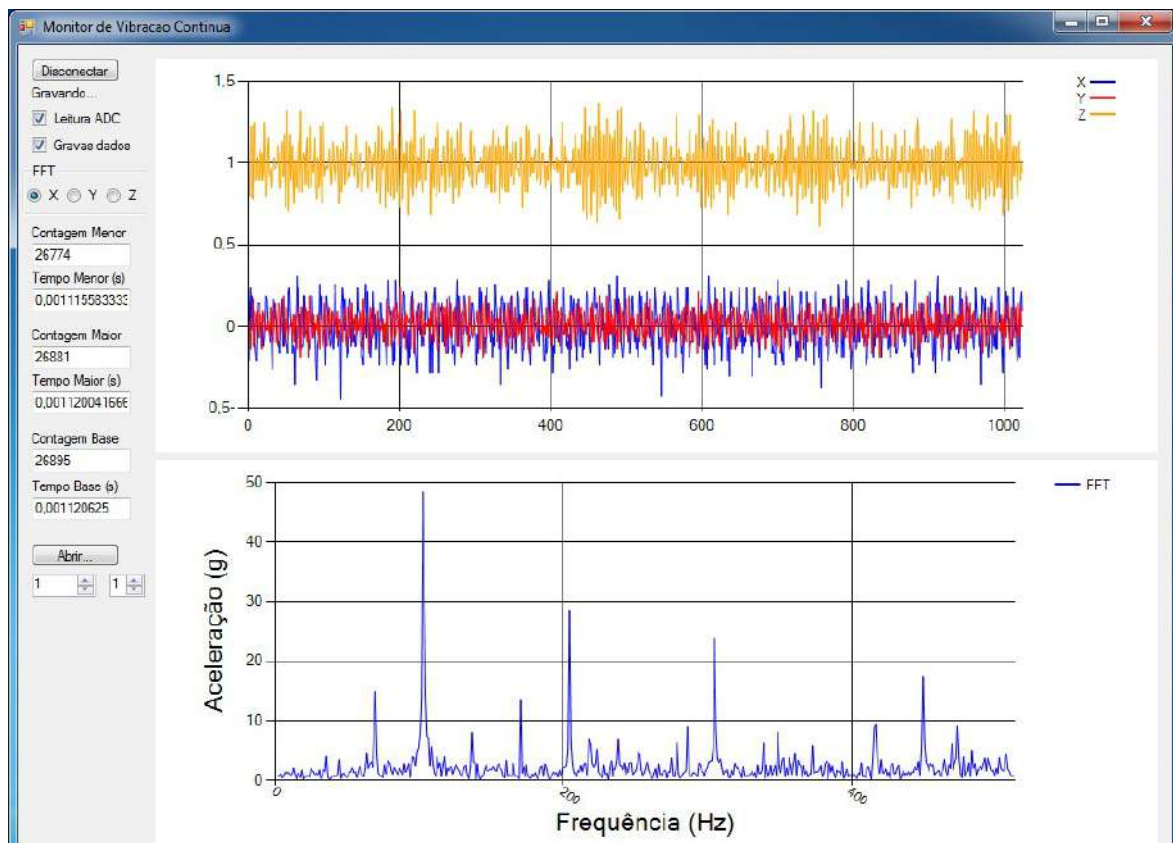


Figura 4.40: Espectro do eixo X do motor de indução à 1770rpm (3 cargas em paralelo).

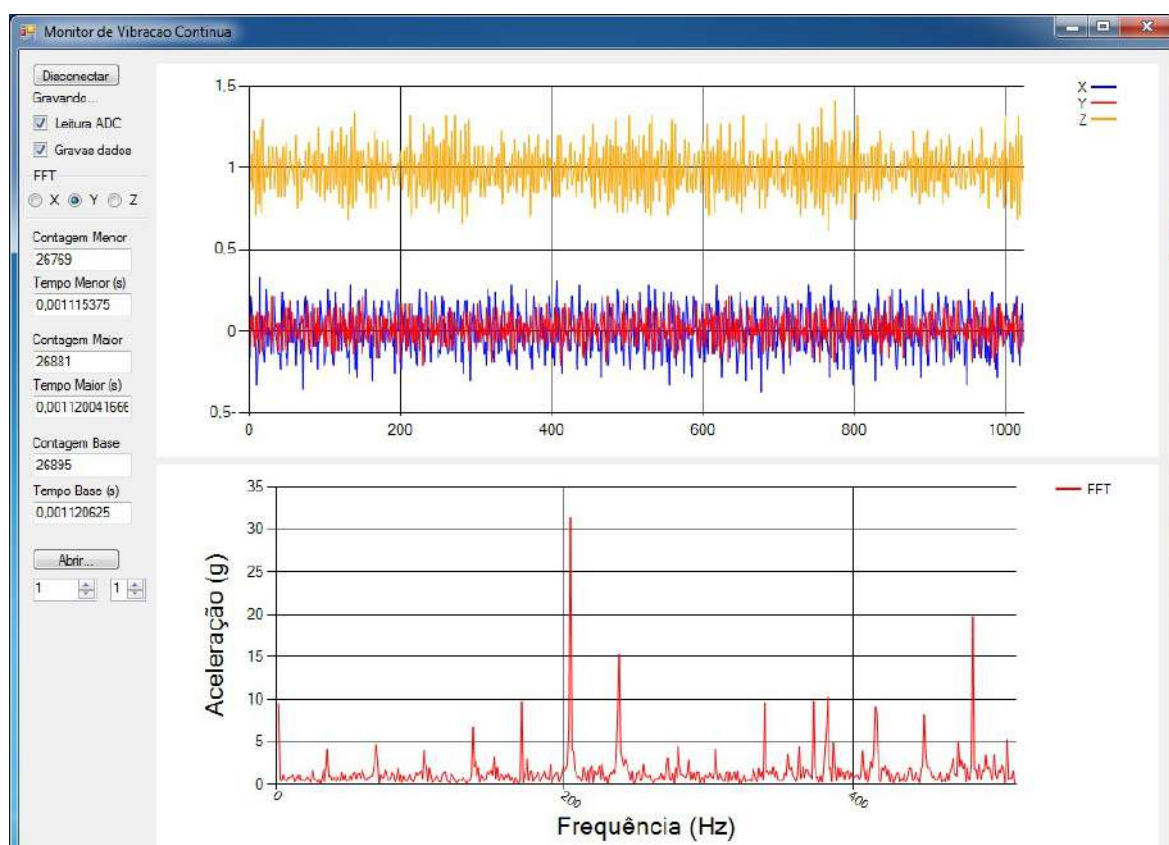


Figura 4.41: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1770rpm (3 cargas em paralelo).

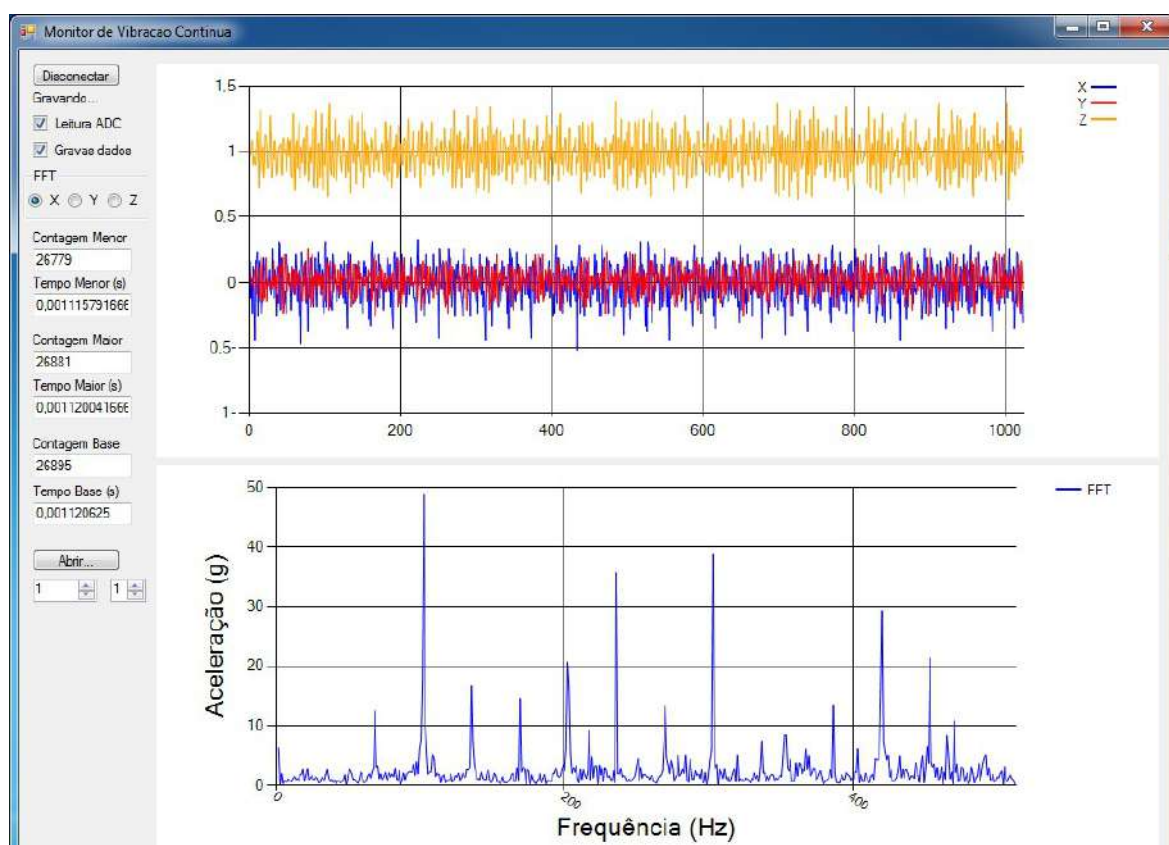


Figura 4.42: Espectro do eixo X do motor de indução à 1758rpm (4 cargas em paralelo).

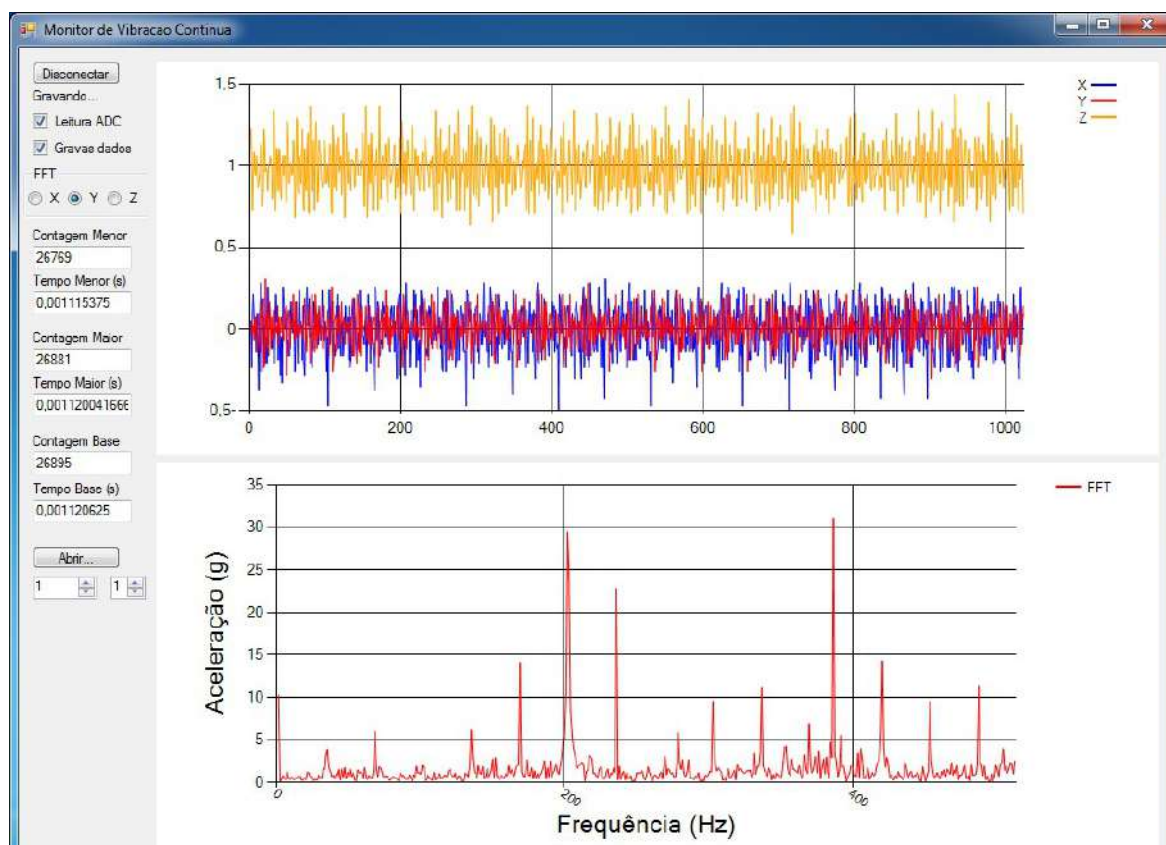


Figura 4.43: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1758rpm (4 cargas em paralelo).

É possível notar através da comparação sequencial das figuras que o aumento de carga leva à diminuição da velocidade de rotação e, consequentemente, a um aumento do número de harmônicas que podem ser visualizadas.

Com a gradação de 0,8399Hz por ponto do espectro, era esperado que os picos das componentes de velocidade de 1798rpm, 1783rpm, 1770rpm e 1758rpm (equivalentes em Hertz a 29,9667Hz, 29,7167Hz, 29,5Hz e 29,3Hz, respectivamente) fossem encontrados em 35,6788, 35,3812, 35,1232 e 34,8851, respectivamente. As componentes harmônicas mais evidentes seriam esperadas nos respectivos múltiplos desses pontos. Para uma melhor visualização dos resultados, segue adiante uma tabela com os valores esperados para as 5 configurações e os valores obtidos.

Tabela 4.9: Valores esperados e obtidos para mudanças de carga do motor de indução.

Sem Carga (1813rpm)		1 resistor (1798rpm)		2 resistores (1783rpm)		3 resistores (1770rpm)		4 resistores (1758rpm)	
Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos
35,9765	35	35,6788	34	35,3812	34	35,1232	34	34,8851	34
71,9530	69	71,3577	69	70,7624	68	70,2465	68	69,7702	67
107,9295	104	107,0365	103	106,1436	102	105,3697	101	104,6553	101
143,9060	139	142,7154	137	141,5248	136	140,4929	135	139,5404	134
179,8825	173	178,3943	172	176,9060	170	175,6161	169	174,4255	168
215,8590	208	214,0731	206	212,2872	204	210,7394	203	209,3106	201
251,8355	242	249,7520	240	247,6684	238	245,8626	237	244,1957	235
287,8120	277	285,4308	275	283,0496	273	280,9858	271	279,0808	269
323,7885	312	321,1097	309	318,4308	307	316,1091	304	313,9659	302
359,7651	346	356,7885	343	353,8120	341	351,2323	338	348,8511	336
395,7416	381	392,4673	378	389,1932	375	386,3555	372	383,7362	369
431,7181	415	428,1462	412	424,5744	409	421,4787	406	418,6213	403
467,6946	450	463,8251	446	459,9556	443	456,6020	439	453,5064	437
503,6711	485	499,5039	481	495,3367	477	491,7252	473	488,3915	470
-	-	-	-	530,7179	511	526,8484	507	523,2766	502

É possível notar que em todas as configurações ocorreu um erro gradativamente crescente, indicando que a velocidade prevista não corresponde à velocidade obtida. As velocidades obtidas estão em 34,67, 34,30, 34,07, 33,85 e 33,55, aproximadamente, correspondendo a 29,12Hz, 28,81Hz, 28,62Hz, 28,43Hz e 28,18Hz (ou 1747rpm, 1729rpm, 1717rpm, 1706rpm e 1691rpm), respectivamente. Portanto existe uma diferença de 66rpm, 69rpm, 66rpm, 64rpm e 67rpm para baixo, respectivamente. A Tab. 4.10 apresenta os valores de erro relativo para as diferentes configurações de carregamento.

Tabela 4.10: Valores dos erros relativos para as configurações de carregamento.

Sem Carga (1813rpm)	1 resistor (1798rpm)	2 resistores (1783rpm)	3 resistores (1770rpm)	4 resistores (1758rpm)
3,63%	3,86%	3,69%	3,63%	3,82%

Através da visualização em sequência dos espectros (das componentes na imagens de mesmo eixo) e dos valores das tabelas é possível notar que, com o aumento gradual da carga, ocorreu:

1. ganho de ênfase das componentes não relacionadas à velocidade (com amplitudes algumas vezes superiores às harmônicas adjacentes relacionadas à velocidade);
 2. alternância de ênfase entre harmônicas (variação de quais são as predominantes e quais são as menos significativas);
 3. perda real de velocidade de rotação, comprovando esta característica de comportamento do motor de indução.
- Testes de mudança de frequência com o inversor de frequência:

Com a alteração da frequência do inversor ocorre também a variação da velocidade de rotação. Com o inversor em 44,9Hz (com blindagem) a leitura da velocidade de rotação através do tacômetro óptico foi de 1343rpm, apesar de serem esperados 1347rpm. Em 75,0Hz (com blindagem) a leitura foi de 2240rpm, apesar de serem esperados 2250rpm. Em 45,6Hz (sem blindagem) a leitura foi de 1366rpm, apesar de serem esperados 1368rpm. Em 75,2Hz (sem blindagem) a leitura foi de 2246rpm, apesar de serem esperados 2256rpm.

Seguem adiante as imagens dos eixos X e Y para as configurações citadas. Para a configuração com frequência de 44,9Hz, com blindagem e velocidade de 1343rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.44 e na Fig. 4.45, respectivamente. Para a configuração com frequência de 75,0Hz, com blindagem e velocidade de 2240rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.46 e na Fig. 4.47, respectivamente. Para a configuração com frequência de 45,6Hz, sem blindagem e velocidade de 1366rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.48 e na Fig. 4.49, respectivamente. Para a configuração com frequência de 75,2Hz, sem blindagem e velocidade de 2246rpm são apresentados os espectros dos eixo X e Y na Fig. 4.50 e na Fig. 4.51, respectivamente.

As imagens para os valores de 60,4Hz (com blindagem) e 60,2Hz (sem blindagem) foram apresentadas nos testes de comparação de velocidade. As respectivas tabelas com os principais valores numéricos de saída são apresentadas na seção referente ao motor de indução, no Apêndice B.

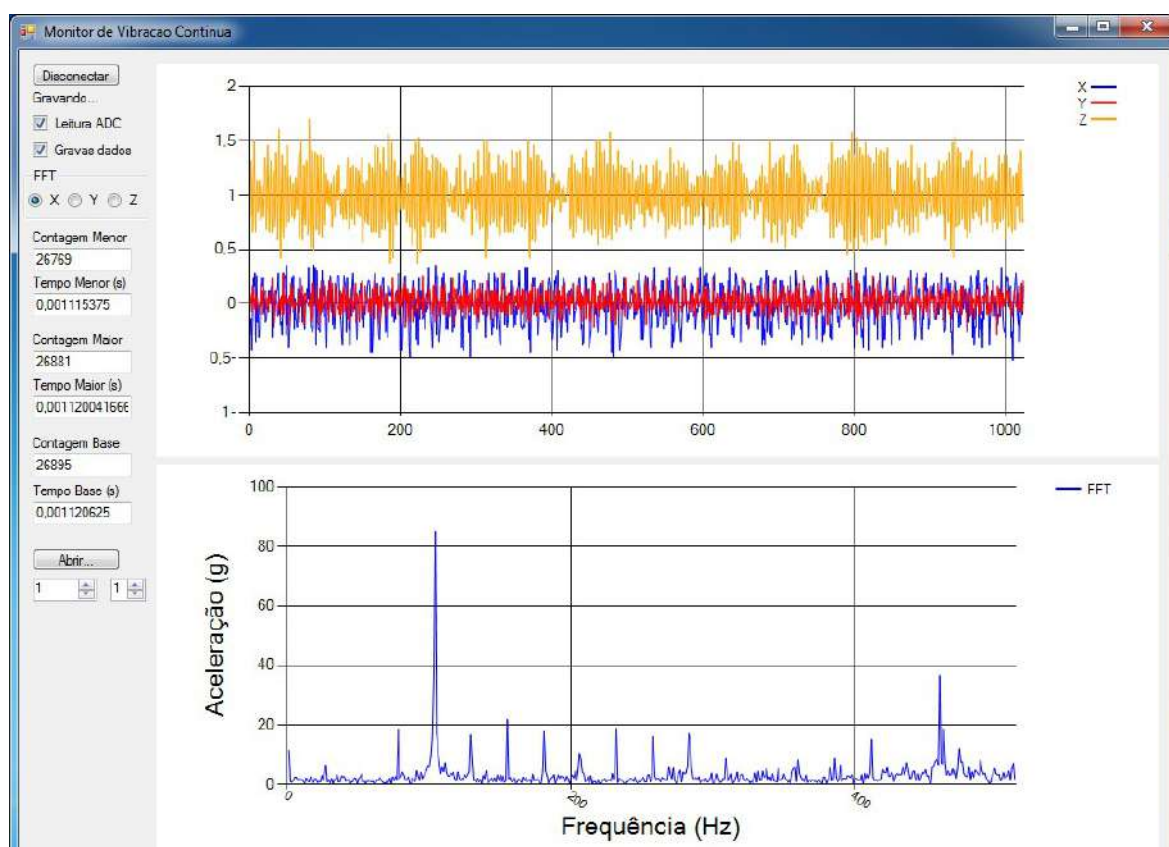


Figura 4.44: Espectro do eixo X do motor de indução à 1343rpm (em 44,9Hz com blindagem).

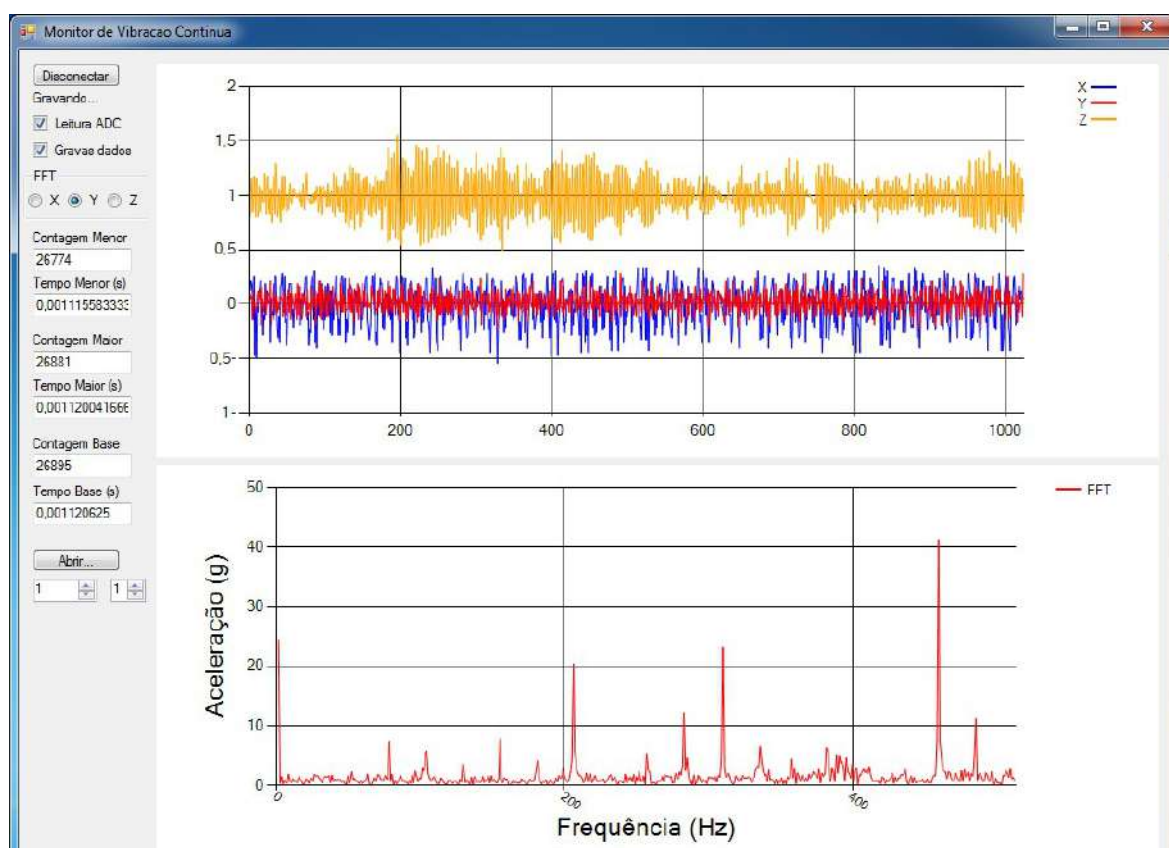


Figura 4.45: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1343rpm (em 44,9Hz com blindagem).

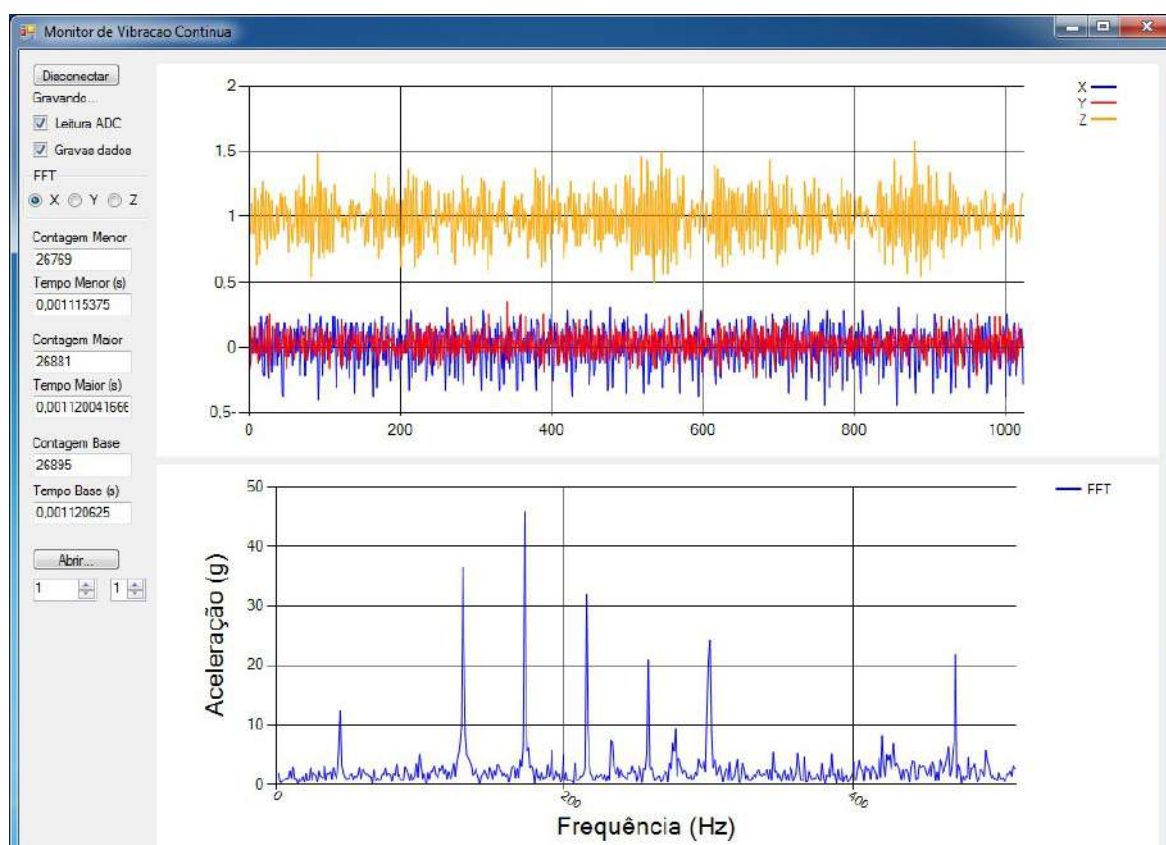


Figura 4.46: Espectro do eixo X do motor de indução à 2240rpm (em 75,0Hz com blindagem).

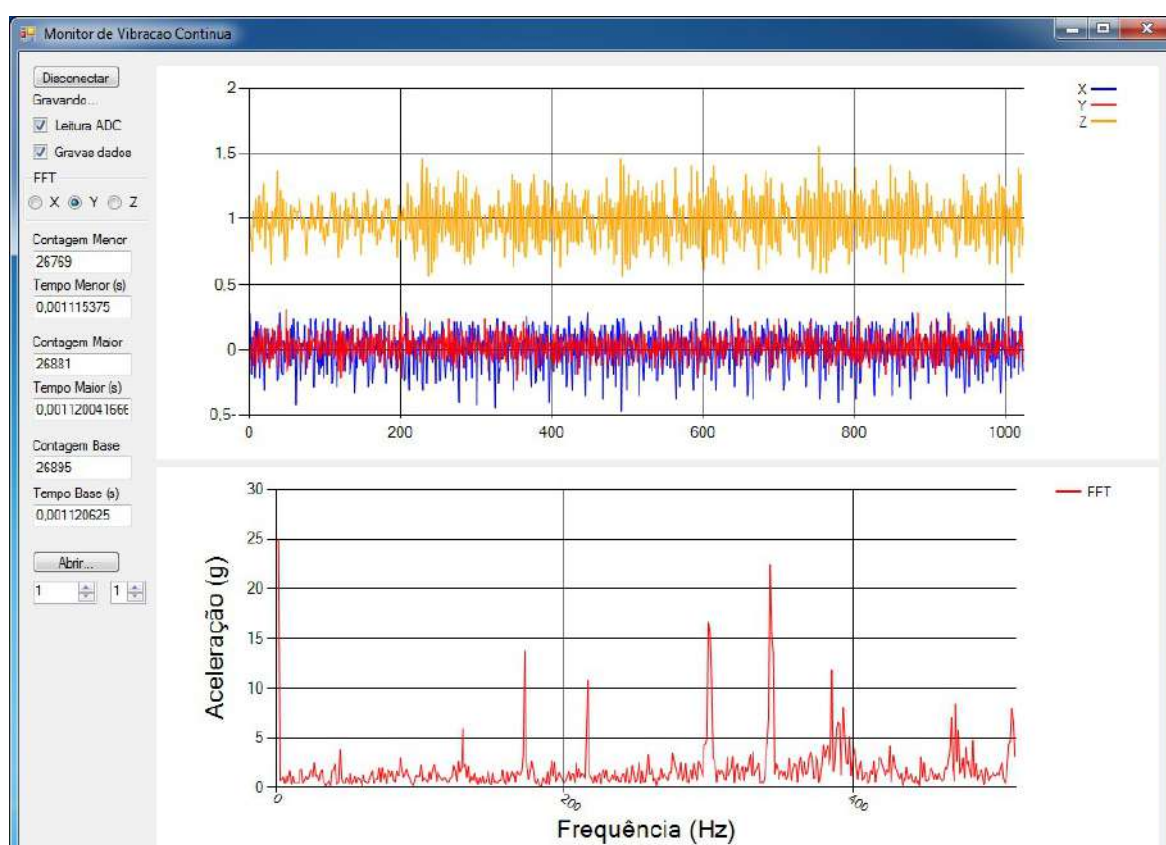


Figura 4.47: Espectro do eixo Y do motor de indução à 2240rpm (em 75,0Hz com blindagem).

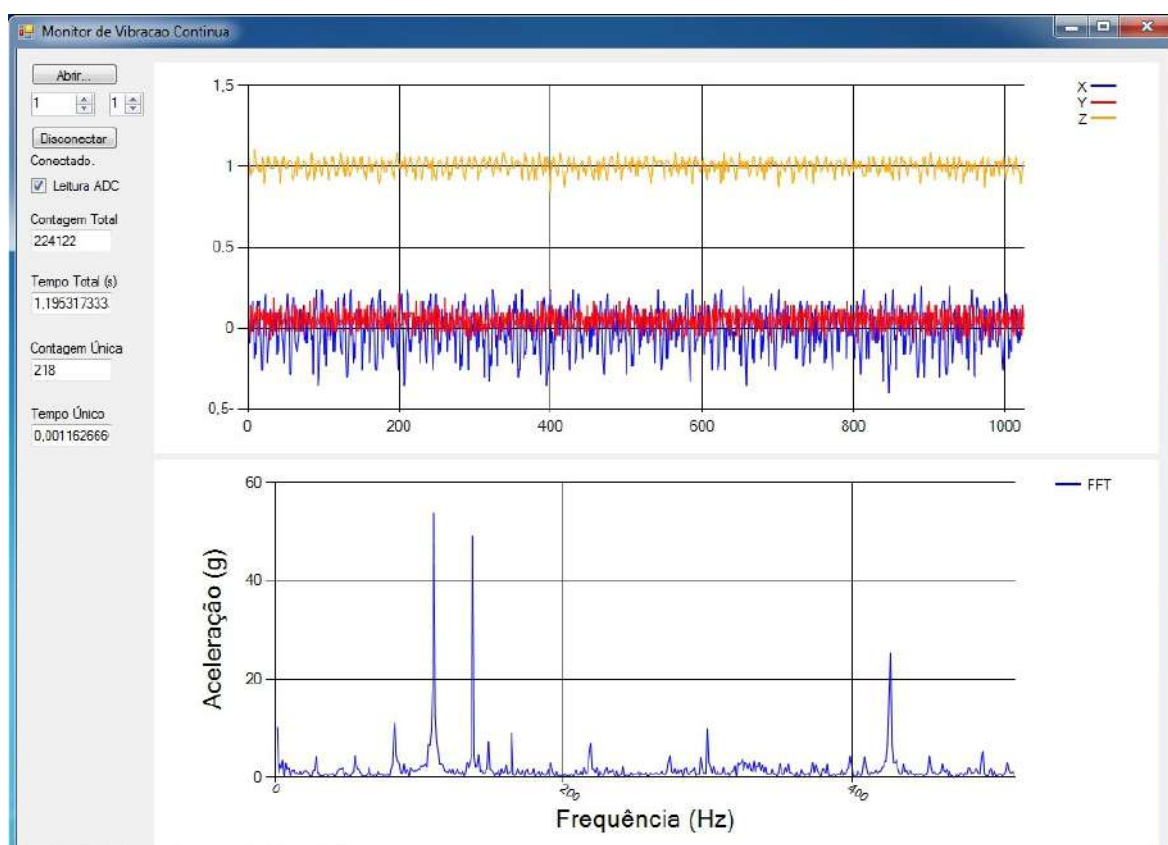


Figura 4.48: Espectro do eixo X do motor de indução à 1366rpm (em 45,6Hz sem blindagem).

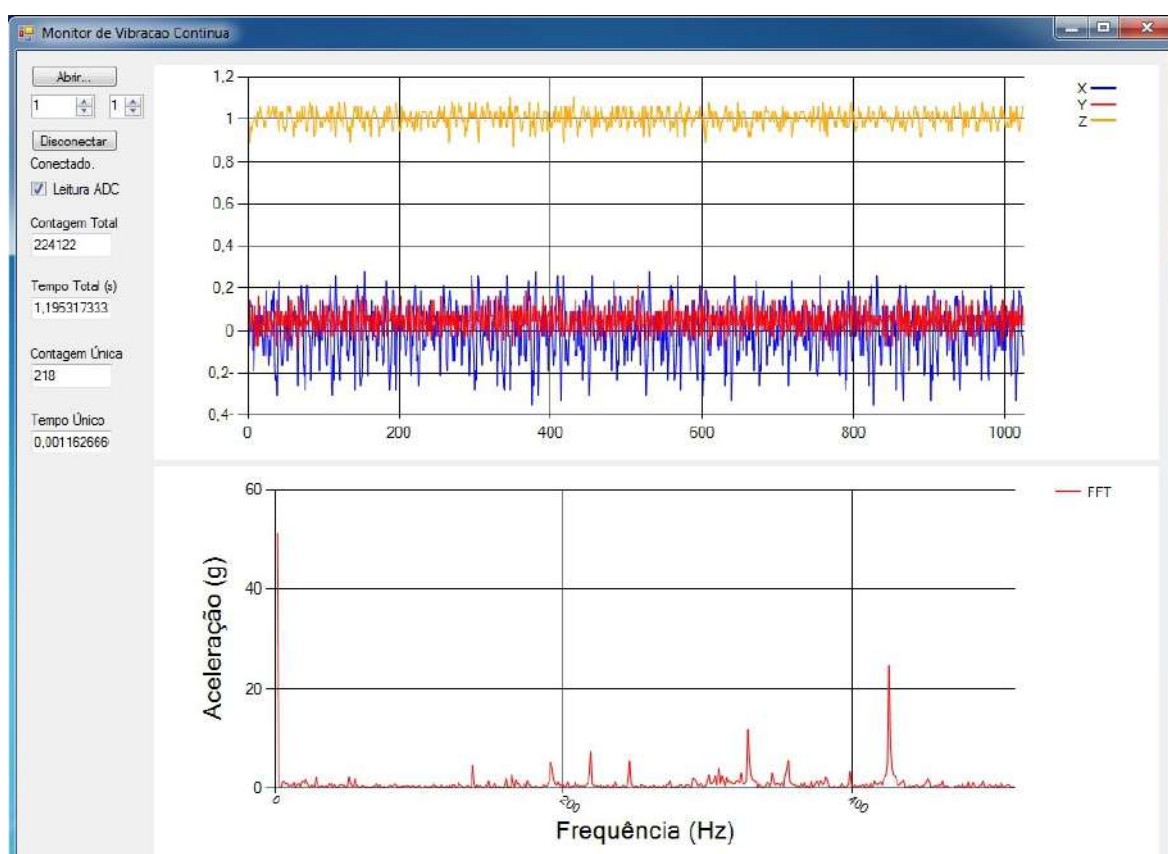


Figura 4.49: Espectro do eixo Y do motor de indução à 1366rpm (em 45,6Hz sem blindagem).

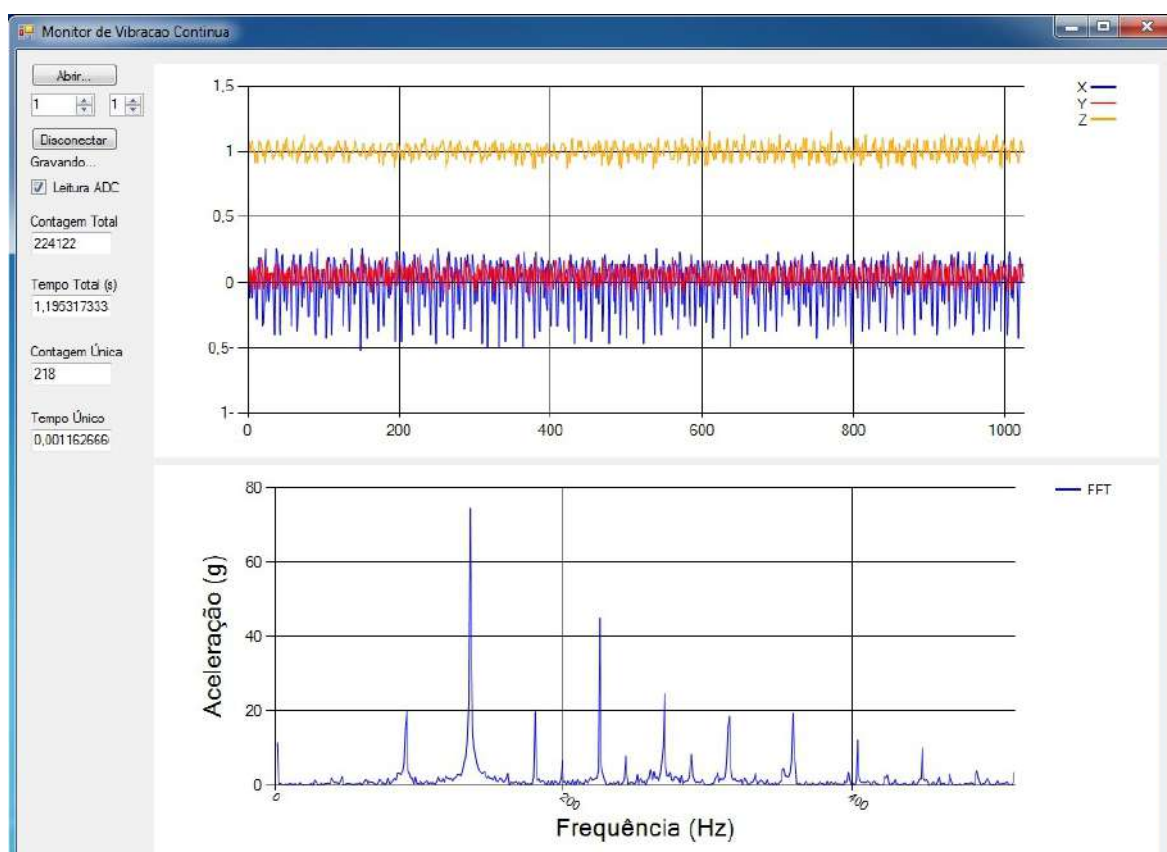


Figura 4.50: Espectro do eixo X do motor de indução à 2246rpm (em 75,2Hz sem blindagem).

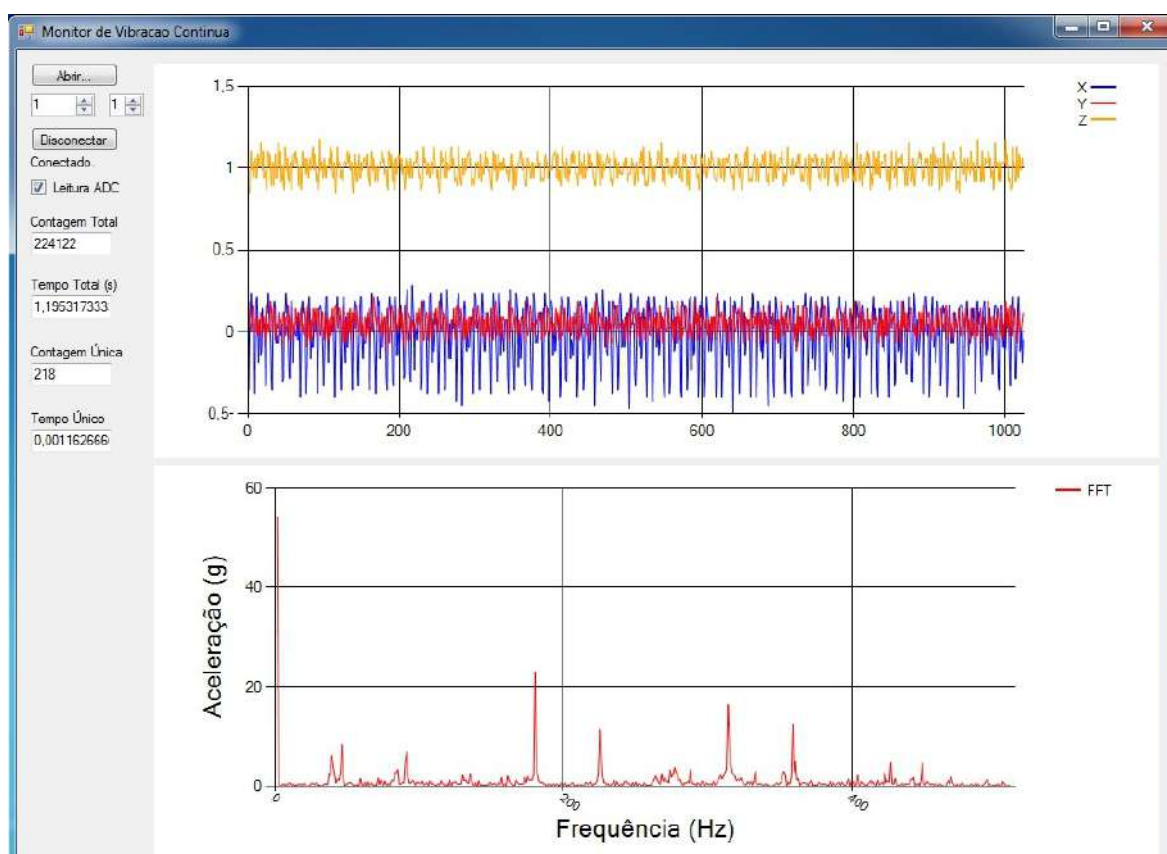


Figura 4.51: Espectro do eixo Y do motor de indução à 2246rpm (em 75,2Hz sem blindagem).

Através das ilustrações é possível realizar comparações entre as configurações com e sem blindagem (ou seja, para o eixo X as comparações entre a Fig. 4.44 e a Fig. 4.48 e entre a Fig. 4.46 e a Fig. 4.50 e para o eixo Y as comparações entre a Fig. 4.45 e a Fig. 4.49 e entre a Fig. 4.47 e a Fig. 4.51). É possível notar que entre essas configurações existem diferenças nas relações de amplitude entre harmônicas e a amplitude geral das harmônicas na configuração com blindagem é menor que na configuração sem blindagem.

Com a gradação de 0,8399Hz por ponto do espectro, era esperado que os picos das componentes de velocidade de 1343rpm, 2240rpm, 1366rpm e 2246rpm (equivalentes em Hertz a 22,3833Hz, 37,3333Hz, 22,7667Hz e 37,4333Hz, respectivamente) fossem encontrados em 26,6500, 44,4497, 27,1064 e 44,5688, respectivamente. As componentes harmônicas mais evidentes seriam esperadas nos respectivos múltiplos desses pontos. Para uma melhor visualização dos resultados, segue adiante uma tabela com os valores esperados para as 2 configurações e os valores obtidos.

Tabela 4.11: Valores esperados e obtidos para mudanças de frequência do motor de indução.

Com blindagem						Sem blindagem					
44,9Hz (1343rpm)		60,4Hz (1813rpm)		75,0Hz (2240rpm)		45,6Hz (1366rpm)		60,2Hz (1806rpm)		75,2Hz (2246rpm)	
Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos	Valores esperados	Valores obtidos
26,6500	26	35,9765	35	44,4497	43	27,1064	27	35,8376	36	44,5688	45
53,3000	51	71,9530	69	88,8995	85	54,2128	54	71,6752	72	89,1376	90
79,9500	77	107,9295	104	133,3492	128	81,3192	82	107,5128	108	133,7064	134
106,6000	103	143,9060	139	177,7989	171	108,4256	109	143,3504	143	178,2752	179
133,2500	128	179,8825	173	222,2487	214	135,5320	136	179,1880	179	222,8440	224
159,9000	154	215,8590	208	266,6984	257	162,6384	163	215,0256	215	267,4128	269
186,5500	180	251,8355	242	311,1481	300	189,7448	190	250,8632	251	311,9816	313
213,2000	205	287,8120	277	355,5979	342	216,8512	218	286,7008	257	356,5504	358
239,8500	231	323,7885	312	400,0476	385	243,9576	245	322,5384	323	401,1192	403
266,5000	257	359,7651	346	444,4974	428	271,0640	273	358,5760	359	445,6880	448
293,1500	282	395,7416	381	488,9471	471	298,1704	299	394,2136	395	490,2568	493
319,8000	309	431,7181	415	-	-	325,2768	327	430,0512	430	-	-
346,4500	334	467,6946	450	-	-	352,3832	355	465,8888	466	-	-
373,1000	359	503,6711	485	-	-	379,4896	381	501,7264	502	-	-
399,7500	385	-	-	-	-	406,5960	408	-	-	-	-

426,4000	411	-	-	-	-	433,7024	436	-	-	-	-
453,0500	436	-	-	-	-	460,8088	463	-	-	-	-
479,7000	462	-	-	-	-	487,9152	490	-	-	-	-
506,3500	488	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

É possível notar que para as configurações com blindagem ocorreu um erro gradativamente crescente, indicando que a velocidade prevista não corresponde à velocidade obtida. As velocidades obtidas estão em 25,75, 34,67 e 42,95, aproximadamente, correspondendo a 21,63Hz, 29,12Hz e 36,07Hz (ou 1298rpm, 1747rpm e 2164rpm), respectivamente. Portanto existe uma diferença de 45rpm, 66rpm e 74rpm para baixo, respectivamente. Para as configurações sem blindagem é possível notar que as diferenças entre valor esperado e valor encontrado são normalmente inferiores a 2 unidades (inferior a 1,68Hz), em sentido crescente com o avanço das harmônicas.

A Tab. 4.12 apresenta os valores de erro relativo e absoluto para as configurações com e sem blindagem, respectivamente.

Tabela 4.12: Valores de erros para as configurações com variação de frequência, com e sem blindagem.

Com blindagem			Sem blindagem		
44,9Hz (1343rpm)	60,4Hz (1813rpm)	75,0Hz (2240rpm)	45,6Hz (1366rpm)	60,2Hz (1806rpm)	75,2Hz (2246rpm)
3,37%	3,63%	3,38%	7,38%	1,40%	4,49%

Através da visualização da sequência de espectros (da variação das componentes) nas imagens e dos valores das tabelas é possível notar que, com o aumento da frequência do inversor, ocorreu:

1. o aumento do equilíbrio de ênfase entre as harmônicas (as diferenças de amplitude entre harmônicas diminuíram em geral);
2. o ganho de ênfase de componentes não relacionadas à velocidade (cuja amplitude começa a se equiparar às harmônicas relacionadas à velocidade);
3. o decremento de amplitude em todas as componentes, mais facilmente observável nas configurações com blindagem.

5. Discussão dos resultados

As discussões dos resultados apresentados no capítulo 4 seguem adiante, separadas de acordo com as seções principais.

5.1. Desenvolvimento dos códigos-fonte da FFT, do microprocessador e da interface gráfica

Sobre o código da FFT, a exatidão de 15 casas decimais (com diferença de 1 ou poucas unidades na 16ª casa decimal, em alguns dos valores) em comparação com a saída da função do software Matlab é muito superior ao necessário para a aplicação. Uma vez que a análise é essencialmente visual, não seria necessária nenhuma casa decimal para as imagens. Para as tabelas numéricas seriam necessárias apenas as casas decimais suficientes para mostrar a diferença entre pontos adjacentes, ou seja, 1 ou 2 casas decimais. Assim, o resultado deste conjunto de testes de comparação de aproximação foi favorável, comprovando a correta codificação do algoritmo da FFT e sua precisão para a aplicação.

Sobre o código do microprocessador, a diferença máxima no tempo de amostragem entre duas amostras consecutivas é de 4 μ s. Essa diferença é a máxima e sua ocorrência não é consecutiva (envolvendo 3 amostras consecutivas), de forma que a diferença real é próxima à metade deste valor, igual a 2 μ s. Diante do tempo base sobre o qual é calculada a extensão do espectro, esta diferença representa um erro de aproximadamente 0,18%. Esse erro não compromete a fidelidade do sinal amostrado, frente à exigência da aplicação.

Sobre o código da interface gráfica, a atribuição de *host* representou a maior deficiência da implementação, levando a uma elevação do tempo de cada ciclo completo. O tempo total de uma operação de amostragem (tomada de 1024 amostras) não foi obtido, mas pode ser aproximado ao multiplicar por 1023 o tempo base. Também não foi obtido o período de tempo entre duas operações de amostragem (ou seja, de um ciclo completo). Dessa forma, não é conhecido o tempo ocioso do microprocessador, no qual ocorre a espera entre o envio de pacotes. É previsível que este tempo ocioso é elevado diante do total, representando uma perda de eficiência na execução da aplicação. Porém, uma vez que não é realizado o estudo de eventos de curta duração, mas apenas do regime de funcionamento dos motores, esta deficiência não influencia a exatidão dos resultados da aplicação.

5.2. Testes sobre os motores

As discussões sobre os testes foi separada de acordo com os tipos, nas seções seguintes.

5.2.1. Testes de comparação de velocidade

As comparações foram realizadas com as leituras do tacômetro óptico e com a leitura de frequência do inversor de frequência, que tem precisões limitadas. O valor da leitura apresentada pelo inversor é sempre superior em módulo e pode ser considerado mais preciso, por seu ajuste mais fino. Também a leitura do tacômetro é influenciada pela iluminação local, pela superfície de leitura, pela manipulação do ponteiro luminoso e pela detecção de variação da velocidade (para atualização da leitura). Por causa destas influências foram tomadas várias leituras diferentes em um mesmo teste, com diferença máxima de 20rpm para uma mesma configuração. Assim, a leitura do inversor de frequência foi considerada mais confiável, ainda que por uma diferença desprezível para a aplicação.

Através dos testes realizados com o motor de indução é possível observar que a diferença entre as leituras do inversor e do tacômetro são de 4rpm, 10rpm, 2rpm e 10rpm para as configurações com blindagem (44,9Hz e 75,0Hz) e sem blindagem (45,6Hz e 75,2Hz), respectivamente. Os valores de erro são baseados na leitura do inversor e iguais a 0,30%, 0,44%, 0,15% e 0,44%, respectivamente. Dado que as diferenças das comparações com a saída do sistema são iguais para as duas fontes de leitura (tomados os testes de todos os motores), o erro entre as duas leituras pode assim também ser considerado desprezível para a aplicação.

Os resultados dos testes de comparação de velocidade foram apresentados em forma de porcentagens de erro, que foram calculadas sobre a diferença máxima entre um valor esperado e obtido de cada teste. Além dessa escolha, foi realizada uma aproximação em unidades de 0,42Hz (a metade da unidade de precisão do sistema), tornando ainda mais desfavorável o valor de erro obtido. Esta metodologia foi escolhida para garantir que o valor real do erro fosse conhecido como menor que este valor superdimensionado (uma vez que o valor real não pode ser precisamente conhecido). Dado que os valores de erro superdimensionados são toleráveis para a aplicação, também os valores reais estão dentro do esperado.

Sobre o erro encontrado nas configurações com blindagem, é devido ao expressivo incremento de massa que a caixa metálica representa. Assim, a placa que antes não oferecia interferência significativa (massa desprezível diante da massa do motor) passa a representar uma interferência já perceptível, ainda que pequena em módulo da saída. E como também observado, o decremento da velocidade detectada é proporcional à velocidade de rotação.

5.2.2. Testes de presença de ruído

Este tipo foi realizado apenas para o motor DC de 12V, atestando que o nível de ruído é irrelevante para todas as frequências. Este ruído é causado pela imprecisão da leitura do acelerômetro, agravado desde a flutuação do sinal analógico (causada por variações de temperatura, variações elétricas, variações entre unidades de componentes eletrônicos e outros) até a flutuação da conversão analógica-digital. Assim, este ruído pode ser considerado padrão válido para os demais motores.

Para o segundo teste de presença de ruído, em especial, ocorreu a detecção de uma componente apenas com a mudança de base de apoio para a placa (da bancada para o motor). É possível concluir que esta componente foi gerada por uma fonte de vibração mecânica externa (presente no ambiente), cuja energia vibratória se propaga para a bancada e, por consequência, para o motor. Como as características do motor (massa, composição, dimensões e fundação) são diferentes das características da bancada, é possível que esta detecção diferente ocorra, graças à interação diferente da energia mecânica em propagação com cada corpo. Por isso também é fundamental um estudo de posicionamento do sensor para aplicações que exigem maior precisão e sensibilidade. A fonte de vibração em questão é o computador de mesa que foi utilizado para executar a interface gráfica, mais especificamente a ventoinha de refrigeração.

5.2.3. Testes de mudança de carga

O carregamento do motor, se não for equilibrado (simétrico) ocasiona um desbalanceamento externo. E mesmo que a carga seja colocada simetricamente, irá agravar qualquer desbalanceamento interno (já presente na condição sem carga). Dessa forma, é possível notar que o motor de indução estaria mais desbalanceado que o motor DC de 1700W, uma vez que as lógicas de mudanças para seus espectros não foram facilmente observadas (especialmente porque estavam mais ligadas a componentes harmônicas não relacionadas à velocidade).

Em contrapartida, as lógicas de mudanças dos espectros para o motor DC de 1700W foram mais facilmente observadas, visto estarem relacionadas diretamente às harmônicas da velocidade. E a facilidade foi ainda maior graças à sua característica de manutenção da velocidade diante do aumento de carga. Dessa forma é possível observar que este motor estava mais balanceado, por causa das componentes que sofreram incremento de amplitude (a componente fundamental e a 1ª harmônica, cuja frequência é igual ao dobro da fundamental) e das que sofreram decremento de amplitude (as 2ª, 4ª e 6ª harmônicas, cujas frequências são múltiplos ímpares da fundamental).

5.2.4. Testes de mudança de frequência com o inversor de frequência

Antes propriamente da comparação entre diferentes configurações do inversor, é possível comparar a saída do sistema ligado à rede elétrica e ao inversor com frequência próxima aos 60Hz. O espectro quando ligado à rede elétrica apresenta muito menos ruído e harmônicas não relacionadas à velocidade, sobretudo em altas frequências. Assim é possível observar que o inversor é responsável pela adição de componentes novas não relacionadas à velocidade, graças à sua técnica de construção da onda senoidal, através do chaveamento em alta frequência.

E com o aumento da frequência do sinal de saída (e por consequência diminuição do período) é natural que haverá menos ciclos de chaveamento compondo cada ciclo do sinal de saída. Por este motivo ocorre o ganho de ênfase das componentes não relacionadas à velocidade com o aumento da frequência de saída (o sinal de saída torna-se mais 'imperfeito').

6. Conclusões e trabalhos futuros

O sistema proposto e desenvolvido para aquisição e análise de sinais de vibração atingiu as expectativas da aplicação. A aquisição intercalada impede a visualização e análise de eventos não repetitivos, mas ainda atende à proposta do monitoramento contínuo, para eventos repetitivos. As análises realizadas também não abordam todos os defeitos que podem ser encontrados nos motores, também porque não foram realizadas comparações com análises semelhantes de outros autores (apenas análises e comparações internas, entre testes). Apesar dessa simplicidade a análise atende a proposta do projeto, demonstrando a possibilidade da realização de testes não invasivos em tempo de operação dos motores. Estas análises seriam úteis para a manutenção preditiva dos mesmos.

As linguagens de programação C e C#, utilizadas para a escrita dos códigos-fonte do microprocessador e da interface gráfica, mostraram-se eficazes para a codificação de rotinas em baixo nível (a exemplo da manipulação de registradores e rotinas com números binários) e alto nível (a exemplo da manipulação de estruturas gráficas). Esta associação de detalhamento e abstração permitiu a simplificação de porções de código periféricas e o ganho de eficiência em porções centrais de cálculos.

O algoritmo da FFT que foi utilizado cumpriu com larga margem a precisão exigida para o tipo de análise proposta. E mesmo que a análise não fosse visual, mas computacional, também seria capaz de atender a exigência de precisão. Apesar de seu cálculo ter sido implementado de forma estática (com valores fixos para o tamanho dos arranjos de entrada e saída), foi arquitetada para a possibilidade de alterações dinâmicas, conforme a necessidade de cada configuração de teste. Essa característica facilita a expansão do número de funcionalidades possíveis para o projeto.

O kit DEMOJM, apesar de não ter sido projetado para atender às exigências da aplicação de aquisição de sinais de vibração, mostrou-se suficiente para a proposta simplificada, sobre uma faixa espectral reduzida (em comparação com os modelos comerciais). Mesmo o microprocessador de 8-bits foi subutilizado, o que permite que a frequência de amostragem seja ainda muito mais elevada. Bastaria realizar a substituição do sensor acelerômetro, preferencialmente por um modelo não integrado à placa (para que a massa da placa não influencie a medição e para que o contato com o motor não danifique a placa).

Os testes sobre os motores comprovaram o funcionamento do sistema desenvolvido e mostraram-se preciso o suficiente para a percepção das componentes de vibração relacionadas à velocidade. Outras componentes, que também puderam ser observadas, não foram analisadas em profundidade para que não fossem apresentadas especulações de defeitos. O método correto para a análise de todos os defeitos possíveis seria a utilização de motores com estes defeitos previamente conhecidos (introduzidos propositalmente). Assim, quando fosse utilizado um determinado modelo de motor, poderiam ser realizados o monitoramento e a análise automática de defeitos.

A partir destas considerações, é possível atestar que o projeto desenvolvido cumpriu os objetivos propostos. Contudo, graças aos vários segmentos que o compõem, pode ainda ser aprimorado de várias formas. Algumas delas estão discriminadas nos tópicos a seguir.

- Encontrar alternativas dentro do algoritmo da FFT ou alternativas às limitações do microprocessador de 8-bits para eliminar a restrição da operação sobre variáveis em ponto flutuante, a fim de viabilizar a execução do algoritmo neste microprocessador;
- Utilizar o potencial para migração entre arquiteturas de 8-bits e 32-bits, oferecida pelo kit DEMOJM e facilitada pelo software CodeWarrior, para realizar a migração do projeto para o microprocessador de 32-bits e observar os avanços alcançados;
- Substituir a interface de comunicação USB por uma interface de comunicação sem fios, a fim de superar as limitações físicas e lógicas impostas pelas conexões cabeadas. Uma alternativa potencial seria a utilização do protocolo Xbee [34], cujas vantagens tem sido destacadas em aplicações industriais;
- Substituir o uso do computador como utilitário para a exibição gráfica, adicionando um módulo com *display* gráfico a ser conectado e controlado diretamente pelo microprocessador;
- Adicionar um módulo de armazenamento expansível, baseado em cartão de memória ou outra mídia portátil, para gravação das informações do sinal de vibração e gravação dos cálculos da FFT no próprio monitor;
- Implementar a lógica de análise automática computacional, para retirada de mais informações do espectro calculado.

Referências Bibliográficas

- [1] Imagem 'brinroll.jpg', retirada de Stevens, D.; Bearing wear and its causes; web-site:
<http://www.vibanalysis.co.uk/technical/wear/wear.html> .

- [2] Imagem '800px-Cavitation_Propeller_Damage.jpg', retirada de Pitting corrosion; Enecon Corporation;
web-site: <http://getenecon.com/proven-solutions/pitting-corrosion.aspx> .

- [3] Datastick® VSA-1214 VSA-1215 Vibration Spectrum Analyzers; Datastick Systems, 2009; web-site:
<http://www.datastick.com> .

- [4] Imagem 'VSA-1215PRHorizL5x7.jpg', retirada de Datastich Press; web-site:
http://www.datastick.com/press/press_photos.html .

- [5] Computador de mão Palm® T|X; web-site:
<http://www.palm.com/br/products/handhelds/tx/index.html> .

- [6] DEMOJM Cost-effective USB development; Freescale Semiconductor, 2008

- [7] Flexis JM Family Overview; Digi-Key; web-site:
<http://dkc1.digikey.com/us/en/tod/Freescale/FlexisJMFamil/FlexisJMFamil.html> .

- [8] Microsoft® Visual Studio® 2010 Express; Microsoft Corporation, 2010; web-site:
<http://www.microsoft.com/express/> .

- [9] USB in a NutShell; web-site: <http://www.beyondlogic.org/usbnutshell/usb1.shtml> .

- [10] VITTORINO, M. A.; Análise de Vibração, Cargill.

- [11] Imagem 'eg-magnets.gif', retirada de MARSHALL, B.; Como funcionam as guitarras elétricas; web-site:
<http://lazer.hsw.uol.com.br/guitarras-eletricas.htm> .

- [12] Imagem 'lab3fig3.gif', retirada de Lab 3: Translational 2nd-order Spring/Mass/Damper System; Natural Response; Fitting Models; we-site: http://ocw.mit.edu/courses/mechanical-engineering/2-003-modeling-dynamics-and-control-i-spring-2005/labs/lab_3/ .

- [13] SOEIRO, N. S.; Curso de Fundamentos de Vibrações e Balanceamento de Rotores; GVA – UFPA, 2008.
- [14] Vibrações em motores elétricos; SKF.
- [15] Imagem adaptada de AKATSU, K.; TAGUCHI, S.; Electric Machine with inner and outer rotor; 2005.
- [16] MICHALAK, E. J.; Manutenção preditiva: análise de vibrações; Mecatrônica Atual, 2008; web-site: <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/270> .
- [17] Imagem 'product-Deep-Groove-Ball-Bearings.jpg', retirada de Shandong tongli bearings Co.,Ltd; web-site: <http://img.hibearing.com/> .
- [18] Imagem retirada de Stevens, D. Motor Drive End Bearing Damage, Case History Number 11; A V Technology Limited; web-site: <http://www.vibanalysis.co.uk/vibcases/vibch11/vibch11.html> .
- [19] Diagnóstico de problemas em motores elétricos por meio da análise do espectro de vibração mecânica de Corrente Alternada; WEG.
- [20] RAO, S. S.; Vibrações Mecânicas, 4ª Edição; Pearson Education do Brasil, 2009.
- [21] Practical Guide to Accelerometers; SENSR, www.sensr.com .
- [22] MMASERIASFS, Rev. 13; Acceleration Sensors, Freescale Semiconductor Inc., 2010.
- [23] Imagem adaptada de 'figure-2(1).jpg', retirada de CORELLI, D.; BAKEWELL, M.; Vibration Accelerometers — Sheer vs Compression Designs, PCB Piezotronics; web-site: <http://maintenanceonline.co.uk/maintenanceonline/?page=articles.asp&id=1630> .
- [24] Imagem 'fig1.jpg', retirada de GUILLOU, D.; Packaging MEMS: New Manufacturing Methodology Substantially Reduces Smart MEMS Costs; IC Mechanics, Inc.; web-site: <http://archives.sensorsmag.com/articles/1203/20/main.shtml> .
- [25] NEWLAND, D. E.; An Introduction to Random Vibrations, Spectral & Wavelet Analysis, Third Edition; Dover, 2005.
- [26] WALKER, J. S; Fast Fourier Transforms; CRC Press, 1991.

- [27] MathWorks; web-site: <http://www.mathworks.com/products/matlab/> .
- [28] TDS 200-Series Digital Real-Time Oscilloscope User Manual; Tektronix.
- [29] Manual de Instruções Tacômetro Foto / Contato Digital MDT-2238A; Minipa, 2003.
- [30] FRIGO, M.; JOHNSON, S.; FFTW; web-site: <http://www.fftw.org/index.html> .
- [31] MARTINS, J.; How to implement the FFT algorithm, 2005; web-site: <http://www.codeproject.com/KB/recipes/howtofft.aspx> .
- [32] ARCHELON INC.; Fast Fourier Transform C Code; web-site: <http://www.archelon.com/fft.html> .
- [33] QUIROZ, S.; How to Make a Graphical User Interface for USB Communication; Freescale Semiconductor Inc., 2006.
- [34] Zigbee Alliance; web-site: <http://www.zigbee.org/> .
- [35] DEMOJM User Manual; DEMOJMUM, Ver. 1.03; PE Micro, 2010.
- [36] SANCHEZ, G.; MONTAÑEZ, E.; PERALEZ, R.; DAVALOS, M.; Migrating within the controller continuum Flexis™ S08 & ColdFire V1; AN3465, Rev. 0; Freescale Semiconductor Inc., 2007.
- [37] Imagem 'DEMOJMSKTBD.jpg', retirada de http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=DEMOJM .
- [38] Welcome to the Controller Continuum; BRCONTINUUMCONTR, Rev. 1; Freescale Semiconductor Inc., 2008.
- [39] MMA7260QT XYZ Three-Axis Low g Acceleration Sensor; MMA7260QTFS, Rev. 1; Freescale Semiconductor Inc., 2007.
- [40] $\pm 1.5g$ - 6g Three Axis Low-g Micromachined Accelerometer; MMA7260QT, Rev. 5; Freescale Semiconductor Inc., 2008.
- [41] Imagem 'chip.jpg', retirada de <http://www.avrfreaks.net/index.php?name=PNphpBB2&file=viewtopic&p=455050> .

[42] CodeWarrior™ Development Studio for Microcontrollers v6.1, Rev. G; Freescale Semiconductor Inc., 2007.

APÊNDICE A – Código-fonte desenvolvido da FFT

Segue adiante o código-fonte da Transformada Rápida de Fourier (FFT) desenvolvido em linguagem de programação C:

```
int cnt = 0; /* Índice da FFT a ser calculada */
public static int n = 128; /* Igual à metade do número de pontos coletados */
public static int m = 32; /* Igual a (n/4) o (número de senos)-1 */
public static int r = 7; /* Igual a log2(n) o número de estágios para 'calcsenos' e 'calcfft' */
int[] fftx = new int[n << 1]; /* Arranjo para armazenar os módulos dos elementos da FFT do eixo X */
int[] ffty = new int[n << 1]; /* Arranjo para armazenar os módulos dos elementos da FFT do eixo Y */
int[] fftz = new int[n << 1]; /* Arranjo para armazenar os módulos dos elementos da FFT do eixo Z */
float[] data0 = new float[n<<1]; /* Arranjo para armazenar a primeira metade da FFT final calculada */
float[] data1 = new float[n<<1]; /* Arranjo para armazenar a segunda metade da FFT final calculada */
float[] senos = new float[(m<<1)+1]; /* Arranjo para armazenar os senos utilizados nos cálculos */

/*
Função para o cálculo de raízes quadradas. Retorna, em um número real, a raiz quadrada do número real
'radicando'. O calculo do pivô para início das iterações é a primeira operação.
*/
public float calcsqrt(float radicando)
{
    float radic, raiz, x;
    int pivo, cont1, cont2, aux;

    radic = radicando;
    cont1 = 0;
    if(radic!=0.0)
    {
        while(radic<1.0)
        {
            radic = radic*4;
            cont1++;
        }
        pivo = (int) radic;
        if(radic-(float)pivo>0.5) pivo++;

        aux = pivo;
        cont2 = 0;
        while(aux>1)
        {
            aux = aux >> 1;
            cont2++;
        }
        cont2 = cont2 >> 1;
        pivo = pivo >> cont2;

        x = (float)pivo;
        raiz = radic/x;
        raiz = (raiz + x)/2;
        cont2 = 1;
        while(x!=raiz)
```

```

    {
        x = raiz;
        raiz = radic/x;
        raiz = (raiz + x)/2;
        cont2++;
    }

    while(cont1 != 0)
    {
        raiz = raiz/2;
        cont1--;
    }
}
else raiz = radic;
return raiz;
}

/*
Função para o cálculo do módulo arredondado de um número complexo. Retorna, em um número inteiro, o
módulo de um número complexo, cujas componentes são os números reais 'xi' e 'yi'.
*/
public int moduloarred(float xi, float yi)
{
    float xy, aux;
    int xyi;

    xy = xi*xi;
    xy = xy + (yi*yi);
    xy = calcsqrt(xy);

    xyi = (int) xy;
    aux = xy - (float)xyi;
    if(aux>0.5) xyi++;
    if(aux<-0.5) xyi--;

    return xyi;
}

/*
Função para o cálculo do módulo de um número complexo. Retorna, em um número real, o módulo de um
número complexo, cujas componentes são os números reais 'xi' e 'yi'.
*/
public float modulo(float xi, float yi)
{
    return(calcsqrt((xi*xi)+(yi*yi)));
}

/*
Função para o cálculo do valor arredondado de um número real.
Retorna, em um número inteiro, o valor arredondado do número real 'flt'.
*/
public int arred(float flt)
{
    float aux;
    int xi;

```

```

xi = (int)flt;
aux = flt - (float)xi;
if (aux > 0.5) xi++;
if (aux < -0.5) xi--;

```

```

return xi;
}

```

```

/*

```

Função para o cálculo do arranjo de senos utilizados no cálculo das FFTs parciais e da FFT final. Metade do número de senos é utilizado no cálculo das FFTs parciais, visto que o tamanho de cada é a metade do tamanho da FFT final. Para o cálculo da FFT final é utilizado o arranjo completo.

Retorna no arranjo global 'senos' os valores calculados dos senos periódicos de 0 até $(n*2)/4$.

```

*/

```

```

public void calcsenos()
{
    float[] z = new float[r-1]; //Seria r-2 para o caso normal
    int i, j, ns, index0, index1, index2;

```

```

    for(j=0;j<(m<<1);j++) senos[j] = 0;
    senos[(m<<1)] = 1;
    ns = 1;
    z[0] = calcsqrt(2);
    for(i=1;i<r-1;i++) z[i] = calcsqrt(2 + z[i-1]);

```

```

    for(i=0;i<r-1;i++)
    {
        index1 = 0;
        index2 = ((m<<1)>>i);
        index0 = index2 >> 1;
        for(j=0;j<ns;j++)
        {
            senos[index0] = senos[index1] + senos[index2];
            senos[index0] = senos[index0]/z[i];

```

```

            index0 = index0 + ((m<<1)>>i);
            index1 = index1 + ((m<<1)>>i);
            index2 = index2 + ((m<<1)>>i);

```

```

        }
        ns = ns << 1;
    }
}

```

```

/*

```

Função para o cálculo dos índices reversos em sequência binária.

Retorna, em um número inteiro, a sequência binária revertida do número inteiro 'index'.

```

*/

```

```

int bitreversal(int index)

```

```

{
    int i, aux, rindex;
    aux = index;
    rindex = 0;

```

```

    for(i=0;i<r;i++)

```

```

{
    rindex = rindex << 1;
    rindex += (aux & 1);
    aux = aux >> 1;
}

```

```

return rindex;
}

```

```

/*

```

Função para o cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT). Retorna no arranjo global de números inteiros 'fftX', 'fftY' ou 'fftZ' (de acordo com o especificado pela variável 'col') o módulo dos índices complexos da FFT do arranjo de números inteiros 'axis'.

```

*/

```

```

int calcfft(int[] axs)

```

```

{
    float rew, imw, tan, v;
    int i, j, k, nk, index0, index1, indexsen, pot;

    for (i = 0; i < (n << 1); i++) data0[i] = axs[i];

    for(i=0;i<n;i++)
    {
        j = bitreversal(i);

        data1[(j<<1)] = data0[(i<<1)];
        data1[(j<<1)+1] = data0[(i<<1)+1];
    }

```

```

    index1 = 1;
    nk = 2;
    pot = n>>1;

```

```

    for(i=0;i<r;i++)
    {
        for(k=0;k<(nk>>1);k++)
        {
            indexsen = (pot*k)<<1;
            if(indexsen>(m<<1))
            {
                indexsen = n - indexsen;
                tan = 1 + senos[((m<<1) - indexsen)];
                tan = tan/senos[indexsen];
            }
            else
            {
                if(indexsen != 0)
                {
                    tan = 1 - senos[((m<<1) - indexsen)];
                    tan = tan/senos[indexsen];
                }
                else tan = 0;
            }
            index0 = k;

```

```

for(j=0;j<(n>>(i+1));j++)
{
    v = (data1[((index1 + index0)<<1)])*tan;
    v += data1[((index1 + index0)<<1)+1];
    rew = data1[((index1 + index0)<<1)];
    rew -= (v*senos[indexsen]);
    imw = rew*tan;
    imw += v;

    data1[((index1 + index0)<<1)] = data1[((index0)<<1)] - rew;
    data1[((index1 + index0)<<1)+1] = data1[((index0)<<1)+1] - imw;

    data1[((index0)<<1)] += rew;
    data1[((index0)<<1)+1] += imw;

    index0 += nk;
}
}

index1 = index1 << 1;
nk = nk << 1;
pot = pot >> 1;
}

for(i=0;i<n;i++)
{
    indexsen = i;
    if(indexsen>(m<<1))
    {
        indexsen = n - indexsen;
        tan = 1 + senos[((m<<1) - indexsen)];
        tan = tan/senos[indexsen];
    }
    else
    {
        if(indexsen != 0)
        {
            tan = 1 - senos[((m<<1) - indexsen)];
            tan = tan/senos[indexsen];
        }
        else tan = 0;
    }

    if(i != 0)
    {
        rew = (data1[(i<<1)+1])/2;
        rew += (data1[((n-i)<<1)+1])/2;
        v = ((data1[((n-i)<<1)])-(data1[(i<<1)]))/2;
        data0[(i<<1)] = (data1[(i<<1)])/2;
        data0[(i<<1)] += (data1[((n-i)<<1)])/2;
        data0[(i<<1)+1] = ((data1[(i<<1)+1])-(data1[((n-i)<<1)+1]))/2;
    }
    else
    {
        rew = data1[1];

```

```

    v = 0;
    data0[0] = data1[0];
    data0[1] = 0;
}

v += rew*tan;
rew -= (v*senos[indexsen]);
imw = rew*tan;
imw += v;

data0[(i<<1)] += rew;
data0[(i<<1)+1] += imw;
}

data1[0] = data1[0] - data1[1];
data1[1] = 0;

for(i=1;i<n;i++)
{
    data1[(i<<1)] = data0[((n-i)<<1)];
    data1[(i<<1)+1] = -(data0[((n-i)<<1)+1]);
}

switch (col)
{
    case 0:
        for(i=0;i<n;i++)
        {
            fftx[i] = moduloarred(data0[(i << 1)], data0[(i << 1) + 1]);
            fftx[i + n] = moduloarred(data1[(i << 1)], data1[(i << 1) + 1]);
        }
        break;
    case 1:
        for(i=0;i<n;i++)
        {
            ffty[i] = moduloarred(data0[(i << 1)], data0[(i << 1) + 1]);
            ffty[i + n] = moduloarred(data1[(i << 1)], data1[(i << 1) + 1]);
        }
        break;
    case 2:
        for (i = 0; i < n; i++)
        {
            fftz[i] = moduloarred(data0[(i << 1)], data0[(i << 1) + 1]);
            fftz[i + n] = moduloarred(data1[(i << 1)], data1[(i << 1) + 1]);
        }
        break;
}

return 0;
}

```

APÊNDICE B – Tabelas de dados de saída do sistema para os testes

Seguem adiante as tabelas com os valores de saída mais relevantes, referentes aos testes realizados sobre os motores. As tabelas estão organizadas de acordo com os motores utilizados e as configurações de montagem. Os valores numéricos são apresentados com 15 ou 16 casas decimais por tratar-se de uma cópia fiel da saída do sistema de aquisição e processamento. Para a análise da aplicação não é necessária esta quantidade de casas decimais.

1. Tabelas dos testes sobre o motor DC de 12V

Tabela 1: Teste de comparação de velocidade em 1156rpm.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
22	2,1002649076973700	0,6331076759916510	0,1470884902457460
23	34,4603703846208000	5,8874914384588900	3,7214284537430600
24	1,5525164738403500	0,4328236371398560	0,6281801295805480
...	...	...	...
45	2,3447409563061700	0,6248538189383610	1,5421962594126300
46	12,1657995213896000	2,9172868542104800	10,4327068763080000
47	1,4922343133248100	0,2008868162922390	1,0426091190980200
...	...	...	...
68	1,0529090556882100	0,3001181325845270	0,4746214287930660
69	6,0897049378633000	1,8255670643093200	2,3981697315417900
70	1,4533281144820300	0,8319452419182760	0,2243083787036840
...	...	...	...
91	1,1625428778170800	0,2549942512903280	0,3843236437147810
92	2,8113189734320300	0,7508924758497460	0,8273616072429830
93	0,3144445531446410	0,2477747297873310	0,1103439573428940
...	...	...	...
136	1,8163573372721100	0,1254818295327630	0,7019334416055990
137	6,1473083278232800	0,5085124406805330	0,4924151225960250
138	12,6043413846677000	0,4883507925894630	1,5154898462561300
139	1,6710296391692400	0,5335431544761410	0,1277346508204720

Tabela 2: Teste de comparação de velocidade em 2995rpm.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
59	32,0692294628816000	64,6419210620963000	20,5285719132805000
60	46,8570269836459000	94,2309776012278000	29,5107944719107000
61	13,3948770707871000	27,8366245794512000	8,9451856550052800
...	...	...	...
118	4,2319885826884400	8,6638425244261200	1,6961358299870000

119	26,9798916102269000	52,0513292042529000	10,8323714794245000
120	6,1553155411843100	10,5971932733746000	1,7964384555363900
...	...	...	...
178	22,3320719889030000	16,4418559972744000	2,7681938112966600
179	75,7047234658142000	54,1214077194124000	8,3142328201196500
180	13,9116534446580000	9,7663762199074500	1,3129989413407900
...	...	...	...
237	2,8597679405841300	7,9183069453859300	0,0279810303989855
238	11,7536648965289000	30,0499102944387000	0,2480845017220750
239	6,8273597138139100	17,2703513259820000	0,1305533880899110
240	3,0462658194618900	6,7641838005753000	0,3709218458624460
...	...	...	...
297	1,3549947931776600	2,0108491472050500	0,4759702796606690
298	19,9770160517497000	38,2840696961870000	7,3828215031603500
299	1,0526909319609200	1,6126303841883500	0,0819716078873300
...	...	...	...
357	2,4831904263088600	14,3276655026178000	4,3532254966519300
358	2,8673591023189100	17,0475856998392000	5,3332163120906200
359	0,9419732569007330	5,3487120732369300	1,5374006220738200
...	...	...	...
416	1,9920261219839200	1,5143991542358500	0,7034817164031010
417	12,8496305488727000	12,2863672921575000	6,9714468338317400
418	1,8839723608000400	2,1970550845201100	0,8645243323997170
...	...	...	...
476	1,1316625166714100	1,9259575695579200	2,2390435801467500
477	2,8753929455659500	4,8654156756297200	5,5838730683462900
478	0,8255681137447460	1,5851294096049400	1,3714757507928100

Tabela 3: Teste de comparação de velocidade em 3460rpm.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
68	39,0128242801785000	98,9861142345985000	30,7463830496380000
69	66,9757289463324000	169,9957527203370000	51,9904835479562000
70	17,8656555241046000	46,5012856816326000	14,0098540762272000
...	...	...	...
136	10,8020161559005000	12,1846570557089000	2,9272747765891700
137	51,9103614213956000	55,4633180813114000	14,0674243230873000
138	17,4559089803983000	17,8684325111962000	4,9417729171339700
...	...	...	...
205	17,0689789659004000	11,9874864873892000	3,9385594118783600
206	132,4974436120630000	89,6097461971395000	32,1287858630652000
207	13,5131562651796000	9,1300626294387900	3,7154345121639600
...	...	...	...
273	3,8007830957756500	6,4072224340714500	0,9652658674948280
274	10,9567403178298000	16,7495815284081000	1,7046192381538600
275	12,2909939531368000	18,6493309081256000	1,3612094605324100
276	4,0403733447342700	6,2730905861265200	0,5731713245165690
...	...	...	...

342	4,2588769659939900	6,9091367403315000	1,5347976284248300
343	28,1622697343643000	46,0125966070786000	12,2557106030348000
344	4,7926593186903800	8,9777561553832200	2,2986782470473100
...	...	...	...
411	2,2624366277325400	6,9905160743182000	1,7835770170771300
412	8,6482444000926100	21,5317624659723000	6,3774254571610700
413	1,3257600728418300	3,5294917019034400	1,7754526842265800
...	...	...	...
479	4,0358868497774300	2,3023859772422000	3,8515890569550900
480	11,1844057262588000	7,2368043690721700	13,3257539023859000
481	7,9498591939699700	4,2271668068140300	9,6190158801357000

Tabela 4: Teste de comparação de velocidade em 3641rpm.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
72	27,9677108576637000	72,5060252232579000	27,6357795248839000
73	42,5034707792983000	110,4736377322900000	40,9354054271752000
74	11,8287333686687000	31,2202887904213000	11,6609621921848000
...	...	...	...
144	7,8623165222046700	4,4344917548740200	0,9275916859023650
145	51,4562725085622000	28,2807305552669000	2,9232433853750000
146	13,4813318349406000	7,0691913298862200	0,4751758675177580
...	...	...	...
217	20,9879720985947000	10,0682902171371000	3,7555716502667300
218	84,0793057488087000	44,0089593329237000	14,0768154295443000
219	13,9683907363238000	7,3058104956714600	1,9942962096077800
...	...	...	...
289	4,1991156789202200	1,8652106581547800	1,7942780960699500
290	15,4201708789046000	7,4320079869477300	6,2998447865052800
291	9,9310709106782000	4,1889856380958500	4,5255387203362800
...	...	...	...
362	0,4356574935400650	0,2447735590670680	0,3463913192616790
363	26,5449928381834000	34,4137635083093000	4,6418505203739300
364	0,1865500512894650	0,3580698722920750	0,6491555422070000
...	...	...	...
435	3,9091080038956700	6,5155042205245800	5,8420915966875700
436	5,1908228226363200	9,4176826546538500	8,8340512135392400
437	1,6012151846766900	2,5616993330190000	2,2001724379241700
...	...	...	...
507	0,4281010960470600	2,3280948939634200	1,9992231786688200
508	3,6611344403466900	11,9889303903768000	12,9886914150277000
509	1,0513701799270300	2,5078308743080100	3,5236434776223200

Tabela 5: Teste de presença de ruído com a placa sobre o motor.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
138	1,3517769741297500	0,1497052500436830	0,7001506568140160

139	3,9257830936532800	0,2012604098228940	0,8786329675092030
140	1,5811727135919500	0,4852682099085070	0,5587458212870170

2. Tabelas dos testes sobre o motor DC de 1700W

Tabela 6: Teste com carga de 300W (mínima).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	22,3379389865068000	19,4733756709913000	21,0331725385676000
34	83,4039232669248000	71,2788808774486000	71,1830714821365000
35	51,0535156882132000	44,7802472099641000	46,1653795519916000
...	...	...	...
68	5,0793758481090400	19,5812107303072000	2,9462141300532800
69	15,9701852010054000	67,5964540726164000	6,3999676508547700
70	4,1922578329558400	12,2418403763140000	1,1649457070507800
...	...	...	...
102	8,8917654212399700	5,3368586134727400	7,8128128258858000
103	55,9703661186546000	34,8865152520615000	63,1519910021596000
104	11,9702490883235000	5,7561152816304400	13,0039054157445000
...	...	...	...
137	25,2184831064467000	19,2141594903148000	6,3923818573658300
138	28,9186277150739000	22,8611317635807000	6,7141144094792800
139	10,1110606840409000	6,3073052135375800	3,5115968664087600
...	...	...	...
171	2,5080396458598200	0,8084346057134790	9,3969217436895400
172	38,1333846802519000	20,0859668726908000	88,5314184846452000
173	3,0862671295844700	3,4149847544730400	4,4125561394924800
...	...	...	...
205	2,4537528356191000	3,3862186444754300	4,2785608513770400
206	6,4116582562889700	8,1072765701399100	7,4796524912761700
207	3,8561850988637800	2,9051769221100400	3,7882338453085200
...	...	...	...
240	3,0944652714769800	2,3460869207897000	23,3423025815661000
241	15,1777370836815000	9,1927371998096300	86,0480672489784000
242	2,5932047114740700	2,5023994721385000	17,0819559676439000
...	...	...	...
274	5,3714012904513700	0,5904039312895410	2,6786344732911900
275	20,0125723257817000	16,0051994656329000	105,6192582823940000
276	2,8436401054724200	1,4619212796173400	25,0610289716276000
...	...	...	...
307	2,3247160084212300	0,3752397578319070	0,7569580005351710
308	5,8741794893543900	2,4440465154401800	0,4771297447791450
309	3,8156048830434000	0,4140302051229590	22,5236730142386000
310	4,9542491118506200	0,2931939922521630	23,2069921200006000
311	2,1637269306786800	0,4864361738921660	6,6228957369059000
...	...	...	...

343	1,2169535798430100	3,1115416626393400	0,6543404909585230
344	9,5285874372936900	9,6962773276597900	9,3468987049384700
345	2,9246909740061800	0,7346822152281960	2,4069727987327100
...	...	...	...
377	1,5975069407578200	2,9867084234018100	1,2892356502298800
378	17,1942497799555000	3,4585308828451800	5,0410458779650200
379	6,8069219192102700	3,4655970686122000	3,1954333246388600
...	...	...	...
412	6,3538839700999600	1,1797470996791300	2,8162399281395900
413	11,5688991557245000	4,8938687927815900	8,8334932143771500
414	5,2392864884575900	1,4085482234946000	1,6165026009291600
...	...	...	...
446	3,0488966847185400	1,3656722091379500	2,1545131388739400
447	15,1476975302249000	1,7032942079789400	6,0378833960077300
448	2,2689211391897800	0,9972190880915500	3,2586179585552700
...	...	...	...
480	5,4335554468017900	3,5222588411892900	1,0760620268063600
481	6,7860377229040400	11,5643968381091000	1,6438671216564300
482	10,2258256871031000	8,5163917741979100	0,9219374853416610
483	4,1574924746279700	6,6297110375694400	0,2826566069764190

Tabela 7: Teste com carga de 600W.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	31,8521156074367000	22,1480113543796000	29,3088042088369000
34	109,1350689340990000	78,7832382013782000	104,3783648522600000
35	69,4087314076617000	49,9815209530335000	65,9739677635545000
...	...	...	...
68	9,1998453323515100	21,9669786094664000	1,9836622978259400
69	33,3548420272535000	73,4937412297305000	10,5552600888962000
70	6,5386426232918600	13,5470278142667000	2,9238749465763000
...	...	...	...
102	4,2054103084311900	6,8528841802024900	5,2614051538028200
103	26,4998586500151000	44,5869574524830000	42,2620619838733000
104	6,1288911147314700	8,0870929358195600	8,3512545804959000
...	...	...	...
137	28,6999727319263000	15,6909509142643000	4,2834302111570100
138	34,2078570930947000	19,5411133668781000	5,1538166139139000
139	10,9221722570637000	4,3233651789386800	3,4646490992258700
...	...	...	...
171	3,3226717510493800	1,2395536588024700	3,6444346582026600
172	10,1905075025049000	4,7286497809349900	58,8744266706595000
173	1,9797392424403000	1,5154435778082900	4,7369814609674700
...	...	...	...
205	3,0683820537823300	2,0757972280958900	3,9337418846199900
206	5,3349816257333700	12,2431714783462000	20,3290698404336000
207	3,3328363541782900	5,3700387273959700	9,2735590545146600
...	...	...	...

240	2,7620415106671400	3,4601838660001300	8,6444531019559600
241	12,2195211474691000	4,5416630878856400	44,5089135340934000
242	2,6598049804479400	0,4656173702975440	13,1962942327419000
...	...	...	...
274	7,1091876607909000	2,7348125237319500	15,0698924803957000
275	29,6735803107561000	20,1583524049283000	69,6530262624403000
276	3,5627005471694400	2,6340216849864000	13,5757596980247000
...	...	...	...
308	2,9593471835342500	0,9642494888892930	8,7698643745718700
309	8,5159259738985900	1,0735600898659700	16,0940096965459000
310	9,2918654020667700	2,4498521132534500	13,2263995949116000
311	3,6446079106716500	0,3763139075505000	4,3310806403680200
...	...	...	...
343	4,8040216280048500	2,1083849491400900	1,5210165022434800
344	9,8740687999940000	6,2535921855256600	7,2710192849012600
345	2,2306159424135800	2,2020813326029600	0,3330375407982360
...	...	...	...
377	3,2462817190052800	0,3380457517245620	1,6267819559687400
378	6,7954063406981900	3,5564835551911600	5,6701086880160700
379	3,2957814506623000	1,4288064173505000	2,4890751282991000
...	...	...	...
412	11,1977911916565000	2,7611435584233700	5,7773499546185700
413	22,4589444937910000	6,0736546550740000	10,6103804009598000
414	4,1414407274182400	3,3877871852655100	1,9149613107493700
...	...	...	...
446	4,6095215207398100	1,3451045964663600	1,2171040436099400
447	15,7499133422268000	2,4367265221078700	6,7777214359164200
448	2,4264166645345800	1,5740644450675300	0,9163120611387620
...	...	...	...
480	8,1953360729038300	4,5918618518098700	0,8811486371859390
481	16,8155368190765000	11,6288092449840000	1,9458683770855500
482	9,3702181329679400	7,5605135005983500	1,0691774299229200

Tabela 8: Teste com carga de 900W.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	33,0384003537564000	20,5910207927440000	31,3145749476346000
34	113,7811621441540000	72,3718256249327000	112,2918066947700000
35	71,5152658163812000	45,5848469923802000	72,0772043178113000
...	...	...	...
68	6,8812545537081900	21,6098866568540000	2,0834445529209300
69	24,5683182887568000	76,2849134153870000	8,0941981090520400
70	5,4257313617999000	13,6817486465917000	2,2466514413112500
...	...	...	...
102	4,1163594465034100	5,4493932305399600	7,1594140187061300
103	28,8967079878228000	38,8205894940928000	51,6468600067608000
104	4,4468469241675900	6,2229874049188100	10,7340967129958000
...	...	...	...

137	35,3796954741890000	12,7129852652114000	7,8890668640508900
138	44,7817113635498000	15,1828064955006000	10,9516999418962000
139	14,5836020218357000	4,8338703817477200	3,8185191805791300
...	...	...	...
171	1,4607207424880600	1,4282081826875700	2,8846037095016800
172	17,9502143425214000	2,3573206648129400	42,8182114725021000
173	2,0959623332061600	0,7367311383546640	2,9733395596125700
...	...	...	...
205	6,8546199715504300	2,6394856540862000	2,5829216878029800
206	23,5033137230869000	10,9206408201060000	12,4256317766115000
207	10,9532273416757000	4,9094719582172200	6,0243763196708700
...	...	...	...
240	0,5625122083421800	1,7440598507225800	10,4232146907043000
241	2,9730573077309800	1,8751731611452600	27,8872598943575000
242	1,2445639712279300	0,2751327501992470	6,7423689667099000
...	...	...	...
274	4,9594336248971400	2,0374620551208500	10,0467667787621000
275	35,2596613077683000	17,0610135949979000	68,5229000197058000
276	2,9943633294019500	1,7396233777806300	6,9436430127598800
...	...	...	...
307	2,5100281176412000	0,9560460330986060	2,6383975878785200
308	4,4239508594374900	2,4565001629314000	4,5518174640969600
309	12,0126696166288000	1,0496899060660600	11,7995599792873000
310	10,6827826517569000	0,7803652175256140	8,9719237909487000
...	...	...	...
343	3,2676703435934500	0,8608471772101170	1,5110408142990700
344	6,1505493678237200	5,7488603841042200	5,5497055483778500
345	3,0616590259918200	0,1905711592181670	0,0462880215832888
...	...	...	...
377	2,6898306213572800	1,2604087496787800	2,2213029930210100
378	9,0072141265152600	4,0171297487484800	5,2354913400868100
379	4,8272969168703700	5,9444146931348500	2,1222942876609800
...	...	...	...
411	6,0762389662361000	0,3297519947628920	5,2062509576909500
412	3,1246668873960700	8,4780672802844500	6,6191948701445000
413	10,1919306643612000	6,1092377660389000	6,2763919801911200
414	3,1167200525974300	1,4337526702810400	4,7642230872416800
...	...	...	...
446	5,1069414866286400	2,4218646096982900	1,6539258742413200
447	15,6937404463464000	16,5345511287114000	6,5964819011603100
448	3,9859161150883300	1,4885239944221400	1,1036431361809100
...	...	...	...
480	0,5681138705589840	2,5953323240760600	0,2292572047224970
481	10,8857214776257000	7,2815792220510900	0,8983513372529620
482	2,8653972607631800	6,3588127772339100	0,5611356158528900

Tabela 9: Teste com carga de 1200W.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	33,3133019685335000	19,6448585951237000	32,1725282012393000
34	117,9869202368400000	69,4996349286354000	112,3663243863080000
35	72,3388047379185000	44,1466684945133000	71,3911040591606000
68	7,9172694680253500	23,2026700523401000	2,7438480989914700
69	24,9553153173423000	78,2929221197477000	10,2712944046706000
70	4,3032989392600600	14,0797545514602000	2,5527155579827700
...	...	...	...
102	3,0927300399260000	3,5974148658102600	7,5265003772304300
103	26,8412403794759000	35,4041835457663000	57,9107424918937000
104	5,6246794602119300	6,8774628019503400	10,0460140022182000
...	...	...	...
37	31,8058960539244000	10,8861038234457000	7,7557300110868800
138	39,5657121433347000	14,7755494476046000	7,7465035891148800
139	10,0869472221552000	5,3497781276311200	1,9034379945671800
...	...	...	...
171	3,9505312503648400	2,0346644636789700	1,9805588391403400
172	18,3759141067183000	4,8808301194106500	33,9884827381384000
173	0,3472692199055240	0,7761230459119890	3,1879239209563000
...	...	...	...
205	6,4271452038274900	1,8971102612225900	1,9221234754082800
206	27,3025403953605000	11,1296633818173000	11,7830498067372000
207	11,7682007947454000	4,1901941310604800	4,0500876582848900
...	...	...	...
239	0,6495885714115640	0,4624586041764800	6,7031263952587500
240	4,4159471340165500	2,7826056960144500	11,5170089948481000
241	1,7941233933131600	2,9338976588632300	25,9200969505393000
242	1,7024094083661200	0,5928701824863430	6,7505502369404500
...	...	...	...
274	1,6677471672926600	2,4523351482156600	12,9329234018964000
275	27,0468962367636000	11,2605809526914000	95,7110520942962000
276	2,3256692630391400	1,9092969861725900	13,8956214951167000
...	...	...	...
308	4,4968334925338900	2,5222026746260900	5,6985457236935700
309	11,8202299704143000	4,9301821743938500	8,1928969936850800
310	8,2631291818040100	1,8250348847784000	9,6955799562766700
311	4,1362428984190000	0,7230980962649650	2,7582764281462400
...	...	...	...
343	0,8349545621449570	2,9588488146914400	0,5482123628284590
344	8,9256117915667400	3,9593538982399800	5,7438135077730300
345	2,7905147590760900	1,6125899787661900	0,7858647207884510
...	...	...	...
377	2,6019236655958000	1,1223509469411500	1,4443342901052500
378	4,4171086328153400	2,7473561608613900	2,3603134342722300
379	2,9693356564296200	1,8981562515218200	1,8638308209643300
...	...	...	...
412	10,2166873791425000	5,9213811540617000	4,8712602124139600

413	11,1048854956009000	10,0997190342589000	7,0132208093590100
414	1,0594897620966100	4,2331303128805700	1,0744536817172900
...	...	...	...
446	5,5273131608537900	1,7302852291851200	0,2365101513481720
447	13,2484707914056000	18,9220656903488000	6,6201446107566100
448	2,5391737508611500	1,5812812339563400	0,8889064667863710
...	...	...	...
480	2,6851412839781700	0,3703781656304300	1,3785598192784300
481	11,7295811052620000	1,3134429996253700	2,0802223867679900
482	6,7844082665017500	1,9519905726963800	1,6649101998335400
483	1,1728412881167100	1,9613715601287900	1,1937223835572000
484	1,9557772579786400	0,6399389060559220	0,6401899013884160

Tabela 10: Teste com carga de 1500W.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	36,5638978254910000	20,7886160037022000	32,1550906740681000
34	125,0844828184230000	70,3684221641608000	118,7750566113990000
35	80,4437676660339000	42,7625216679160000	75,3077590307262000
...	...	...	...
68	8,8242876482900600	23,8790569273795000	1,5587091812802800
69	24,7004550971298000	84,5380654610641000	11,4078166381616000
70	3,0635486568062800	16,7927455349907000	3,2107227987097500
...	...	...	...
102	2,0200278184865600	3,6600345192569700	8,8824859552396900
103	13,5194578640809000	30,6412550684468000	61,6618546471754000
104	3,7916411124643900	6,9146888298004700	11,5980818498611000
...	...	...	...
137	30,8082842342011000	10,7789558227656000	5,8567089368493800
138	38,1954451786406000	12,9604938186089000	6,8692065143469900
139	12,4553378963520000	2,2108006229534600	3,0122571621172600
...	...	...	...
171	2,3098388744700300	0,3127335277077900	1,9833925020258500
172	11,1906533413620000	13,9633060312236000	28,0912282456828000
173	1,5041558028154100	1,0880259748403900	2,0378705202304100
...	...	...	...
205	5,9792996793065100	1,0674642437953000	2,4269860264757100
206	22,7364167603038000	6,7109118783034800	3,3687151528892800
207	10,0192612721496000	2,4003701913582800	0,1787223987140600
...	...	...	...
240	4,9312333568702300	3,5081392173760600	24,2595416690809000
241	10,9848656859386000	7,2564982412060100	49,6328092169838000
242	3,2507877013972500	2,1395334384147500	17,4664895335153000
...	...	...	...
274	0,6173120972033430	2,6900728753918300	17,4484680212259000
275	7,4006400047898300	13,7271836746131000	123,0345730563900000
276	2,9234795217638800	1,1997628260046000	13,3135546478502000
...	...	...	...

308	5,2013179745136200	2,7724026633150700	7,4849394842864600
309	7,3979647545470500	1,1783540144817400	24,3546707919564000
310	8,0511841890944100	2,4801211198776300	18,9368241171231000
311	3,5769422374132300	3,2840231490814700	7,9750994109216800
...	...	...	...
343	0,5561182745859450	1,1278318352889600	1,8297554287233300
344	9,2523133662044500	3,7134011210416400	8,2399158851419600
345	1,0793693070345000	1,1758230485743700	1,9372348300367700
...	...	...	...
377	3,6710984288390600	0,9144514460758690	1,5571302860653300
378	5,0917611365798900	5,5878333704181300	4,8273275242076800
379	2,1985546630223500	1,5100217643512800	0,8271713275866250
...	...	...	...
412	3,7464557466955300	0,9631835405368970	9,0283320364959400
413	5,9146268810412300	2,9081456048990400	15,7685255417823000
414	4,9446975183426600	1,4343894647194000	9,2888957521698900
...	...	...	...
446	3,4488401878993100	2,0352026026487000	2,6340717780663900
447	18,2379729922691000	15,6528011265332000	2,3792043722032800
448	5,1146767844601200	0,9167097493403350	0,2954046722485840
...	...	...	...
480	4,4306751752108400	2,7453210565674900	1,3664023968717400
481	7,6781335264107300	2,4075678833459700	2,7561567032634300
482	7,4898083312287500	2,7696281984137700	2,3301081068453400
483	1,8368676026423900	3,6452237217501100	1,5450257182688900

3. Tabelas dos testes sobre o motor síncrono

Tabela 11: Teste de comparação de velocidade em 1800rpm.

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
35	2,2022574637246000	1,0915975405480800	1,2845265439674400
36	11,0603831935536000	2,1671335618484900	6,8841017782969500
37	1,5906732624635900	0,0009599238427390	1,0082155841099000
...	...	...	...
71	4,3430709537244700	4,0962530669027300	2,3208931173996500
72	11,3465224830718000	9,5244820669983300	6,3857494386889700
73	2,6378229689693700	1,7321468688609800	1,5253339594003000
...	...	...	...
107	5,1846614161254800	1,2953807989107800	10,1247487865103000
108	6,7667853360287200	2,7501291591771300	15,2821513068937000
109	2,4419523509302200	0,7134663998083520	4,8984259164213700
...	...	...	...
142	31,0916046644297000	0,3532422937209260	4,4954584222152200
143	103,0477329493530000	0,7772461367479240	14,8062244991983000
144	80,7908432532739000	0,2563686762096060	11,3568524499047000

...	...	...	...
178	8,0188699103768600	6,5732232135329300	1,3722998293380600
179	31,0291241375601000	24,7091582044073000	6,5527266121524500
180	11,9182077473351000	10,9294096598876000	2,5101560751377200
...	...	...	...
214	16,3387184686859000	10,6463816233341000	1,2453684944226500
215	117,0287145303630000	69,2122638865025000	14,4694080468283000
216	22,7613354425549000	13,7690931502808000	2,6692164892478600
...	...	...	...
250	0,7198241043032820	1,6936796652665100	0,2054804906104640
251	100,6824470413890000	34,3044357995914000	23,2585824095364000
252	2,1321859793000300	0,8140427860782650	0,4439376890219810
...	...	...	...
286	2,4230986359871900	1,0959172632128800	0,9733799487300870
287	17,2781814408663000	3,1484888666909000	6,0421592471045300
288	1,5678365890074800	0,2987640971893130	0,4495165642327760
...	...	...	...
322	12,4678064495728000	2,8685282035347900	3,2687190557861900
323	34,3891835691738000	8,2072584156165700	8,1539612997697900
324	5,8990495105830700	1,4894271377583600	0,9898849558697850
...	...	...	...
358	25,7910421163064000	11,8646235750711000	12,9104552014936000
359	37,6173191449491000	17,1215815609117000	18,7224569058086000
360	10,3540350602438000	4,5071213436175000	5,7852157351507300
...	...	...	...
393	3,4756565893980700	1,1831051387008700	0,6268405227577760
394	12,9532102262799000	5,2378896059370300	1,6902389108474800
395	11,0464039108514000	3,4969785498366600	1,6385015408270700
...	...	...	...
429	3,2549148653209000	1,5192028421656600	0,3276046343146470
430	11,7044606256089000	5,9203061303418500	0,9200273950894460
431	4,6978660433711700	2,6454542876902700	0,5847686111556150
...	...	...	...
465	2,6203295455096200	0,5615951548369320	0,6714819796494430
466	22,0317889408435000	3,3282845802138300	6,7118207953017100
467	4,4732153550342600	0,7274010116624740	1,6301032413321100
...	...	...	...
501	0,4951999843596000	0,3377834920659630	0,6117214802990040
502	10,3098892796044000	0,4934057976214410	13,0799032718522000
503	1,2439847187708800	0,3085169309520870	0,9406345981332190

4. Tabelas dos testes sobre o motor de indução

Tabela 12: Teste com blindagem e motor sem carga a 1790rpm (rede elétrica de 60Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	0,5424872058888520	0,8100716414470020	0,5215543039739470
34	7,3116688789542100	3,6722540662793400	2,1382983782638200
35	3,2650204935994800	0,8406281938529000	0,9796890371750760
...	...	...	...
67	7,8576257290271100	0,6006306933873250	3,7841531010508700
68	20,3468173292897000	5,7242684739840200	16,3179690446317000
69	12,2822388015741000	4,1874900763234000	10,4377944735462000
...	...	...	...
102	27,9406342800734000	3,3842038183103100	6,3337224837007300
103	33,2930423783286000	3,6027864410694300	8,1666509691505900
104	10,3854674129491000	1,1577967164380000	1,9764885714596400
...	...	...	...
136	6,2145453260246100	2,4938664604620300	1,5441930636050500
137	14,3040465387375000	6,3116217845619700	5,5834072094461000
138	3,5199909414918100	3,2971027106765800	1,2186769077555000
...	...	...	...
170	1,0660081775984500	0,7361910269899580	3,4632073373232300
171	5,6598848478489800	17,6524264373532000	25,2185656218173000
172	3,0939925719846500	2,9423446699899800	4,3441339596231100
...	...	...	...
204	0,7327075504368920	3,3733525003869900	0,3279557510496480
205	7,0384666963624800	25,2981291128974000	1,4598885750484100
206	2,6799932160746200	3,9161054018786600	1,5864737401764600
207	4,3047943241070400	0,8906302248916950	0,8756587222900130
...	...	...	...
238	11,6705106466383000	2,9382772549125100	14,5114959267484000
239	55,2430235178100000	17,7323537304981000	56,1714665328043000
240	24,1724632844282000	8,4103191524193200	27,7008956813113000
...	...	...	...
272	10,3165022795023000	0,9871572374199120	10,8197310985573000
273	28,9232678195637000	5,3087048655496600	21,2583917374530000
274	26,4671245279021000	5,2694110029218900	19,9360102593383000
...	...	...	...
307	4,9050959288805900	11,5112781722963000	12,7257242675747000
308	8,9205167859945400	23,5324507165796000	25,8359540724168000
309	2,9426636491818000	4,7109561547726300	6,6094090188220300
...	...	...	...
341	2,4219619261966400	0,8071804365372210	1,2314387599202000
342	17,4100300331789000	17,3496775040263000	4,1459954959911600
343	4,7756169702309400	3,2952614536897000	0,9744254359113350
...	...	...	...
374	7,6819727659084300	7,2254546850222900	1,7640684192023700
375	7,5175096973417200	7,2974191856845200	0,9607563452055930

376	20,4905337338791000	5,3556823084959100	9,4834219066942000
377	0,7422849250391280	1,1087956453762400	1,8899127648781700
...	...	...	...
408	5,9168477493104700	3,0917061970421000	1,7677942671722300
409	12,3074758548138000	4,6297168713302800	1,5239231652995100
410	11,4538893499573000	2,0937116777849600	4,0423775028608100
411	4,7142178982964800	1,1630582526963600	1,8337839380799700
...	...	...	...
442	6,2764404262537200	1,8438014184525100	0,3773155431435300
443	34,5370134159720000	7,2436682458449000	1,0619869975794000
444	4,7972957956072800	2,3684232298239100	1,0069389600547000
...	...	...	...
476	4,6039671683023700	1,5974384753822000	0,5915914565588510
477	6,7761155747598000	13,1247867331339000	1,1623999185341900
478	21,8261812912135000	2,4758667988391400	1,5487654736734400
479	28,3081528908949000	2,3389560834534600	2,4259107564707900
480	8,6102849414838000	0,8623884485013680	0,5116842454462600
...	...	...	...
510	5,6250074875052100	0,4838403250681700	0,3745435341843830
511	17,4590411453064000	7,7314109697332500	1,5132604152515600
512	4,6587420000000000	3,5058210000000000	1,2705660000000300

Tabela 13: Teste com blindagem e motor sem carga a 1813rpm (inversor em 60,4Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
34	6,5660536535575900	2,7305880534191200	8,0407737908257200
35	10,9562619383749000	4,4899249626827800	13,4732186154835000
36	4,3886079203023800	0,3252625105884360	4,1750106331308500
...	...	...	...
68	4,8937542507917400	3,3676268598096900	2,1366954149206400
69	29,4146037912127000	14,1602177749677000	9,4326034592596200
70	10,1620017229830000	3,6106315845297600	3,6286225698346000
...	...	...	...
103	10,7502014448845000	1,8663787232324300	1,6327973434658900
104	64,0776764055966000	7,2639163851114900	5,3766882430662400
105	5,3240350123372900	0,8123341452236530	1,3522646205199200
...	...	...	...
137	5,0112984083548500	1,1478107197472400	1,8841092949819400
138	20,2119724710350000	1,9300509585226800	2,0812731979561800
139	18,8749728174160000	2,4580757456637600	2,7151039227353500
140	5,1983675407561000	0,4020902937873080	0,6595524395966650
...	...	...	...
172	4,2736258654505800	2,2357941901976300	2,6171059347243100
173	15,4643902258189000	17,2676290524626000	15,6994671418644000
174	5,3625443640810800	3,5541150719058100	8,2529483242172400
...	...	...	...
207	5,2674779024045000	3,3230297353498400	3,8301377558279800
208	20,9671182844045000	11,8928565308145000	16,3228907980687000

209	6,2620956030596100	1,1456229956871800	3,1075372889622900
...	...	...	...
241	10,2601125369287000	3,0698836338110800	3,0867269449437100
242	34,4069757281239000	14,8375194907480000	15,9665796310359000
243	21,7574194382994000	6,7158006490481700	6,8279192189141300
...	...	...	...
276	0,8005131958367360	2,0632155749354000	1,1709145648873600
277	61,1338028241696000	9,2646694046385500	73,4982564873127000
278	5,2620560044525200	5,5484819555361800	54,3651819627906000
...	...	...	...
311	4,6154601702307600	18,3024736689821000	8,7264988333892000
312	7,4604283817961000	28,1630574523813000	13,0181348556831000
313	4,5053934956574700	9,2829589798529900	6,0611753506951200
...	...	...	...
345	2,2797318859388500	2,2369017601988900	0,8634558238698810
346	14,9241174784578000	4,7419375464709600	1,4707008536588300
347	5,1990249086044300	2,7154619341255600	1,2586495355624800
...	...	...	...
380	3,3202319479662600	2,6952848643200600	1,5296774017805800
381	15,4413824317418000	4,0574943638219900	3,0097080755200500
382	6,5217088095905300	1,3872506921122000	0,3244610687410380
...	...	...	...
414	1,6960308187793600	3,6303434691559800	0,3123675793600890
415	2,5253957562860300	6,3081912943326400	4,8179718152094800
416	5,6274408820974200	4,4114806333512500	4,3176135960040700
417	2,0204780968878300	2,8739988724686600	1,4816605068543800
...	...	...	...
449	7,4842671107948000	0,9300632141728650	0,6450699584258150
450	12,1445258706208000	5,6378313929103500	1,3090745151932700
451	11,1560105089129000	2,7677137340240000	0,5656994072169180
...	...	...	...
484	13,0437458710696000	2,1076324341411100	0,8395418629685960
485	27,3180739794186000	7,5236039484334000	1,8860491757163900
486	4,1466955606135400	2,5980637075879200	2,0237931545883500
487	4,7147114523697400	1,3384478074203300	0,8692331359947530

Tabela 14: Teste sem blindagem e motor sem carga a 1790rpm (rede elétrica de 60Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
35	3,6100600496220300	3,1681467640088500	1,7096299203974800
36	6,5355554184105700	6,1840912726151400	4,8732196612731500
37	2,1549752253630900	1,0659077643808200	1,4544554951503300
...	...	...	...
70	6,6478522343975500	2,8770917991983300	7,6765009755976900
71	27,7175613554995000	10,4984912877694000	27,4758633886648000
72	13,3520469178646000	4,8471351915051700	12,7372967104089000
...	...	...	...
106	0,8756051931722930	0,2456976934609650	0,4344642700832030

107	18,2071815045208000	0,7912542447974650	3,9669397206707500
108	1,3470509653531400	0,5929711097220350	0,4726122229862180
...	...	...	...
142	9,8148977149022200	1,6471962179884600	1,6307172812769200
143	20,5672351621466000	4,0461174424214200	4,8206917967241900
144	4,9758307044852300	1,3938023283595400	0,4135608598708470
...	...	...	...
177	3,6360650895074000	1,0310869030287500	1,3855399450301900
178	18,2050445003412000	3,6598955741378900	5,4873578390536400
179	12,8164224119953000	0,4600504189601370	3,7065858532667500
...	...	...	...
213	3,7750760502659300	1,1210405760058800	1,5573148298632600
214	33,3103548833422000	11,2124082131272000	14,8946850600394000
215	6,6453354208824200	0,6587793747900860	2,6946901756723300
...	...	...	...
249	21,3526275136376000	7,9068718617739400	8,9940493962898800
250	37,5687789853505000	14,1254767546847000	15,2977972200450000
251	10,9006756954455000	4,8404726838002200	4,7419534915708700
...	...	...	...
284	5,4625823254900600	1,1982814943918900	1,9277821410232600
285	22,1744387354791000	3,8821622696962600	8,8355966968099800
286	10,5826245019631000	1,9003767953506800	4,3189917539700200
...	...	...	...
320	0,6907832925097850	1,0386379491519900	0,3149653472322890
321	5,4213947602707000	4,2708804560741400	1,1360632398591500
322	0,7353116187946440	0,6148992935955220	0,1008053599878730
...	...	...	...
356	3,0255534532293700	1,5917439744605900	1,3395813893282600
357	4,5514279385686700	3,3994513259652200	2,3149917961678200
358	1,3265106269395600	1,5549849629879500	1,1589433013844200
...	...	...	...
391	1,6176510396235400	0,1782238541117390	0,8432629190876700
392	4,0215037690462500	1,5711144657760600	1,2505374113241600
393	2,5338217338921600	0,4715063881455300	1,1424899697122200
...	...	...	...
427	0,2861425354927050	0,0939299996667335	0,4029461799496390
428	3,7262133956541800	0,8838611795624740	1,3979826756974300
429	0,9205121465213340	0,1831891220441860	0,2357544176585160
...	...	...	...
462	0,8794731253189390	0,1671088977320790	0,4237906835159560
463	2,0916664222691900	0,8986179122109000	0,2097039582311170
464	3,2299943478239600	0,1820761454217990	0,7935591429387200
465	1,0288247970233600	0,4667622741521960	0,4726855678490060
...	...	...	...
498	0,8716925302886690	0,0354439274228100	0,7309097298914080
499	2,4297550676797600	0,4425423169925490	1,0112647828631500
500	1,6396643739488900	0,6171569293555850	0,9478728957598120
501	0,6437482045555510	0,3903595434104800	0,4347416419509970

Tabela 15: Teste sem blindagem e motor sem carga a 1806rpm (inversor em 60,2Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
35	5,6768205385424700	1,3186749694716200	0,8414834750481550
36	35,1438054834425000	3,0201257628263900	4,9715267168433900
37	4,3883003088126700	0,8424481987217230	0,5783325848332600
...	...	...	...
71	18,2420487320267000	3,5790945097874900	0,8350622737000490
72	53,0259993924097000	8,3635576771390300	3,6040945475528200
73	9,0561139546622700	2,8850677714083900	0,8143734150169890
...	...	...	...
107	107,3965232425480000	2,5232784894128200	20,0815687770205000
108	159,0258163858830000	2,5730335748212400	26,2407487723823000
109	40,6356646634221000	2,0366092630893500	7,4268394767858500
...	...	...	...
142	6,1351320163434900	0,4943416741162200	0,6339836875260980
143	26,9230627698267000	2,7565081989298100	4,0824732888682400
144	24,9190017314658000	1,1711780431330000	5,0021602898393000
145	9,7330262803103900	1,2652358870014700	1,0261004366526100
...	...	...	...
178	13,1177726053404000	5,0890186504589100	2,0497333178785700
179	38,8619537302974000	19,0082555129510000	13,4439528472783000
180	20,6476267506854000	8,3424991058405800	10,3832081156677000
...	...	...	...
214	5,4431541359268900	4,1070141672867200	6,3537946828475400
215	12,3492921861678000	21,1672202533106000	25,7715541659705000
216	2,7289428228095500	6,1087100686461800	5,5573280876848100
...	...	...	...
250	2,7332673577626500	1,1365859401600700	3,5243424115070900
251	30,3191516921816000	12,6861400520100000	25,7137635177248000
252	3,6459376832519400	0,9403259000280080	3,2854551705897100
...	...	...	...
286	7,1400195648492300	0,2984284064749680	3,8170388081790900
287	37,2839925851097000	10,0655830685340000	8,8928185255610500
288	0,4426104226913900	1,8623468849040300	2,7729428019708300
...	...	...	...
322	7,2085458889523100	1,9302506992901000	6,1832696403942200
323	29,8060109645081000	4,5655424540016700	27,7502859348979000
324	4,5005041868315400	0,6640933547294380	8,5916676818832000
...	...	...	...
358	10,0510076892333000	4,3571344501075700	4,5117174290066800
359	24,1468898774303000	9,7123092115080600	5,8978131503162400
360	4,7800182737362200	1,7987755636584900	4,1276534226722400
...	...	...	...
393	4,5903255196337900	1,6475835535053800	0,0959937720344702
394	11,3988231248802000	4,0834211683120100	2,0329497933154200
395	7,4308931757335900	4,9893584193515500	3,2042736425923400
396	2,8608414863820600	0,4201919123553590	1,4607258315400200
...	...	...	...
429	5,8195925506920900	1,2898295918080600	8,5076194205892400

430	14,2885188658253000	2,8071446657328200	14,3881860190339000
431	9,5201359856330900	1,9261955475942100	10,2802034424907000
...	...	...	...
465	1,1066036981218100	1,0582940557921000	3,6650770590679400
466	1,5172915129224700	3,2854120499168500	25,4216355581604000
467	0,6871905882010830	0,6689634901221040	9,4090804582049700
...	...	...	...
500	1,9571809083249500	0,3232598128454020	2,9508204625884400
501	1,7467158492372500	0,5782553312334220	5,4627313327402500
502	3,4935772294615700	2,1736841146429900	4,6908791044290600
503	1,3250520828822700	0,6880318755290320	4,3689514954528300

Tabela 16: Teste com blindagem e motor a 1798rpm com 1 carga (inversor em 60,4Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	3,0363087231763500	1,2972319675144900	5,2477673556063200
34	9,6580778666038700	8,4611731115853600	13,0075493141097000
35	6,5513888990958300	3,6174614648655600	7,6433467939618400
...	...	...	...
68	10,3467588792390000	4,6805061408239200	5,8166843065178200
69	22,9722264018754000	8,8489571741976800	15,0316421663912000
70	4,7537378324502900	3,2331693290309700	2,4423470945109600
...	...	...	...
102	2,7253682891674500	1,2481682327798100	1,1164915303733400
103	85,1133490870280000	8,0551709332559700	12,2670197277348000
104	1,2176197328306700	0,2656703966590220	0,9209880500574890
...	...	...	...
136	1,8697488942316900	1,9259062168715400	2,6651295513417800
137	8,4652857451485500	2,9932475506419400	4,2480447324967700
138	7,3779143419174500	1,8433432611319300	2,5272076772742400
...	...	...	...
171	9,7146609126695200	4,5219514988427900	6,1640741679111400
172	23,9933789914960000	11,9198503648208000	19,8954543849208000
173	3,5599117638040600	5,2793788645975100	4,5262057644810600
...	...	...	...
205	2,2778056120143000	2,1134159096932200	1,1710903954966300
206	15,3820809265247000	33,7247457536560000	12,6963883220933000
207	1,7652228425847800	2,3714791195049000	0,8394191466475150
...	...	...	...
239	9,4866355729191300	3,1322368200257400	6,8431838607658700
240	38,8840521215646000	11,0045082388285000	25,5457542251661000
241	25,4055423231958000	6,6223228729054600	21,3692753591934000
...	...	...	...
274	17,6871081480629000	4,7584733648298600	40,8565186466742000
275	49,2552094875729000	8,8648454352157900	137,5780553024260000
276	12,0499298324831000	2,7758808496105500	37,2158476835816000
...	...	...	...
308	0,5276703654046580	2,8736466994904000	1,3974757500376900

309	12,1917976102638000	32,7701774638686000	11,9791470496814000
310	1,1609818444386400	3,5793916426084200	3,5055327435705900
...	...	...	...
342	2,2293749157958300	4,0255748090279400	3,2814265809588800
343	7,0896810382125500	12,2507358237968000	4,1676740853636900
344	4,2359354782440600	8,5978812131248300	1,7342846464147900
...	...	...	...
377	4,1344008958006500	3,3554498481541500	1,4474510067100500
378	5,6435165139082100	4,6088694143260000	2,2360980741356700
379	5,4549093273178200	3,0737710644870100	1,4454657286928500
...	...	...	...
411	3,2926760936655900	0,2732709854683480	1,7854340565251800
412	14,4496463691151000	6,1934266348609800	7,6464938454289700
413	1,6383415916866100	1,2507324055268800	0,2492376240058490
...	...	...	...
445	5,7793858152408100	0,4015885038617970	1,4162905217083700
446	12,2112404786729000	2,3911556680708100	1,5444248101517700
447	13,2469221009451000	0,7365617959476890	1,2694700729466700
448	8,5527123124323200	1,7953645629917700	0,6657072670190080
...	...	...	...
480	9,0132066706683400	1,1522500354823600	0,6763100827531580
481	36,6663751558411000	4,3568460278987700	1,4884196805451300
482	10,4495514603747000	0,4015179951578240	1,1200630009826300

Tabela 17: Teste com blindagem e motor a 1783rpm com 2 cargas (inversor em 60,4Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	2,3548957119860000	1,6435928110137100	1,3916148890314200
34	5,7469979304837700	5,5315137027221000	9,2460850672473600
35	0,8860647967567780	0,2171724922710640	1,9882110898647600
...	...	...	...
67	3,2082865499062600	0,8489116149786750	3,1431085039886100
68	24,8807593496723000	7,0833211883130100	21,0710432147132000
69	5,6362748603011700	1,2575866920779900	3,4878900199774300
...	...	...	...
101	11,9359312071724000	1,2204146913434100	1,1272665513517600
102	69,1351353864129000	5,3961875291090900	8,9403137143919200
103	15,4996458555199000	0,4727143425089160	2,0601232342698900
...	...	...	...
135	1,7652153320628600	1,7522508031113700	0,9682663306585020
136	7,3897646400583100	7,5023298251388700	1,5863248210943700
137	0,1218516179868640	2,9413027246777300	0,6648002629459010
...	...	...	...
169	2,9773172747700200	1,1021725637158300	3,8776188351016600
170	18,0102071932420000	7,3465175794476300	17,6883145526130000
171	10,0659458712012000	3,4227950932569900	7,2983773646926800
...	...	...	...
203	2,3570577918712900	5,6622701488077800	2,0063127816808800

204	13,2198782099396000	26,5084490611763000	7,4294559303572600
205	8,4587628267550800	16,6402338580572000	4,3590899835271100
...	...	...	...
237	6,1566161705825500	4,6848205788986200	9,7147815412413800
238	18,9200795896016000	13,4492043340625000	26,4183674767976000
239	13,1328936032105000	12,6706817823823000	21,5679855045169000
...	...	...	...
271	4,4054310674009200	2,4969323263052000	10,2641884260510000
272	14,9306373295134000	6,8445145776517500	35,4625447212555000
273	16,5750506339605000	5,1500333184505900	43,9085779780368000
274	7,7338263410893800	0,0355009238776612	19,1492158177385000
...	...	...	...
306	11,4029176964376000	6,4105747788429600	11,6434010098989000
307	15,4913884229925000	9,9425189031001400	17,1098563221544000
308	3,3196703108392000	3,6160550500260700	6,2362383538110600
...	...	...	...
339	3,1002776356832700	1,6013135293637100	1,0835834500818100
340	0,8620393542581540	7,7421401985630100	1,9158510813057700
341	2,1598617618887400	12,8185660131104000	1,7870150204655500
342	1,0864522042072600	1,1856489437706200	0,5931807624256780
...	...	...	...
373	1,7730448634734400	1,0664425369298000	1,1325572429173800
374	2,0199141113116600	4,6839650615448700	1,9410343800560400
375	5,1782618053970200	3,2319171889027800	4,3465061056115700
376	1,4312889227807900	3,9478074614036500	1,1961655673947300
...	...	...	...
408	2,9833812169666700	1,4118315753000200	1,8539954565563700
409	4,1326192100460800	4,0148727658470700	6,5198868947620600
410	4,4330605738838600	1,9454470329547700	2,2321322713673600
...	...	...	...
442	5,4881212091623200	0,7930760611240120	0,8412340541867260
443	9,2927082377902900	2,4256897866317200	2,2934767078845800
444	2,2297457954328700	2,0794585156276600	0,5763559263578150
...	...	...	...
476	0,9832709083117830	2,6855736940785800	0,5385698882847230
477	0,1518934921798810	4,9001746259336300	1,6736432692545500
478	1,9301746120109500	1,4131035730969700	1,5542594136314100
...	...	...	...
510	1,3446694079997800	0,7202894080834380	0,6342556690421960
511	3,3997486990598200	3,1582998037799400	1,6356592912216700
512	1,8117330000000000	0,9176310000000000	0,5176380000000340

Tabela 18: Teste com blindagem e motor a 1770rpm com 3 cargas (inversor em 60,4Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	2,2637875855125100	1,7221918623333400	1,2882122044145100
34	2,9933093997757800	4,1533781077816000	8,5772469992266400
35	0,2818109944105830	0,9637787907214550	0,8539816246643270

...	...	...	...
67	9,6988314353491000	3,2615796913978600	6,3417907355540000
68	16,4421910334763000	4,6471739324513300	9,9828563785076700
69	6,2124218382639800	2,5961198619493600	2,2652646539089400
...	...	...	...
100	12,3011640534910000	0,7535467374590290	1,5788157871573300
101	47,5369460095804000	4,0233939224077800	4,5038282224353300
102	34,7808811327860000	2,9579608646778700	3,7067044399674000
...	...	...	...
134	3,7097977678923500	1,2312486254833900	0,8587367701963420
135	10,3578627030264000	6,8054621437763900	2,4302737178251600
136	2,0571555497156400	2,0899498740886800	0,5888604339136700
...	...	...	...
168	1,2598185077227000	0,6838652440311380	1,0272297178054200
169	13,5269268946520000	9,7813480052304000	38,6280263319365000
170	1,4244274629714000	0,2327742878054400	1,8435926165144300
...	...	...	...
202	5,8077312448763000	6,8095626591277500	1,9834045757567400
203	29,2108812155345000	31,3357327752837000	7,7706679834537300
204	5,5809707854701700	4,1909644526995200	0,8366843996353240
...	...	...	...
236	4,4091919257483200	8,3767030526213700	15,0124732423129000
237	7,2514045328506400	15,3692361755416000	26,8631249044633000
238	2,6246937552897600	3,8220336744030500	6,8602500000539000
...	...	...	...
269	0,8502707705795200	0,4971856922042340	11,3202965648340000
270	1,0031573214163400	2,3905911421212400	31,2914900387457000
271	2,2622202918413800	3,1057591970886100	19,3423662990540000
272	0,4459836958141970	0,7484351936045150	2,5258105525514200
...	...	...	...
303	3,9684678933122500	1,6262077155576500	5,5216077093343900
304	23,5006804350586000	4,1962331004613900	25,7772047232982000
305	9,6562811823136600	1,3596539199642300	8,0581955081297900
...	...	...	...
337	0,2677327028606850	0,6025184208623970	0,4543901297231210
338	5,5771541332043300	9,6754878583167100	3,5150978692115100
339	1,2031650508606700	1,5304328636664400	0,6711780428316890
...	...	...	...
371	0,6343631474797860	0,7530512943443310	0,5192170578686680
372	8,1088242738125600	9,8089934788854800	4,5789591003614800
373	2,2579360398332900	1,9661061705018200	0,4943061995869120
...	...	...	...
405	0,9073620075451730	1,0514666534737400	1,1159934378315300
406	4,5369717729894600	3,9955523187990700	4,7081913721937800
407	1,6728020949088900	1,7175316699525700	0,7325626859213360
...	...	...	...
438	1,9687754099789400	1,2347213766200500	0,7034830729551340
439	2,8297834377532600	1,9388694455454800	1,3843707034074600
440	1,9494641368289200	1,9035166331703300	0,5623239238341980
...	...	...	...

472	2,0338359184114500	1,0076408112310000	0,4793677031744490
473	9,8085640684590600	5,0828943726578300	1,9434889347185400
474	4,1329819171176400	2,2103158047666400	0,6098485751520060
...	...	...	...
506	1,2432307192623200	0,6735281299182220	1,0510164107162100
507	4,3609478934672200	5,3019725661271400	2,5022788829604900
508	1,5754251134162400	0,6643016264715080	0,6186155565775190

Tabela 19: Teste com blindagem e motor a 1758rpm com 4 cargas (inversor em 60,4Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
33	1,5288411602237600	3,1846442004705900	4,3023140952646300
34	3,9342756330902100	3,9202142423280500	6,3187816710924000
35	1,1443704705429600	1,7776302881016400	1,7502683576183200
...	...	...	...
66	1,7595068284885000	1,4886764479953000	0,8862230117001680
67	14,0207532426111000	6,0246358665097100	7,8779338661849300
68	4,3237234766794900	1,7823807965630400	2,1728714709803500
...	...	...	...
99	7,6835227355078200	0,9948808515581820	1,9489856547903300
100	18,9396070825570000	2,1079624011507300	2,2771881832612800
101	48,3403518206027000	1,7720426640312200	6,9348522385187500
102	10,7401874760137000	0,2488171293782140	0,5726077217978770
...	...	...	...
133	3,1834338270587900	1,8687485751074500	0,5825144642815810
134	15,7081564123807000	6,1480074517113700	1,9566074087611900
135	5,8371735681776800	2,7560323485832500	0,5238529815272110
...	...	...	...
167	4,0989968867095900	2,1475663952018600	8,8508378082462600
168	15,9314848594096000	14,1508255075092000	52,6338222316722000
169	1,1571969617846300	1,2665302825297000	6,7830538382957200
...	...	...	...
200	6,3000868580052000	10,2972160555039000	1,5732152808190900
201	20,3385790615540000	29,4575772298940000	7,4457375559496600
202	16,5673379785342000	24,4971266720032000	5,1034682628849800
...	...	...	...
234	0,9738966858080290	1,1856130492241000	1,2824829836483500
235	36,8341881789923000	22,8472202174298000	43,4687780588359000
236	2,0512462758744800	0,3753961505624900	1,4004580497391800
...	...	...	...
268	8,4525221673123100	1,9396703032712800	12,6429072013665000
269	11,6808665480989000	3,0306972447119900	19,2631015252887000
270	3,6511243562282600	0,9446731073328020	6,1532412964916200
...	...	...	...
301	5,4298338969647100	1,2442671947823400	6,2638619907628400
302	37,0981964665938000	9,5544631360736100	38,7469261607623000
303	7,8817201105341200	3,5139402784519700	7,5750693579154900
...	...	...	...

335	2,6095925327212300	3,4607476297706000	0,9743633348164940
336	8,3201834759716700	11,2213207831927000	2,5540487318819300
337	1,9662968491088400	1,9679472376760500	0,5527359981191260
...	...	...	...
367	1,8964982506473500	1,5642315283663800	1,3228950874213600
368	0,0354118773723865	1,0974832231029500	2,1493748824314800
369	3,9352858331606900	6,9416189382021400	1,4607372806102400
370	2,3108779010655600	2,1075067909260700	1,6209946533729900
...	...	...	...
402	2,0961796727986200	0,7320802946444110	0,6211686656017190
403	6,3529856999230100	3,4290023958016300	2,7998170990703600
404	0,7186325942420820	0,6157053017565240	0,7166853487984130
...	...	...	...
435	1,1580626614978100	0,7320887360194270	0,5110133876565340
436	1,1272421693723500	2,3131070937717200	3,5406500776998100
437	1,2179207295694600	1,4626815513976300	3,8237638223489300
438	1,0240733897058700	0,6451327842786040	1,2397038283899300
...	...	...	...
469	1,3249364046188400	0,9078540177282760	0,1658118827167270
470	13,0001478486364000	1,4660453122028200	1,4680095941064600
471	2,1704780207407600	1,0860431272893300	0,6188529643049200
...	...	...	...
501	1,8197361247779800	0,7622961228317260	0,5228869885199140
502	2,0100531325992800	2,1655561903430100	1,7978684629136400
503	1,2538565669383500	2,3575462735000200	0,8851731151094040

Tabela 20: Teste com blindagem e motor sem carga a 1343rpm (inversor em 44,9Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
24	0,7381435952627340	0,4392173531781820	0,7788478832956690
25	3,7234620498713400	1,9883846111959800	2,0628391695515900
26	7,1926411464517000	2,0808035984594200	1,0171186418511600
27	2,8439947728047800	0,5334660806132470	0,1603065446797850
...	...	...	...
50	0,7261827868136620	1,9284029908636100	2,2223627774427000
51	3,2694155707905000	3,2881783726325700	5,8513645255637900
52	3,8805970827377100	0,8466866541440980	2,7541194048172000
53	2,0639441466952400	0,9427485037586810	1,7537414950837800
...	...	...	...
76	2,7961822578596100	0,8441997080407170	1,2770846164206700
77	14,8789061581806000	7,4807750156264400	12,0162540184144000
78	1,5144450532485300	0,9904839193981300	3,6916348591136600
...	...	...	...
102	44,9034141720069000	4,9541652683351300	3,6016797222814400
103	74,6074364904388000	7,0119070049145400	5,2853659005671400
104	22,4383855848161000	2,7285349674571900	2,6247071078835500
...	...	...	...
127	5,7309418788896100	0,8377674643106450	1,9496131604605700

128	17,9946574623344000	2,2305643818816100	4,6061603972253100
129	7,7605917524988600	3,1027134009241800	1,5257780208607900
130	4,4688575098331800	0,9268157043880270	2,3020898320398200
...	...	...	...
153	0,7689602066960370	1,8300271276050600	0,4081212880979660
154	20,9033114395199000	9,7169158678247400	4,4526795130924200
155	0,9817184435686820	0,7315739700080550	1,2787159428308400
...	...	...	...
179	8,1517071647555700	1,8994386235507100	6,4914310518129700
180	14,9437899640468000	3,6193525897615500	10,8946419243775000
181	3,7569807423401800	1,1606332358082800	1,7979754000034100
...	...	...	...
204	3,3526996678647800	5,1977337768966600	1,7622082835239200
205	15,0412887693994000	19,3556615901215000	2,7838644559709200
206	6,7738381671079400	8,4187504459614300	4,4417365515143800
207	6,4976358246963400	2,4420986927741900	3,0844391778731000
...	...	...	...
230	2,3280053310499000	2,2138957739175200	2,9932954086543400
231	21,7405478653111000	2,5094937536889600	9,9752307157188800
232	5,3321671931456400	2,3420333616143000	5,3676185101038400
...	...	...	...
256	14,2941918673073000	4,9427143544300600	15,8605880740127000
257	17,3807368155026000	5,2594433853284800	19,5772689841870000
258	5,6186956382894000	0,8955893788964050	10,2160619927408000
...	...	...	...
281	5,2511506846163300	3,5795394205428800	16,9359640867954000
282	24,6890880470806000	12,1035759438315000	78,6579687981403000
283	6,3726997607630200	3,0636838032888900	16,5731439128760000
...	...	...	...
307	1,7724961650252600	1,3972843161928500	4,0213553630658000
308	5,4691783289288500	4,3546902886726200	7,5684553122052400
309	4,2775354402958900	20,6610468812968000	15,8803508237468000
310	1,2875623065703800	3,0055935916990300	4,0672347808701300
...	...	...	...
333	3,4242561166779800	2,8706296089740300	4,5878531677243100
334	5,0686875381500100	5,7035872470941100	4,7039778709726100
335	2,3545198059269000	7,5554277098126900	2,1617480203008700
336	2,4484856841697100	1,8041002057077700	2,7147702093883500
...	...	...	...
358	3,7035593240444200	2,9062545876465500	0,9634325059028920
359	8,3445986979707100	5,1365934139282700	0,9257230702265460
360	1,7441404773358000	2,0501980959014700	1,3878342609525200
361	3,1475082884646000	1,7944901370699300	0,4499803858422910
...	...	...	...
384	1,8580277443965200	2,3234023953975600	0,4142505621325730
385	5,1621488171115000	1,4720952898315400	1,4734736542114800
386	1,2403422156943100	1,2416780423175400	0,5467114521732530
...	...	...	...
410	6,9624033036244100	1,2074931292175500	1,5190695666995600
411	12,4416717790231000	2,7584580141642500	1,1367010197026800

412	5,7960601644855100	1,8397238988279100	2,1933454812717000
...	...	...	...
435	3,6109873588947300	1,0423602065299400	1,3344021048195000
436	14,1470200955995000	2,6332275350876900	1,5595575226047100
437	2,6520307714818600	0,8662998540962970	1,5153188594349300
...	...	...	...
461	7,6547470737993700	1,8050444823636300	0,7472273129589430
462	29,2956108173808000	2,3151280053195900	0,9203376067856220
463	5,2617808966157200	0,9979575082718430	1,6051999463324100
...	...	...	...
487	2,8494553978595500	2,8706511873331300	1,0569641183251100
488	6,3279072211410900	5,5725674856664000	0,4463415732526620
489	2,8396399124622300	2,6205414773309700	0,6108433519083190

Tabela 21: Teste com blindagem e motor sem carga a 2240rpm (inversor em 75,0Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
42	4,6018499596310800	0,5277573262593660	9,3289907237177500
43	12,9345183411594000	3,9103346034584500	33,7497388242128000
44	1,2878733735302400	1,5082380922220000	5,4593702722824900
...	...	...	...
84	1,0876319046651300	1,6704085378954800	2,0628823568091600
85	3,0589640520689800	2,0705297075183300	7,1941302854076000
86	1,8536928067319300	1,7994774258751700	9,0966870708666700
...	...	...	...
127	10,7332136532909000	2,3442366109776200	1,4001133075895700
128	32,9477181269459000	6,6583319641183800	6,9470360733425800
129	22,7727842224605000	3,5548789446947900	3,5136640270972400
...	...	...	...
170	7,4459012657445900	0,9327986938315310	7,4432463950338200
171	46,8344051116487000	13,6942191070638000	31,1015454976940000
172	12,4538686871095000	2,7955398511018400	7,9401522980421500
...	...	...	...
213	0,464805555218760	2,4764038300934500	1,0416542433918600
214	30,0009804766270000	5,4648184990217900	14,1778100834568000
215	10,3742878315797000	10,2488311037887000	12,9704758580535000
216	1,1473524148663300	1,7958495494097600	4,2156169381067700
...	...	...	...
256	7,0169300830817800	0,7320506799996850	1,8969686255971900
257	19,8005821482088000	3,9611449903582900	14,0495947342419000
258	7,7124215981548600	1,4891651259124100	4,3225040702452600
...	...	...	...
299	18,8377303243203000	13,9830605082079000	7,2223406206684800
300	27,6240638714383000	19,3575561188393000	12,6347455944923000
301	6,8531645026031700	8,7913370547778900	2,2186095281957500
...	...	...	...
341	0,7764818360823190	7,4834132436184600	1,4596809337046600
342	1,0299442300088100	22,8543543445952000	1,0973978202861800

343	0,4741018540487290	15,5263072263566000	1,7399779513032400
...	...	...	...
384	2,8317849490269000	3,7558078374112100	0,4494946460375590
385	9,0384316981934300	6,8963577969877600	6,1640050178835200
386	2,9817702464158100	1,3282457583858600	0,6449770376152440
...	...	...	...
427	0,5172163907191750	1,1364294689237200	4,1242872828806100
428	5,0951134720584200	3,7148080720569900	11,8241260714012000
429	2,3676122023507900	1,7699315391296500	6,9409209850564800
...	...	...	...
470	6,6755372331768000	2,0431670538286200	0,5936164318832200
471	20,5311925045498000	8,0180961487573500	1,6855605435390200
472	7,3920648952725700	1,5294344041946800	1,1386775240677800

Tabela 22: Teste sem blindagem e motor sem carga a 1366rpm (inversor em 45,6Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
25	0,6237320509396600	0,3485267649824230	0,4439561916996620
26	0,9206232717067980	0,5281235789011200	0,6737678925911780
27	4,3697199776595600	2,3790507841709700	0,0810379366317224
28	1,2313748600145900	0,4421350212177100	0,3021539629831300
...	...	...	...
53	3,2068600411783500	0,6349137942156260	0,7220338878281880
54	4,7405502453465200	0,1053565332915910	5,3178296163381800
55	3,3215378826349100	1,2035155099916500	3,3256391354646100
56	2,6527177260015300	0,4268457189397460	0,8532728435927920
...	...	...	...
81	8,2007118063398600	0,8841409462593630	2,4620736454650400
82	12,2875333202719000	0,9634371875319850	4,2936640716826200
83	3,5088113850255700	0,4911880131015210	2,7552385199085300
...	...	...	...
108	15,2038345283548000	1,6055510576901600	4,2491988229178700
109	65,4153833304918000	1,2586171450287600	14,5559419217793000
110	10,8923993719077000	0,9371273686285080	3,2772953090896300
...	...	...	...
135	2,5551806753984500	0,2179874607135020	0,6266628304446200
136	53,2904869710875000	5,5618302094105800	5,1139876938045300
137	0,2872953572851980	1,5735349798997500	0,8910020751067270
...	...	...	...
162	2,7495086564883200	1,6693552372299200	0,8422988867771590
163	9,4250418921093900	4,9219717222809600	2,8155469103198300
164	3,6985296077446500	2,3761620554945800	1,1639246688232200
...	...	...	...
189	0,6165468331789120	2,5039288559859100	0,9501504803641260
190	3,4750585136058800	6,5701072133015700	2,9429250971027800
191	0,6176276930057680	4,5097137023518300	2,1728783278761000
...	...	...	...
217	4,1927429595161400	3,3311420773746800	3,0831914545537900

218	9,5687833176749600	8,5080331375994700	4,6784151361050400
219	1,4853434830717300	1,6970442617405500	1,6136902116585800
...	...	...	...
244	0,6380608898509680	1,1464947105132000	0,9607191069027290
245	1,5278721867259100	6,1162033867912700	4,5171521005990700
246	1,6050184965655100	1,7006129215506700	0,7283088050947060
...	...	...	...
272	5,2939430016969400	1,0946810540587400	0,2892933513530450
273	5,8805859670413000	1,7328813153043800	1,4057915939954300
274	0,5922404591877660	0,4596619711065480	0,4234417057445940
...	...	...	...
298	1,2367449489863000	1,1369492287621700	1,2459329129254500
299	9,2660210906817100	2,1399199137583700	1,5530750940617400
300	2,6811824653894600	3,8475881747803900	0,6449845035804030
...	...	...	...
326	3,6497761608140900	2,1316581023843900	0,3891447134664280
327	0,8569119927479950	10,6230001941473000	6,2633183257994100
328	2,6840197263066700	5,2163413548689400	1,8026191821181900
...	...	...	...
354	0,9792796570461480	4,8400500604483600	2,0616100542295100
355	2,5196112288324400	6,4506783678507800	1,9571347481950400
356	2,4048491916907600	3,4209781091630000	1,0928754880792600
...	...	...	...
380	1,7518488246340900	2,5264698039909100	1,3803678214613600
381	4,1140144833918700	2,9541684372003200	3,9480079483839100
382	2,4692824785835300	3,9423224709556600	1,6649981142398600
...	...	...	...
407	0,1689808584865980	0,6984824408599990	0,9846207718111820
408	2,9061130227008100	1,5658832445617900	2,6908222625228000
409	1,8101579759174400	0,8117707636072360	1,1153277905260500
...	...	...	...
435	2,6841495665852600	1,3081420417666100	0,4059645884618600
436	3,4852917577913200	2,1853071417057100	2,7882344227324300
437	0,8909440264803360	0,7620109633443640	0,7990948261932750
...	...	...	...
462	3,6804806701207700	2,1235269800884700	0,6763518960130330
463	4,8871051641444600	1,4148303871111500	2,1497529308367600
464	1,6234680080261500	0,3005596418038270	0,0763609129539132
...	...	...	...
489	1,9684618999807800	1,6843738374262600	0,9459188764027470
490	4,1361870109978400	1,4963834400399000	2,5070187158601200
491	0,3911029357994630	0,6986340964444510	0,6405159292114270

Tabela 23: Teste sem blindagem e motor sem carga a 2246rpm (inversor em 75,2Hz).

Índices de componentes	Valor da componente no eixo X	Valor da componente no eixo Y	Valor da componente no eixo Z
44	1,1544039477892200	2,6130297988119800	3,2068366060398900
45	2,2135415089663900	8,3693093277724600	11,3357681663168000

46	1,0300499783163400	0,8405990616379390	1,8403530655514000
...	...	...	...
89	15,4334424349296000	2,6422374522506700	13,6665945431394000
90	17,1317085966571000	2,3480365329508600	16,2149160702495000
91	5,1624296105734500	1,4079601143643600	4,8290818172466400
...	...	...	...
133	20,9761582175507000	0,8015045342561430	1,6569826941011500
134	81,4371735452431000	3,7503994318693300	6,3620430039321600
135	36,8399924462507000	2,2408285947121100	2,7471007612636100
...	...	...	...
178	2,6446506088616600	4,3323063986624400	1,3256065204309900
179	20,3849505415468000	28,6971473066862000	6,5145972130279900
180	4,0349287096506300	4,9369280312052100	2,5682031941366200
...	...	...	...
223	8,4477640305203400	2,8578422611515000	1,5059394235180700
224	37,3655967290365000	14,2047074094988000	9,7322960356254500
225	9,9642255352825300	6,8113402536661400	7,0052536281235600
...	...	...	...
268	11,1066835848550000	3,4239323353581000	1,7253948691191900
269	17,2646807836974000	4,3776028584364300	1,8050258926377700
270	7,9675110463220600	1,7366639618343000	2,1986380713726800
...	...	...	...
312	7,0237185595716000	4,6458279849904400	2,8369428216793800
313	22,1931109232416000	14,3167121959944000	8,9063343130566300
314	13,3464829520454000	9,4216869439961400	10,3592319254412000
...	...	...	...
357	3,8857617611474400	2,9001174259217100	1,3902694460610600
358	18,2196503495537000	12,9651965816801000	4,9529264948413300
359	4,9765403429408400	4,2527421326985200	1,7344972157765600
...	...	...	...
402	2,0963251473306800	0,9994253423992670	0,5159420003869520
403	13,0063073991522000	0,1859685675831010	3,2241384292991500
404	3,0142314491289500	0,9628356344583390	1,5302955211049100
...	...	...	...
446	2,1481362683743100	0,7539406646532520	0,8613672313769870
447	3,2987126675366500	1,5996050576709000	0,8169635216192400
448	7,9947523863873000	3,7303094243629100	0,2261747668970480
449	3,7433078920548000	1,3974843925431200	0,3746653684943410
...	...	...	...
492	1,8820585310013200	1,9420172024159000	0,6612859386500820
493	2,0179719676701700	2,6519152594330100	1,8328106146512600
494	2,2137738035778300	1,3521673150445800	1,7683863199942400

ANEXO A – Módulo de desenvolvimento DEMOJM

O módulo de desenvolvimento DEMOJM, fabricado pela empresa PE Micro [35], consiste de uma plataforma de testes para a linha de microprocessadores Flexis JM, da empresa Freescale Semiconductor [36]. O kit de desenvolvimento é composto pela placa-mãe DEMOJM e por duas placas-filha, contendo um modelo de microprocessador da linha Flexis cada uma. É possível conectar uma placa-filha por vez ao soquete central da placa-mãe, de acordo com o modelo desejado. Além das placas, acompanham também no kit um DVD-ROM com exemplos de projetos, prontos para execução, além do software CodeWarrior 6.1, como ambiente de desenvolvimento e depuração completo. Outros softwares e *drivers*, da empresa PE Micro, podem ser encontrados no dispositivo de armazenamento USB, que juntamente com cabos de conexão USB e manuais impressos constituem os demais itens inclusos. Uma imagem com as placas do kit, retirada de [37], é apresentada na Fig. 1.

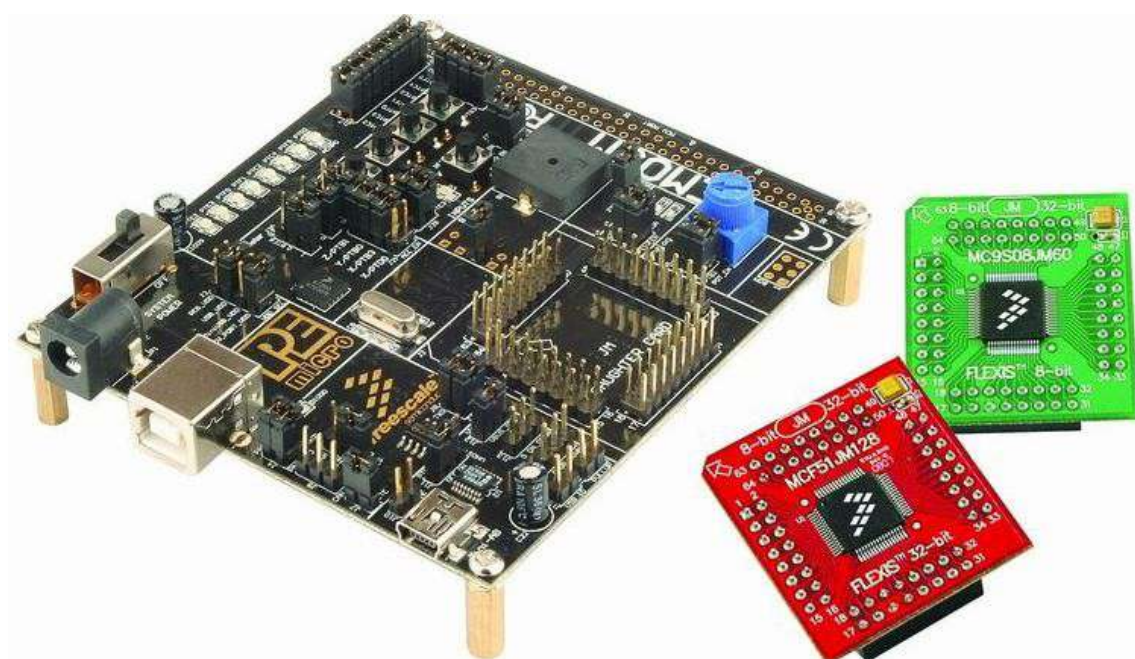


Figura 1: Kit de desenvolvimento DEMOJM.

Entre os principais itens que compõem a placa DEMOJM, podem ser apontados:

- Analisador Lógico integrado;
- Porta Serial Virtual integrada;
- Módulo de comunicação CAN;
- Conector Mini-AB USB;
- Acelerômetro de 3 eixos do modelo MMA7260QT;

- 8 LEDs acessíveis ao usuário;
- 4 botões;
- Sonorizador piezo;
- Potenciômetro de 10k Ω ;
- Jumpers para configuração e habilitação/deshabilitação de componentes.

O Analisador Lógico é composto de 2 canais (IN0/IN1), que podem ser conectados a qualquer pino do microprocessador por meio de jumpers apropriados. O sinal capturado pode ser apresentado em tempo-real em um computador, por meio da interface gráfica disponibilizada no DVD-ROM. Já a Porta Serial Virtual permite o uso dos pinos RXD e TXD para conexão sem a necessidade de hardware serial específico, utilizando também a interface gráfica disponibilizada no DVD-ROM. E finalmente, é disponibilizado na placa um terminal metálico, conectado ao pino de alimentação do microprocessador, para conferência dos patamares ultra-baixos de consumo de energia da linha Flexis JM [35].

O módulo DEMOJM pode ser configurado para três modos de operação diferentes, o modo de depuração, o modo de execução e o modo BDM (*Background Debug Mode*) externo. No modo de depuração um computador executando o CodeWarrior ou um dos softwares da PE Micro controla a operação. No modo de execução o próprio microprocessador instalado é responsável pela operação, podendo estar ou não conectado ao computador, bastando apenas que o aplicativo já tenha sido codificado corretamente e gravado em sua memória flash interna. No modo BDM externo o microprocessador instalado no DEMOJM tem seu aplicativo depurado e gravado por meio de um cabeçalho BDM opcional, utilizando um dispositivo de interface BDM externo (e não o circuito já agregado no DEMOJM), a fim de permitir testes preliminares para a construção de um sistema de hardware próprio, que utilize um microprocessador da linha JM.

1. Linha de microprocessadores Flexis JM

Antes que o projeto de um sistema hardware/software seja propriamente iniciado, é necessário o estabelecimento de algumas diretrizes para a orientação de seu desenvolvimento, a fim de que os objetivos finais e prazos de conclusão sejam alcançados. A equipe responsável deve tomar algumas decisões, entre elas a escolha do modelo de microprocessador mais adequado. E o primeiro parâmetro nessa escolha é o tamanho da palavra binária que qualifica sua arquitetura, seja de 8-bits ou 32-bits. Para realizar essa escolha devem ser pesadas as exigências e as restrições do projeto, sabendo qual é a influência de cada item, quais são prioritários e quais são secundários.

Entre as exigências, podem ser citados o tempo de execução, performance, precisão dos cálculos, tolerância a falhas, robustez, consumo de energia, dimensões físicas e outras qualificações, sem as quais o projeto estaria invalidado por não alcançar seus objetivos de funcionalidade. Como restrições, podem ser citados o preço (valor máximo de custo de cada unidade produzida), tempo de conclusão e outras

qualificações, sem as quais o projeto estaria invalidado por não alcançar seus objetivos de mercado. De fato, alguns itens podem configurar uma exigência e uma restrição ao mesmo tempo, dependendo do ponto de vista, uma vez que a exigência corresponde a um patamar mínimo e a restrição corresponde a um limiar máximo. E o microprocessador, como núcleo de operação do sistema hardware/software, pode ser considerado como um dos componentes mais determinantes para a satisfação destes parâmetros e para o sucesso do projeto [38].

Os modelos de microprocessadores de 8-bits apresentam como característica em comum uma maior simplicidade, que começa na estrutura da arquitetura e compreende até as ferramentas e etapas de desenvolvimento. Isso implica em custos menores do componente e menor espaço ocupado em circuito, maior facilidade e agilidade para a codificação, menor tempo dispensado no treinamento da equipe e na conclusão do projeto. Também implica em menor performance e na oferta de menos recursos. Em contrapartida, os modelos de microprocessadores de 32-bits são geralmente complexos, tanto em sua estrutura arquitetural, como em suas ferramentas e etapas de desenvolvimento. Isso implica em custos mais elevados do componente, maior espaço ocupado em circuito (tanto do componente, como de circuitos auxiliares necessários), menor facilidade e agilidade para a codificação, maior tempo dispensado no treinamento da equipe e na conclusão do projeto. Porém, a performance e a oferta de recursos são muito superiores.

Dessa forma, projetos orientados por restrições de área de circuito impresso (como em equipamentos portáteis), restrições de preço e de tempo de conclusão normalmente utilizam microprocessadores de 8-bits. São também projetos cujas aplicações restringem-se ao controle eficiente e simples de periféricos e sistemas eletromecânicos. Porém, quando o projeto necessita de mais funcionalidades, mais espaço de memória e, principalmente, maior performance e precisão de computação, a migração para uma arquitetura de 32-bits pode ser a solução mais eficaz.

Como já esperado, o preço dessas melhorias deve ser pago em matéria de tempo e custos mais elevados, uma vez que toda novidade precisa ser estudada e dominada pelos desenvolvedores. Novidades e diferenças são inseridas desde as ferramentas de software para desenvolvimento e para depuração, até os periféricos de hardware e o módulo de depuração. Também o algoritmo codificado precisa passar por mudanças no mapeamento de memória, manipulação de exceções e configuração de registradores e periféricos, a partir de novas bibliotecas e nova documentação. O tipo de encapsulamento diferente e a configuração dos pinos (diferentes em número e em localização no encapsulamento) exige uma completa reestruturação da disposição dos demais componentes e das fontes de alimentação. Finalmente, modos de alimentação e tensões de alimentação devem ser diferentes e exigir hardware adicional. Todo o incremento em custo e tempo que estas alterações implicam pode comprometer o sucesso do projeto frente aos seus concorrentes, segundo as demandas do mercado.

Buscando diminuir, ou até solucionar completamente esta separação entre arquiteturas de 8-bits e 32-bits, foi criada a linha de microprocessadores Flexis, que tem como objetivo facilitar e agilizar o intercâmbio de projetos entre estas duas arquiteturas. Isso é possível por meio da confecção de modelos de

microprocessadores, dos dois tipos de arquitetura, que sejam compatíveis pino-a-pino, que tenham periféricos em comum e que compartilhem ferramentas de desenvolvimento. No caso específico da variação JM da linha Flexis, os modelos representantes são o MC9S08JM60 e o MCF51JM128, da família de 8-bits S08 e da família de 32-bits ColdFire V1, respectivamente [38].

A partir deste elo de compatibilidade, seria possível inclusive a migração de um projeto para outros modelos de microprocessadores, tanto para versões de 8-bits de famílias mais simples, até para versões de 32-bits mais atuais e poderosas, das famílias ColdFire V2, ColdFire V3 e ColdFire V4. Outra característica da linha Flexis JM é a integração de controladores USB, permitindo a adição deste protocolo de comunicação às funcionalidades de um projeto.

Além da compatibilidade pino-a-pino, que permite a troca entre componentes sem qualquer alteração física no layout da placa de circuito, estes modelos apresentam várias estruturas e funcionalidades em comum. Entre estas funcionalidades em comum, os principais itens são:

- Alimentação para operação na faixa de 2,7 a 5,5V;
- 1 Conversor Analógico-Digital (ADC) de 12-bits e 12 canais;
- Interfaces de comunicação dos protocolos Serial Peripheral Interface – SPI (2 unidades), Serial Communications Interface – SCI (2 unidades) e Inter-Integrated Circuit – I²C (apenas 1 unidade);
- 2 Temporizadores (Timers) de 16-bits, sendo um de 2 canais e o outro de 6 canais;
- 1 Contador de Tempo-real (Real-time Counter – RTC);
- Encapsulamentos LQFP de 64 e 44 pinos com compatibilidade pino-a-pino;
- Ferramentas de desenvolvimento comuns, sendo a principal o software CodeWarrior.

Estas estruturas e funcionalidades em comum estão relacionadas especialmente à comunicação com periféricos e a aplicações que utilizam temporização, além da simplificação na etapa de desenvolvimento do código e do layout final da placa de circuito impresso. Mas como já poderia ser esperado, existem também diferenças entre os modelos, que justificam o aumento da performance do microprocessador de 8-bits para o de 32-bits, além do tamanho da palavra binária propriamente. Entre as melhorias do MCF51JM128 sobre o MC9S08JM60, podem ser citados os seguintes itens:

- Interface USB 2.0 nos modos host, device e OTG, ao invés de apenas o modo device;
- Pilha do protocolo USB, desenvolvida pela empresa CMX, para os modos host, device e OTG, ao invés de apenas para o modo device;
- 128KBytes de memória flash integrada, ao invés de apenas 60KBytes;
- 16KBytes de memória RAM integrada, ao invés de apenas 4KBytes;
- 66 portas de entrada/saída (I/O) de propósito geral, ao invés de apenas 51 portas;
- Módulo completo para depuração em segundo plano (background debug), ao invés de apenas uma

interface de depuração single-wire;

- Frequência de Clock de operação do núcleo de 50,33MHz, ao invés de 48MHz;
- Frequência de Clock do barramento de 25,17MHz, ao invés de 24MHz;
- Faixa de temperatura de operação de -40°C até 105°C, ao invés da faixa de -40°C até 85°C.

Além das melhorias, podem ser também citadas novidades em funcionalidades para o modelo MCF51JM128, ausentes no modelo MC9S08JM60. Os principais itens são:

- Módulo de comunicação do protocolo Controller Area Network – CAN;
- 1 porta de entrada/saída veloz (rapid I/O) de propósito geral, de 16-bits;
- 1 Unidade Integrada de Aceleração Criptográfica, da língua inglesa Integrated Cryptographic Acceleration Unit – CAU.

Os modos host e OTG de operação da interface USB também podem ser considerados novidades, uma vez que ampliam grandemente o leque de aplicações USB que podem ser desenvolvidas, eliminando inclusive a necessidade do uso de outro equipamento para gerenciar a comunicação, uma vez que o próprio MCF51JM128 pode assumir essa tarefa. Uma característica presente apenas no MC9S08JM60 é um bloco adicional de memória RAM de 256 Bytes, dedicado à comunicação USB. Porém, uma vez que o MCF51JM128 oferece muito mais memória em outros blocos, esta diferença acaba não representando uma deficiência real.

2. Acelerômetro MMA7260QT

O dispositivo MMA7260QT, da empresa Freescale, é um sensor acelerômetro capacitivo confeccionado com a tecnologia de micro-fabricação de superfície, consistindo de duas células capacitivas sensoras de superfície (g-cell) seladas hermeticamente na pastilha de silício. Estas células são estruturas mecânicas confeccionadas com material semicondutor e por meio dos mesmos processos de fabricação de circuitos integrados semicondutores. A estrutura da célula pode ser compreendida como uma massa central móvel posicionada entre um conjunto de barras fixas. A massa central está ligada a barras móveis, que deflexionam quando a célula é submetida a uma aceleração. Quando deflexionada, a barra móvel aumenta sua distância em relação às barras fixas de um lado, ao mesmo tempo que diminui a distância em relação às barras fixas do outro lado. O incremento e decremento de distância acontecem na mesma proporção. Considerando que a interação entre barras fixas e móveis configura capacitâncias em série, torna-se possível a medição da aceleração ao associá-la à variação das capacitâncias. A capacitância de um dos lados aumenta com a diminuição da distância entre barras, enquanto que a capacitância do outro lado diminui com o aumento da distância entre barras. Um diagrama deste princípio de funcionamento, obtido da folha de dados

do componente [39], é apresentado na Fig. 2.

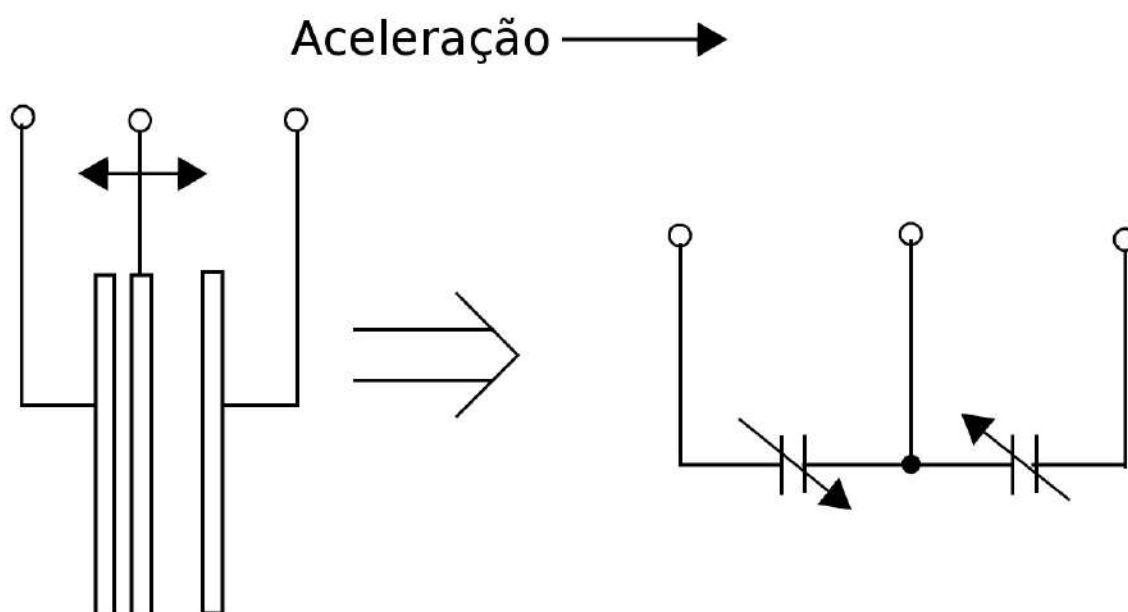


Figura 2: Princípio de funcionamento do MMA7260QT.

Dentro do encapsulamento que contém as células também existem circuitos integrados para condicionamento do sinal analógico, realizando a conversão da variação capacitiva para uma variação proporcional de tensão, por meio de um sinal de clock interno conhecido. Algumas funções desses circuitos são pré-definidas na fábrica e não podem ser alteradas, como o filtro passa-baixas de 1 pólo, compensação de temperatura e o valor de compensação para leitura de zero-g. Porém outras funções podem ser configuradas, como o modo de baixo consumo de energia (Sleep Mode) e a sensibilidade do sensor [39]. Um diagrama da estrutura do componente (com os blocos lógicos de composição) obtido em sua folha de dados [39], é apresentada na Fig. 3.

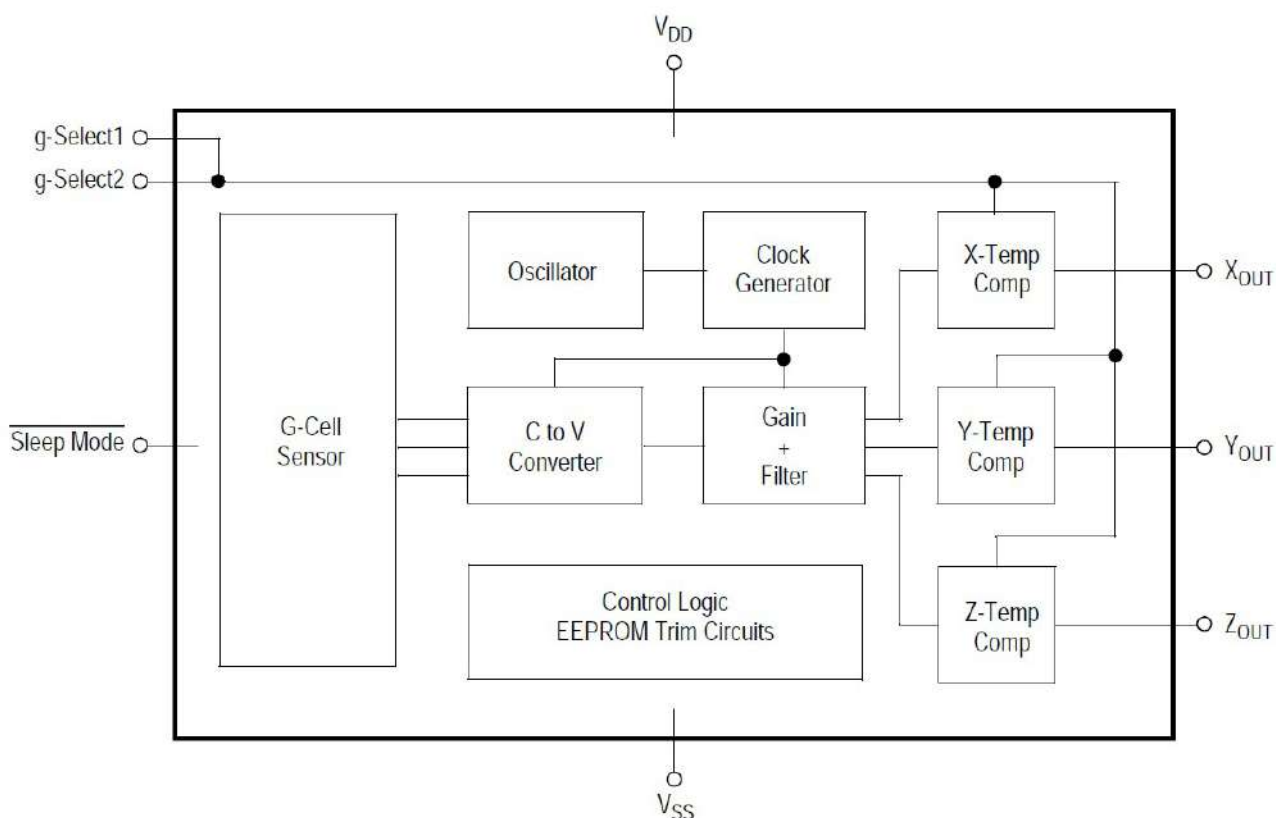


Figura 3: Estrutura do MMA7260QT.

O modelo MMA7260QT permite a variação de sua faixa de medição por meio da variação de sensibilidade. As faixas de medição possíveis são de 1,5g, 2g, 4g ou 6g, selecionáveis por meio de 2 pinos, g-Select2 e g-Select1, conectados diretamente ao módulo de ganho de tensão. A lógica de seleção é apresentada na Tab. 1.

Tabela 1: Lógica de seleção da sensibilidade.

g-Select2	g-Select1	Faixa de medição	Sensibilidade
0	0	1,5g	800 mV/g
0	1	2g	600 mV/g
1	0	4g	300 mV/g
1	1	6g	200 mV/g

O MMA7260QT é enquadrado como um acelerômetro de 'baixo g', pois outros modelos da Freescale se enquadram em outras porções da faixa completa, de 1,5g até 250g. Outra característica é o número de eixos de medição nos quais o sensor opera, que para o MMA7260QT são 3, nos eixos X, Y e Z (compreendendo o espaço tridimensional). Essas características são ideais para aplicações nas quais a aceleração é causada por quedas, inclinações, choques, vibração e reposicionamento. Alguns exemplos de

aplicações práticas dessas situações são [40]:

- Detecção de quedas para proteção de equipamentos eletrônicos;
- Reconhecimento de inclinações e padrões de movimento, para entrada de comandos em uma interface usuário-computador;
- Compensação de movimento para estabilização de imagens;
- Contagem de passos (pedometria);
- Navegação de automóveis;
- Registro de eventos em automóveis, aviões, entregas de mercadorias empacotadas;
- Monitoramento sísmico.

Outra vantagem do MMA7260QT é seu baixo consumo de energia durante sua operação, de apenas 500 μ A. Quando ativado para o Sleep Mode, as saídas do dispositivo são desligadas e este valor cai para apenas 3 μ A. Ainda, a tensão necessária para sua alimentação é de 2,2V até 3,6V, fazendo do MMA7260QT um modelo ideal para uso em equipamentos portáteis e alimentados por baterias. Sua resposta em frequência é de 150Hz para o eixo Z e de 350 Hz para os eixos X e Y, apesar de sua frequência de amostragem interna ser de 11kHz. Esses valores permitem a análise de sinais cuja componente de maior frequência seja a metade da frequência de aquisição (de 75Hz e 175Hz, respectivamente), sem incorrer em distorções por *aliasing*.

Com tempo de inicialização de 1ms (tempo necessário para que o componente, após ser energizado, esteja completamente pronto para operar), baixo custo por unidade do componente e dimensões físicas reduzidas (6mm X 6mm X 1,45mm em encapsulamento QFN de 16 pinos), o MMA7260QT também pode ser considerado uma boa escolha para a produção de equipamentos eletrônicos de consumo em larga escala. Uma fotografia do componente, retirada de [41], é apresentada na Fig. 4.

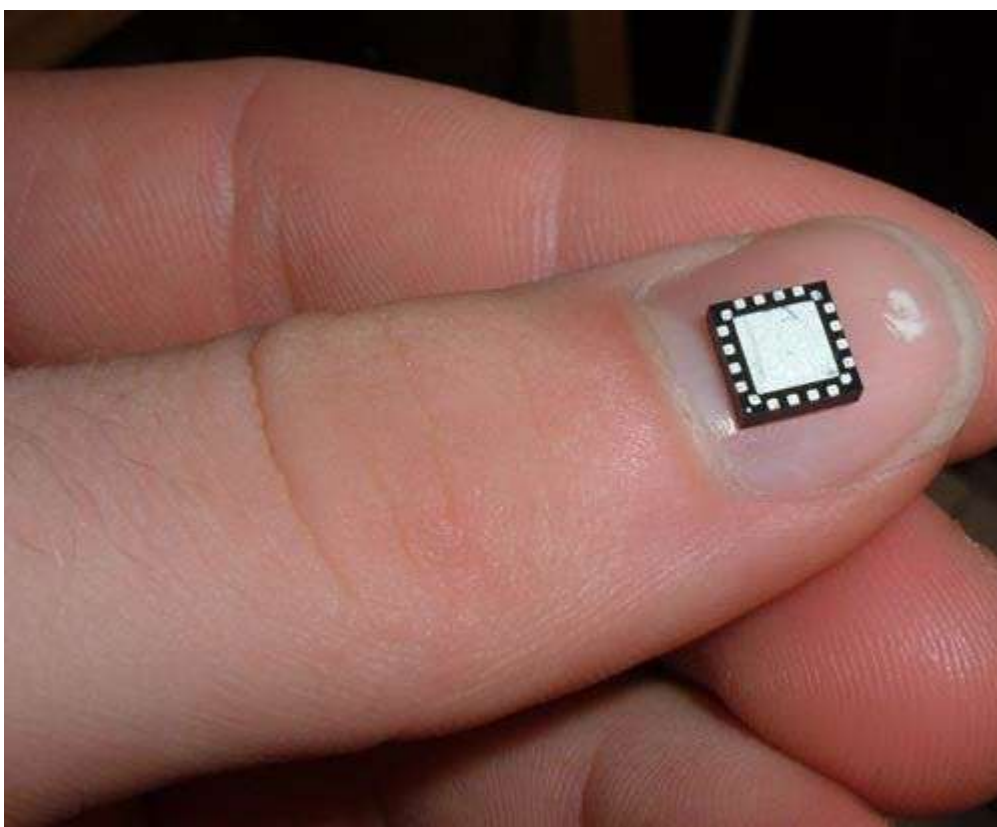


Figura 4: Foto do MMA7260QT.

ANEXO B – Software de desenvolvimento CodeWarrior 6.1 Special Edition

O software CodeWarrior é o ambiente de desenvolvimento unificado, oferecido pela empresa Freescale, para a criação de projetos para microprocessadores também fabricados por ela. O CodeWarrior oferece o editor de texto com marcação para as linguagens de programação C, C++ e Assembly, bem como as respectivas ferramentas de compilação (*compiler*), montagem (*assembler*), ligação de instâncias (*linker*) e depuração (*debugger*). Também oferece a ferramenta de gravação (*programmer*), para transferência do arquivo-objeto para a memória flash do microprocessador. A gravação é realizada por meio de hardware apropriado, que realiza a interface entre a placa de circuito e o computador. Algumas opções para seleção são oferecidas na ferramenta de gravação, como a conexão BDM Livre (Open Source), USB inDART (solução da empresa SofTec Microsystems) e as soluções da empresa P&E Microsystems, como USB BDM Multilink, Cyclone Pro, MON08 Multilink e USB MON08 Multilink.

O CodeWarrior oferece várias opções de criação de projetos, desde o gerenciador de criação para um projeto completamente novo, até a habilidade de importar um projeto já existente, total ou parcialmente. Permite a criação de projetos simples, de um único arquivo em Assembly, até projetos mais complexos, compostos por vários arquivos em linguagem de programação C. Oferece também cerca de 150 projetos prontos, escritos nas linguagens Assembly e C, que podem ser usados como modelos para construções próprias. E para facilitar a codificação das primeiras rotinas, oferece uma ferramenta chamada Device Initialization, para a geração de código de inicialização para a CPU e para periféricos.

Entre as várias opções de configuração que o CodeWarrior oferece para o projeto, a que mais se destaca é possibilidade de realizar a troca de microprocessador em qualquer momento durante o ciclo de desenvolvimento. Ao fazê-lo, o software automaticamente reconfigura as ferramentas de construção e substitui os cabeçalhos e bibliotecas específicos. Para facilitar o trabalho do desenvolvedor, são também apresentadas em tela as diferenças de arquitetura entre o modelo de microprocessador anterior e o modelo novo escolhido, como também as porções de código que precisam ser atualizadas manualmente, como as rotinas de interrupção e as operações programadas em linguagem Assembly (aquela de mais baixo nível, relacionada diretamente com a arquitetura-alvo).

O CodeWarrior também oferece, como recurso mais avançado para a migração de projetos entre microprocessadores, a função 'Processor Expert'. Trata-se de uma função para organizar as funcionalidades desejadas para o projeto. Ao invés de codificar manualmente a função desejada, utilizando os descritores específicos de cada arquitetura (que estão declarados em sua biblioteca específica), utiliza-se uma tabela de seleção, que insere no projeto os módulos escolhidos. Assim, quando o microprocessador for trocado, o próprio CodeWarrior poderá identificar os blocos de código que pertencem a determinada função e, de posse do bloco equivalente da nova arquitetura, poderá realizar a simples substituição. Além de simplificar a troca entre arquiteturas e de diminuir o trabalho de programação, outras grandes vantagens dos blocos de código prontos do Processor Expert são sua confiabilidade e performance, uma vez que foram já extensivamente testados e otimizados para cada arquitetura [42].

No DVD-ROM, disponibilizado juntamente com o kit de desenvolvimento DEMOJM, está inserido o software CodeWarrior em sua versão 6.1 Special Edition. Também estão inseridas as bibliotecas dos microprocessadores MC9S08JM60 e MCF51JM128, além dos exemplos de projetos prontos (escritos em linguagem C e em Assembly) e demais recursos. Como sugerido pelo nome, trata-se de uma categoria especialmente designada para o trabalho com um conjunto restrito de microprocessadores, inclusos os do kit DEMOJM. Apesar de apresentar algumas limitações frente às outras categorias (Standard Edition e Professional Edition), oferece os recursos necessários e suficientes para a criação de extensos projetos, podendo ser utilizado por tempo indeterminado.

As maiores limitações impostas pela categoria Special Edition estão no Compilador e no Depurador para projetos escritos em linguagem de programação C. A função do Compilador é a tradução otimizada das estruturas da linguagem de alto nível para comandos de baixo nível, a fim de reduzir o tamanho do código final (economizando espaço de memória de gravação) e aumentar a performance de execução. A função do Depurador é inspecionar o código final durante sua execução, buscando encontrar falhas de lógica, de aproximação e outras. A restrição para a categoria está no tamanho do código final gerado, que deve ser de 32KBytes no máximo para o MC9S08JM60 e de 64KBytes no máximo para o MCF51JM128. As categorias Standard Edition e Professional Edition não restringem o tamanho do código final, mas em contrapartida restringem outros recursos e determinam um período de utilização, exigindo a aquisição de licenças.

Outras funcionalidades do Compilador para a otimização do código são a busca por porções de código não utilizadas, a declaração de operações Macro em Assembly e a inclusão de várias bibliotecas compatíveis com o padrão ANSI C e ISO C++. Também permite a exportação do arquivo-objeto nos formatos ELF/DWARF 2.0, Hiware, Freescale S-Record, hexadecimal Intel e binário. Outras funcionalidades do Depurador são a apresentação gráfica das variáveis e estruturas de dados declaradas no código, a execução do código em blocos de comando ou passo-a-passo, a simulação de várias arquiteturas (incluindo sua lista de instruções, periféricos, interrupções e eventos de entrada/saída) e a capacidade de reportar informações detalhadas do projeto (sobre registradores de entrada/saída, tabela de símbolos, pilha, eventos pendentes, exceções pendentes, pontos de parada e pontos de observação).

As janelas gráficas do gerenciador de criação de projeto e do programador com ambiente de depuração são apresentadas na Fig. 1 e na Fig. 2.



Figura 1: Gerenciador de criação de projeto.

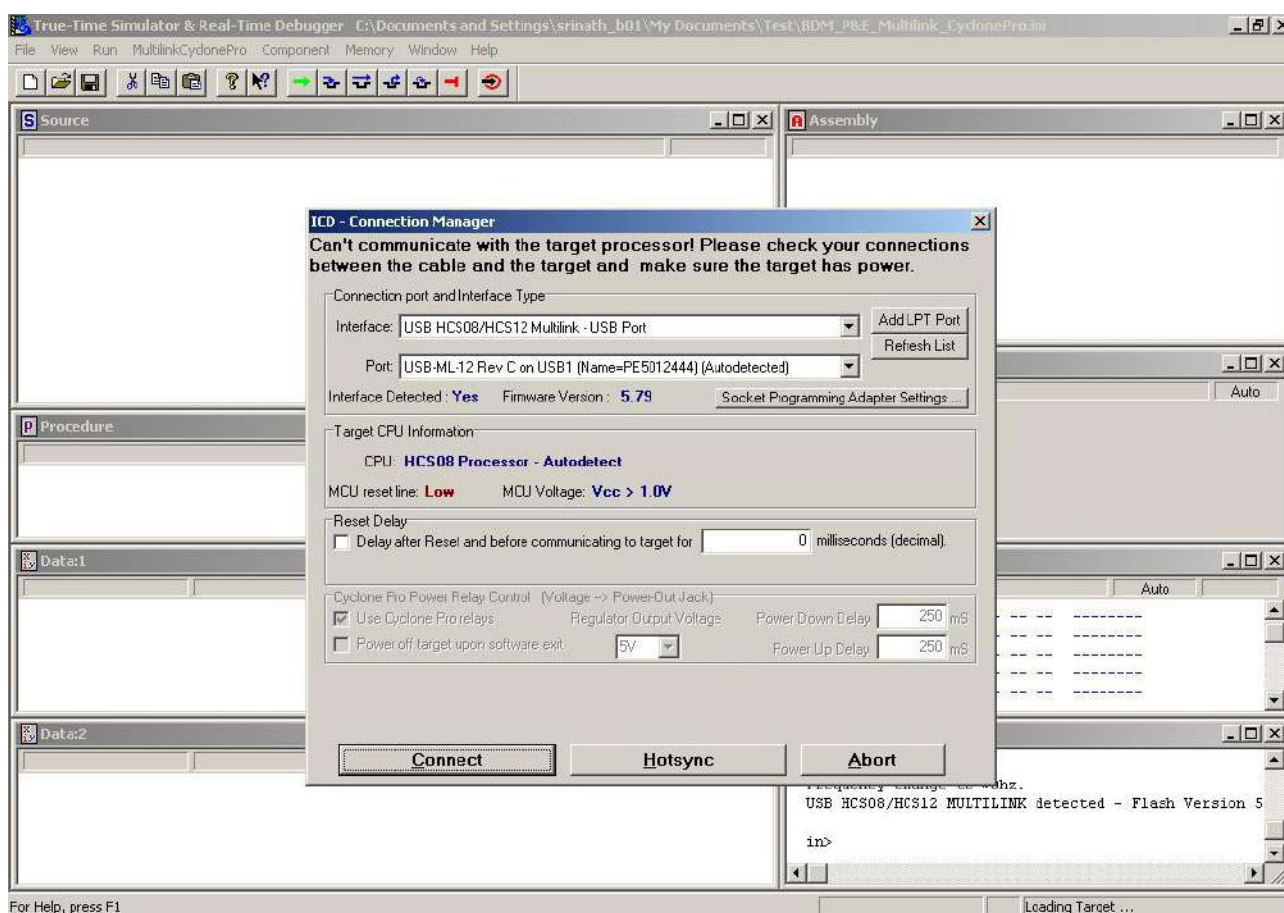


Figura 2: Programador com ambiente de depuração.