

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM
TRANSPORTE DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

Área de Engenharia Elétrica

por

Rodrigo Donizete Gianini de Lima

Antonio Assis Bento Ribeiro, Msc.
Orientador

Itatiba (SP), Dezembro de 2009

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**SISTEMA DE MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM
TRANSPORTE DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

Área de Engenharia Elétrica

por

Rodrigo Donizete Gianini de Lima

Monografia apresentada à Banca Examinadora
do Trabalho de Conclusão do Curso de
Engenharia Elétrica para análise e aprovação.
Orientador: Antonio Assis Bento Ribeiro, Msc.

Itatiba (SP), Dezembro de 2009

Aluno: Rodrigo Donizete Gianini de Lima

Título: Sistema de monitoramento de vibrações em transporte de transformadores de potencia.

1º Examinador: Prof . Msc. Antonio Assis Bento Ribeiro - USF

2º Examinador: Prof. Msc. Renato Franco de Camargo - USF

3º Examinador: Prof. Dr. Geraldo Peres Caixeta - USF

A banca examinadora do trabalho de conclusão de curso em sessão pública realizada em 10/12/2009, considerou o candidato:

aprovado reprovado

Dedico este trabalho de conclusão de curso a minha mãe Natalina, meu pai José Roque, pela minha existência, pela motivação, pela dedicação aos meus estudos, e aquela que me complementa em tudo que faço e que me acompanha durante toda esta jornada: Denislésia, minha querida esposa.

.

AGRADECIMENTOS

Neste momento tão belo. Quero agradecer a Deus a oportunidade que estou tendo. Pelo amor e paciência que puseste em meus pais. Vencemos mais uma etapa de nossas vidas. Agradeço por tudo Senhor Deus.

Agradeço a minha esposa pela cooperação neste período de dedicação ao Tcc.

Agradeço imensamente ao Eduardo Pedrosa, diretor da empresa onde trabalho (Tretech Sistemas Digitais), pelo incentivo nos estudos e no desenvolvimento dos funcionários que a compõem.

Agradeço ao professor e orientador do TCC Msc. Antonio Assis Bento Ribeiro pela ajuda e incentivo durante todo período de graduação.

Agradeço aos professores Renato Franco de Camargo e Geraldo Peres Caixeta pela aceitação do convite de avaliação na banca de defesa do Tcc e pelos elogios e críticas durante a avaliação.

Agradeço aos amigos: Christos, Daniel Carrijo, Moacir Filho, Julio Franco, e os que participaram diretamente ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

*Temos o poder de mudar vidas com
simples ações. Por isso devemos praticá-las
com discernimento, responsabilidade e, acima
de tudo, muito AMOR.*

Rui Barbosa

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE EQUAÇÕES.....	xi
RESUMO.....	xii
<i>ABSTRACT</i>	xiii
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. OBJETIVO GERAL	14
1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.2. METODOLOGIA	15
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1. CONHECENDO O TRANSFORMADOR	16
2.2. CONSEQÜÊNCIAS DOS IMPACTOS DURANTE TRANSPORTE	17
2.2.1. DEFORMAÇÃO RADIAL.....	18
2.2.2. DEFORMAÇÃO AXIAL	19
2.2.3. DESLOCAMENTO DOS ENROLAMENTOS.....	20
2.2.4. CAUSAS DAS FALTAS MECÂNICAS	21
2.3. VIBRAÇÃO	21
2.3.1. CONCEITOS BÁSICOS DE VIBRAÇÕES.....	23
2.3.2. MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES.....	24
2.4. ACELERAÇÃO	26
2.5. REGISTRADOR DE IMPACTO ANALÓGICO	27
2.6. ACELERÔMETRO	29
2.6.1. MEMS(<i>Micro-Eleto-Mechanical Systems</i>)	30
2.6.2. TIPOS DE ACELERÔMETROS	31
2.6.3. APLICAÇÕES.....	34
3. PROJETO	35
3.1. <i>HARDWARE</i>	35
3.1.1. ESCOLHA DO SENSOR	37
3.1.2. SENSOR ACELERÔMETRO ADXL335.....	38
3.1.3. DICAS DE APLICAÇÃO DO SENSOR.....	39
3.1.4. CONFIGURAÇÃO DA LARGURA DE BANDA USANDO CX, CY, E CZ.....	39
3.1.5. FONTE DE ALIMENTAÇÃO.....	40
3.1.6. MICROCONTROLADOR E PERIFÉRICOS.....	40
3.1.7. CONDICIONAMENTO DE SINAIS E MEDIÇÃO.....	40
3.1.8. ESQUEMA ELETRÔNICO.....	41
3.1.9. CIRCUITO IMPRESSO.....	41
3.2. <i>FIRMWARE</i>	42
3.2.1. ESCOLHA DO COMPILADOR	42
3.2.2. FLUXOGRAMA DO FIRMWARE PROJETADO.....	43
3.2.3. AUTO-DIAGNÓSTICO DO SISTEMA	44

3.3. DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA.....	45
3.4. APLICAÇÃO.....	45
3.5. ENSAIOS PRÁTICOS.....	46
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
6. GLOSSÁRIO	56
7. ANEXO I - DATA SHEET DO SENSOR ADXL335.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS

C	Coefficiente de amortecimento viscoso
EEPROM	<i>Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
f	Frequência em Hertz
<i>g</i>	Aceleração da gravidade
LCD	Display de cristal líquido
K	Rigidez mecânica
MEMS	<i>Micro-Electro-Mechanical Systems</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
Rad./s	Radianos por segundo
T	Período
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
USF	Universidade São Francisco
VPM	Vibrações por minuto

LISTA DE FIGURAS

Figura 01.	Estrutura das partes principais de um Transformador.....	17
Figura 02.	Serviço Transporte de um transformador de 150 toneladas Equipamentos Carreta modular - linha de eixos - 14 eixos.....	18
Figura 03.	Deformação radial em um enrolamento do transformador.....	18
Figura 04.	Deformação axial em um enrolamento do transformador.....	19
Figura 05.	Deslocamento de um enrolamento do transformador de potência.....	20
Figura 06.	Uma função periódica e uma harmônica, mostrando o período T e amplitude x_0 .	21
Figura 07.	Dois movimentos harmônicos incluindo o ângulo de fase ϕ	22
Figura 08.	Esboço de um modelo de um grau de liberdade.....	23
Figura 09.	Diagrama de Blocos do Processo de Medição.....	25
Figura 10.	Planilha para registradores de impacto Mitsubishi.....	28
Figura 11.	Impactos Registrados em Papel.....	28
Figura 12.	Aceleração sentida em um sistema capacitivo.....	29
Figura 13.	Princípio de Funcionamento de um acelerômetro através de uma massa.....	30
Figura 14.	Ordem de Grandeza dos dispositivo MEMS.....	30
Figura 15.	Esquema simplificado de um acelerômetro capacitivo.....	32
Figura 16.	Esquema simplificado de um acelerômetro triaxial piezo-resistivo.....	33
Figura 17.	Diagrama de Blocos do Sistema de Monitoramento de Vibrações durante Transporte de Transformadores.....	35
Figura 18.	Diagrama de Blocos do Hardware.....	36
Figura 19.	Foto da placa de protótipo.....	36
Figura 20.	Foto do Sensor.....	38
Figura 21.	Diagrama de Blocos do Acelerômetro utilizado no Projeto.....	39
Figura 22.	Esquema eletrônico do Projeto.....	41
Figura 23.	Circuito impresso do Projeto.....	41
Figura 24.	Fluxograma do firmware.....	43
Figura 25.	Fluxograma de auto diagnóstico do firmware.....	44
Figura 26.	Locomoção do Transformador através de guindaste.....	45
Figura 27.	Sistema de movimento periódico constituído por uma massa e uma mola.....	46
Figura 28.	Foto do Sistema massa-mola.....	47
Figura 29.	Sensor acoplado na massa.....	48
Figura 30.	Tela de download dos dados - Programa MPLAB.....	48
Figura 31.	Gráfico da Aceleração no Tempo.....	51
Figura 32.	Gráfico de aceleração no tempo ampliado.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de aceleração em diversas situações.....	31
Tabela 2. Valores medidos no eixo z através do sensor.....	49

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1.1.....	22
Equação 1.2.....	22
Equação 1.3.....	22
Equação 1.4.....	23
Equação 1.5.....	23
Equação 1.6.....	24
Equação 1.7.....	24
Equação 1.8.....	24
Equação 1.9.....	26
Equação 1.10.....	26
Equação 1.11.....	26
Equação 1.12.....	29
Equação 1.13.....	39
Equação 1.14.....	40
Equação 1.15.....	46
Equação 1.16.....	53
Equação 1.17.....	53
Equação 1.18.....	53

RESUMO

Lima, Rodrigo D. Gianini. Sistema de Monitoramento de Vibrações em Transporte de Transformadores de Potencia. Itatiba, 2009. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade São Francisco, Itatiba, 2009.

Devido à importância do transformador de potencia no sistema elétrico, a detecção de falhas e a capacidade de avaliar o estado atual do equipamento se tornam indispensáveis, evitando assim prejuízos pela sua indisponibilidade. Neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um protótipo capaz de monitorar as vibrações mecânicas durante o transporte de transformadores de potencia. A monitoração é uma ferramenta essencial para verificar a qualidade do transporte e a detecção de um defeito interno ou externo em uma máquina de grande porte. O sistema contempla um software de aquisição dos dados monitorados, para que seja feita uma análise técnica após a chegada do transformador na subestação de energia elétrica. O hardware foi projetado para efetuar medições das grandezas: Aceleração “g”, Tempo“s”. Os dados são medidos através de um sensor acelerômetro com transdutor interno com medição em três eixos (x, y e z). As variáveis são convertidas em tensão através do sensor e posteriormente processados por um microcontrolador. O Sensor acelerômetro utilizado é o ADXL335 do fabricante Analog Devices com range de medição +-3g e o microcontrolador utilizado é o PIC18F6720 da família 18F do fabricante Microchip. O projeto, o esquemático, o layout e a programação do circuito integrado estão descritas em diagramas de blocos e a análise dos dados é visualizada através de gráficos.

Palavras-chave: Acelerômetro, Transformador, Transporte, Projeto, Hardware, Firmware.

ABSTRACT

Due the power transformer importance in the power system, the failure detection and the capability to evaluate the equipment actual state became necessary, thus avoiding losses of their unavailability. This paper presents the development of a prototype capable of monitoring power transformers mechanical vibrations during transport. The monitoring is a essential tool to check the transportation quality and detection of internal or external failure in large machine. The system includes a data acquisition software, so a technical analysis can be done after the power transformer arrival in the substation. The hardware was designed to make measurements of the variables: aceleration "g", Time "s",. The data is measured through a accelerometer sensor with internal transducer to measure in three axes (x, y, and z). The variables are converted into voltage signal through the sensor and after processed by a microcontroler. The accelerometer sensor used is the ADXL 335, manufactured by Analog Devices with measurement range of + - 3 g. and the microcontroler used is the PIC 18F6720, family 18F from Microchip. The design, the scheme, the layout and programming of the chip are described in block diagrams and data analysis is visualized by graphics.

Keywords: Accelerometer, Transformer, Transport, design, Hardware, Firmware.

1. INTRODUÇÃO

O transporte do transformador de potência é um problema logístico muito complexo. Devido ao seu grande porte, são exigidas soluções especiais para trafegar até seu destino final, tais como veículos de carga extra-pesados e guindastes de grande capacidade. Muitas vezes, os acessos as estradas, ruas, viadutos não comportam a passagem desse tipo de comitiva, exigindo planejamento muito apurado ou, quando não restam alternativas, improvisações indesejáveis.

O transformador de potência, devido á construção de sua parte ativa, não pode ser submetido a uma aceleração acima de três vezes a gravidade, pois corre o risco de sofrer alguma movimentação de seus enrolamentos. [03] Por isso, há uma grande preocupação por parte dos fabricantes e também dos usuários dos transformadores quanto aos impactos durante o transporte. Tendo em vista as várias dificuldades durante o transporte, o principal motivo é a qualidade de algumas rodovias e estradas que muitas vezes possuem erosões e depressão, causando vibrações prejudiciais nas partes ativas do transformador.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

Diante de um longo transporte de um transformador, e todo o custo envolvido é importante a monitoração das acelerações sofridas durante o transporte. Pois é de grande importância o usuário saber a qualidade do transporte e verificação das possíveis não conformidades em seus produtos.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

A análise de dados e a manutenção de um sistema analógico de qualidade do transporte de um transformador são complicadas e demoradas. Com os avanços tecnológicos, agilidade, custo e benefício faz com que o usuário atualize seus equipamentos analógicos por digitais.

Diante das dificuldades do sistema analógico, este projeto tem como objetivo desenvolver um hardware com processamento digital que terá armazenamento dos dados em uma memória não volátil (EEPROM) e posteriormente o usuário poderá efetuar o download dos dados e analisar as informações através de gráficos.

1.2. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com base em pesquisas de livros, *data sheet*, revistas, internet e desenvolvimento, montagem e testes em uma placa protótipo. Durante o desenvolvimento do sistema, foram pesquisados vários tipos de sensores de acelerômetros e suas respectivas características. Tendo determinado o modelo do sensor, o microcontrolador e os componentes da placa, foi projetado o circuito eletrônico para atender a aplicação.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para desenvolvimento do sistema foi necessário preparar uma seqüência de trabalhos e pesquisas. Abaixo estão listados os principais pontos:

- Identificação da necessidade, idéia e benefícios do sistema;
- Pesquisas bibliográficas;
- Estudo detalhado dos componentes, linguagem de programação, compiladores a serem utilizados para contemplar o projeto;
- Desenvolvimento de circuito eletrônico;
- Desenvolvimento de circuito impresso;
- Desenvolvimento de rotinas em linguagem C;
- Testes de Hardware e Firmware;
- Testes no Sistema de aquisição dos dados;
- Testes Práticos;

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CONHECENDO O TRANSFORMADOR

O transformador de potência opera continuamente sob condições severas como: campos elétricos e magnéticos elevados, temperatura de trabalho elevada, exposição direta ao ambiente (poeira, chuva, poluição). Existem, ainda, algumas situações eventuais que solicitam enormemente a robustez do transformador como, por exemplo, sobre tensões de manobra, descargas atmosféricas (raios), correntes de curto-circuito. Além destas, podem acontecer eventos não inerentes com a sua operação no sistema, como por exemplo, vandalismo e impactos de transporte, mas que ameaçam a integridade do equipamento.

Por ser o equipamento principal e o mais caro de uma subestação de energia, a ocorrência de algum defeito no transformador implica em grandes prejuízos. Não somente pelos custos de substituição e reparo, mas também pelo não-fornecimento de energia a um grande número de consumidores.

Por este motivo, o transformador é objeto de diversos estudos que visam reconhecer anomalias em sua estrutura, que são potenciais fontes de defeito. Essas anomalias são denominadas faltas. Existem vários tipos de faltas (faltas: causa das possíveis falhas no funcionamento do transformador) que podem ocorrer em transformadores de potência. Por exemplo, a penetração de umidade no tanque, que diminui a rigidez dielétrica do fluido e também acelera a degradação do isolamento sólido (papel). Outro exemplo é a formação de pequenos arcos (descargas parciais) em algumas regiões do dielétrico, que podem ocasionar um defeito interno e, conseqüentemente, um grande dano ao equipamento. Entre os diversos tipos de faltas que existem, este trabalho dá subsídio especificamente ao estudo das faltas mecânicas do transformador. A figura 01 apresenta um transformador de potencia típico em vista de corte onde podem ser vistos seus principais componentes. [01]

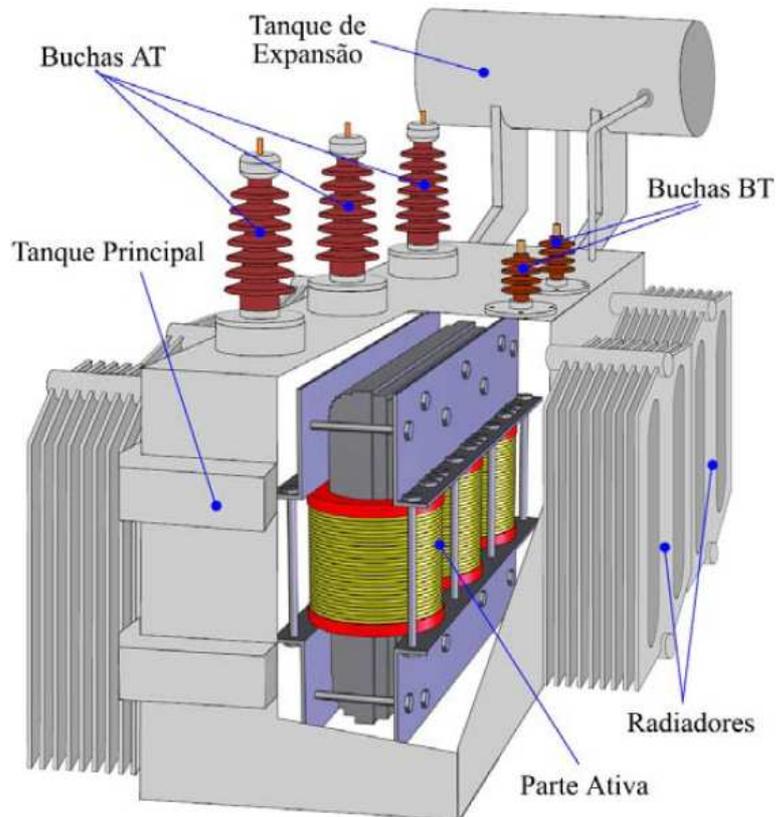


Figura 01. Estrutura das partes principais de um Transformador
 Fonte : [01]

2.2. CONSEQÜÊNCIAS DOS IMPACTOS DURANTE TRANSPORTE

Devido à má qualidade de algumas das rodovias, o sistema de transporte de grandes cargas, sempre foi uma das causas de danos internos em transformadores de potencia. A figura 02 apresenta uma carreta modular transportando um transformador de 150 toneladas numa estrada precária.

As faltas mecânicas em transformadores de potência são tipos de defeitos que ocorre na parte ativa do equipamento, e constituem-se da deformação e/ou o deslocamento dos enrolamentos. Essas faltas são provocadas por esforços mecânicos internos ou externos ao equipamento.

Entretanto, o transformador com alterações mecânicas em seus enrolamentos tem menor robustez, o que pode precipitar sua vida útil.



Figura 02. Serviço Transporte de um transformador de 150 toneladas
Equipamentos Carreta modular - linha de eixos - 14 eixos
Fonte: [08]

2.2.1. DEFORMAÇÃO RADIAL

A figura 03 apresenta uma vista de corte da seção de um transformador tipo núcleo envolvido que mostra a situação dos enrolamentos antes e depois de uma deformação radial. Em transformadores desse tipo a tendência dos esforços eletrodinâmicos é comprimir o enrolamento interno e expandir o enrolamento externo.

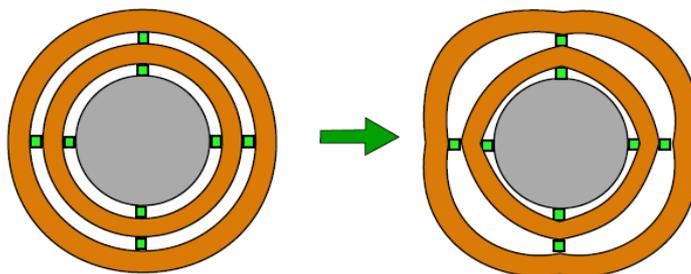


Figura 03. Deformação radial em um enrolamento do transformador.
Fonte : [01]

- Estiramento do isolante que reveste os condutores dos enrolamentos. Isto é altamente prejudicial, pois degrada significativamente o material isolante, reduzindo a vida útil do transformador.

- Diminuição das distâncias de isolamento entre o enrolamento interno e o núcleo. Com isso há uma redução da capacidade do transformador de suportar surtos de tensão. Além disso, modifica a distribuição do campo elétrico ao longo do enrolamento, podendo submeter partes do material isolante a maiores estresses elétrico.

- Diminuição das distâncias de isolamento do enrolamento externo ao tanque ou a outro enrolamento do equipamento, no caso de transformadores trifásicos. Provoca os mesmos efeitos do anterior.

- Afrouxamento das amarrações dos enrolamentos. Isto permite certa mobilidade dos condutores, o que provoca vibrações e, em longo prazo, a fadiga do material isolante e das conexões. Além disso, reduz a robustez do transformador frente a correntes de curto-circuito. [01]

2.2.2. DEFORMAÇÃO AXIAL

A deformação axial se configura como mostra a figura 04. A figura mostra uma vista de frente dos enrolamentos de um transformador antes e depois da deformação.

As conseqüências desse tipo de deformação são:

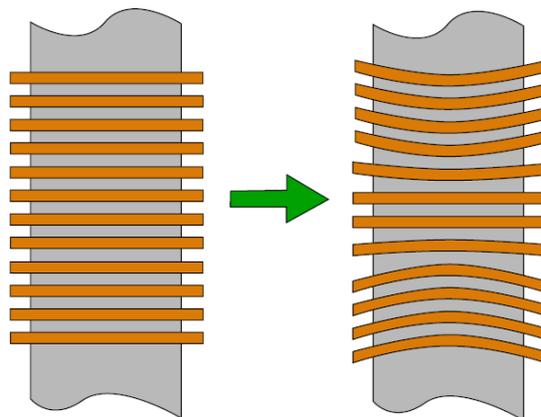


Figura 04. Deformação axial em um enrolamento do transformador
Fonte: [01]

- Torção dos condutores dos enrolamentos. Isto produz um estiramento e/ou esmagamento do material isolante que reveste os condutores, reduzindo a vida útil do transformador.

- Diminuição da rigidez mecânica do disco de compressão ou quebra do mesmo. Permite o deslocamento do enrolamento, provoca vibrações e também reduz a capacidade do equipamento em suportar correntes de curto-circuito.

- Afrouxamento das amarrações dos enrolamentos. Reduz a robustez do transformador frente a correntes de curto-circuito, provoca vibrações e fadiga do material isolante e das conexões.

[01]

2.2.3. DESLOCAMENTO DOS ENROLAMENTOS

A figura 05 apresenta um exemplo de deslocamento de enrolamento, onde é mostrado o enrolamento interno fora de seu eixo.

As principais conseqüências desse tipo de falta são:

- Diminuição das distâncias de isolamento entre os enrolamentos. Modifica a distribuição do campo elétrico ao longo dos enrolamentos e reduz a capacidade do transformador de suportar surtos de tensão.

- Diminuição da rigidez mecânica do conjunto do enrolamento. Um deslocamento do enrolamento indica que há mobilidade do enrolamento, o que provoca vibrações e também reduz a capacidade do equipamento em suportar correntes de curto-circuito. [01]

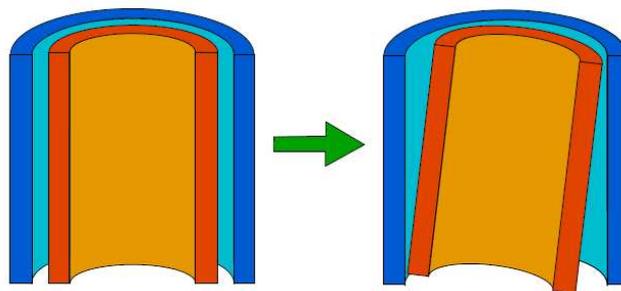


Figura 05. Deslocamento de um enrolamento do transformador de potência.

Fonte: [01]

2.2.4. CAUSAS DAS FALTAS MECÂNICAS

Os enrolamentos do transformador de potência são dimensionados mecanicamente para suportar os esforços produzidos pela circulação de suas correntes nominais. Entretanto, existem eventos que ocorrem durante a vida útil do equipamento que, em algum momento, podem provocar algum tipo de falta mecânica. [01]

2.3. VIBRAÇÃO

Uma vibração é, em seu sentido geral, um movimento periódico, isto é, um movimento que se repete em todos os particulares após certo intervalo de tempo chamado de período da vibração, usualmente designado pelo símbolo T . Um diagrama do deslocamento 'x' em relação ao tempo 't' pode ser uma curva consideravelmente complicada. Como exemplo, a figura 06(a) mostra a curva de movimento observada no suporte do mancal de uma turbina a vapor.

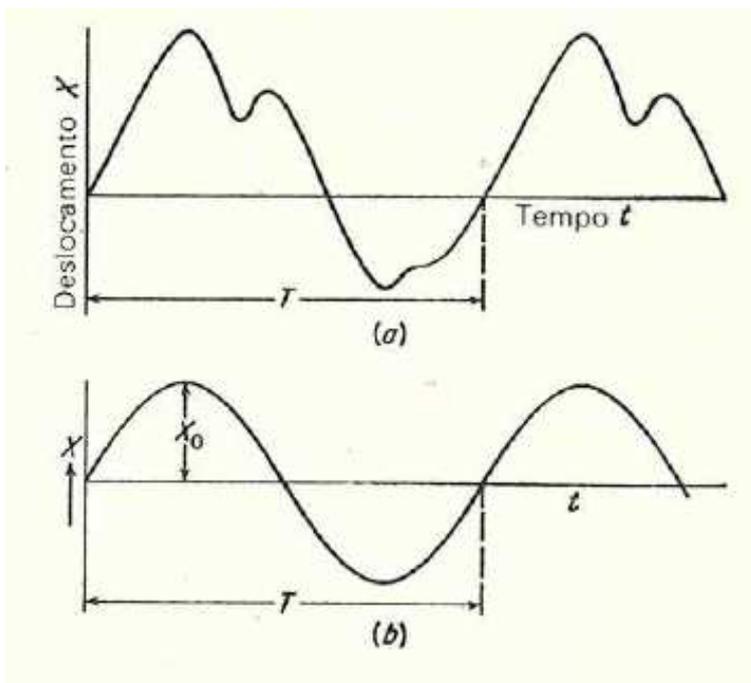


Figura 06. Uma função periódica e uma harmônica, mostrando o período T e a amplitude x_0
Fonte: [09]

O movimento harmônico é o tipo mais simples de movimento periódico. Nele, a relação entre x e t pode ser expressa por

$$x = x_0 * \text{sen } \omega t \quad (1.1)$$

Conforme mostra a figura 6 (b), que representa as pequenas oscilações de um pêndulo simples. O valor máximo do deslocamento é x_0 , chamado de amplitude da vibração.

O período T é usualmente medido em segundos; seu inverso, $f = 1/T$, é a frequência da vibração. Na Eq. (1.1) aparece o símbolo ω , conhecido por frequência circular, que é medida em radianos por segundo (rad./s).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \text{ s} \quad (1.2)$$

Como f é o inverso de T ,

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \text{ Hz} \quad (1.3)$$

Para as máquinas rotativas, a frequência é usualmente expressa em vibrações por minuto, designada por $vpm = 30 \omega/\pi$.

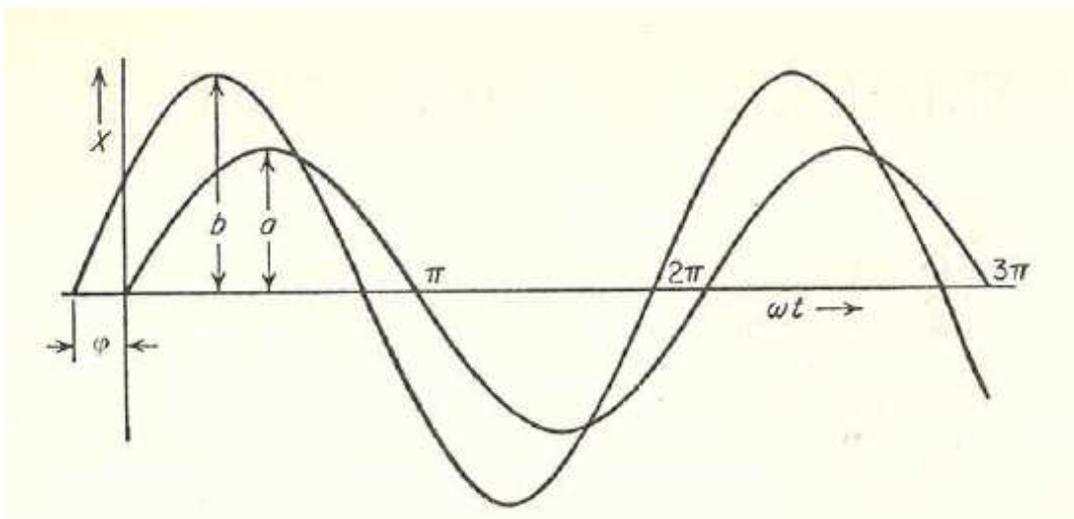


Figura 07. Dois movimentos harmônicos incluindo o ângulo de fase ϕ
 Fonte: [09]

Em um movimento harmônico para qual o deslocamento é dado por $x = x_0 * \text{sen } \omega t$, a velocidade é achada pela diferenciação do deslocamento em relação ao tempo tal que a velocidade é também harmônica e tem um valor máximo ωx_0 .

$$\frac{dx}{dt} = x' = x_0 \omega * \cos \omega t \quad (1.4)$$

A aceleração é

$$\frac{d^2x}{dt^2} = x'' = -x_0 \omega^2 * \text{sen } \omega t \quad (1.5)$$

Na maioria das situações experimentais, a vibração mecânica é caracterizada através dos seguintes parâmetros mensuráveis: aceleração, velocidade, deslocamento, frequência, amortecimento e tensão mecânica. Vibrações implicam necessariamente movimentos, e por isso os transdutores devem ser capazes de medir o movimento relativo a um espaço inercial. Os transdutores mais básicos envolvem um sistema massa – mola - amortecedor encapsulados com um sistema de medição do deslocamento da massa relativo à cápsula (acelerômetros).

Antes de determinarmos os procedimentos para medição da vibração, é essencial uma pequena introdução relacionada à teoria básica de vibrações. [06]

2.3.1. CONCEITOS BÁSICOS DE VIBRAÇÕES

Como exemplo clássico, a figura 08 apresenta um sistema linear de um grau de liberdade que pode ser descrito a partir dos seguintes parâmetros: deslocamento, massa, coeficiente de amortecimento e rigidez mecânica.

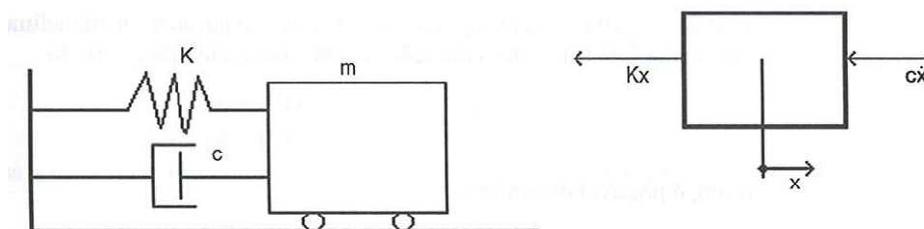


Figura 08. Esboço de um modelo de um grau de liberdade
Fonte: [06]

Ao aplicar-se uma perturbação inicial ao sistema ilustrado na figura 08 e deixá-lo vibrar livremente, pode-se descrever o movimento por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0, \quad (1.6)$$

sendo x o deslocamento em metros, m a massa em quilograma, c o coeficiente de amortecimento viscoso $N \cdot s/m^2$ e K a constante de rigidez em N/m .

A solução dessa equação é um sinal senoidal (normalmente denominado, nesta área, vibração senoidal) cuja frequência é dependente da rigidez da massa. O valor do coeficiente de amortecimento viscoso afeta basicamente o decaimento da amplitude da vibração e tem pouca influencia na frequência, sendo muitas vezes desprezível em casos de vibrações estruturais. Apenas para exemplificar, pode-se citar outros sistemas de primeira ordem: uma viga em balanço, o teto ou a parede de uma estrutura. Cabe salientar que o amortecimento de estruturas não é estritamente linear, porém, na maioria das situações experimentais, pode-se utilizar satisfatoriamente um coeficiente de amortecimento equivalente. [06]

Considerando-se $C = 0$, a frequência natural angular (ω_n) pode ser escrita como:

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad (1.7)$$

Sendo m a massa e K rigidez. Cabe observar que a frequência angular (ω_n) está relacionada com a frequência cíclica (f) da dada em hertz ($Hz = 1/s$) por

$$\omega = 2\pi f. \quad (1.8)$$

2.3.2. MEDIÇÃO DE VIBRAÇÕES

Devido á necessidade de quantificar algumas características vibratórias, tais como frequência, deslocamentos, aceleração e velocidade, entre outras, faz-se necessário medir essas grandezas com algum tipo de transdutor. Em termos práticos, a caracterização da vibração pode ser dividida em três etapas:

Medição de uma das grandezas listadas anteriormente;

Análise do sinal derivado do sistema transdutor – condicionador;

Controle do sistema para minimizar os efeitos das vibrações.

Como o procedimento de análise do sinal vibratório é posterior ao uso de um transdutor ou de um processo de medição, é extremamente importante realizar o procedimento experimental corretamente para não se comprometerem os procedimentos posteriores: análise e controle. [06]

Abaixo algumas aplicações de medição de vibração:

- Vibrações de máquinas;
- Análise de falha por fadiga;
- Auxiliar no projeto de isoladores para vibrações;
- Identificação de níveis de aceleração danosos ou não ao corpo humano;
- Análise sísmica;
- Avaliação de testes de choques, impactos e explosões, além da análise modal de estruturas.

Conforme mostrado na figura 09, o processo de medição inicia-se na identificação de um determinado fenômeno vibratório, passando pela introdução de um transdutor (que tem como função converter o sinal mecânico em sinal elétrico), a amplificação do sinal e a apresentação desse sinal, que pode ser armazenado ou não, possibilitando-se assim a posterior análise. [06]

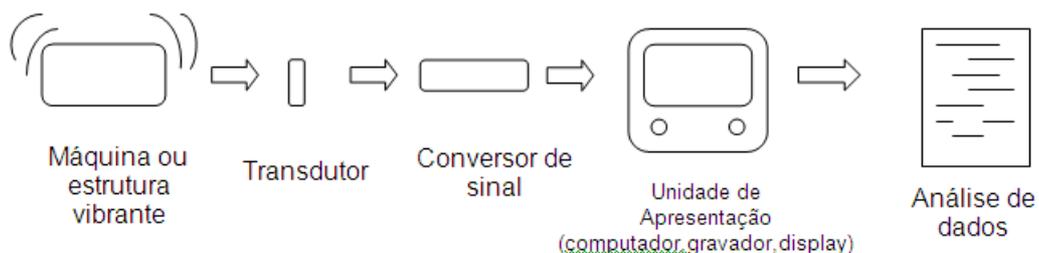


Figura 09. Diagrama de Blocos do Processo de Medição
Fonte: [06]

Os principais sensores para medição de vibrações são:

- Sensores de deslocamentos;
- Sensores de velocidade;
- Sensores de aceleração (acelerômetros);
- Sensores de fase e de frequência.

2.4. ACELERAÇÃO

A aceleração é uma das inúmeras grandezas físicas que podem ser medidas em qualquer corpo. Medir o valor da aceleração pode revelar muito sobre o comportamento dos corpos.

Quando a velocidade de uma partícula varia, diz-se que a partícula sofre aceleração (ou está acelerada). Para movimentos ao longo de um eixo, a aceleração média $A_{méd}$ em um intervalo de tempo Δt é:

$$A_{méd} = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (1.9)$$

A aceleração instantânea (ou simplesmente aceleração) é derivada da velocidade em relação ao tempo:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (1.10)$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt} * \frac{dx}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1.11)$$

Em palavras, a aceleração de uma partícula em qualquer instante é dada pela derivada segunda de sua posição $x(t)$ em relação ao tempo.

Uma unidade usual de aceleração é o metro por segundo: $m/(s * s)$ ou m/s^2 . A aceleração é uma grandeza vetorial, possui módulo, direção e sentido. Seu sinal algébrico representa seu sentido sobre o eixo da mesma forma que para o deslocamento e a velocidade; ou seja, uma aceleração com um valor positivo está no sentido positivo de um eixo, enquanto uma aceleração com um valor negativo está no sentido negativo. [07]

Através da microeletrônica foram desenvolvidos sensores que são capazes de fazer a leitura da aceleração com grande precisão.

Esses sensores permitiram o surgimento de aplicações como o mecanismo que dispara o Air Bag em caso de colisão de um veículo, aplicações em medição de vibração em máquinas, jogos de vídeo- game e sensores para área da medicina. [04]

2.5. REGISTRADOR DE IMPACTO ANALÓGICO

O registrador de impacto é o instrumento que registra os impactos recebidos pelo transformador durante o transporte, ocasionados por variações bruscas de suas velocidades, e que podem provocar deslocamentos de suas partes internas.

Há registradores de impacto com e sem registro gráfico, um ponteiro indica a intensidade do impacto, permanecendo na posição correspondente ao impacto mais intenso. Os registradores são fixados um em cada direção dos três eixos ortogonais X, Y e Z do transformador (Figura 10).

Os impactos são registrados em papel que possui uma escala de valores de impacto e uma escala de tempo, em hora, conforme a Figura 11.

Os impactos que ultrapassarem a segunda zona equivalem a três vezes a força da gravidade e são considerados prejudiciais e o transportador deverá tomar os devidos cuidados para esses valores não serem atingidos.

O registro do lado esquerdo do papel é uma indicação da qualidade do transporte.

2.6. ACELERÔMETRO

Um acelerômetro básico pode ser construído a partir de um princípio simples. Imagine uma massa de prova, cujo peso é determinado e conhecido. Ao ser montado em uma estrutura de pendulo, como mostrado na figura 12, tem-se um sensor mecânico de aceleração, onde o ângulo formado é proporcional a aceleração sofrida pela massa.

Com a colocação de um potenciômetro no eixo deste pendulo. Deste modo, o valor que aparecerá na resistência do potenciômetro será proporcional a aceleração que a massa de prova sofreu. Este tipo de sensor se baseia na segunda lei de Newton:

$$f = m \cdot a \quad (1.12)$$

O problema deste tipo de experimento é conseguir reproduzi-lo de modo que seja aplicável em sistemas de micro escala, como em sistemas embarcados. Um dispositivo com este princípio, em pequena escala, é difícil de construir dentro de um circuito integrado. Isto só foi possível a partir de integração nano métrica (MEMS- *Micro-Eleetro-Mechanical Systems*), um exemplo do que pode ser feito, que utiliza a variação da capacitância ao invés da variação de resistência, é ilustrado nas figuras 12-a e 12-b. [04]

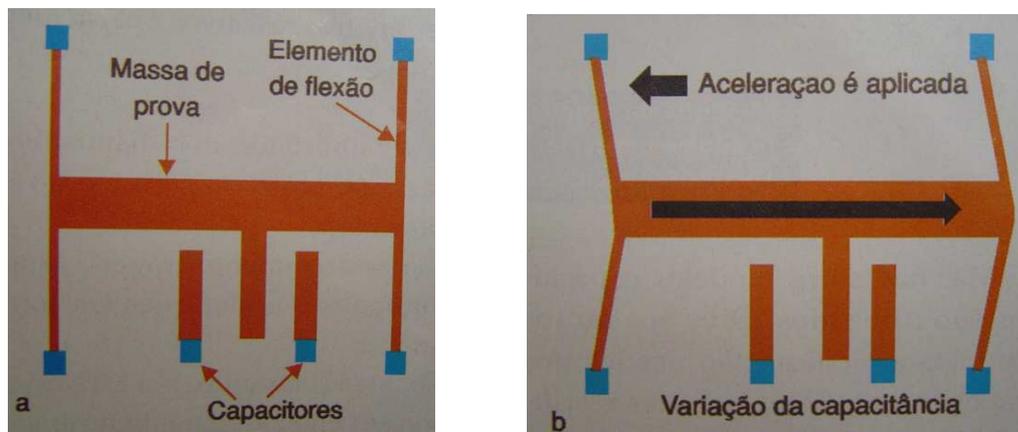


Figura 12. Aceleração sentida em um sistema capacitivo
Fonte: [04]

2.6.1. MEMS(*Micro-Eleetro-Mechanical Systems*)

Basicamente esta técnica faz a integração entre elementos mecânicos (como sensores e atuadores) e componentes eletrônicos, tudo em uma mesma pastilha de silício. Este tipo de combinação reduz muito o custo para construção de sistemas mais complexos. Outra vantagem é que a proximidade entre sensor e o processamento reduz os níveis de ruído envolvidos.

Muitas aplicações são possíveis para estes micro-sistemas eletromecânicos.

Uma destas é a construção de acelerômetros em escala integrada.

Vários fabricantes de circuitos integrados detêm a tecnologia para a fabricação MEMS: Analog Devices, Freescale, Silicon Designs, STmicroelectronics, etc. Geralmente os dispositivos MEMS são divididos em classes, de acordo com sua aplicação e complexidade.

Os acelerômetros classe 2 têm partes móveis. São estas partes móveis que consegue medir a aceleração, como demonstrados pelo princípio das figuras 13 e 14. Mais o mais comum é utilizar a variação de micro capacitância, mais fácil de medir, que a variação de resistência. A maioria dos acelerômetros comerciais baseia-se em capacitores interligados, como pode ser visto na figura 14.

[04]



Figura 13. Princípio de Funcionamento de um acelerômetro através de uma massa

Fonte: [04]

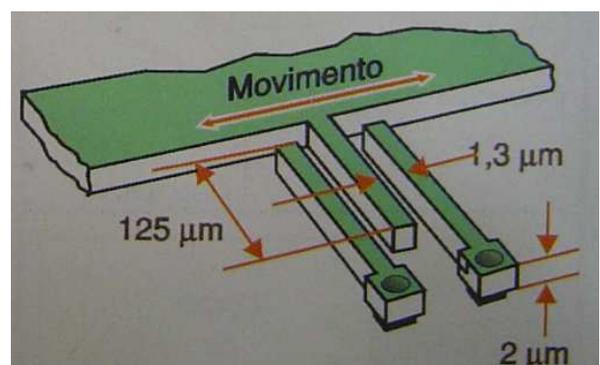


Figura 14. Ordem de Grandeza dos dispositivos MEMS

Fonte: [04]

Tabela 1. Valores de aceleração em diversas situações

Fonte: [04]

g	Efeito
0,61	Automóvel acelerando de 0 a 100 km/h em 4,5 segundos
0,75	Frenagem de um automóvel até sua parada total
1	Objeto em queda livre
1,8	Efeito sentido pelos Flaps de um Airbus no momento do pouso
3	Um carro de Fórmula Indy em uma curva
4,5	Montanha Russa Titan, no Texas
5	Um carro de Fórmula 1 em uma curva
10	Desaceleração em um acidente de automóvel para que haja quebra de ossos humanos
15	Assento ejetado em um avião de combate
33	Efeito quando um pára-quedas se abre
85	Desaceleração estimada no acidente da Princesa Diana
150	Salto de uma pulga
300	Chute em uma bola de futebol
1000	Um carro durante os testes de impacto (Crash Test)
20000	Uma bala em uma pistola automática 765
60000	Pedaços de material em uma explosão com TNT

2.6.2. TIPOS DE ACELERÔMETROS

As técnicas MEMS para fabricação de acelerômetros permitem utilizar diferentes arranjos e aproveitar características dos materiais para medir a aceleração. Cada um destes tipos tem peculiaridades diferentes, como sensibilidade, custo, robustez, etc. Vejamos alguns dos mais comuns. [04]

2.6.2.1. RESISTIVOS

O modelo baseia-se numa ponte resistiva, onde o corpo de prova, sensível a aceleração, faz movimentos da haste móvel.

Com isto, os resistores fixados a haste sofrem variações de resistência proporcionais à aceleração do dispositivo.

Uma fonte de alimentação é necessária e a tensão de saída nos terminais de sinal será de acordo com a aceleração sofrida. [04]

2.6.2.2. CAPACITIVOS

Os movimentos do corpo de prova fazem variar as capacitâncias móveis. Veja que o diagrama mostrado na figura 15 difere um pouco do modelo já mostrado na figura 14, de modo a exemplificarmos outra configuração capacitiva possível. Para que a saída do sensor forneça um nível de tensão proporcional à aceleração sofrida pelo dispositivo, um condicionamento de sinal é realizado internamente, onde um circuito com amplificador operacional faz os ajustes necessários. Uma variação de frequência aplicada a uma ponte capacitiva é o suficiente para o condicionamento de sinal.

As principais características dos acelerômetros resistivos e capacitivos são:

- A sensibilidade dos dispositivos varia de acordo com a tensão de alimentação.
- São relativamente frágeis, sendo limitados a acelerações em torno de 10g;
- Como são fabricados por MEMS, são leves e pequenos, garantindo grande escala de miniaturização;
- Os custos vão de US\$5 a 100, dependendo de suas características e faixa de atuação.

Por estas características, estes sensores (resistivos e capacitivos) são mais indicados para as seguintes aplicações:

Eventos de baixa frequência ou de longa duração como em automóveis (airbags, disparo de alarmes e etc.), elevadores; parques de diversão; simuladores de movimento, sensores de inclinação.

[04]

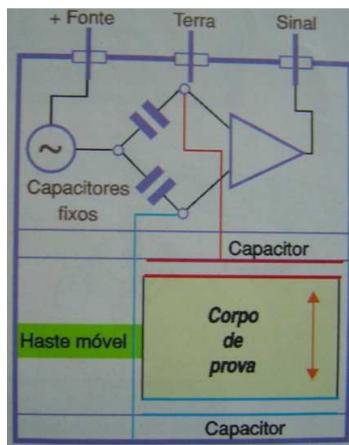


Figura 15. Esquema simplificado de um acelerômetro capacitivo
Fonte: [04]

2.6.2.3. PIEZELÉTRICO

Baseia-se no princípio piezométrico que tem alguns materiais, como o quartzo. O movimento de uma base, causada pela aceleração do sensor, fará com que o corpo piezométrico sofra uma ação de força. A proporção desta força relativa à aceleração sofrida é convertida em tensão pelo cristal de quartzo. [04]

Suas principais características são:

- Extremamente estáveis em ambientes com grandes variações de temperatura
- Indicados para sinais de baixa frequência (menor que 1 kHz)
- Podem quebrar com acelerações muito altas (Acima de 100g)
- Sensores de custo elevado

2.6.2.4. PIEZO- RESISTIVO

Neste modelo são utilizados elementos que variam a resistência elétrica conforme a força a ele aplicada. Um exemplo é dado na figura 16, com um acelerômetro triaxial (modelo que mede a força g nas três dimensões (x , y e z)). Nele o corpo de prova, com a massa que sentirá a variação de aceleração, está suspenso sobre braços piezo-resistivo. A leitura da tensão sobre esta ponte indica em qual eixo está à aceleração, e seu respectivo valor. [04]

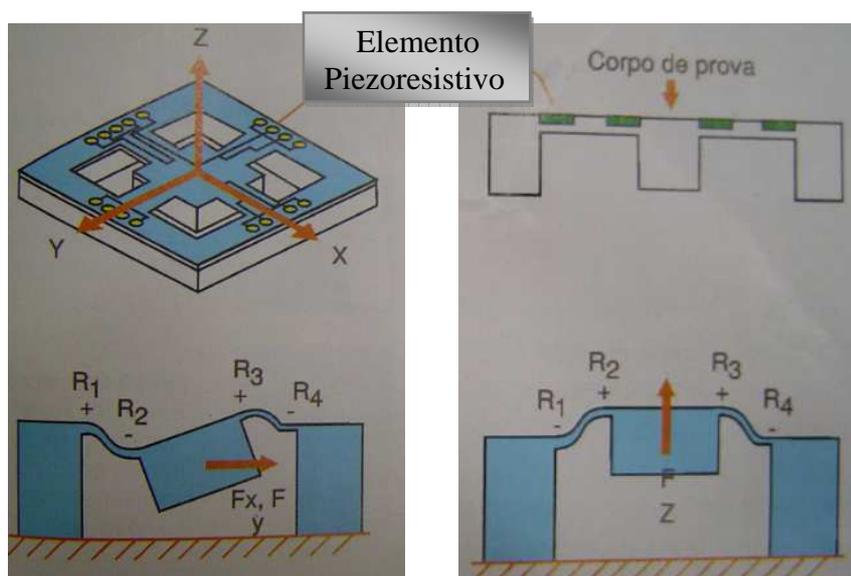


Figura 16. Esquema simplificado de um acelerômetro triaxial piezo-resistivo

Fonte: [04]

2.6.3. APLICAÇÕES

Basicamente os acelerômetros são empregados onde há necessidade de medir movimento e inclinação, seja de modo estático (apenas baseado na força gravitacional) ou de modo dinâmico (análise de vibrações de máquinas e equipamentos ou queda de objetos). Mas não apenas a aceleração pode ser medida, já integrando o valor da aceleração obtida pelo sensor, obtém-se a velocidade. Integrando novamente, obtém-se a posição. Suas principais aplicações são em:

- Disparo em Air Bags,
- Sensores biomédicos,
- Navegação de aeronaves,
- Correção de inclinações em embarcações,
- Brinquedos, vídeo games, telefones celulares,
- Sensores de acelerações para aplicações industriais,
- Alarmes veiculares

Além de inúmeras aplicações industriais, o acelerômetro com tecnologia MEMS, que permitem alto grau de miniaturização, tem diversas aplicações comerciais, nos setores de entretenimento, segurança, veicular, etc. [04]

3. PROJETO

3.1. *HARDWARE*

A seguir na figura 17 é apresentado um diagrama de blocos do sistema, figura 18 diagrama de blocos do *hardware* e na figura 19 uma imagem da placa protótipo.

Os principais circuitos do equipamento desenvolvido são mencionados, com uma breve descrição das soluções adotadas em cada um.

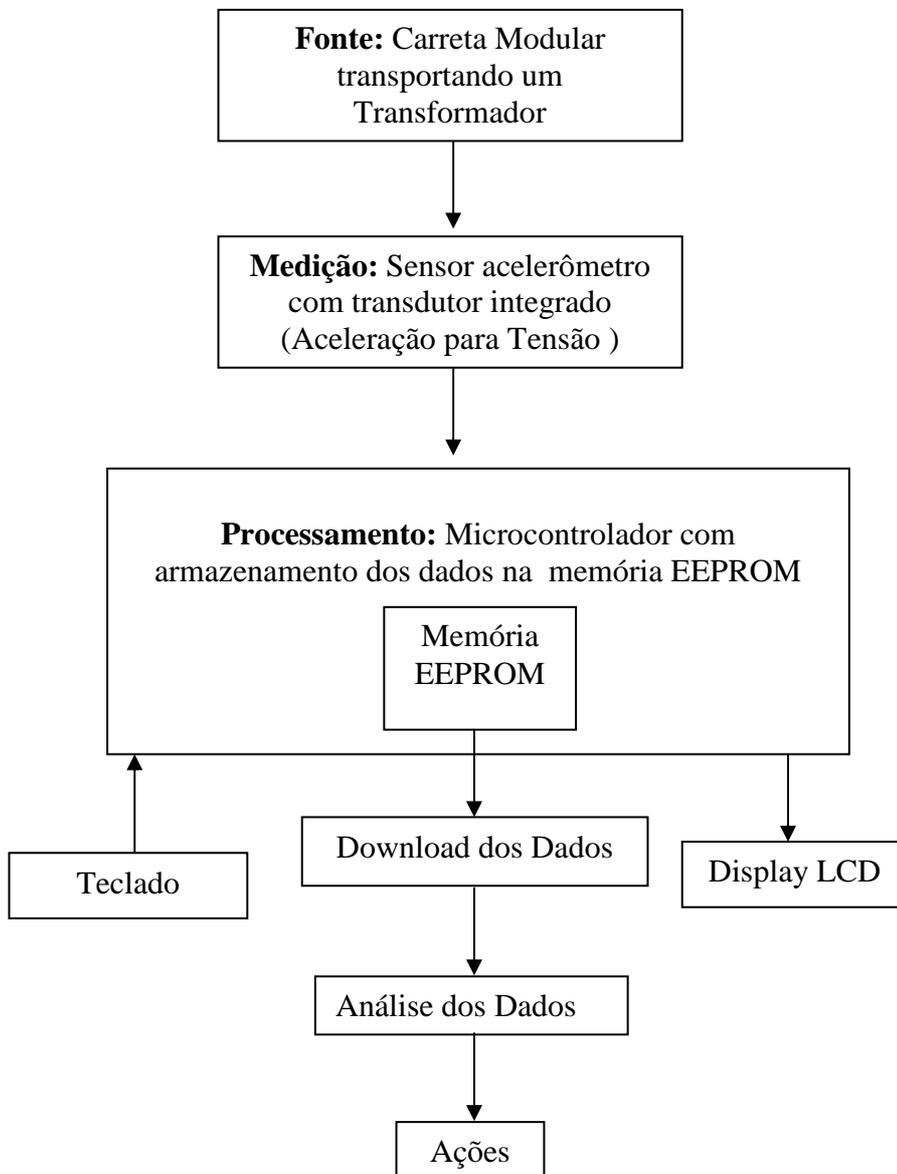


Figura 17. Diagrama de Blocos do Sistema de Monitoramento de Vibrações durante Transporte de Transformadores

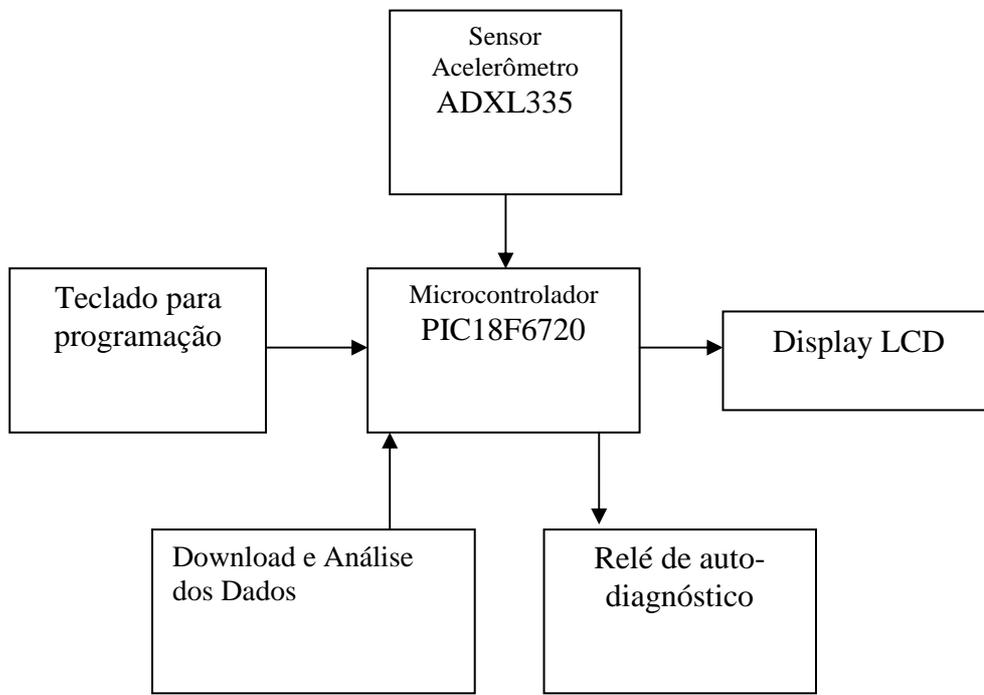


Figura 18. Diagrama de Blocos do *Hardware*

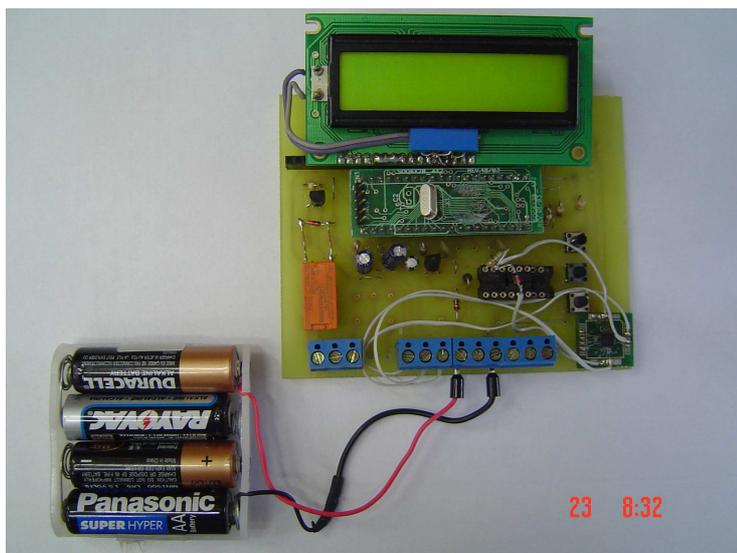


Figura 19. Foto da placa de protótipo

3.1.1. ESCOLHA DO SENSOR

Quando se escolhe um sensor para medição de vibração, devem ser considerados alguns aspectos destacando-se:

- 1) A faixa de frequência e a amplitude: Um dos principais parâmetros para a determinação do instrumento a ser usado é a faixa de frequência. As baixas frequências, geralmente a amplitude do deslocamento é elevada, sendo assim, os vibrômetros são os mais indicados. As altas frequências, as amplitudes do deslocamento são baixas e, em consequência, as amplitudes da aceleração são altas; sendo assim, os acelerômetros apresentam maior sensibilidade e são os mais indicados. Os sensores de velocidade são genéricos, ou seja, apresentam desempenho razoável tanto a baixas como as altas frequências. O mais importante é que em uma situação prática sejam observadas e respeitadas as características específicas do sensor e do sistema a ser medido (faixas de amplitude e de frequência);
- 2) O tamanho e a massa da máquina ou estrutura: O tamanho e a massa do equipamento ou estrutura a ser medida são fatores importantes, porque, uma vez que a vibração depende da massa do sistema, instrumentos que possuam grandes massas quando comparados ao sistema a ser medido influem nas medições podendo distorcer os resultados;
- 3) As condições de operação: Os equipamentos que operam em condições de funcionamento adversas, tais como em ambientes úmidos, radioativos, corrosivos ou abrasivos, tendem a limitar o uso da grande maioria dos sensores. É de suma importância que os instrumentos não sofram alterações de funcionamento, pois tais alterações tendem a distorcer os valores medidos;
- 4) O tipo de análise dos dados: A maneira como os dados obtidos são analisados é um fator importante na escolha do sensor. O sensor muitas vezes é determinado pelo modo de apresentar os dados para a análise pretendida. [06]

3.1.2. SENSOR ACELERÔMETRO ADXL335

Foi possível escolher o sensor que fosse compatível com a sua aplicação. Abaixo na figura 20 uma foto do sensor utilizado, na figura 21 está um diagrama de blocos do sensor.

As principais características do acelerômetro escolhido são:

- 1) Range de medição de aceleração: - 3 g ~ +3g
- 2) Range de frequência: 10 ~ 100 Hz
- 3) Sensibilidade de saída: Com variação proporcional à tensão de alimentação
 $V_S = 3,6 \text{ V}, 360 \text{ mV / g.}$

A tolerância da resistência interna (RFILT) normalmente varia tanto quanto $\pm 15\%$ do seu valor nominal (32 k Ω), e a largura de banda varia de acordo. A capacidade mínima de 0,0047 μF para CX, CY, CZ é recomendada em todos os casos. [11]



Figura 20. Foto do Sensor

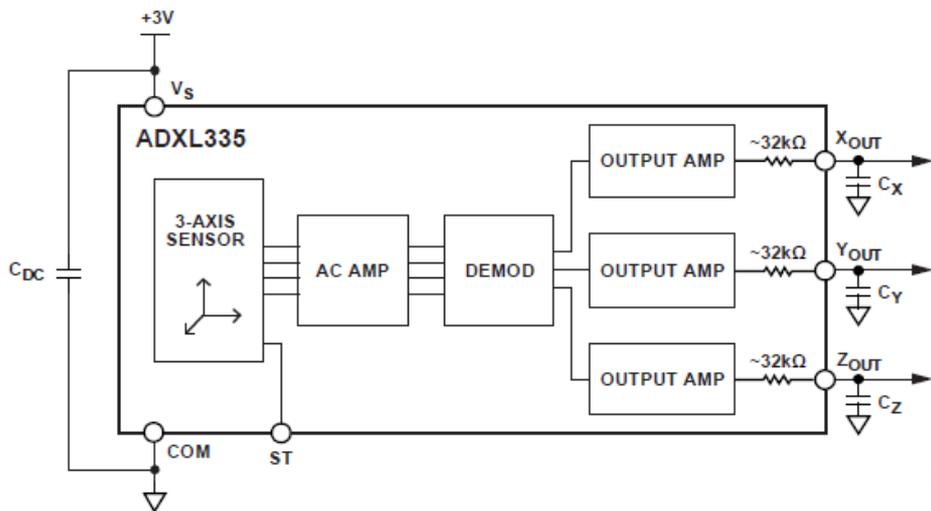


Figura 21. Diagrama de Blocos do Acelerômetro utilizado no Projeto
 Fonte: [11]

3.1.3. DICAS DE APLICAÇÃO DO SENSOR

Para a maioria das aplicações, um capacitor de 0,1 μF único, CDC, colocadas junto à alimentação do ADXL335 filtra o ruído da fonte de alimentação. No entanto, em aplicações onde o ruído está presente na frequência de clock de 50 kHz interno (ou qualquer harmônica do mesmo), os cuidados adicionais são necessários porque este ruído pode causar erros na medição de aceleração. Caso necessário, um resistor 100 Ω (ou menor) ou ferrite pode ser inserido em série com a alimentação. [11]

3.1.4. CONFIGURAÇÃO DA LARGURA DE BANDA USANDO CX, CY, E CZ

O ADXL335 disponibiliza recursos para limitar a banda de frequências nos pinos Xout, Yout e Zout. Para implementação do filtro passa-baixa, capacitores devem ser acrescentados a estes pinos.

A equação para a largura de banda de 3 dB é:

$$F(3 \text{ dB}) = \frac{1}{(2\pi (32 \text{ k}\Omega) \times C (X,Y,Z))} \quad \text{ou, mais simplesmente} \quad (1.13)$$

$$C(x, y, z) = \frac{1}{(2\pi (32 \text{ k}\Omega) \times 10)} \rightarrow C(x, y, z) = 497\text{nf} \quad (1.14)$$

A frequência de 10 Hz foi escolhida de forma experimental, durante os testes este valor poderá ser alterado. [11]

3.1.5. FONTE DE ALIMENTAÇÃO

A alimentação da placa é feita através de pilhas recarregáveis.

3.1.6. MICROCONTROLADOR E PERIFÉRICOS

Foi possível escolher um dos microcontroladores em que o mesmo se enquadrava bem nas necessidades da aplicação. Essa preferência esta de acordo com os requisitos. Alguns recursos específicos deste microcontrolador considerados na escolha foram as memórias RAM e EEPROM estendida, entradas analógicas para digitalizar as informações do sensor.

Os principais periféricos são a já mencionada EEPROM e a memória RAM, ambas internas. Outros circuitos conectados ao microcontrolador são: As teclas para programação dos parâmetros e o display LCD para visualização das informações.

A EEPROM e utilizada para armazenar o histórico das acelerações (que não podem ser perdidas se o equipamento for desligado) e a RAM armazena temporariamente as amostras da conversão analógica / digital para os cálculos do microcontrolador.

A memória EEPROM tem 1024 bytes, tem capacidade de armazenar 128 valores de acelerações.

3.1.7. CONDICIONAMENTO DE SINAIS E MEDIÇÃO

O microcontrolador já tenha incorporado um conversor analógico / digital com resolução de 10 bits com vários canais, devido o sensor acelerômetro possuir um transdutor interno e a sensibilidade relativamente alta deste conversor, os sinais de entrada não precisaram ser amplificados. O condicionamento destes se resumiu apenas em efetuar a filtragem das frequências indesejáveis do sinal através dos filtros de *hardware* e posteriormente os pinos de sinais são conectados nas entradas analógicas do microcontrolador.

3.1.8. ESQUEMA ELETRÔNICO

O esquema eletrônico foi projetado conforme os diagramas de blocos mostrados nas figuras 17 e 18. O projeto eletrônico foi desenvolvido através do software Proteus.

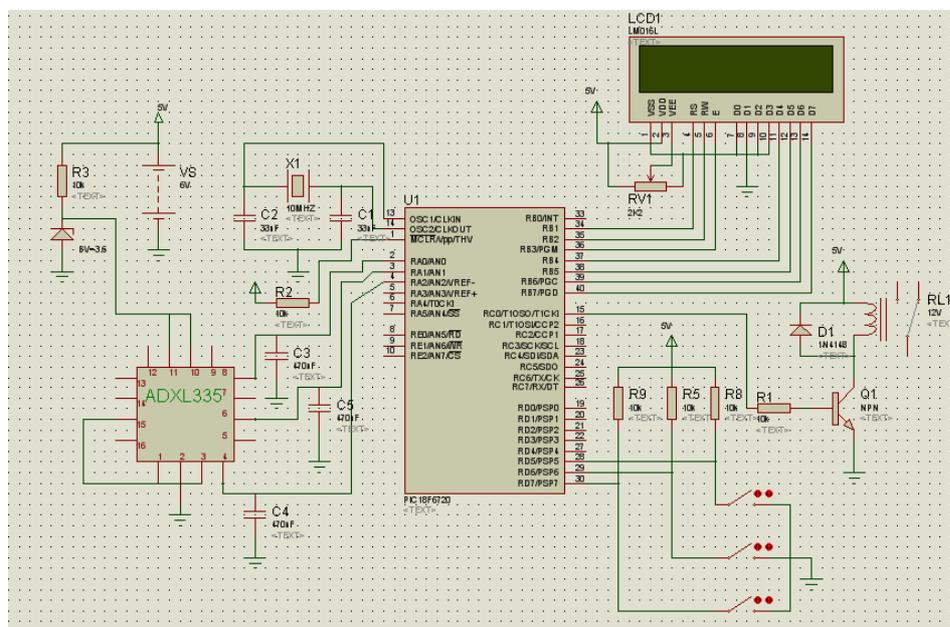


Figura 22. Esquema Eletrônico do Projeto

3.1.9. CIRCUITO IMPRESSO

O circuito impresso foi projetado conforme o esquema eletrônico mostrado na figura 22. O projeto foi desenvolvido através do software Proteus.

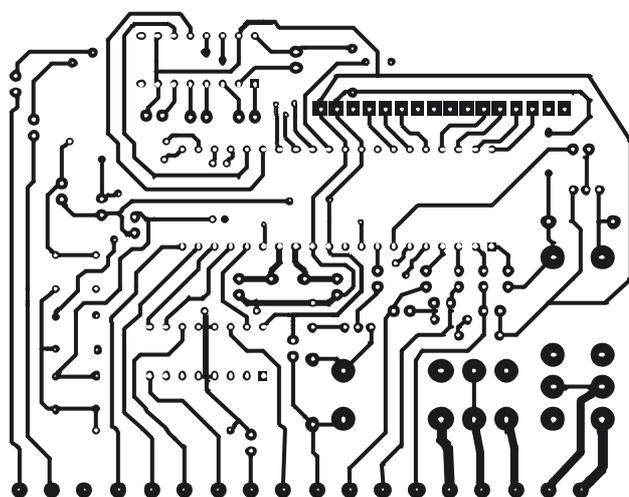


Figura 23. Circuito impresso do Projeto

3.2. FIRMWARE

Consiste no programa gravado no microcontrolador para que este execute as funções esperadas. Foi desenvolvido em linguagem “C” utilizando o editor e compilador do próprio fabricante do componente “Microchip”, a partir da estrutura. As rotinas referentes a interação do microcontrolador com o restante do hardware e a medição das acelerações durante o transporte do transformador, fornecendo os valores de amplitude e tempo, foram desenvolvidas neste trabalho.

O processo de medição começa na conversão analógica / digital, feita através dos conversores internos do microcontrolador, a uma taxa de amostragem definida pelo microcontrolador. Após receber os valores das amostras nos três canais de entrada (eixo x, y e z) posteriormente é gravada na memória RAM para depois utilizá-los nos cálculos de amplitude e tempo. O processo também inclui a filtragem digital e a filtragem por hardware, para eliminar efeitos provenientes de ruídos e harmônicas indesejáveis. Por fim, os resultados com valores maiores que 1 g é armazenado nos bancos de memória EEPROM.

3.2.1. ESCOLHA DO COMPILADOR

A utilização de C para programação de microcontroladores com Pics é uma escolha natural, pois a maioria dos microcontroladores disponíveis no mercado consta com compiladores de linguagem C para desenvolvimento de firmware.

O uso de C permite a construção de programas e aplicações muito mais complexa dos que seria viável utilizando apenas o Assembly. Além disso, o desenvolvimento em C permite uma grande velocidade na criação de novos projetos, devido à facilidade de programação e também sua portabilidade, o que permite adaptar programas de um sistema para o outro.

Outro aspecto favorável da utilização da linguagem C é a sua eficiência, pois no jargão dos compiladores é a medida do grau de inteligência com que o compilador traduz um programa C para o código máquina. Quanto menor e mais rápido o código gerado, maior será a eficiência da linguagem e do compilador.

Devido a sua proximidade com o hardware e o Assembly, a linguagem C é considerada como a linguagem de alto nível mais eficiente atualmente disponível para microcontroladores. Além disso, a utilização dela permite que o programador preocupe-se mais com a programação da aplicação em

si, já que o compilador assume para si as tarefas com controle e localização das variáveis, operações matemáticas e lógicas, verificação de bancos de memória e etc. [05]

3.2.2. FLUXOGRAMA DO FIRMWARE PROJETADO

O firmware projetado consiste em algumas regras para não perder dados medidos considerados importantes, pensando nisso foi desenvolvido um fluxograma do firmware conforme a figura 24.

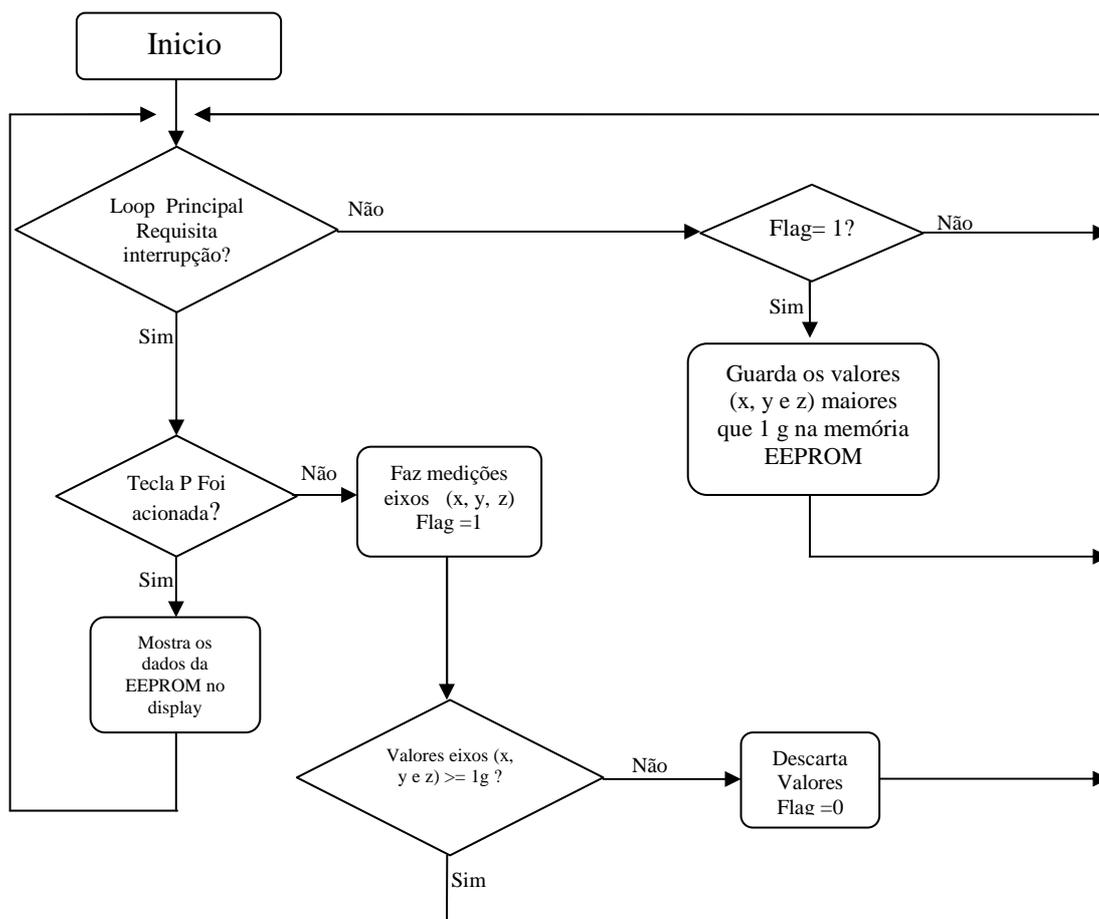


Figura 24. Fluxograma do firmware

3.2.3. AUTO-DIAGNÓSTICO DO SISTEMA

Caso ocorra alguma falha interna de armazenamento de dados na EEPROM ou bateria descarregada, uma indicação de sinalização de erro estará disponível no painel da carreta modular. A sinalização é feita através de um relé normalmente fechado, para quando o sistema estiver sem alimentação, ou seja, placa desligada ou bateria descarregada, uma sinalização estará disponível no painel da carreta. A visualização no painel é através de lâmpada com identificação de falha no registrador de impacto. Abaixo na figura 25, está o fluxograma de auto diagnóstico do firmware.

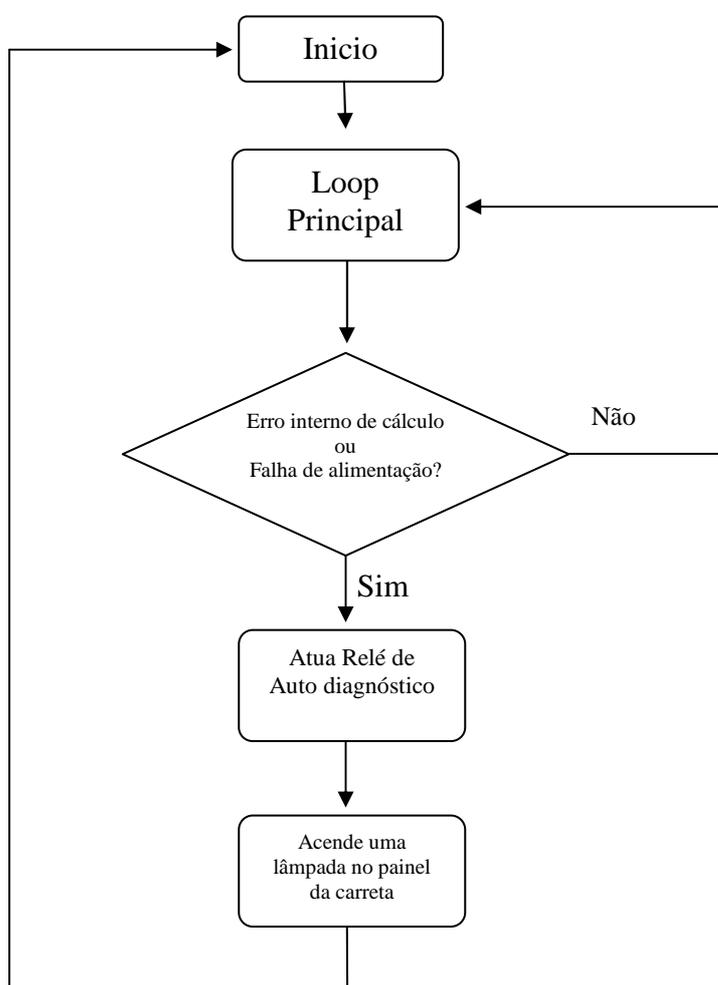


Figura 25. Fluxograma de auto diagnóstico do firmware.

3.3. DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA

Os documentos gerados no desenvolvimento do hardware foram os diagramas elétricos, a lista de materiais, os layouts das placas de circuito impresso. Os documentos gerados pelo desenvolvimento do firmware foram o código-fonte na linguagem utilizada (neste caso, “C”) e o arquivo resultante da compilação, a ser gravado no microcontrolador. Esses são os arquivos que compõem a documentação básica do projeto, que permanecem devidamente guardados e são atualizados conforme surjam necessidades de mudanças.

3.4. APLICAÇÃO

Conforme já descrito anteriormente, o registrador ficará acoplado no corpo do transformador (Figura 26), sua placa de medições possuirá um invólucro com grau de proteção IP67, ou seja, totalmente resistente a chuva, poeira e etc.

O registrador ficará colhendo os dados de aceleração das vibrações deste a saída do transformador da fábrica até ser colocado na posição de trabalho.

Para verificar as medições em uma aplicação real, um registrador de impacto já conceituado no mercado ficará instalado em paralelo com registrador em condição de teste. Através da análise e comparação dos dados será possível implantar melhorias e funções adicionais para obter a confiabilidade do sistema.

Registrador de Impacto



Figura 26. Locomoção do Transformador através de guindaste

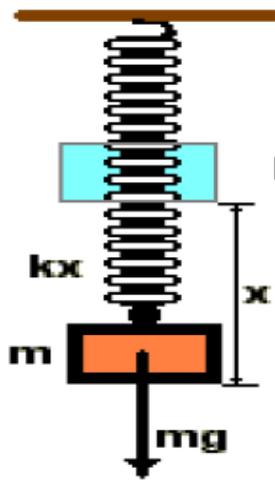
Fonte: [08]

3.5. ENSAIOS PRÁTICOS

Os testes iniciais de resposta do sensor foram efetuados de forma de comparação dos dados teóricos com os dados práticos. Abaixo os detalhes dos ensaios:

Os testes foram efetuados em um sistema de movimento periódico constituído por uma massa e uma mola (Figura 27 e 28). As seqüências dos ensaios estão descritos abaixo:

- 1) O valor da constante elástica K da mola foi calculado através da equação 1.15 e de levantamentos práticos.



$$mg = kx \quad (1.15)$$

Figura 27. Sistema de movimento periódico constituído por uma massa e uma mola.
Fonte: [10]



Figura 28. Foto do Sistema massa-mola

1° Levantamento

Aceleração da gravidade (g): $9,8 \text{ m/s}^2$
 Mola + massa: 2,665 kg
 x com a mola em repouso: 20,32 cm
 x com mola e massa em equilíbrio: 30 cm

$$mg = kx$$

$$k = \frac{2,665 * 9,8}{(30,02 - 20,32) * 10^{-2}}$$

$$k = 269,25 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

2° Levantamento

Aceleração da gravidade (g): $9,8 \text{ m/s}^2$
 Mola + massa: 1,725 kg
 x com a mola em repouso: 20,32 cm
 x com mola e massa em equilíbrio: 26 cm

$$mg = kx$$

$$k = \frac{1,725 * 9,8}{(26,4 - 20,32) * 10^{-2}}$$

$$k = 278,04 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Média entre o 1° e 2° levantamento : $k = \frac{269,25+278,04}{2}$; $k = 273,645 \frac{\text{N}}{\text{m}}$

- 2) Tendo como referencia a força gravitacional, o sensor foi calibrado em 1 e -1 g.
- 3) Para efetuar as medições de aceleração, o sensor acelerômetro foi acoplado na massa + mola com valor de 2,665 kg (figura 29), a placa protótipo foi reiniciada e posteriormente, a massa foi conduzido a uma força externa desconhecida. Como experiência, somente os dados do eixo z foram armazenados e comparados com os valores teóricos.



Figura 29. Sensor acoplado na massa

- 1) Conforme mostrado na figura 30, através do *software MPLAB* foi efetuado o download dos registros armazenados na memória *EEPROM* do microcontrolador da placa protótipo.

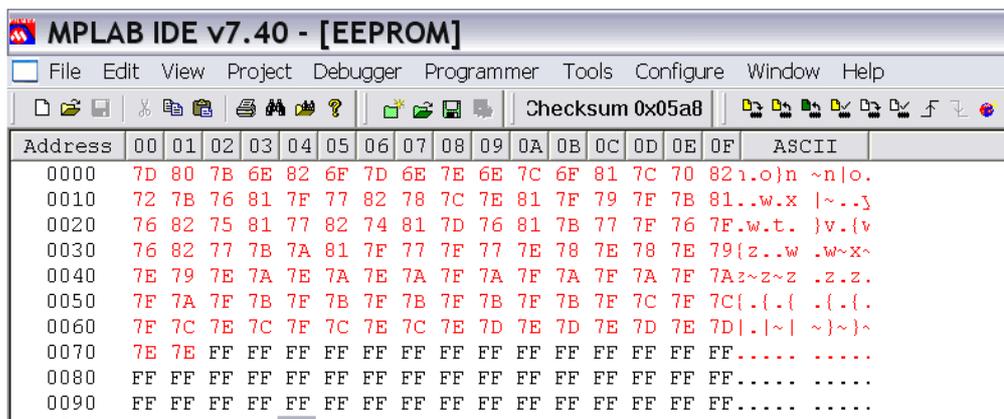


Figura 30. Tela de download dos dados - Programa MPLAB

- 2) Os dados importados da memória EEPROM, foram exportados para uma planilha EXCEL. A tabela 02 abaixo possui um algoritmo de cálculo para efetuar a geração de gráfico das acelerações no tempo.

Abaixo está a legenda das colunas da tabela 02:

- **Aceleração hexa:** São os valores em hexadecimal retirados da memória EEPROM;
- **Aceleração DEC:** São os valores em hexadecimal convertidos em decimal;
- **Ordem de medida:** Uso interno da planilha;
- **Tempo (ms):** Tempo entre medidas;
- **Aceleração (g):** Valor de aceleração calculado;
- **m/s²:** Valores de aceleração calculados em m/s²;
- **F (N):** Valores de forças calculadas a cada medição.

Tabela 2. Valores medidos no eixo z através do sensor

Aceleração HEXA	Aceleração DEC	Ordem de Medida	Tempo (ms)	Aceleração (g)	m/s ²	Tempo (s)	F (N)
7d	125	0	0	1.000	9.800	0.000	26.117
80	128	1	312	1.133	11.107	0.312	29.599
7B	123	2	624	0.911	8.929	0.624	23.795
6E	110	3	936	0.333	3.267	0.936	8.706
82	130	4	1248	1.222	11.978	1.248	31.921
6F	111	5	1560	0.378	3.702	1.560	9.866
7D	125	6	1872	1.000	9.800	1.872	26.117
6E	110	7	2184	0.333	3.267	2.184	8.706
7E	126	8	2496	1.044	10.236	2.496	27.278
6E	110	9	2808	0.333	3.267	2.808	8.706
7C	124	10	3120	0.956	9.364	3.120	24.956
6F	111	11	3432	0.378	3.702	3.432	9.866
81	129	12	3744	1.178	11.542	3.744	30.760
7C	124	13	4056	0.956	9.364	4.056	24.956
70	112	14	4368	0.422	4.138	4.368	11.027
82	130	15	4680	1.222	11.978	4.680	31.921
72	114	16	4992	0.511	5.009	4.992	13.349
7B	123	17	5304	0.911	8.929	5.304	23.795
76	118	18	5616	0.689	6.751	5.616	17.992
81	129	19	5928	1.178	11.542	5.928	30.760
7F	127	20	6240	1.089	10.671	6.240	28.439
77	119	21	6552	0.733	7.187	6.552	19.152

82	130	22	6864	1,222	11,978	6,864	31,921
78	120	23	7176	0,778	7,622	7,176	20,313
7C	124	24	7488	0,956	9,364	7,488	24,956
7E	126	25	7800	1,044	10,236	7,800	27,278
81	129	26	8112	1,178	11,542	8,112	30,760
7F	127	27	8424	1,089	10,671	8,424	28,439
79	121	28	8736	0,822	8,058	8,736	21,474
7F	127	29	9048	1,089	10,671	9,048	28,439
7B	123	30	9360	0,911	8,929	9,360	23,795
81	129	31	9672	1,178	11,542	9,672	30,760
76	118	32	9984	0,689	6,751	9,984	17,992
82	130	33	10296	1,222	11,978	10,296	31,921
75	117	34	10608	0,644	6,316	10,608	16,831
81	129	35	10920	1,178	11,542	10,920	30,760
77	119	36	11232	0,733	7,187	11,232	19,152
82	130	37	11544	1,222	11,978	11,544	31,921
74	116	38	11856	0,600	5,880	11,856	15,670
81	129	39	12168	1,178	11,542	12,168	30,760
7D	125	40	12480	1,000	9,800	12,480	26,117
76	118	41	12792	0,689	6,751	12,792	17,992
81	129	42	13104	1,178	11,542	13,104	30,760
7B	123	43	13416	0,911	8,929	13,416	23,795
77	119	44	13728	0,733	7,187	13,728	19,152
7F	127	45	14040	1,089	10,671	14,040	28,439
76	118	46	14352	0,689	6,751	14,352	17,992
7F	127	47	14664	1,089	10,671	14,664	28,439
76	118	48	14976	0,689	6,751	14,976	17,992
82	130	49	15288	1,222	11,978	15,288	31,921
77	119	50	15600	0,733	7,187	15,600	19,152
7B	123	51	15912	0,911	8,929	15,912	23,795
7A	122	52	16224	0,867	8,493	16,224	22,635
81	129	53	16536	1,178	11,542	16,536	30,760
7F	127	54	16848	1,089	10,671	16,848	28,439
77	119	55	17160	0,733	7,187	17,160	19,152
7F	127	56	17472	1,089	10,671	17,472	28,439
77	119	57	17784	0,733	7,187	17,784	19,152
7E	126	58	18096	1,044	10,236	18,096	27,278
78	120	59	18408	0,778	7,622	18,408	20,313
7E	126	60	18720	1,044	10,236	18,720	27,278
78	120	61	19032	0,778	7,622	19,032	20,313
7E	126	62	19344	1,044	10,236	19,344	27,278
79	121	63	19656	0,822	8,058	19,656	21,474
7E	126	64	19968	1,044	10,236	19,968	27,278
79	121	65	20280	0,822	8,058	20,280	21,474
7E	126	66	20592	1,044	10,236	20,592	27,278
7A	122	67	20904	0,867	8,493	20,904	22,635
7E	126	68	21216	1,044	10,236	21,216	27,278
7A	122	69	21528	0,867	8,493	21,528	22,635
7E	126	70	21840	1,044	10,236	21,840	27,278
7A	122	71	22152	0,867	8,493	22,152	22,635
7F	127	72	22464	1,089	10,671	22,464	28,439
7A	122	73	22776	0,867	8,493	22,776	22,635
7F	127	74	23088	1,089	10,671	23,088	28,439
7A	122	75	23400	0,867	8,493	23,400	22,635
7F	127	76	23712	1,089	10,671	23,712	28,439
7A	122	77	24024	0,867	8,493	24,024	22,635
7F	127	78	24336	1,089	10,671	24,336	28,439
7A	122	79	24648	0,867	8,493	24,648	22,635
7F	127	80	24960	1,089	10,671	24,960	28,439
7A	122	81	25272	0,867	8,493	25,272	22,635

7F	127	82	25584	1,089	10,671	25,584	28,439
7B	123	83	25896	0,911	8,929	25,896	23,795
7F	127	84	26208	1,089	10,671	26,208	28,439
7B	123	85	26520	0,911	8,929	26,520	23,795
7F	127	86	26832	1,089	10,671	26,832	28,439
7B	123	87	27144	0,911	8,929	27,144	23,795
7F	127	88	27456	1,089	10,671	27,456	28,439
7B	123	89	27768	0,911	8,929	27,768	23,795
7F	127	90	28080	1,089	10,671	28,080	28,439
7B	123	91	28392	0,911	8,929	28,392	23,795
7F	127	92	28704	1,089	10,671	28,704	28,439
7C	124	93	29016	0,956	9,364	29,016	24,956
7F	127	94	29328	1,089	10,671	29,328	28,439
7C	124	95	29640	0,956	9,364	29,640	24,956
7F	127	96	29952	1,089	10,671	29,952	28,439
7C	124	97	30264	0,956	9,364	30,264	24,956
7E	126	98	30576	1,044	10,236	30,576	27,278
7C	124	99	30888	0,956	9,364	30,888	24,956
7F	127	100	31200	1,089	10,671	31,200	28,439
7C	124	101	31512	0,956	9,364	31,512	24,956
7E	126	102	31824	1,044	10,236	31,824	27,278
7C	124	103	32136	0,956	9,364	32,136	24,956
7E	126	104	32448	1,044	10,236	32,448	27,278
7D	125	105	32760	1,000	9,800	32,760	26,117
7E	126	106	33072	1,044	10,236	33,072	27,278
7D	125	107	33384	1,000	9,800	33,384	26,117
7E	126	108	33696	1,044	10,236	33,696	27,278
7D	125	109	34008	1,000	9,800	34,008	26,117
7E	126	110	34320	1,044	10,236	34,320	27,278
7D	125	111	34632	1,000	9,800	34,632	26,117
7E	126	112	34944	1,044	10,236	34,944	27,278
7E	126	113	35256	1,044	10,236	35,256	27,278

3) Através dos valores da tabela 02, foi possível gerar o gráfico das acelerações no tempo conforme mostrado na figura 31.

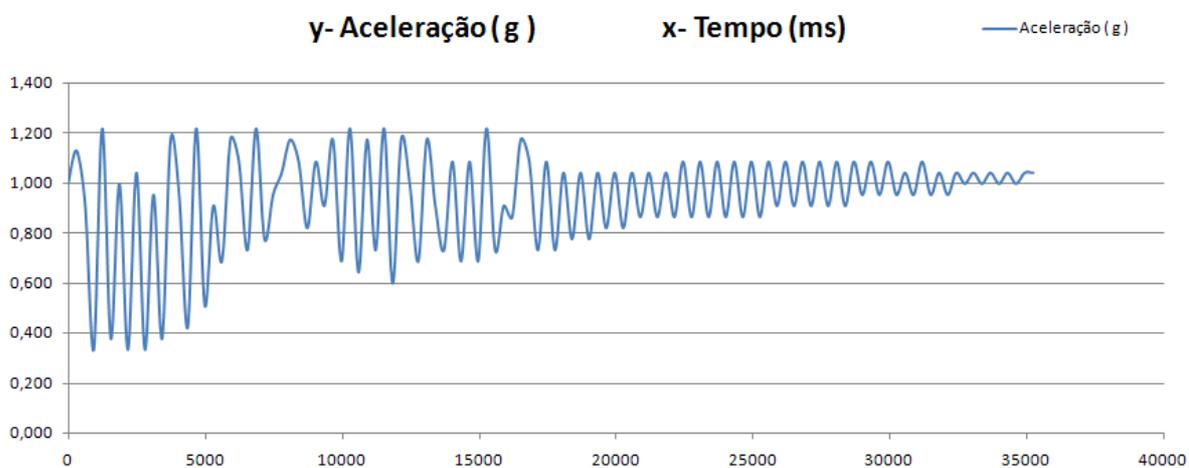


Figura 31. Gráfico da Aceleração no Tempo

4) Abaixo estão descritos a análise do gráfico:

- O gráfico mostra que antes da aplicação da força externa, o sistema estava em equilíbrio e a aceleração medida é somente a da gravidade.
- Ao efetuar a força externa na massa para o sentido do centro da terra, ocorreu uma pequena aceleração positiva. Como a força foi aplicada também no sentido do centro da terra, as acelerações se somam.
- Ao retirar a força externa, a massa começou a oscilar numa frequência constante.
- A cada período ocorre uma variação negativa e positiva em relação à aceleração da gravidade.
- Na borda de descida da aceleração, é o momento em que o deslocamento da massa está na direção contrária do centro da terra, pois a derivada segunda da senoide do movimento é a mesma senoide com fase invertida.
- No pico mínimo é o momento em que a mola está toda comprimida.
- Quando a aceleração é $1g$, é o momento em que a massa passou pelo ponto de equilíbrio
- A amplitude do sinal tem um comportamento de atenuação até a parada total do sistema (ponto de equilíbrio).

5) A frequência da mola, sendo função da sua constante elástica k e massa acoplada m é calculada pela seguinte equação:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (1.16)$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{273,645}{2,665}} \quad (1.17)$$

$$f = 1,614 \text{ Hz}$$

Na figura 32 abaixo, está o gráfico da figura 31 ampliado. Este gráfico mostra um comparativo entre da frequência calculada através da equação 1.16 e a frequência medida pela placa protótipo.

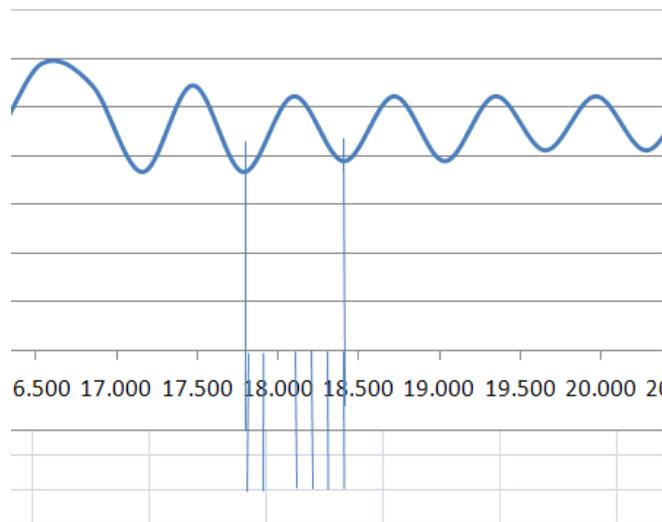


Figura 32. Gráfico de aceleração no tempo ampliado

$$f = \frac{1}{T} \quad f = \frac{1}{(18400-17790) \cdot 10^{-3}} \quad f = 1,639 \text{ Hz} \quad (1.18)$$

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com grande avanço no mercado atual, saber a qualidade do transporte de transformadores de potencia é muito importante para o cliente, pois a vida útil do transformador pode ser comprometida caso à aceleração de sua massa ultrapasse três vezes a aceleração da gravidade.

O projeto de hardware teve um ótimo desempenho, ou seja, não precisou ser alterado durante os testes.

O projeto de firmware teve um ótimo desempenho nos algoritmos de leitura de teclado, acionamento da sinalização de falha e comunicação com display, porém as rotinas de leitura da entrada analógica precisaram ser modificadas durante os ensaios práticos.

O sistema desenvolvido mostrou-se eficiente nos testes práticos realizados. Como sua aplicação será no transporte de transformadores, e a carreta modular ao trafegar pelas estradas gera uma frequência de vibração relativamente baixa, foi possível verificar através do ensaio de movimento periódico constituído por uma massa e uma mola a resposta do sensor em baixa frequência. Os valores teóricos de frequência e a comparação do comportamento físico ficaram muito próximos aos valores medidos pela placa de aquisição.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[01] AGUIAR, Ezequiel Rabelo de. **Análise de Resposta em Frequência Aplicada em Transformadores de Potencia.** Belo Horizonte: s.n., 2007.

Dissertação de Mestrado.

[02] CARRIJO, Polonio Araujo Daniel. **Estudo de Metodologia e Técnicas para Execução de ensaios de Resposta em Frequência em Transformadores de Potencia.** Belo Horizonte: s.n., 2009.

Dissertação de Mestrado.

[03] MILASCH, Milan. **Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante.** São Paulo, Edgard Blucher; [Itajubá, MG]; Escola federal de Engenharia, 1984.

[04] CUNHA, Alessandro Revista Saber Eletrônica. Ed saber. Ano 43- Nº 419 - Dezembro / 2007

[05] PEREIRA, Fábio. **Microcontroladores PIC- Programação em C.** São Paulo: Érica, 2003

[06] BALBINOT, Alexandre. **Instrumentação e fundamentos de medidas**, v.2 / Alexandre, Balbinot, Valner João Brusamarello. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

[07] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. **Fundamentos de Física 1-Mecânica.** 6. Ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2002. 277 p.

[08] Disponível em: <<http://www.transportesgoncalo.pt/index.cfm?s=5&ss=11>>. Acesso em: 11 de out. de 2009.

[09] Den Hartog, Jacob Pieter. **Vibrações nos sistemas mecânicos.** São Paulo Edgard Blucher; Ed. da Universidade de São Paulo, 1972.

[10] Movimento harmônico simples MHS. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala04/04_RE_11.asp#Elasticidade>. Acesso em: 15 nov. 2009.

[11] Data sheet do sensor acelerômetro. Disponível em: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL335.pdf> Acesso em: 10 set. 2009.

6. GLOSSÁRIO

Microcontrolador	É um microprocessador e vários periféricos num único componente eletrônico.
Pino de Entrada/Saída (I/O)	Pino de ligação externa do microcontrolador, que pode ser configurado como entrada ou saída. Na maioria dos casos, o pino de entrada e saída permite ao microcontrolador comunicar, controlar ou ler informação.
Firmware	Informação de que o microcontrolador necessita para poder funcionar. O firmware não pode apresentar quaisquer erros e pode ser escrito em diversas linguagens tais como: Basic, C, Pascal, ou assembler.
Hardware	Parte física do projeto: Microcontrolador, sensor, alimentação, circuitos de sinal e todos os componentes montados na placa.
Assembler	Traduz código fonte em código que o microcontrolador pode compreender. Destina-se também à detecção dos erros cometidos ao escrever o programa.
Compilador	Converte o programa editado em linguagem textual para o código binário a ser gravado no microcontrolador.
ROM, EPROM, EEPROM, FLASH, RAM	São tipos de memórias. A primeira não pode ser limpa, aquilo que se escreve nela, permanece para sempre e nunca mais pode ser apagada. A segunda pode apagar-se por meio de uma lâmpada de raios ultravioletas. A terceira pode ser apagada eletricamente. A quarta também é apagável eletricamente, mas ao contrário da memória EEPROM, não implica um grande número de ciclos, ao escrever ou apagar os conteúdos dos endereços de memória. Finalmente, o último tipo, é a memória mais rápida, mas não conserva o seu conteúdo quando ocorre uma falha na alimentação. Por isso, esta memória não é usada para guardar o programa, mas sim para guardar os valores das variáveis e resultados intermédios.

Byte, Quilobyte, Megabyte	Termos relacionados com quantidades de informação. A unidade básica é o byte que corresponde a 8 bits. Um quilobyte são 1024 bytes e um megabyte tem 1024 quilobytes.
Subrotina	É um fragmento de instrução chamado mais de uma vez dentro de um programa. Tipicamente uma subrotina será colocada em um programa seja para separar logicamente a função do resto do código, ou seja, para economizar espaço de memória, escrevendo-se uma só vez o grupo de instruções necessárias.
Faltas	Causa das possíveis falhas no funcionamento do transformador

7. ANEXO I - DATA SHEET DO SENSOR ADXL335



Small, Low Power, 3-Axis $\pm 3 g$ Accelerometer

ADXL335

FEATURES

- 3-axis sensing
- Small, low profile package
4 mm \times 4 mm \times 1.45 mm LFCSP
- Low power : 350 μ A (typical)
- Single-supply operation: 1.8 V to 3.6 V
- 10,000 g shock survival
- Excellent temperature stability
- BW adjustment with a single capacitor per axis
- RoHS/WEEE lead-free compliant

APPLICATIONS

- Cost sensitive, low power, motion- and tilt-sensing applications
- Mobile devices
- Gaming systems
- Disk drive protection
- Image stabilization
- Sports and health devices

GENERAL DESCRIPTION

The ADXL335 is a small, thin, low power, complete 3-axis accelerometer with signal conditioned voltage outputs. The product measures acceleration with a minimum full-scale range of $\pm 3 g$. It can measure the static acceleration of gravity in tilt-sensing applications, as well as dynamic acceleration resulting from motion, shock, or vibration.

The user selects the bandwidth of the accelerometer using the C_x , C_y , and C_z capacitors at the X_{OUT} , Y_{OUT} , and Z_{OUT} pins. Bandwidths can be selected to suit the application, with a range of 0.5 Hz to 1600 Hz for the X and Y axes, and a range of 0.5 Hz to 550 Hz for the Z axis.

The ADXL335 is available in a small, low profile, 4 mm \times 4 mm \times 1.45 mm, 16-lead, plastic lead frame chip scale package (LFCSP_1Q).

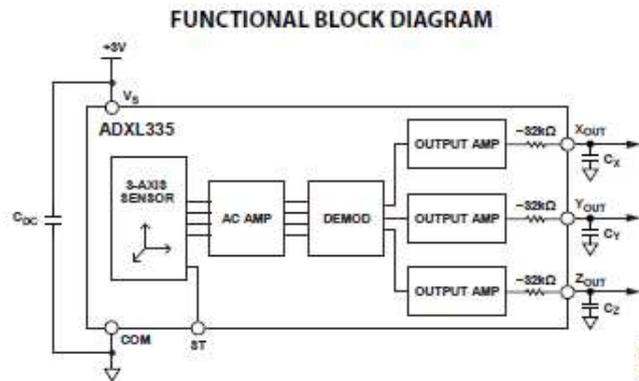


Figure 1.

Rev. 0

Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Analog Devices for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from its use. Specifications subject to change without notice. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Analog Devices. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.
Tel: 781.329.4700 www.analog.com
Fax: 781.461.3113 ©2009 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

SPECIFICATIONS

$T_A = 25^\circ\text{C}$, $V_S = 3\text{ V}$, $C_X = C_Y = C_Z = 0.1\ \mu\text{F}$, acceleration = 0 g , unless otherwise noted. All minimum and maximum specifications are guaranteed. Typical specifications are not guaranteed.

Table 1.

Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
SENSOR INPUT					
Measurement Range	Each axis	± 3	± 3.6		<i>g</i>
Nonlinearity	% of full scale		± 0.3		%
Package Alignment Error			± 1		Degrees
Interaxis Alignment Error			± 0.1		Degrees
Cross-Axis Sensitivity ¹			± 1		%
SENSITIVITY (RATIOMETRIC)²					
Sensitivity at X_{OUT} , Y_{OUT} , Z_{OUT}	Each axis $V_S = 3\text{ V}$	270	300	330	<i>mV/g</i>
Sensitivity Change Due to Temperature ³	$V_S = 3\text{ V}$		± 0.01		$\%/^\circ\text{C}$
ZERO <i>g</i> BIAS LEVEL (RATIOMETRIC)					
0 <i>g</i> Voltage at X_{OUT} , Y_{OUT}	$V_S = 3\text{ V}$	1.35	1.5	1.65	V
0 <i>g</i> Voltage at Z_{OUT}	$V_S = 3\text{ V}$	1.2	1.5	1.8	V
0 <i>g</i> Offset vs. Temperature			± 1		$\text{mg}/^\circ\text{C}$
NOISE PERFORMANCE					
Noise Density X_{OUT} , Y_{OUT}			150		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
Noise Density Z_{OUT}			300		$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ rms
FREQUENCY RESPONSE⁴					
Bandwidth X_{OUT} , Y_{OUT} ⁵	No external filter		1600		Hz
Bandwidth Z_{OUT} ⁵	No external filter		550		Hz
R_{INT} Tolerance			$32 \pm 15\%$		$\text{k}\Omega$
Sensor Resonant Frequency			5.5		kHz
SELF-TEST⁶					
Logic Input Low			+0.6		V
Logic Input High			+2.4		V
ST Actuation Current			+60		μA
Output Change at X_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	-150	-325	-600	mV
Output Change at Y_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+325	+600	mV
Output Change at Z_{OUT}	Self-Test 0 to Self-Test 1	+150	+550	+1000	mV
OUTPUT AMPLIFIER					
Output Swing Low	No load		0.1		V
Output Swing High	No load		2.8		V
POWER SUPPLY					
Operating Voltage Range		1.8		3.6	V
Supply Current	$V_S = 3\text{ V}$		350		μA
Turn-On Time ⁷	No external filter		1		ms
TEMPERATURE					
Operating Temperature Range		-40		+85	$^\circ\text{C}$

¹ Defined as coupling between any two axes.

² Sensitivity is essentially ratiometric to V_S .

³ Defined as the output change from ambient-to-maximum temperature or ambient-to-minimum temperature.

⁴ Actual frequency response controlled by user-supplied external filter capacitors (C_X , C_Y , C_Z).

⁵ Bandwidth with external capacitors = $1/(2 \times \pi \times 32\text{ k}\Omega \times C)$. For C_X , $C_Y = 0.003\ \mu\text{F}$, bandwidth = 1.6 kHz. For $C_Z = 0.01\ \mu\text{F}$, bandwidth = 500 Hz. For C_X , $C_Y = 10\ \mu\text{F}$, bandwidth = 0.5 Hz.

⁶ Self-test response changes cubically with V_S .

⁷ Turn-on time is dependent on C_X , C_Y , C_Z and is approximately $160 \times C_X$ or C_Y or $C_Z + 1\text{ ms}$, where C_X , C_Y , C_Z are in microfarads (μF).