

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

RAFAEL TAMOTSU OKADA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MEDIDAS DE ACELERAÇÃO

Guaratinguetá
2012

RAFAEL TAMOTSU OKADA

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MEDIDAS DE ACELERAÇÃO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Manoel de Souza Soares

Guaratinguetá
2012

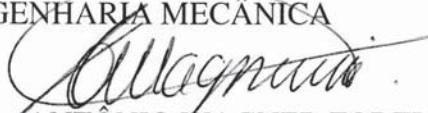
O41a	<p>Okada, Rafael Tamotsu</p> <p>Avaliação experimental de medidas de aceleração / Rafael Tamotsu Okada. - Guaratinguetá: [s.n.], 2012</p> <p>55 f.: il.</p> <p>Bibliografia: f. 55</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Álvaro Manoel de Souza Soares</p> <p>1. Aceleração (Mecânica) 2. Acelerômetro I. Título</p> <p>CDU 531.1</p>
------	---

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE MEDIDAS
DE ACELERAÇÃO**


RAFAEL TAMOTSU OKADA


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. ANTÔNIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. ÁLVARO MANOEL DE SOUZA SOARES
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. FERNANDO DE AZEVEDO SILVA
UNESP-FEG


Prof. Dr. MAURO PEDRO PERES
UNESP-FEG

Setembro de 2012

Aos meus pais, Mamoru Okada e Elena Aquemi Saito Okada,
por todo esforço, sacrifício e apoio.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, aos meu pais, Mamoru Okada e Elena Aquemi Saito Okada, que para me darem esta oportunidade tanto se sacrificaram.

Ao meu irmão Fábio Kazuhiko Okada e seu bom humor.

À minha noiva, Raquel Kageyama Hisi, pelo amor, paciência e companheirismo, sempre presente e disposta a me ajudar.

À minha falecida àvo Fuyuko Okada e minha tia Halumi Okada que na ausência de meus pais, cuidaram de meu irmão e de mim.

Aos meus amigos da República Vamointão, por todas as experiências e momentos juntos nessa etapa da vida.

Ao professor Álvaro Manoel de Souza Soares, pela amizade e orientação neste trabalho.

“Procure ser um homem de valor, em vez de ser um homem de sucesso.”

Albert Einstein

OKADA, R. T. **Avaliação experimental de medidas de aceleração**. 2012. 55 f. Trabalho (Graduação) – Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012

RESUMO

A aceleração é um parâmetro essencial para a engenharia e vem se tornando cada vez mais importante devido a necessidade das empresas de se tornarem mais competitivas no mercado. Tanto em aplicações de novas tecnologias a seus produtos, quanto na otimização de suas linhas de processos com manutenção preditiva e automação robótica. Este trabalho tem como objetivo fazer uma análise da qualidade dos sinais obtidos através de um acelerômetro capacitivo. Para tanto se montou uma bancada experimental, que consiste de um "*shaker*", alimentado por um gerador de sinais, um potenciômetro linear e um acelerômetro capacitivo; para a aquisição dos sinais utilizou-se uma placa de aquisição e o software LabView, com o intuito de se integrar duas vezes o sinal do acelerômetro e compará-lo com o sinal do potenciômetro. Este trabalho demonstra também o impacto de processamento dos dados adquiridos assim como a técnicas de pré e pós-processamento de sinais através do software GNU/Octave.

PALAVRAS-CHAVE: Aceleração, Acelerômetros Capacitivo, LabView, Processamento de Dados, GNU/Octave.

OKADA, R. T. **Experimental evaluation of acceleration measurements**. 2012. 55 f. Trabalho (Graduação) – Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012

RESUMO

Acceleration is a key parameter for engineering and is becoming increasingly important because of the need for companies to become more competitive in the market. Both applying new technologies to their products and optimizing their process lines with predictive maintenance and robotic automation. This study aims to analyze the quality of the signals obtained from a capacitive accelerometer. To do that a test rig was mounted, which consist of a shaker, fed by a signal generator, a linear potentiometer and a capacitive accelerometer; for the signal acquisition was used a acquisition board and the Labview software, in order to integrate twice the signal from the accelerometer and compare it with the sign of the potentiometer. This work also demonstrates the impact of acquired signal processing as well as techniques of pre and post processing of signal via software GNU/Octave.

KEYWORDS: Aceleration, Capacitive Acelerometer, LabView, Data Processing, GNU/Octave.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplo de ressonância induzida pelo vento (Pte Tacoma Narrows).....	19
Figura 2.1- Transferência alternada de energia potencial para cinética	21
Figura 2.2 - Pêndulo simples	22
Figura 2.3 - Viga em balanço, um sistema com infinitos graus de liberdade.....	23
Figura 2.4 – Esquema de Princípio da Superposição	25
Figura 2.5 – Esquema solução caso não-linear.....	26
Figura 2.6 – Vibração determinística	27
Figura 2.7 – Vibração Aleatória	27
Figura 2.8 – Representação gráfica da regra do trapézio simples	31
Figura 2.9 – Representação gráfica da regra do trapézio múltipla	32
Figura 2.10 – Representação gráfica da regra de Simpson $\frac{1}{3}$ simples	33
Figura 2.11- Representação gráfica da regra de Simpson $\frac{1}{3}$ múltipla	34
Figura 2.12 – Representação gráfica da regra de Simpson $\frac{3}{8}$ simples	35
Figura 2.13 - Esquema de um acelerômetro capacitivo.....	36
Figura 3.1 - 10Hz: Senoidal.....	40
Figura 3.2 - 10Hz: Senoidal (Integrada).....	40
Figura 3.3 - 1Hz: Senoidal.....	40
Figura 3.4 - 1Hz: Senoidal (Integrada).....	41
Figura 3.5 - Senoidal (1Hz+10Hz)	41
Figura 3.6 - Senoidal Integrada (1Hz+10Hz)	41
Figura 3.7 - Senoidal (1Hz+10Hz) (Invertida)	41
Figura 3.8 - Senoidal (1Hz+10Hz) (Invertida) (Integrada)	43
Figura 3.9 – Sinal da aceleração da vibração do motor.....	44
Figura 3.10 – Sinal da aceleração da vibração do motor (Integrado).....	44
Figura 4.1 - Experimento montado em laboratório	46
Figura 4.2 - Diagrama de bloco da aplicação LabView	47
Figura 4.3 - Placa de aquisição de dados NI USB 6008.....	48
Figura 4.4 - Sinal do acelerômetro	49
Figura 4.5 - Sinal do potenciômetro	50
Figura 5.1 – Esquema para obtenção dos resultados	50
Figura 5.2 – Comparação entre os sinais	52
Figura 5.3 – Esquema para obtenção dos resultados (filtro Butterworth)	52
Figura 5.4 – Comparação sinal potenciômetro versus integração (8 Hz).....	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 APRESENTAÇÃO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	14
1.3 OBJETIVO	15
1.3.1 OBJETIVO GERAL.....	15
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4 METODOLOGIA UTILIZADA	16
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 APRESENTAÇÃO	18
2.2 ESTADO DA ARTE.....	20
2.3 DEFINIÇÕES DE VIBRAÇÕES.....	21
2.3.1 VIBRAÇÃO	21
2.3.2 ELEMENTOS DE SISTEMAS VIBRATÓRIOS	21
2.3.3 GRAUS DE LIBERDADE.....	22
2.3.4 SISTEMAS DISCRETOS E CONTÍNUOS	23
2.4 CLASSIFICAÇÃO DE VIBRAÇÕES.....	24
2.4.1 VIBRAÇÃO LIVRE E FORÇADA	24
2.4.1.1 VIBRAÇÃO LIVRE	24
2.4.1.2 VIBRAÇÃO FORÇADA	24
2.4.2 VIBRAÇÃO NÃO AMORTECIDA E AMORTECIDA.....	24
2.4.3 VIBRAÇÃO LINEAR E NÃO LINEAR.....	25
2.4.4 VIBRAÇÃO DETERMINÍSTICA E ALEATÓRIA	27
2.5 DEFINIÇÕES DE ACELERÔMETROS.....	28
2.6 PRINCÍPIO FÍSICO	29
2.7 INTEGRAÇÃO NUMÉRICA	30
2.7.1 MÉTODO DO TRAPÉZIO SIMPLES	31
2.7.2 MÉTODO DO TRAPÉZIO MÚLTIPLO.....	32
2.7.3 MÉTODO DE SIMPSON $\frac{1}{3}$ SIMPLES	33
2.7.4 MÉTODO DE SIMPSON $\frac{1}{3}$ MÚLTIPLO.....	34
2.7.5 MÉTODO DE SIMPSON $\frac{3}{8}$ SIMPLES	35
2.8 TIPOS DE ACELERÔMETRO.....	36
2.8.1 ACELERÔMETROS CAPACITIVOS	36
2.8.2 ACELERÔMETROS PIEZOELÉTRICOS.....	37
2.8.3 ACELERÔMETROS PIEZORESISTIVOS	37
3 FUNDAMENTAÇÃO SOBRE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS	38
3.1 INTRODUÇÃO	38
3.2 GNU/OCTAVE	39

3.3 DADOS DIGITALIZADOS	39
3.3.1 DEFINIÇÃO DO CONCEITO.....	39
3.3.2 EFEITOS DO OFFSET	44
4 DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL.....	45
4.1 INTRODUÇÃO	45
4.2 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO	46
4.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	47
5 RESULTADOS	51
5.1 PÓS-PROCESSAMENTO DE DADOS	51
6. CONCLUSÕES.....	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

Um sensor pode ser definido como um dispositivo destinado à interpretação ou leitura de uma grandeza física, podendo ser ela algo simples como temperatura ou luminosidade; uma medida um pouco mais complexa como a rotação de um motor ou a distância de um carro até algum obstáculo próximo ou até mesmo eventos distantes do nosso cotidiano, como a detecção de partículas subatômicas e radiações cósmicas.

O foco deste trabalho é o sensor conhecido como acelerômetro capacitivo, cuja função é medir tanto a aceleração estática quanto dinâmica. A construção básica deste mecanismo é feita por uma microestrutura móvel ou oscilador emparelhado, com uma ou mais microestruturas sólidas ou estacionárias que armazenam a capacitância, proporcionando a denominação “acelerômetro capacitivo”. A capacitância, ou energia gerada por estes componentes, carregam um circuito elétrico sobre a qual o sensor está ligado, assim possibilitando a leitura dos dados colhidos.

A aceleração é um dos parâmetros essenciais para a medição de vibração, que por sua vez é um parâmetro fundamental na análise de problemas de engenharia, abrangendo manutenção preditiva, automação de processos, tecnologia em novos produtos etc.

Devido ao fato de que o acelerômetro capacitivo é um transdutor de vibração de baixo custo e por ter seu circuito integrado, assim também apresentando grande versatilidade, este trabalho tem por objetivo analisar sua precisão.

Para isto montou-se uma bancada experimental composta pelo acelerômetro capacitivo e um potenciômetro linear deslizante, fixados sobre um *shaker*, cuja vibração foi alimentada por um gerador de sinal. Por fim a dupla integração do sinal do acelerômetro permite sua comparação com o sinal do potenciômetro.

1.2 Justificativa

Ter rendimento máximo de um processo, fazendo com que toda energia cedida seja transformada em trabalho na elaboração de um produto, ter um produto mais barato pelo fato de não estar superdimensionado, ter a possibilidade de prever quando uma máquina vai necessitar de uma manutenção, ter a capacidade de testar seu produto em campo são algumas das possibilidades que a utilização de sensores trazem ao mercado atual.

E a concorrência existente entre as empresas exigem cada vez mais que seus produtos e processos sejam cada vez melhores e mais eficientes, tornado-as mais competitivas.

Assim é natural que a utilização de acelerômetros capacitivos tenha seu papel no cenário organizacional atual, devido a seu baixo custo e versatilidade.

1.3 Objetivo

1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem o objetivo de se aferir experimentalmente a qualidade dos sinais obtidos através do acelerômetro capacitivo.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Estudar as dificuldades presentes durante a obtenção de sinais digitais e seus impactos em sua qualidade;
- Estudar as técnicas utilizadas para tratamentos destes sinais;
- Familiarizar-se com os *softwares* LabVIEW e GNU/Octave;
- Construir uma bancada experimental composta por um acelerômetro capacitivo, um potenciômetro linear deslizante montados sobre um “shaker” cuja vibração é alimentada por um gerador de sinais;
- Adquirir os sinais do potenciômetro e acelerômetro capacitivo utilizando-se uma placa de aquisição de dados e o *software* LabVIEW.
- Tratar o sinal obtido através do acelerômetro capacitivo e integrá-lo duas vezes com a finalidade de se obter um sinal de deslocamento através do software GNU/Octave;
- Comparar os sinais e analisar a precisão obtida ao se utilizar um transdutor de baixo custo.

1.4 Metodologia utilizada

A metodologia utilizada para a elaboração deste trabalho foi, inicialmente, revisar os conceitos referentes a vibrações e acelerômetros. Para então estudar os problemas existentes na digitalização de sinais e os tratamentos necessários para que estes problemas não prejudiquem a qualidade do sinal obtido. Assim como a familiarização com o software GNU/Octave utilizado para este fim.

Então foi realizado um estudo relativo ao software LabVIEW e suas ferramentas utilizando-se os seus manuais; o “Ajudo e Suporte” do próprio programa, apostilas e trabalhos de conclusão de curso e artigos.

Com estes conceitos, partiu-se para a etapa experimental do trabalho, na qual consistiu em montar a bancada experimental e na geração dos sinais. O sinal adquirido através do acelerômetro foi tratado e, então, integrado até obter-se o sinal de deslocamento.

A última etapa foi a análise da comparação entre o sinal do acelerômetro (tratado e duplamente integrado) com o sinal do potenciômetro, finalizando-se com as devidas conclusões.

1.5 Estrutura do trabalho

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica que serviu de base teórica para elaboração deste trabalho.

O capítulo 3 contém a fundamentação teórica sobre aquisição e análise de sinais e a introdução ao software GNU/Octave.

O capítulo 4 corresponde à descrição da bancada experimental, na qual foram realizadas as aquisições dos sinais a serem avaliados.

No capítulo 5 é realizado o pós-processamento dos dados, assim como a análise dos resultados.

Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 Introdução

A vibração está envolvida de alguma forma na maioria das atividades humanas. Ouve-se devido à vibração do tímpano, vê-se por que as ondas se propagam, a fala origina-se das vibrações das cordas vocais e o caminhar envolve oscilação de braços e pernas. Em muitos outros campos da atividade humana, fenômenos apresentam variáveis cujos comportamentos são oscilatórios (economia, biologia, química, física, etc.).

Na engenharia, atualmente, as aplicações das vibrações mecânicas são de grande importância. Projetos de máquinas, fundações, estruturas, motores, turbinas, sistemas de controle e outros, demandam que questões envolvendo vibrações sejam consideradas. Os primeiros estudos de vibração em engenharia foram motivados pelo problema de desbalanceamento de motores. Estes podem ser originados devidos problemas de projeto, como de fabricação e manutenção. Em turbinas, a engenharia ainda não foi capaz de sanar grande parte dos problemas com origem em pás e rotores. Estruturas projetadas para suportar máquinas centrífugas também estão sujeitas a vibração, onde possivelmente partes dessas estruturas sofram fadiga devido à variação cíclica de tensões. A vibração, em máquinas, causa desgaste prematuro em mancais e engrenagens, causando ruído excessivo, como também afrouxamento de porcas e parafusos. Em processos de usinagem, pode causar trepidação, resultando em baixo acabamento superficial.

Outra forma de apresentação da vibração surge sempre que a frequência natural de vibração de uma máquina ou estrutura coincide com a frequência da força atuante sobre o mesmo; este fenômeno é conhecido como ressonância e leva a grandes deformações e falhas mecânicas. Muito pode ser lido sobre falhas causadas por vibrações excessivas em virtude da ressonância. Um exemplo clássico é o da ponte de Tacoma Narrows (figura 1.1), nos Estados Unidos, inaugurada em julho de 1940 e destruída em novembro do mesmo ano, quando entrou em ressonância induzida pelo vento.



Figura 1.1 – Exemplo de ressonância induzida pelo vento (Pte Tacoma Narrows)

Em virtude dos efeitos devastadores que podem surgir em máquinas e estruturas, os testes vibratórios se tornaram um procedimento padrão no projeto e desenvolvimento da maioria dos sistemas de engenharia.

O ser humano atua, frequentemente, como parte integrante de muitos sistemas de engenharia. Onde a transmissão da vibração para o homem resulta em perda de eficiência e desconforto. Vibrações em painéis de instrumentos podem produzir mau funcionamento ou causar dificuldades de leitura de medidores. Assim, um dos objetivos do estudo de vibração é a redução dos níveis vibratórios através do projeto e montagem adequados de máquinas. Então enquanto o engenheiro mecânico visa projetar máquinas de forma que esta apresenta níveis vibratórios baixos, o engenheiro estrutural tenta projetar a base da máquina para assegurar que o efeito da vibração não se transmita.

Apesar da grande quantidade de efeitos negativos na qual a vibração esta envolvida, esta também pode ser utilizada com bons resultados em várias aplicações industriais como esteiras transportadoras, peneiras vibratórias, compactadores, misturadores etc. A vibração também é utilizada em ensaios de materiais, processos de usinagem e soldagem, além de também ser utilizada em outras áreas como os amplamente utilizados ultrassons na medicina, simulando terremotos em pesquisas geológicas e conduzindo estudos em projetos de reatores nucleares.

2.2 Estado da Arte

NERY (2008) apresenta um desenvolvimento de uma ferramenta virtual para análise de vibração em máquina rotativa, visando a manutenção preditiva.

FIGUEREIDO, GAFANIZ, LOVES e PEREIRA (2007) - Fazem uma abordagem geral sobre as características dos acelerômetros e qual o interesse da sua aplicação no campo da medicina.

CARNEIRO (2003) faz um levantamento bibliográfico das tecnologias dos acelerômetros comerciais. Mostrando também a quantidade e localização dos principais acelerômetros contidos num veículo leves.

2.3 Definições de vibrações

2.3.1 Vibração

Um corpo é dito estar vibrando quando ele descreve um movimento de oscilação em torno de uma posição de referência. Ou ainda "Qualquer movimento que se repita após um intervalo de tempo" (RAO, 2008, p.6). O número de vezes de movimento completo (ciclos) tomados durante o período de um segundo é chamado de frequência e sua unidade é hertz (Hz).

2.3.2 Elementos de sistemas vibratórios

Um sistema vibratório envolve a transferência alternada de energia potencial para cinética, e de energia cinética para potencial, entre seus elementos, como indicado na figura 2.1. Caso o sistema apresente elemento amortecedor, a cada ciclo de vibração, uma parcela da energia existente inicialmente no sistema é dissipada. Assim sendo necessária uma fonte externa de energia para manter um regime permanente de vibração.

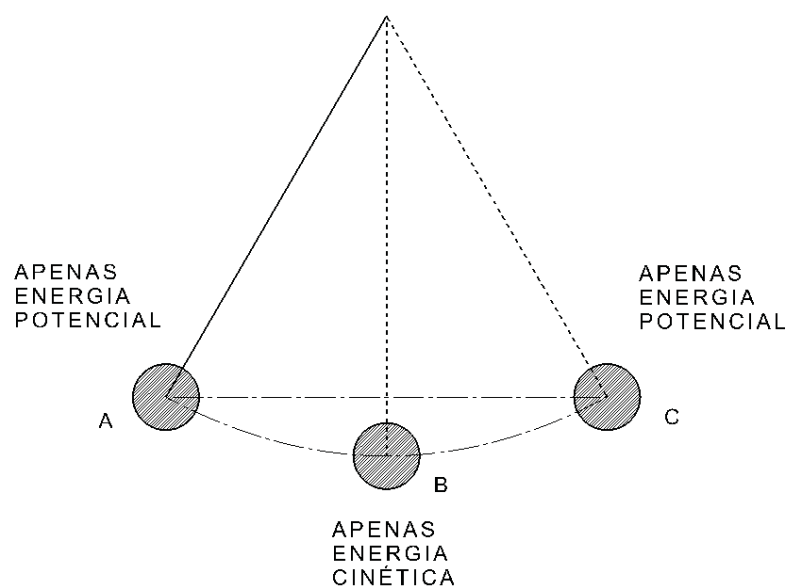


Figura 2.1- Transferência alternada de energia potencial para cinética

2.3.3 Graus de liberdade

Número mínimo de variáveis independentes necessárias para se determinar completamente um sistema vibratório. A figura 2.2 mostra um pêndulo simples, e representa um sistema com apenas um grau de liberdade, pois este pode ser definido em termos do ângulo θ . Nota-se que este também pode ser definido em termos de x e y , no entanto elas relacionam-se como descrito na equação (2.1).

$$x^2 + y^2 = l^2 \quad (2.1)$$

Na equação (2.1), l é o comprimento da haste do pêndulo. Desta forma qualquer uma das coordenadas define o sistema vibratório.

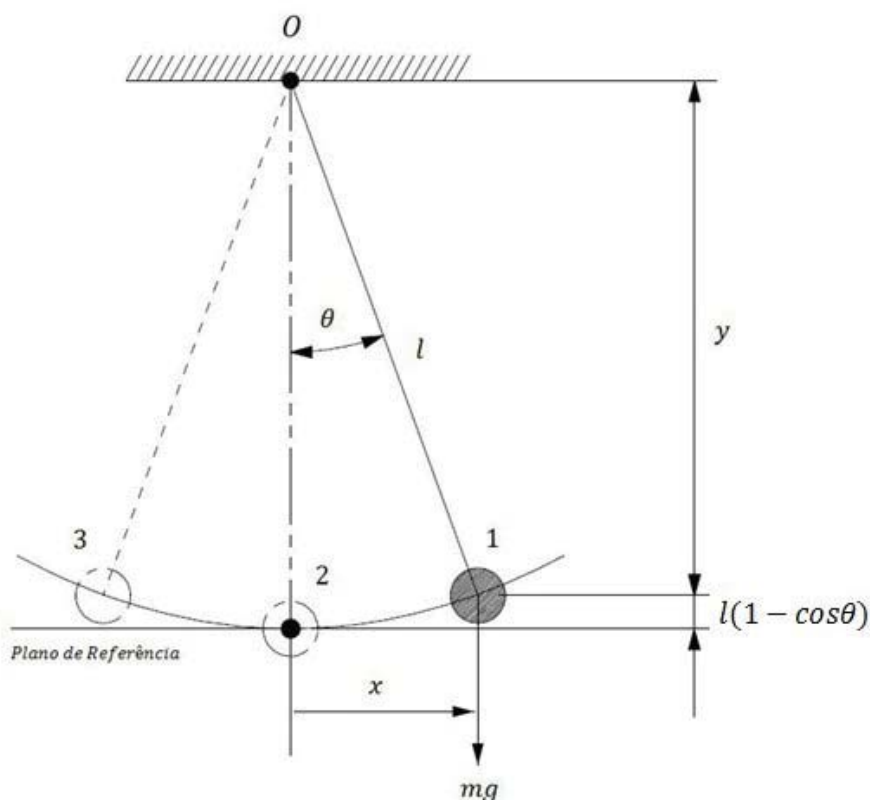


Figura 2.2 - Pendulo simples (RAO, 2008)

2.3.4 Sistemas discretos e contínuos

Sistemas vibratórios, como vistos na figura 2.2, apresentam número finito de graus de liberdade. Estes são denominados sistemas discretos ou de parâmetros concentrados. No entanto, alguns sistemas, principalmente os que apresentam elementos elásticos contínuos, têm um número infinito de graus de liberdade, como na figura 2.3, onde a viga em balanço tem um número infinito de pontos de massa, necessitando-se de um número infinito de coordenadas para definir-se a curva de deflexão elástica.

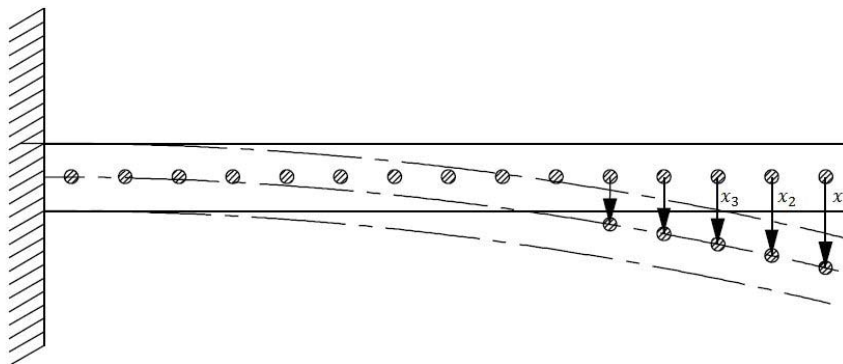


Figura 2.3 - Viga em balanço, um sistema com infinitos graus de liberdade (RAO, 2008)

Comumente os sistemas estruturais e de máquinas tem elementos elásticos (deformáveis) e, assim, um número infinito de graus de liberdade.

2.4 Classificação de vibrações

2.4.1 Vibração livre e forçada

2.4.1.1 Vibração livre

"Se um sistema, após uma perturbação inicial, continuar a vibrar por conta própria, a vibração resultante é conhecida como vibração livre." (RAO, 2008, p8). Onde após a perturbação inicial, não há presença de forças externas agindo sobre o sistema.

2.4.1.2 Vibração forçada

"Se um sistema estiver sujeito a uma força externa (muitas vezes, uma força repetitiva), a vibração resultante é conhecida como vibração forçada" (RAO, 2008, p8). Em casos onde a frequência da aplicação da força externa coincide com a frequência natural do sistema, ocorre o fenômeno conhecido como ressonância.

2.4.2. Vibração não amortecida e amortecida

Em um sistema vibratório, o elemento amortecedor dissipa, a cada ciclo, uma parcela da energia existente inicialmente neste mesmo sistema; estes são sistemas com vibração amortecida. Este elemento pode ser o ar, dissipando energia por atrito ou através de qualquer resistência existente durante a oscilação. A não existência deste elemento, dá origem a um sistema com vibração não amortecida.

2.4.3 Vibração linear e não linear

Dentro de um sistema, se todos os componentes vibratórios do sistema tiverem um comportamento linear, diz-se que a vibração resultante é uma vibração linear, e analogamente para sistema não linear. Implicando-se em que para sistemas não lineares, o princípio de superposição não é válido e as técnicas de análise são menos conhecidas. As vibrações lineares obedecem ao Princípio da Superposição ilustrado na figura 2.4 abaixo, ou seja, existe uma proporcionalidade entre excitação e resposta.

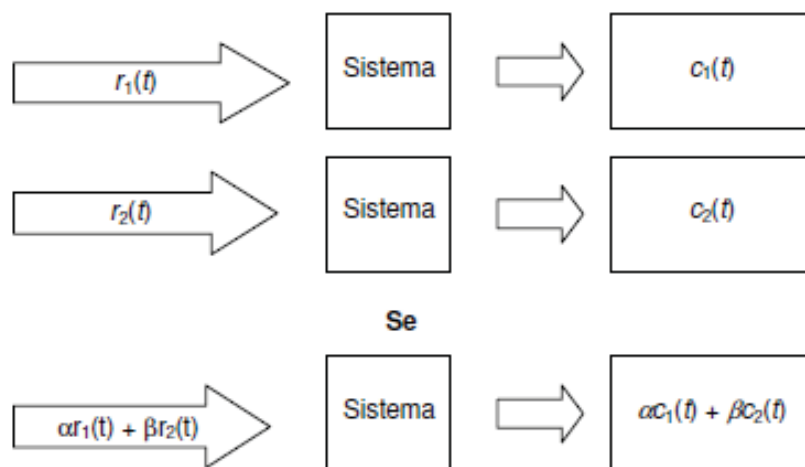


Figura 2.4 – Esquema de Princípio da Superposição

No sistema linear existe proporcionalidade entre causa (excitação) e efeito (resposta). Se todos os componentes do sistema elástico comportarem-se linearmente, segundo as equações (2.2), (2.3) e (2.4), dizemos que a vibração é linear.

$$F_{massa} = m\ddot{x} \quad (2.2)$$

$$F_{amortecedor} = c\dot{x} \quad (2.3)$$

$$F_{mola} = kx \quad (2.4)$$

No caso de vibração linear, o modelo matemático é composto por um sistema de equações diferenciais ordinárias lineares, EDOL's, de fácil solução analítica. Já no caso de vibração não-linear, o modelo matemático é composto por um sistema de EDO não-L, de difícil ou mesmo impossível solução analítica

Vibrações não-lineares: não obedecem ao Princípio da Superposição.

No caso não-linear, podemos atacar o problema de acordo com os procedimentos ilustrados na figura 2.5.

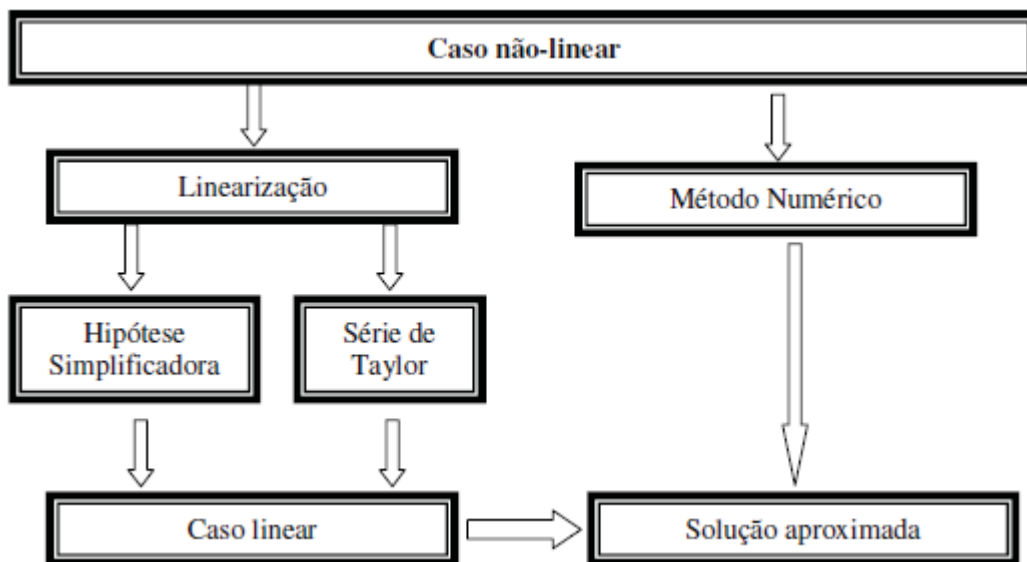


Figura 2.5 – Esquema solução caso não-linear

2.4.4 Vibração determinística e aleatória

Para vibrações, conhecendo-se a magnitude da excitação a qualquer instante, define-se que a excitação é determinística (figura 2.6). Em casos onde a vibração é aleatória (figura 2.7), a resposta do sistema também será aleatória, e esta apenas poderá ser descrita em termos de quantidades estatísticas.

Vibrações determinísticas: a excitação é conhecida e a resposta é previsível.

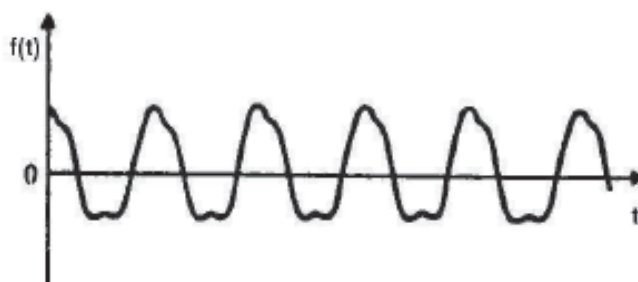


Figura 2.6 – Vibração determinística

Vibrações aleatórias: a excitação não é conhecida e a resposta é também aleatória.

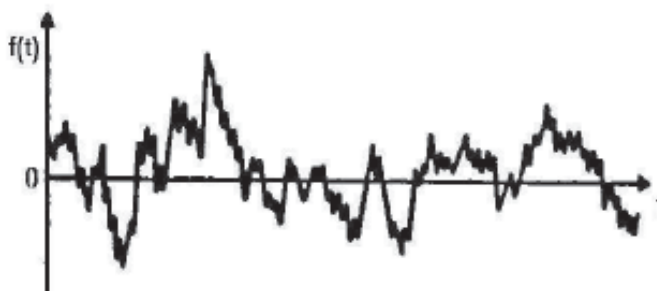


Figura 2.7 – Vibração Aleatória

2.5 Definições de acelerômetros

Acelerômetros são sensores ou transdutores que medem acelerações. A aceleração é uma medida de quão rapidamente a velocidade varia e pode ser obtida segundo uma, duas ou três direções, utilizando acelerômetros uni, bi ou triaxiais, respectivamente.

Tipicamente, os acelerômetros são constituídos por uma massa de reação suspensa por uma estrutura estacionária. Este aparelho pode ser visto como um transdutor massa-mola, que se encontra no interior de um sensor, que por sua vez está unido ao corpo. Sempre que este acelera, a inércia faz com que a massa resista. A força exercida pela massa é proporcional à força aplicada, a aceleração do corpo é proporcional ao deslocamento da massa.

Num acelerômetro, a aceleração é geralmente medida num ponto especial de medida, ao longo de um eixo sensível do acelerômetro. A magnitude da aceleração aplicada é vista, por instrumentos ou circuitos, como um impulso elétrico. O impulso elétrico é depois processado por circuitos externos, podendo ser usado em inúmeras aplicações.

Pode-se utilizar acelerômetros para medir não só acelerações (dinâmicas), como também inclinação, rotação, vibração, colisão e gravidade (acelerações estáticas), constituindo assim um aparelho de elevada utilidade para projetos em diversas áreas da engenharia.

2.6 Princípio físico

Sensores de movimento são desenhados para medir a taxa de mudança de posição, localização, ou deslocamento de um objeto que esta em movimento. Se a posição de um objeto em função do tempo é $x(t)$, então a primeira derivação da posição fornece a velocidade do objeto, $u(t)$, se uma direção é também especificada. Se a velocidade do objeto também esta mudando, então a primeira derivação da velocidade dá a aceleração. Isto é também a segunda derivação da posição.

$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} \quad (2.5)$$

$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d^2x(t)}{dt^2} \quad (2.6)$$

$$v(t) = v(0) + \int_0^1 a(t)dt \quad (2.7)$$

$$x(t) = x(0) + \int_0^1 v(t)dt \quad (2.8)$$

A forma primaria do sensor de movimento é o acelerômetro. Este dispositivo mede a aceleração, $a(t)$, de um objeto. Integrando as equações 2.5 e 2.6 e fácil mostrar que o acelerômetro pode ser usado para determinar ambas a rapidez e a posição do objeto também.

2.7 Integração Numérica

Segundo FILHO (2007), O procedimento usual de cálculo de uma integral definida é encontrar uma antiderivada do integrando e aplicar o Teorema Fundamental do Cálculo. Há situações, entretanto, nas quais é necessário se obter uma aproximação numérica da integral, como por exemplo:

- A anti-derivada do integrando não pode ser obtida analiticamente.
- Cálculo da área de uma função representada por dados provenientes de medidas experimentais.

Matematicamente, a integral definida de uma função f em um intervalo $[a,b]$ é dada por:

$$\int_a^b f(x)dx = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^n f(x_k^*)\Delta x \quad (2.9)$$

Nesta equação, a soma que aparece no lado direito é chamada de soma de Riemann; o intervalo $[a,b]$ é dividido em n subintervalos de comprimento $\Delta x = \frac{b-a}{n}$ e x_k^* denota um ponto arbitrário no k -ésimo subintervalo.

Os métodos de integração numérica usuais são derivados das fórmulas de Newton-Cotes. O procedimento consiste, basicamente, em substituir a função original por outra função, cuja integração possa ser realizada de modo mais simples, ou seja:

$$\int_a^b f(x)dx \cong \int_a^b f_n(x)dx \quad (2.10)$$

Os métodos de integração numérica apresentados nesta seção são:

- Método do trapézio simples.
- Método do trapézio múltiplo.
- Método de Simpson $1/3$ simples.
- Método de Simpson $1/3$ múltiplo.
- Método de Simpson $3/8$ simples.

2.7.1 Método do Trapézio Simples

Neste caso, $f_n(x)$ é uma função polinomial de primeiro grau. Geometricamente, a regra do trapézio simples determina a área formada pelos extremos, a abscissa e a reta que os pontos (figura 2.8), ou seja:

$$I \cong \int_a^b \left[f(a) + \frac{f(b)-f(a)}{b-a} (x-a) \right] dx \quad (2.11)$$

A solução dessa equação resulta, então, no método do trapézio simples:

$$I \cong (b-a) \frac{f(a)+f(b)}{2} \quad (2.12)$$

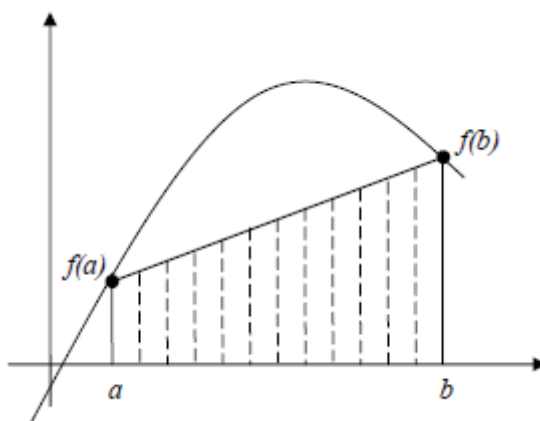


Figura 2.8 – Representação gráfica da regra do trapézio simples. FILHO(2007)

2.7.2 Método do Trapézio Múltiplo

Uma forma de melhorar a estimativa do método do trapézio simples é aumentar o número de intervalos, aplicando o método a cada segmento, de forma a aproximar a curva da função por uma reta (figura 2.9).

Supondo que existam $n+1$ pontos: $(x_0, x_1, x_2, \dots, x_n)$, tem-se então, n segmentos de tamanho:

$$h = \frac{x_n - x_0}{n} \quad (2.13)$$

A integral é então calculada, conforme expressão (2.14)

$$I \cong \int_{x_0}^{x_1} f(x) dx + \int_{x_1}^{x_2} f(x) dx + \dots + \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x) dx \quad (2.14)$$

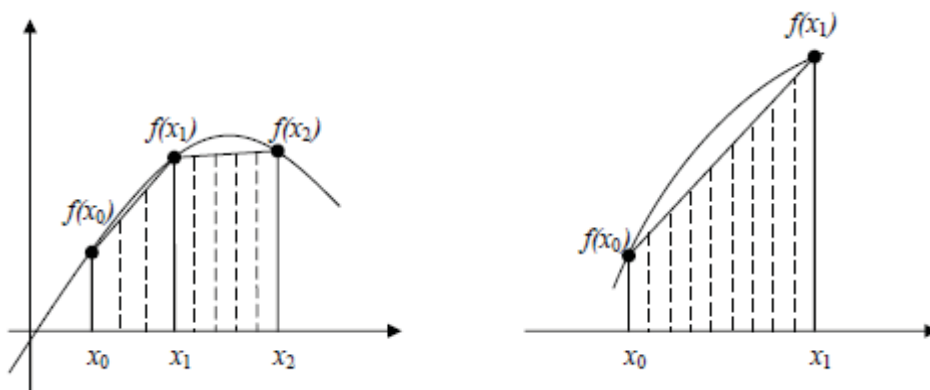


Figura 2.9 – Representação gráfica da regra do trapézio múltipla. FILHO (2007)

Substituindo a expressão (2.12) na expressão (2.14), obtém-se:

$$I \cong h \frac{f(x_0) + f(x_1)}{2} + h \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2} + \dots + h \frac{f(x_{n-1}) + f(x_n)}{2} \quad (2.15)$$

A solução dessa equação resulta, então, na regra do trapézio múltiplo:

$$I \cong \frac{h}{2} [f(x_0) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(x_n)] \quad (2.16)$$

2.7.3 Método de Simpson $1/3$ simples

O método de Simpson $1/3$ simples utiliza um polinômio de Lagrange de segunda ordem para aproximar a função (figura 2.10):

$$I \cong \int_{x_0}^{x_2} \left[\frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} f(x_1) + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} f(x_2) \right] dx \quad (2.17)$$

A solução dessa equação resulta, então, na regra de Simpson $1/3$ simples:

$$I \cong \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)] \quad (2.18)$$

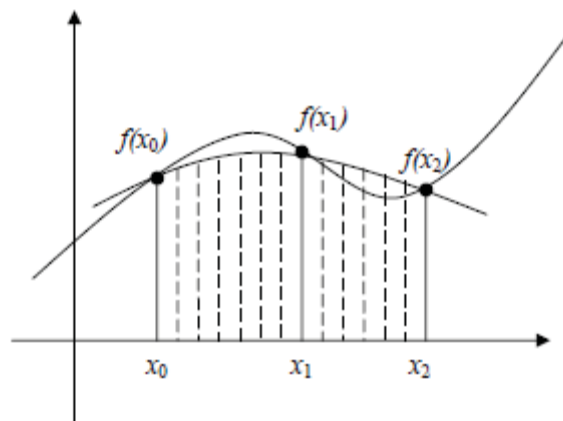


Figura 2.10 – Representação gráfica da regra de Simpson $1/3$ simples. FILHO (2007)

2.7.4 Método de Simpson $1/3$ múltiplo

Semelhante ao que se fez com a regra do trapézio múltipla, a melhoria da estimativa do cálculo da integral é obtida aumentando o número de intervalos e aplicando o método a cada segmento (figura 2.11). Isso é feito substituindo a expressão (2.18) na expressão (2.14), ou seja:

$$I \cong 2h \frac{f(x_0)+f(x_1)+f(x_2)}{6} + 2h \frac{f(x_2)+4f(x_3)+f(x_4)}{6} + \dots + 2h \frac{f(x_{n-2})+4f(x_{n-1})+f(x_n)}{6} \quad (2.19)$$

A solução dessa equação resulta então, na regra de Simpson $1/3$ múltipla:

$$I \cong \frac{h}{3} [f(x_0) + 4 \sum_{i=1,3,5}^{n-1} f(x_i) + 2 \sum_{i=2,4,6}^{n-2} f(x_i) + f(x_n)] \quad (2.20)$$

Observa-se que um número par de segmentos deve ser utilizado.

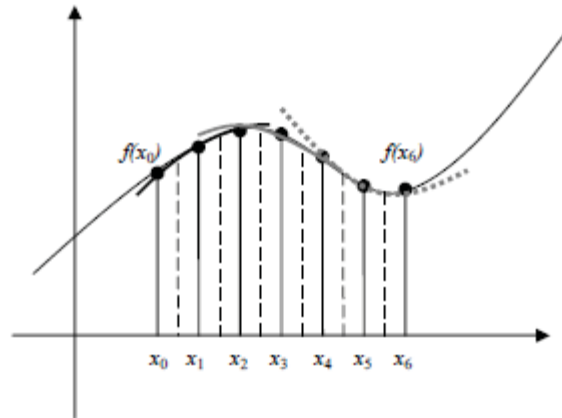


Figura 2.11- Representação gráfica da regra de Simpon $1/3$ múltipla. FILHO (2007)

2.7.5 Método de Simpson $3/8$ simples

A regra de Simpson $3/8$ simples utiliza um polinômio de Lagrange de terceira ordem para aproximar a função (figura 2.12):

$$I \cong \int_{x_0}^{x_3} \left[\frac{(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)(x_0-x_3)} f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)(x_1-x_3)} f(x_1) + \dots \frac{(x-x_1)(x-x_0)(x-x_3)}{(x_2-x_1)(x_2-x_0)(x_2-x_3)} f(x_2) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)(x-x_3)}{(x_3-x_0)(x_3-x_2)(x_3-x_1)} f(x_3) \right] dx \quad (2.21)$$

A solução dessa equação resulta, então, na regra de Simpson $3/8$ simples:

$$I \cong \frac{(x_3-x_0)}{8} [f(x_0) + 3f(x_1) + 3f(x_2) + f(x_3)] \quad (2.22)$$

Observa-se que um número ímpar de segmentos deve ser utilizado.

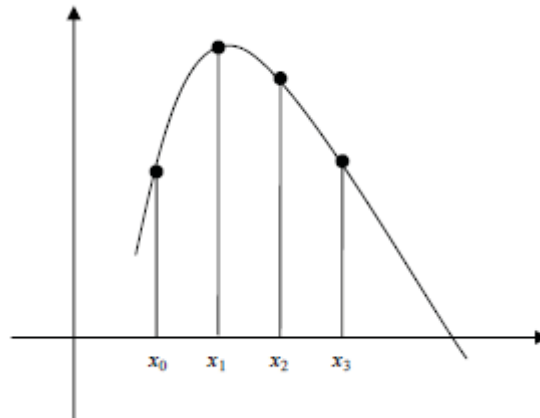


Figura 2.12 – Representação gráfica da regra de Simpson $3/8$ simples. FILHO (2007)

2.8 Tipos de Acelerômetros

Existem vários tipos de acelerômetros. Cada um possui características, vantagens e desvantagens. Dos acelerômetros mecânicos, os mais comuns são os capacitivos, os piezoelétricos e os piezoresistivos.

2.8.1 Acelerômetros capacitivos

Capacitores são componentes elétricos que armazenam carga. Um capacitor é, geralmente formado dispondo duas placas paralelamente uma à outra. A capacidade é dada por:

$$C = \epsilon A/d \quad (2.23)$$

Onde ϵ é uma constante dependente do material entre as placas e A é a área das placas ($A \gg d^2$) e d corresponde à distância entre elas.

Os acelerômetros capacitivos contêm um capacitor entre a massa e a estrutura de suporte e são sensíveis às mudanças na capacidade entre eles. Uma aceleração da massa provoca variações no espaço entre a placa fixa e móvel do capacitor, o qual é inversamente proporcional à carga do capacitor. Como resposta à aceleração, a capacidade elétrica varia, o que faz variar o sinal de saída do circuito, como mostrado na figura 2.13.

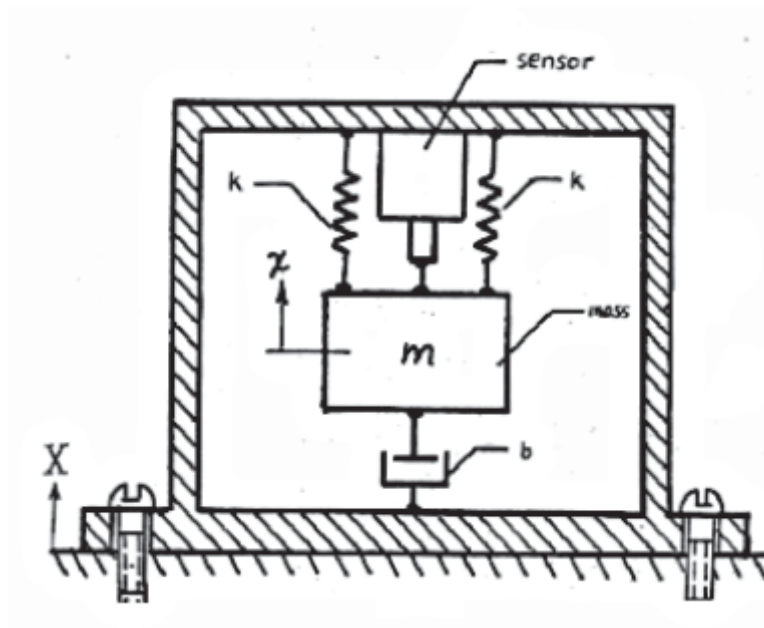


Figura 2.13 - Esquema de um acelerômetro capacitivo.

2.8.2 Acelerômetros Piezoelétricos

Os cristais piezoelétricos são cristais sintéticos ou naturais que produzem carga quando são comprimidos ou fletidos.

Nos acelerômetros piezoelétricos, a massa é unida a um cristal piezoelétrico. Quando o corpo do acelerômetro é sujeito à vibração, a massa obedece às leis da inércia e o cristal piezoelétrico fica submetido a forças de tração e compressão, gerando cargas. Estas forças são proporcionais à aceleração, de acordo com a lei de Newton, $F = ma$.

2.8.3 Acelerômetros Piezoresistivos

Neste tipo de acelerômetros, comparando com os piezoelétricos, surge um componente piezoresistivo em substituição ao cristal piezoelétrico. A força exercida pela massa faz variar a resistência, que é detectada por uma ponte de Wheatstone.

3 FUNDAMENTAÇÃO SOBRE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE SINAIS

3.1. Introdução

Tradicionalmente a obtenção de uma curva de velocidade dada uma curva de aceleração no tempo, ou o deslocamento correspondente a uma curva de velocidade é simples, e calculada através da área sobre a curva. Se a curva segue uma conhecida função determinística, então uma solução exata pode ser encontrada, se segue uma função não-determinística, então uma solução aproximada pode ser encontrada utilizando técnicas de integração numérica.

Medições e dados instrumentados caem nesta segunda categoria. E, se os dados medidos, contêm mesmo que, uma pequena quantidade de baixas frequências ou "*DC offset components*", estes podem frequentemente levar a resultados equivocados apesar de numericamente corretos.

O problema não é causado por perda de informações no processo de obtenção, nem devido aos efeitos de suas amplitudes ou quantização do tempo, e sim devido a uma característica intrínseca da integração de funções trigonométricas, na qual suas amplitudes são aumentadas conforme a definição da frequência.

3.2 GNU/Octave

GNU/Octave é um interpretador de linguagem de alto nível, concedido, primeiramente para computação numérica. Este fornece ferramentas para soluções numéricas de problemas lineares e não lineares, além de realizar outros experimentos numéricos.

Ele também possui extensivas funções gráficas para visualização e manipulação de dados. Octave é normalmente usado através de sua interativa linha de comando, mas este também pode ser utilizado para escrever programas não interativos. Sua linhagem é muito similar ao Matlab e muitos de seus programas podem ser facilmente portados.

Octave é um programa *free-source* e segue a Licença Pública, GNU-GPL, ou simplesmente GPL que garante que este seja distribuído e utilizado, mantendo porém os direitos autorais.

Neste trabalho o Octave foi utilizado como uma alternativa ao Matlab, para auxiliar na demonstração e aplicação dos conceitos matemáticos necessários.

3.3 Dados digitalizados

3.3.1 Definição do conceito

Sendo

$$y(t) = A \sin(2\pi ft) \quad (3.1)$$

sua integral indefinida é dada por

$$\int y(t) dt = c - \frac{A}{2\pi f} \cos(2\pi ft) \quad (3.2)$$

Desta, pode-se verificar que a amplitude da componente oscilatória é inversamente proporcional à frequência - com o aumento da frequência a amplitude decresce. Isto pode ser demonstrado graficamente pelas Figuras, a seguir:

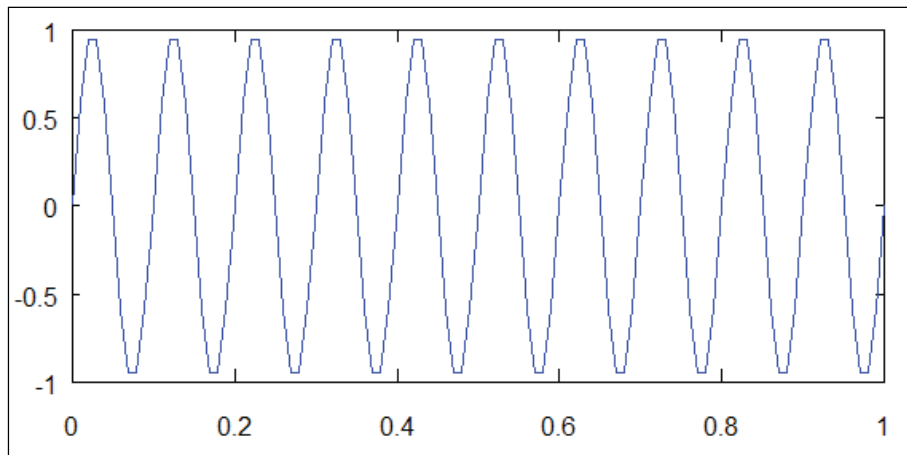


Figura 3.1 - 10Hz: Senoidal

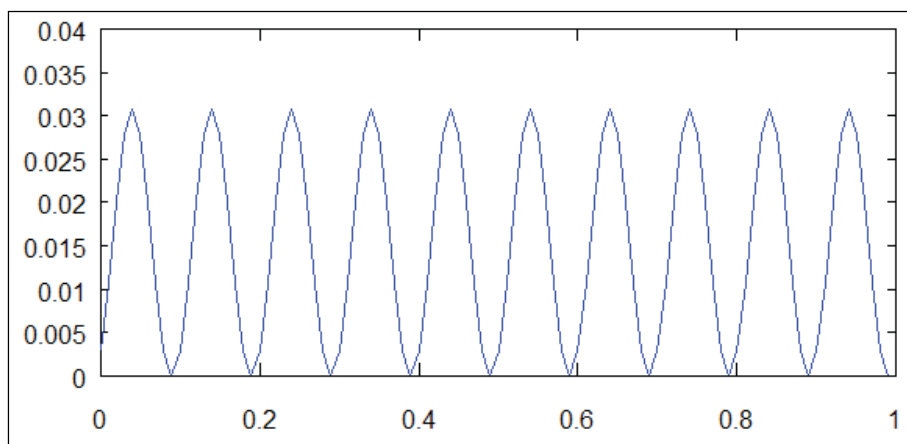


Figura 3.2 - 10Hz: Senoidal (Integrada)

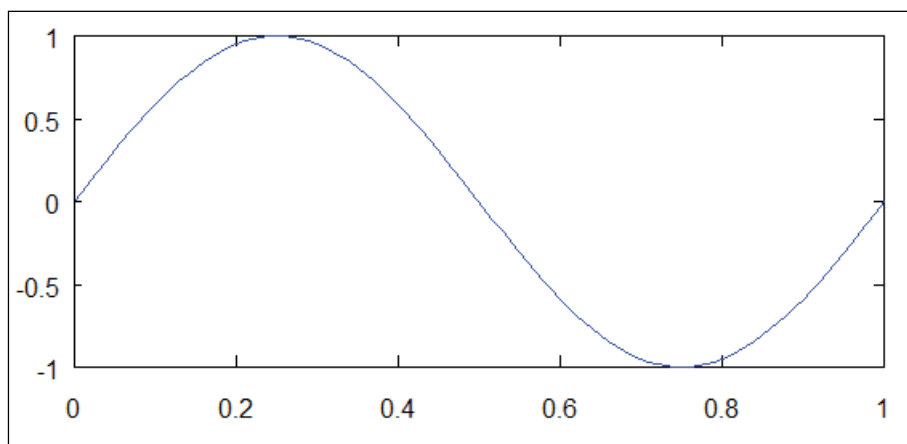


Figura 3.3 - 1Hz: Senoidal

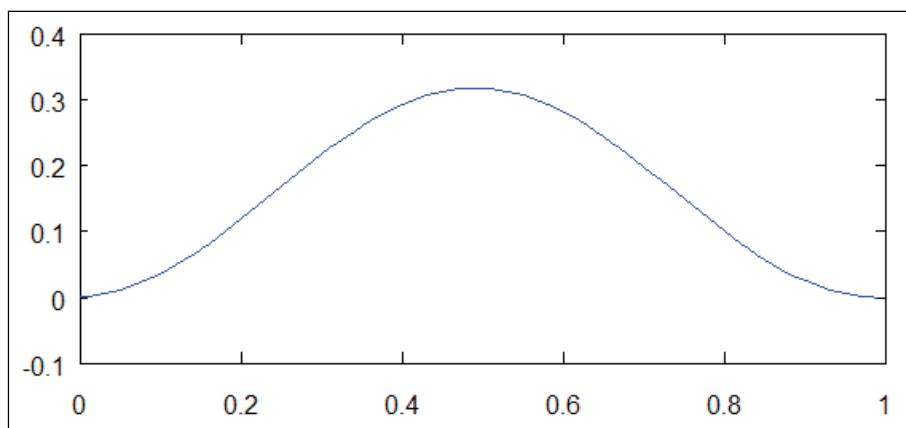


Figura 3.4 - 1Hz: Senoidal (Integrada)

Uma onda unitária de frequência 10Hz e sua função integrada pode ser vista nas figuras 3.1 e 3.2. Comparando-se estes com uma senoide também unitária, porém com uma menor frequência (mostrada nas figuras 3.3 e 3.4, nota-se imediatamente que o sinal integrado de frequências 1Hz é mais de dez vezes maior que a de frequência 10Hz.

Quando estas duas ondas são somadas, os seguintes resultados são obtidos, figuras 3.5 e 3.6:

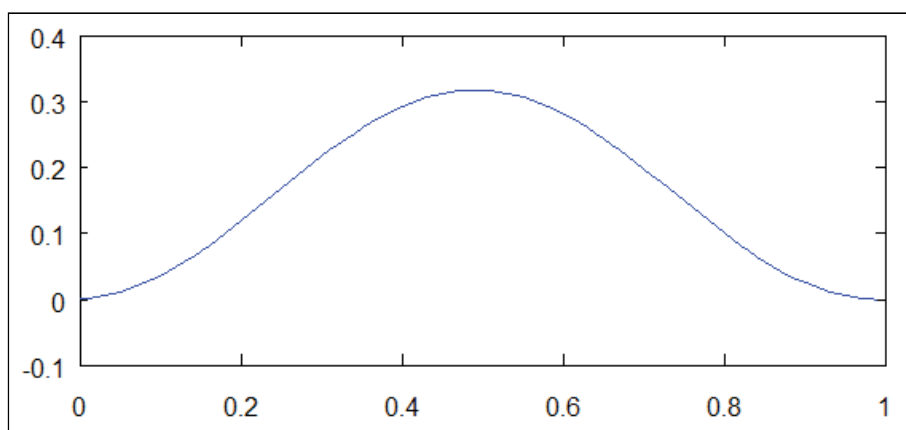


Figura 3.5 - Senoidal (1Hz+10Hz)

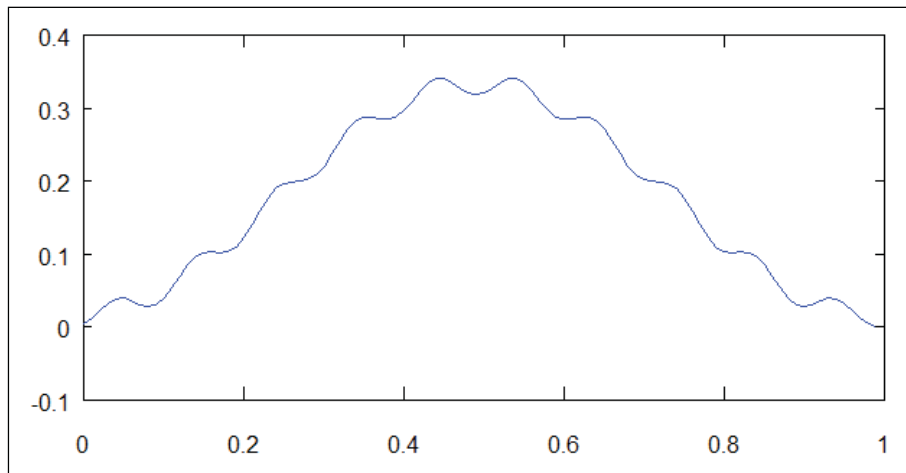


Figura 3.6 - Senoidal Integrada (1Hz+10Hz)

Verifica-se claramente que o comportamento do sinal de menor frequência predomina sobre a saída integrada e a característica oscilatória da onda original não é mais presente no sinal integrado.

Não apenas é importante a amplitude da componente de baixa frequência, mas a fase também é crucial devido ao fato desta ter um efeito significativo sobre a forma bruta do sinal integrado. Uma inspeção de todas as saídas integradas revela que ao invés de serem bipolares como as entradas, elas são predominantemente positivas. Esta é uma consequência da fase senoidal de entrada ser zero. Se as fases de entrada fossem atrasadas em 180 graus, então a saída seria predominantemente negativa, como mostrada nas figuras 3.7 e 3.8.

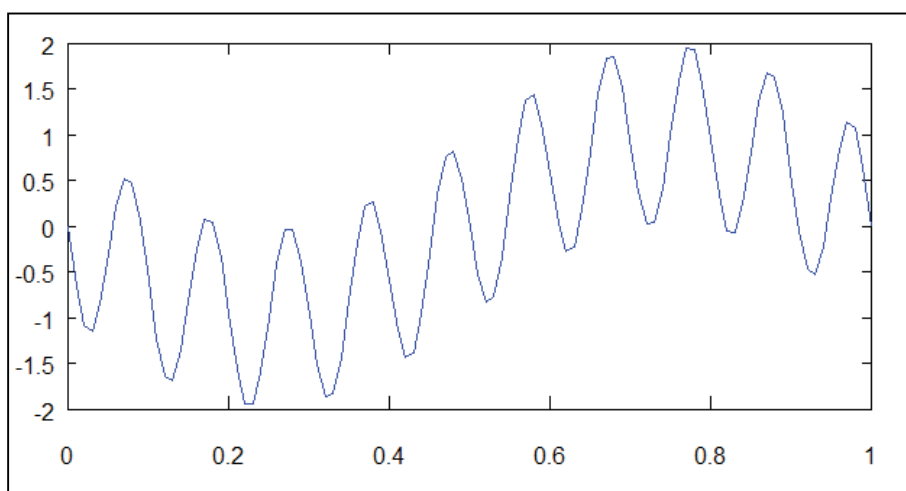


Figura 3.7 - Senoidal (1Hz+10Hz) (Invertida)

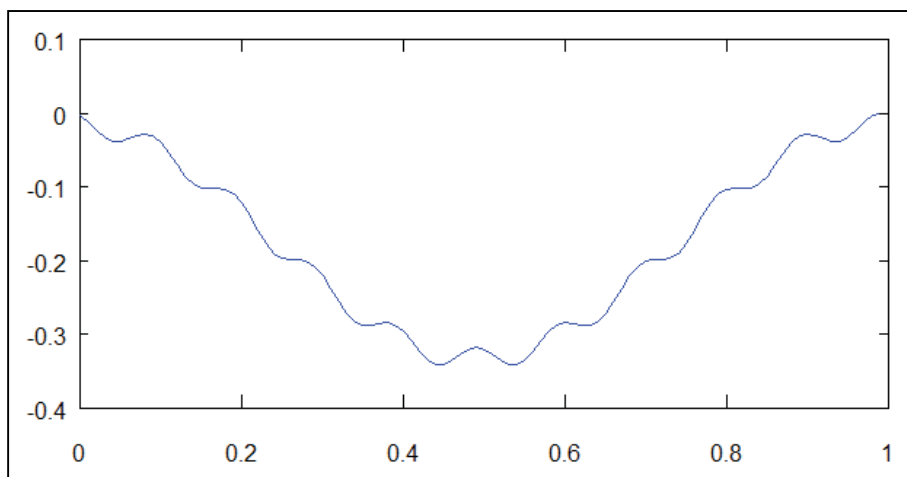


Figura 3.8 - Senoidal (1Hz+10Hz) (Invertida) (Integrada)

3.3.2 Efeitos do offset

Para o caso de haver um sinal de offset no sinal de entrada e se este offset possuir um sinal positivo de amplitude k , então temos:

$$y(t) = k \quad (3.3)$$

A integral indefinida desta onda é dada por:

$$\int y(t)dt = c + kt \quad (3.4)$$

Que é uma "rampa" de crescimento proporcional a magnitude (e sinal) de k . Desta mesma maneira que baixas frequências podem dominar a forma de uma sinal integrado, as presenças de pequenos offsets podem alterar completamente a estrutura e a magnitude do sinal, como visto nos exemplos (figuras 3.9 e 3.10):

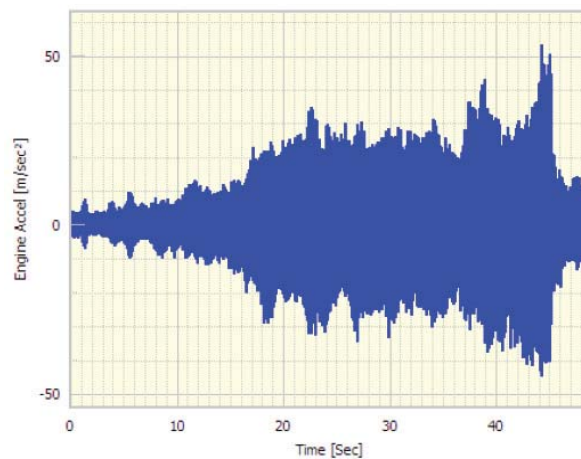


Figura 3.9 – Sinal da aceleração da vibração do motor.

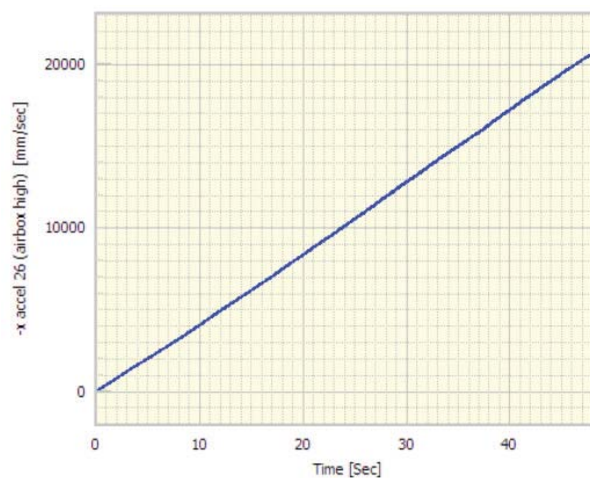


Figura 3.10 – Sinal da aceleração da vibração do motor (Integrado).

4 DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

A aquisição de dados a partir de qualquer sensor envolve cuidados, tais como, taxa de amostragem, conversão do sinal de analógico para digital, filtragem digital, calibração de dados, cálculos numéricos e assim por diante. Neste trabalho, aborda-se a aquisição e tratamento de dados provenientes de um acelerômetro capacitivo e a sua dupla integração, a fim de se obter dados de deslocamento. O acelerômetro capacitivo é um circuito integrado de baixo custo, que não precisa de amplificação de sinal, o que aumenta a sua portabilidade e o torna muito adequado para medições de campo. Para aferir os dados provenientes do acelerômetro, montou-se um experimento composto por um gerador de sinal que transmite o seu sinal a um *shaker*. Sobre a massa oscilatória do *shaker*, montaram-se dois sensores: um potenciômetro deslizante e um acelerômetro capacitivo. O intuito era integrar-se numericamente os dados adquiridos pelo acelerômetro capacitivo para compará-lo ao deslocamento medido pelo potenciômetro deslizante. Os dados foram adquiridos e armazenados utilizando-se o software LabView® e o processamento dos dados digitais foi feito usando-se o software GNU/Octave.

4.2 Descrição do experimento

Para adquirir os dados dos sensores, montou-se um experimento composto por um gerador de sinais, um *shaker*, um acelerômetro capacitivo (Micromachined MMA 1220D da Motorola) e um potenciômetro deslizante (com 30 mm de curso), como ilustra a figura 4.1. A saída de sensores foi digitalizado por uma placa de aquisição de dados analógico/digital USB (NI USB-6008 da National Instruments), que foi controlado por um programa desenvolvido utilizando-se a linguagem gráfica LabView®.

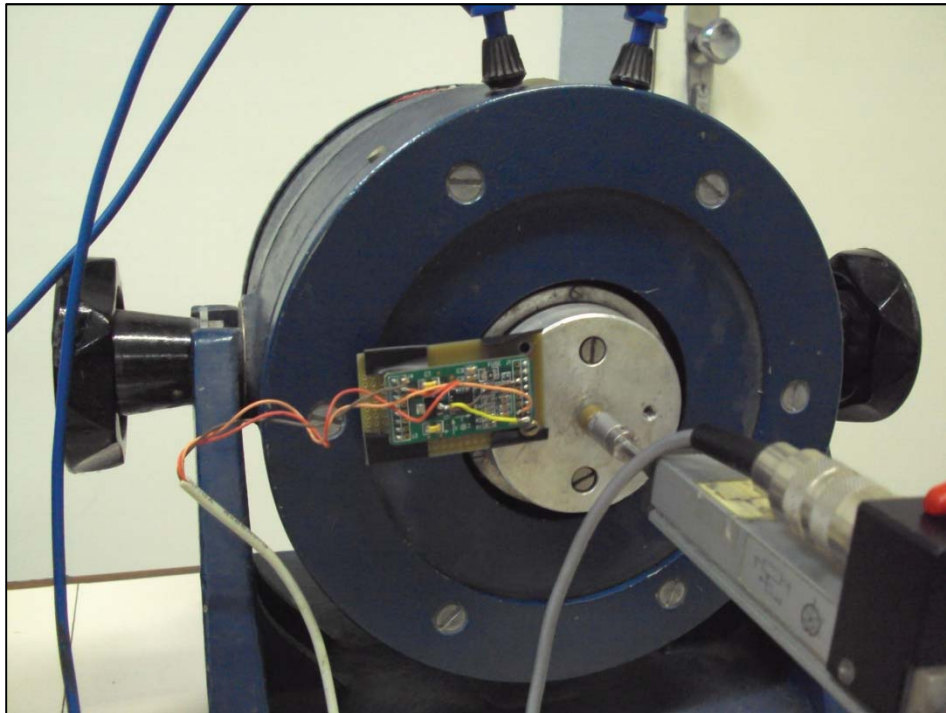


Figura 4.1 - Experimento montado em laboratório

4.3 Aquisição dos dados

O LabView (acrônimo para *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) é uma linguagem de programação gráfica desenvolvida pela National Instruments com o objetivo de realizar aquisição, processamento e análise de dados em um só ambiente de programação. Podem-se citar como principais campos de aplicação do LabView, a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação. Os programas em LabView são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente *vi* (*Virtual Instruments*). São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. O programa não é processado por um interpretador, mas sim compilado. Deste modo seu desempenho é comparável ao exibido por linguagens de programação de alto nível e ainda é passível de gerar um código executável, que roda em computadores que não possuem o software instalado.

A aplicação LabView utilizada neste trabalho é bastante simples e foi desenvolvida para realizar a aquisição, filtragem e armazenamento dos dados provenientes do sensores. O diagrama de blocos da aplicação está ilustrado na figura 4.2.

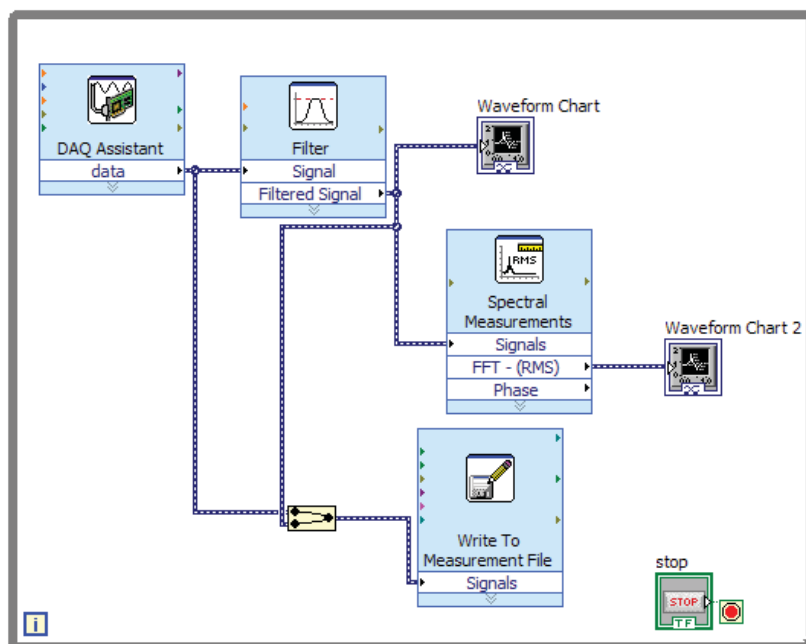


Figura 4.2 - Diagrama de bloco da aplicação LabView

Inicialmente, colocou-se no diagrama de blocos o componente LabView responsável por configurar a placa de aquisição de dados utilizada (*DAQ Assistant*). A placa (figura 4.3), conectada a um computador PC compatível pela porta USB, é a NI USB 6008 e possui as características descritas na tabela 1.

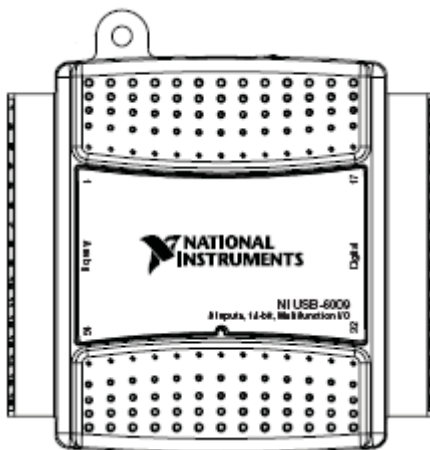


Figura 4.3 - Placa de aquisição de dados NI USB 6008

Tabela 1 - Principais Especificações da Placa de Aquisição de Dados NI USB 6008

Nome do Produto	USB-6009
Tipo de Medidas	Voltagem
Canais DE ENTRADA	4 , 8
Canis <i>Single-Ended</i>	8
Canais Diferenciais	4
Resolução	12 bits
Taxa de Aquisição Máxima	10 kS/s
Voltagem máxima	10 V
Faixa Máxima de Voltagem (Entrada)	-10 V , 10 V
Canais de saída	2
Resolution	12 bits
Voltagem máxima na saída	5 V
Faixa Máxima de Voltagem (Saída)	150 S/s
Canais Bidirecionais (Digital I/O)	12
Numero de canais digitais	0 , 12

Ao se colocar este componente dentro do diagrama de bloco, inicia-se um procedimento automático para a configuração da placa. Este procedimento permite a escolha dos canais a serem utilizados, tensão de entrada de cada canal, sua taxa de aquisição de dados e o tipo de canal a ser definido (diferencial ou referenciado). Para esta aplicação adotou-se dois canais (uma para cada sensor) referenciados com entrada limitada entre 0V (zero Volts) e 5V (cinco Volts) e taxa de aquisição de 100 Hz.

O segundo componente a ser integrado ao diagrama de blocos foi o filtro (Filter), que permite que sejam aplicados filtros digitais à massa de dados. Este componente foi ajustado para filtrar os dados com um filtro Butterworth passa alta com cinco polos com frequência de corte em 5 Hz (dado empírico).

O terceiro componente integrado ao diagrama de blocos foi um componente responsável por armazenar os dados adquiridos (*Write to Measurement File*) de forma que pudessem ser pós-processados no GNU/Octave, como citado anteriormente.

O quarto e último componente utilizado foi um componente responsável por repetir a aquisição de dados (*While Loop*), deixando a decisão de terminá-la para o usuário do programa.

Os dados adquiridos estão ilustrados nas Figuras 4.4 e 4.5.

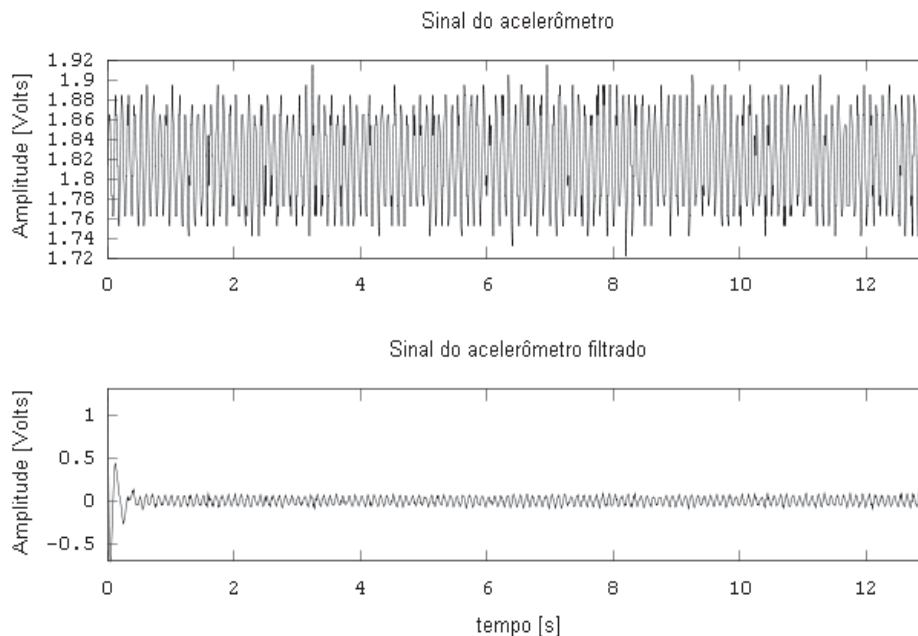


Figura 4.4 - Sinal do acelerômetro

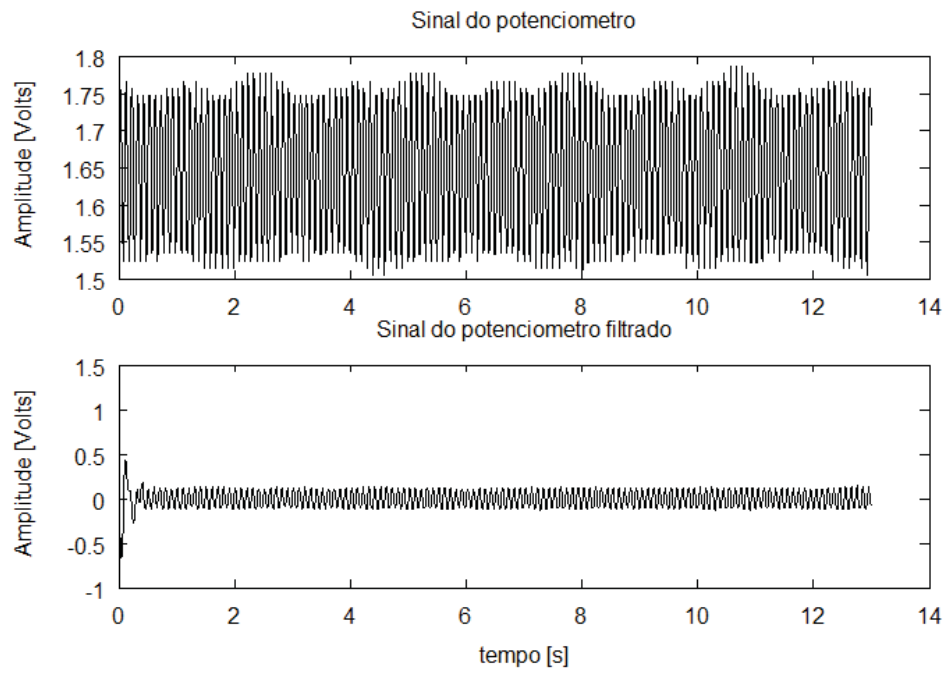


Figura 4.5 - Sinal do potenciômetro

5 RESULTADOS

5.1 Pós-processamento de dados

Na parte experimental deste trabalho, como já foi dito foi usado um acelerômetro, que é um sensor amplamente utilizado em aplicações de engenharia. Podem ser uteis para realizar análise modal e muitas outras análises no domínio da frequência. Se não há preocupação com a amplitude do sinal, esta análise pode ser feita sem problemas. Neste caso estamos interessados em ter medidas precisas de velocidade e de deslocamento. Para a obtenção dessas grandezas, é necessário realizarmos duas integrações do sinal de aceleração. A figura 5.1 apresenta um esquema que ilustra os passos a serem seguidos.

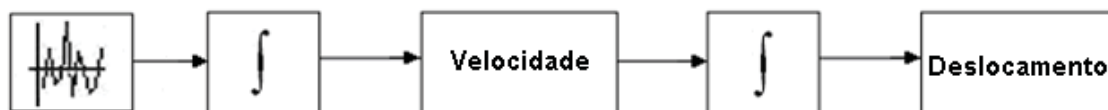


Figura 5.1 – Esquema para obtenção dos resultados

Quando lidamos com integradores numéricos, se o sinal a ser integrado contém algum tipo de offset, temos que ter em mente que estes valores serão somados ao longo de todos os pontos de integração, causando divergência no sinal processado, como ilustrado anteriormente, com o cálculo da integração de sinais sintéticos. A figura 5.2 ilustra a integração numérica do sinal do acelerômetro, sem submetermos o sinal a nenhum tratamento.

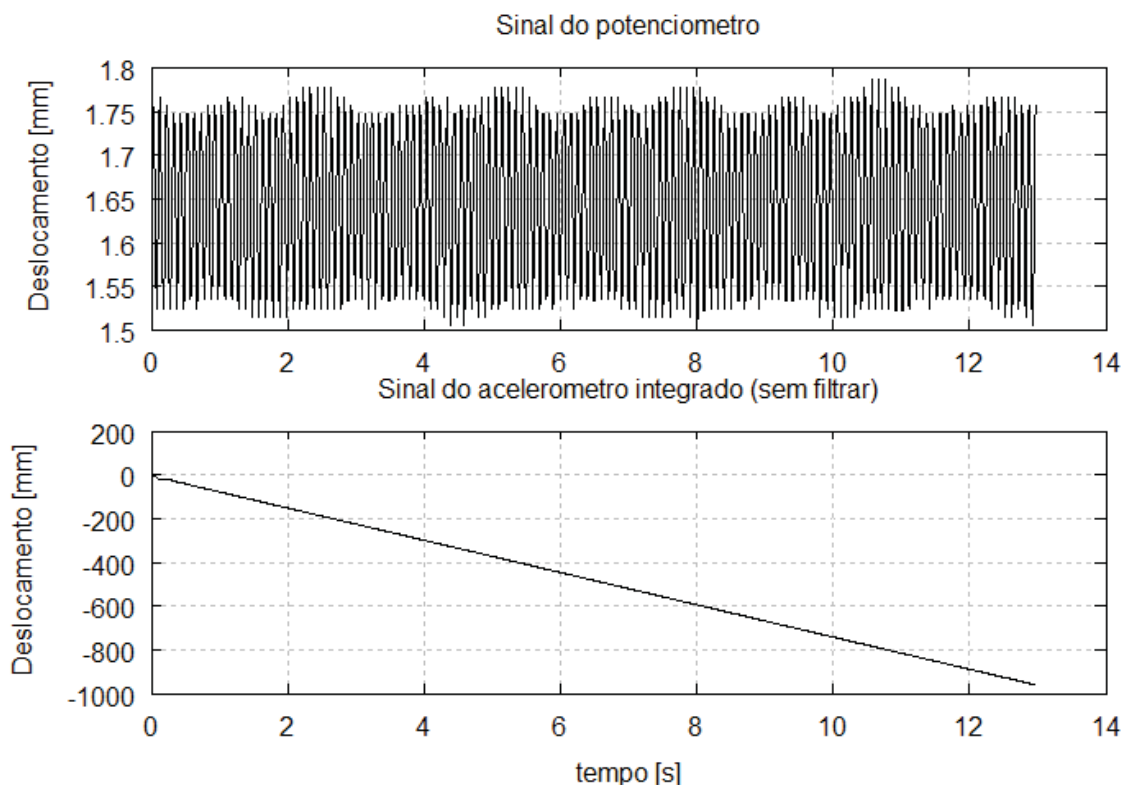


Figura 5.2 – Comparação entre os sinais.

Na integração numérica usou-se uma rotina já implementada no Octave(R) (trapz) que, dadas as coordenadas de dois pontos, retorna a integral entre os dois usando a regra do trapézio. Nota-se pela figura 5.2, que o sinal integrado do acelerômetro divergiu completamente do sinal potenciômetro. A fim de corrigir essas imprecisões, são necessários que os dados sejam filtrados.

Aplicou-se um filtro digital no sinal a ser integrado, tal como sugerido na figura 5.3. O filtro escolhido foi um Butterworth passa alta de ordem 5 (cinco) e frequência de corte em 20Hz. Esses valores foram escolhidos de forma empírica.

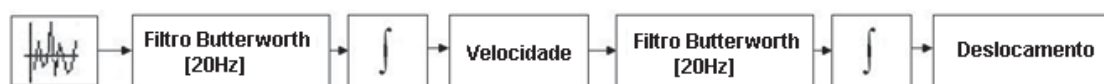


Figura 5.3 – Esquema para obtenção dos resultados (filtro Butterworth).

Após a filtragem dos dados, fez-se a integração e comparação dos mesmos com os dados do potenciômetro. A figura 5.4 ilustra esta comparação com os sensores excitados com uma senóide de 8Hz. No gráfico superior, plotou-se todo o tempo de

ensaio e no gráfico inferior retirou-se as amostras discrepantes, devido ao filtragem dos dados, de forma realçar a proximidade entre as curvas.

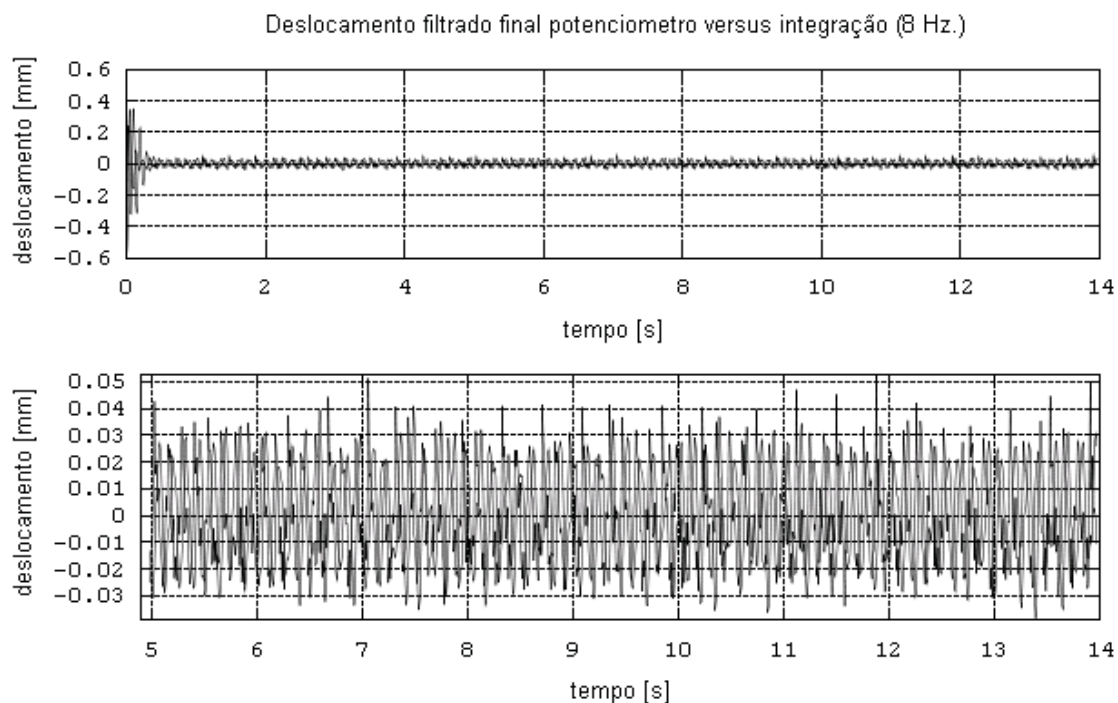


Figura 5.4 – Comparação sinal potenciômetro versus integração (8 Hz).

Para uma melhor análise dos dados, montou-se a tabela 2, onde se compara numericamente os dados do potenciômetro e acelerômetro duplo integrado.

Tabela 2 – Comparação (Potenciômetro e Sinal duplamente integrado do Acelerômetro)

Freq. (Hz)	Valor de pico (mm)		Valor RMS (mm)		Erro Médio Quadrático (mm)
	pot	integrado	pot	integrado	
8	0,025054	0,020889	0,017716	0,014770	0,027148
9	0,050889	0,040969	0,035984	0,028969	0,068637
10	0,066733	0,085016	0,047187	0,060115	0,118890

6 CONCLUSÕES

Este trabalho teve por objetivo avaliar as medições de acelerações adquiridas através do acelerômetro capacitivo, devido sua simplicidade e de seu baixo custo, tornando-se, assim muito útil e prático para as diversas aplicações de engenharia.

Como foi verificado, através de um experimento prático e viável, o sinal do acelerômetro, integrado até uma curva de deslocamento, comparado com o do potenciômetro apresentou boa precisão, validando-o como uma ferramenta precisa.

Durante o trabalho também se pode verificar os problemas existentes durante a integração de sinais digitalizados assim como técnicas para sua resolução, através do software GNU/Octave, que foi utilizado aqui como alternativa ao software Matlab, com a vantagem de que o GNU/Octave é um software de código livre protegido pela *GNU General Public License*, assim de grande valia para a área acadêmica.

REFERÊNCIAS

CAMPOS, filho, Frederico Ferreira - Algoritmos numéricos. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010, p 211-229.

CARNEIRO, F. M., (2003) Levantamento Bibliográfico das Tecnologias dos Acelerômetros Comerciais – Universidade Estaduais de Campinas, São Paulo.

FIGUEIREDO, L. J., GAFANIZ, A. R., LOPES, G. S., PEREIRA, R., (2007) “Aplicações de Acelerômetros” – Instituto Superior Técnico, Lisboa.

GNU Octave Documentation Version 3.6.1 February 2011.

LabVIEW Basics I, Course Manual. Course Software Version 4.0 January 2008.

LabVIEW Basics II, Course Manual. Course Software Version 4.0 January 2008.

LINCOLN, A., (2007) “Calculating Velocity or Displacement from Acceleration Time Histories”, em Prosig Application Notes, www.prosig.com

NERY, R. T. C., (2008) Desenvolvimento de uma Ferramenta Virtual para Análise de Vibração em Máquina Rotativa: Aplicação em uma Bancada Didática. - Universidade Federal do Pará, Pará.

Rao, Singiresu S. - Vibrações mecânicas/Singiresu S. Rao - 4.Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008, p 5-11.