

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CARLOS SAKITI KURIYAMA

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES E SUA RELAÇÃO COM O CARREGAMENTO DOS
TRANSFORMADORES**

CURITIBA

2022

CARLOS SAKITI KURIYAMA

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES E SUA RELAÇÃO COM O CARREGAMENTO DOS
TRANSFORMADORES**

Vibration analysis and its relationship with the loading of transformers

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.
Orientador: Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen.

CURITIBA

2022



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba



CARLOS SAKITI KURIYAMA

ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES E SUA RELAÇÃO COM O CARREGAMENTO DOS TRANSFORMADORES

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Automação E Sistemas De Energia.

Data de aprovação: 23 de Junho de 2022

Dr. Paulo Cicero Fritzen, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Eduardo Machado Dos Santos, Doutorado - Fundação Universidade Federal do Pampa - Unipampa (Unipampa)

Dr. Thiago De Paula Machado Bazzo, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 17/08/2022.

Dedico este trabalho à minha família,
pelos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui o meu agradecimento a todos que diretamente ou indiretamente tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho.

A Deus pela força dada a cada dia e sua misericórdia.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Cícero Fritzen, pelo apoio e orientação na execução deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia - PPGSE.

A minha família: mãe Myriam, pai Koso, esposa Elisangela Milek Kuriyama e filho Pedro Milek Kuriyama.

A minha amiga Lílian Mueller por acreditar em mim.

E aos que não foram citados, mas estão em meu coração.

“O livro é um mestre que fala,
mas que não responde”.
(PLATÃO, [s. d.])

RESUMO

Em um sistema elétrico de potência existe uma enorme quantidade de transformadores de distribuição. Eles estão instalados em uma área muito grande, e cada unidade é considerada de pequena potência. Estas características fazem com que tais equipamentos recebam apenas a manutenção corretiva. A presente dissertação busca diagnosticar a condição de carregamento dos transformadores por meio de sensores de vibração de baixo custo. Foram desenvolvidos dois sistemas para detectar as vibrações do transformador: O primeiro com um acelerômetro MPU6050, um microprocessador e um computador; O segundo com um microfone MAX9814, um osciloscópio USB e um computador. Os sensores utilizados tinham características como custo reduzido, instalação não invasiva e inexistência de contato com partes ativas do transformador. O experimento utilizou para os testes um transformador trifásico a seco de 400VA. O transformador foi submetido as seguintes condições de carregamento: a vazio, com cargas resistivas e com retificadores de meia onda. Realizou-se a observação e análises das vibrações no espectro de frequência. O ensaio destacou que as principais fontes de vibração são os enrolamentos e o núcleo, e estas se relacionam as cargas aplicadas ao transformador. Os sensores de vibrações reduzem os custos do monitoramento dos transformadores, e então tornam mais real a possibilidade da inclusão dos transformadores nos programas de manutenção preditiva.

Palavras-chave: transformadores elétricos; vibração; detectores; manutenção.

ABSTRACT

In a power electrical system there are a huge number of distribution transformers. They are installed over a very large area, and each unit is considered small power. These characteristics mean that such equipment receives only corrective maintenance. The present dissertation seeks to diagnose the loading condition of transformers by means of low-cost vibration sensors. Two systems were developed to detect transformer vibrations: the first with an MPU6050 accelerometer, a microprocessor and a computer; the second with a MAX9814 microphone, a USB oscilloscope and a computer. The sensors used had features such as low cost, non-invasive installation, and no contact with active parts of the transformer. The experiment used a 400VA three-phase dry-type transformer for the tests. The transformer was submitted to the following loading conditions: empty, with resistive loads and with half wave rectifiers. Observation and analysis of the vibrations in the frequency spectrum was performed. The test highlighted that the main sources of vibration are the windings and the core, and these are related to the loads applied to the transformer. Vibration sensors reduce the cost of monitoring transformers, and thus make the possibility of including transformers in predictive maintenance programs more real.

Keywords: electrical transformer; vibration; detectors; maintenance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Transformador de potência	18
Figura 2 - Transformador de distribuição	19
Figura 3 - Deslocamento, velocidade e aceleração como vetores girantes.....	29
Figura 4 - Diferença entre escala dBSPL e dBA	30
Figura 5 - Diferença entre pressão sonora e potência sonora.....	32
Figura 6 - Nível de pressão sonora.....	34
Figura 7 - Espectro de frequências.....	39
Figura 8 - Janelamento	40
Figura 9 - Sensibilidade dos acelerômetros.....	42
Figura 10 - Estrutura de um instrumento virtual.....	44
Figura 11 - Sensor Capacitivo MEMS	48
Figura 12 - Módulo sensor de vibração GY521	49
Figura 13 – Módulo GY-MAX9814 ou Sensor de vibração.....	50
Figura 14 - Microfone de eletreto	51
Figura 15 - Circuito Integrado MAX9814.....	52
Figura 16 - Osciloscópio USB 6022BE	55
Figura 17 - Exemplo de resultado na tela do osciloscópio	57
Figura 18 - Transformador de 400VA utilizado nos ensaios	59
Figura 19 - Carga resistiva utilizada nos ensaios	61
Figura 20 - Acelerômetro MPU6050	63
Figura 21 - Conexão entre Arduino e Sensor MPU6050	64
Figura 22 – Fluxograma para ler o acelerômetro e envia as informações ao computador	66
Figura 23 – Fluxograma para ler a entrada USB e grava arquivo dados no arquivo CSV.....	70
Figura 24 – Fluxograma para ler arquivos CSV e gerar gráficos do tipo FFT....	71
Figura 25 - Sinal de vibração em relação ao tempo e a frequência.....	78
Figura 26 - Gráficos de FFT, amplitude em função da frequência.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Nível médio de ruído dB(A) para transformadores a óleo	36
Tabela 2 - Critério de severidade de vibração em máquinas rotativas	36
Tabela 3 - Dimensionamento das cargas resistivas	61
Tabela 4 - Resultados de amplitude de vibração	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CIGRE	Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
ISO	International Organization for Standardization
NBR	Normas Brasileiras
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Aceleração
AC	Corrente alternada
A/D	Analógico para digital
ACG	Controle automático de ganho
ADC	Conversor analógico digital
BW	Largura de banda de sinal
CA	Corrente alternada
CAN	Controller Area Network
CC	Corrente contínua
CI	Circuito integrado
Coef.	Coefficiente
CSV	Comma separated values
dB	decibel
dB(A)	decibel auditivos
dB(SPL)	decibel pressão
dB(T)	decibel total
DFT	Transformada de Fourier em tempo discreto
DIV	Divisão
DPS	Degrees per second
DTH	Distorção harmônica total
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
EFT	Transientes rápidos
EMC	Compatibilidade eletromagnética
EMI	Interferência eletromagnética
ESD	Descargas eletrostáticas
Ex	Sinal de energia
FET	Transistor de efeito de campo
FFT	Transformada rápida de Fourier
f _N	Frequência de Nyquist
f _s	Frequência de amostragem
g	Aceleração da gravidade terrestre
GATE	Terminal de gatilho
GP	Grau de polimerização
I ² C	Inter integrated circuit
IP	Grau de proteção
Leq	Nível equivalente
Li	Nível de intensidade sonora
LORA	Long Range
LNA	Amplificador de baixo ruído
L _p	Nível de pressão
L _{pt}	Nível de pressão total
L _w	Nível de potência sonora
m	Massa
MEMS	Micro electro mechanical system
MICBIAS	Tensão de polarização do microfone
MODBUS	Protocolo de comunicação da Modicon
P	Pressão

PET	Poliéster
Px	Sinal de potência
RMS	Root mean square
S	Superfície
SDA	Dados Seriais
SEM	Susceptibilidade eletromagnética
SEP	Sistema elétrico de potência
SLC	Sinal de relógio serial
SNR	Relação sinal ruído
T	Temperatura ou intervalo de amostragem
TCP	Transmission Control Protocol
TEDS	Transdutor eletrônico com folha de dados
USB	Universal Serial Bus
V	Volume ou velocidade ou tensão
VA	Volt ampere
VCA	Tensão alternada
VCC	Tensão contínua
VGA	Amplificador de ganho variável
Vpp	Tensão de pico a pico
WIFI	Wireless field

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	Objetivos gerais.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Transformadores de potência	18
2.2	Tipos de transformadores	18
2.3	Transformadores de distribuição.....	19
2.3.1	Vida útil dos transformadores de distribuição	20
2.4	Manutenção de transformadores	21
2.5	Distorção harmônica elétrica	22
2.6	Ruído acústico em transformadores	23
2.7	Vibrações devido as forças eletromagnéticas nas bobinas.....	25
2.8	Vibrações devido as forças de magnetostricção no núcleo	26
2.9	Medição de vibração mecânica	27
2.10	Medição da vibração aerotransportada	29
2.10.1	Potência sonora e pressão sonora	31
2.10.2	Métodos para determinar a potência sonora	32
2.10.3	Análise do nível sonoro no domínio do tempo	34
2.11	Limites de vibração em transformadores.....	35
2.12	Análise das vibrações no domínio do tempo e da frequência	37
2.13	Transformada Rápida de Fourier (FFT).....	38
2.14	Sensores de vibração comerciais	41
2.15	Interferência eletromagnética.....	42
2.16	Instrumentação Virtual.....	43
2.17	Medição de vibração com microfones	45
2.17.1	Acoplamento CA	45
2.17.2	Amplificadores de sinal.....	45
2.17.3	Aterramento	45
2.17.4	Faixa dinâmica	46
2.17.5	Amostragem simultânea	46
2.17.6	A qualidade dos sinais em cabos longos	46

2.17.7	Outras considerações sobre os microfones	46
2.18	Medição de vibração com sensores MEMS	47
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	50
3.1	Detecção da vibração por meio de microfones	50
3.1.1	Microfone de eletreto	51
3.1.2	Circuito amplificador de som	52
3.1.3	Fontes de ruído indesejáveis	53
3.1.4	O osciloscópio analisador de sinais	54
3.1.5	Procedimento para medição do transformador com microfone	56
3.1.6	O transformador de testes	58
3.1.7	A carga utilizada nos ensaios	60
3.1.8	Condições aplicadas ao transformador para as medições	62
3.2	Detecção de vibração por meio de acelerômetro	62
3.2.1	A interface entre o sensor de aceleração e o computador	65
3.2.2	O programa que analisa as informações do sensor de aceleração	67
3.2.3	Descrição do primeiro programa Python	67
3.2.4	Descrição do segundo programa Python	68
3.2.5	Condições aplicadas ao transformador para as medições	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
4.1	Experimentos com o sensor de ruído baseado em microfone.	73
4.2	Experimentos com o sensor de ruído baseado em acelerômetro. ..	79
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
5.1	Sugestão para trabalhos futuros	82
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A - Gráficos em maior resolução	88

1 INTRODUÇÃO

Os transformadores de distribuição de energia elétrica existem aos milhares e estão instalados em uma grande área. Para as empresas do setor elétrico é um desafio enorme manter o controle sobre eles.

Ravaglio *et al.* (2004) afirma que a maioria dos transformadores de distribuição está na região rural, e 70% deles tem entre 3 a 15 kVA, portanto são de pequena potência. Dados da COPEL (2019) mostram que somente no estado do Paraná existem 483.951 transformadores de distribuição.

Conforme CIGRÉ-BRASIL (2013) a qualidade do fornecimento de energia elétrica depende em muito dos transformadores, uma falha em um deles pode ocasionar a interrupção do fornecimento de energia por longos períodos.

Os transformadores são os ativos de maior valor agregado em uma instalação de transmissão e distribuição, e as empresas de energia devem estabelecer uma política de manutenção para estes equipamentos.

Os grandes transformadores das subestações de energia elétrica possuem um alto valor agregado, e por isto têm o monitoramento contínuo de grandezas elétricas, físicas e químicas. Para Fonseca (2014) estes ativos alcançam 30 anos de vida útil, esta durabilidade corresponde principalmente ao tempo de depreciação dos materiais isolantes imersos em óleo no transformador.

A vida útil de um transformador de distribuição é definida aqui, e em outros estudos, como o período de tempo entre o início de operação até o momento de sua retirada de operação por falha ou defeito. Considerando esta definição Filho (2013) afirma que a vida média dos transformadores de distribuição é de 10,4 anos, e Ravaglio *et al.* (2004) afirma que 50% deles falham em até 9 anos, e apenas 1% deles passam dos 27 anos de operação contínua.

Fonseca (2014) salienta que a vida útil do transformador está relacionada a fatores como: a qualidade do produto, o desgaste natural, a manutenção recebida e as condições de operação e instalação.

Um dos motivos da grande diferença no tempo de vida útil entre os transformadores de distribuição e os transformadores das subestações é a manutenção recebida por estes, mas não por aqueles.

Quando um transformador de distribuição falha ele é substituído. Este é considerado o fim de sua vida útil no local em que estava trabalhando, não

importando se será recuperado posteriormente. Fica entendido que este transformador não recebeu nenhum tipo de manutenção durante sua vida útil e que o sistema elétrico de potência recebeu uma manutenção corretiva no momento em que o transformador foi substituído.

A escolha do modelo de manutenção é principalmente uma questão de custo e benefício. Os custos se dividem entre: instrumentalização, monitoramento, equipes de manutenção e a manutenção propriamente dita. Os benefícios são: o aumento da qualidade no fornecimento de energia elétrica e o aumento da vida útil dos transformadores.

Se os transformadores de distribuição não recebem manutenção por questões financeiras, utilizar sensores de vibração para monitorar transformadores pode reduzir custos e contribuir para reverter esta realidade.

Relacionar a vibração ao estado de carregamento dos transformadores abre caminho para o desenvolvimento não só de sensores, mas sistemas de análise de vibração e diagnóstico para transformadores. Mais uma alternativa para se somar a instrumentação tradicional dos transformadores.

1.1 Justificativa

O fato de se esperar dos transformadores de distribuição apenas 9 anos de trabalho ao invés de 30 anos registrados nos transformadores das subestações motiva esta pesquisa.

Sensores de vibração não exigem instalação invasiva nem contato com partes energizadas, mas ainda são pouco utilizados no monitoramento de transformadores. Não se encontram referências ao monitoramento contínuo de vibrações em guias de manutenção de transformadores de potência, como o da CIGRÉ-BRASIL (2013).

Relacionar a condição de carregamento dos transformadores com as suas vibrações torna os sensores de vibração uma alternativa técnica e econômica para monitorar os transformadores.

Reduzir o custo de monitoramento é caminhar na direção de viabilizar a inclusão dos transformadores de distribuição nos programas de manutenção preditiva.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivos gerais

Este trabalho tem como objetivos: desenvolver um sistema com sensores de vibrações para monitorar os transformadores de energia elétrica; determinar se existe uma relação entre estas vibrações e as cargas aplicadas ao transformador; criar um sistema de instrumentação de baixo custo para os transformadores de distribuição.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral faz-se necessário executar os seguintes passos:

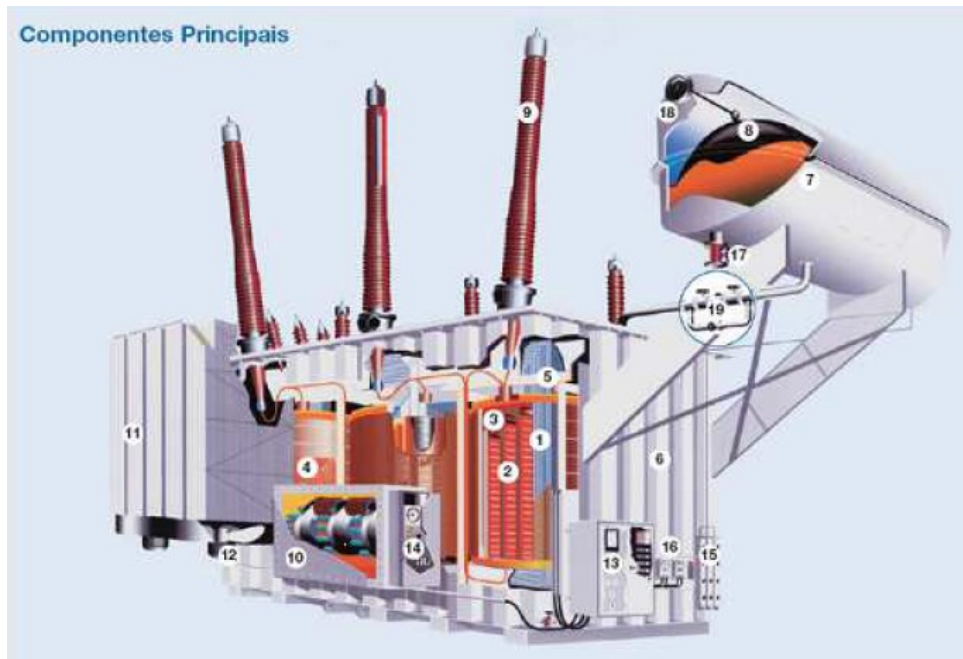
- a) Realizar a revisão da literatura acerca do tema;
- b) Obter um transformador trifásico e diversas cargas para os testes;
- c) Desenvolver um sistema para captar as vibrações geradas no transformador a partir de sensores de som e sensores de aceleração;
- d) Determinar se existe relação entre os pontos de fixação dos sensores e a sensibilidade em relação as vibrações das fases;
- e) Coletar os dados de vibração em relação as diversas condições de operação do transformador;
- f) Desenvolver um programa para diagnosticar e armazenar informações sobre os resultados da análise de vibração realizada;
- g) Analisar os resultados e conclusões obtidos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transformadores de potência

Os transformadores são equipamentos de fundamental importância para o Sistema Elétrico de Potência (SEP) e têm um alto valor agregado em uma instalação de transmissão e distribuição (Figura 1). Uma falha em um desses equipamentos pode ocasionar interrupções de fornecimento de energia por períodos prolongados e conseqüentemente causar prejuízos aos fornecedores e consumidores de energia. Dada esta relevância, as empresas do ramo de energia estabelecem políticas de manutenção voltadas para a confiabilidade e disponibilidade destes equipamentos, conforme lembra CIGRÉ-BRASIL (2013).

Figura 1 - Transformador de potência



Fonte: (CIGRE-BRASIL, 2013)

2.2 Tipos de transformadores

De acordo com Mota (2017), os transformadores são classificados segundo vários critérios como: finalidade, tipo, material do núcleo e número de fases. O critério de classificação mais simples é o número de fases, podendo ser monofásicos ou trifásicos.

Em termos de construção há dois formatos predominantes: *core* e *shell*. Nos transformadores do tipo *core* os enrolamentos rodeiam o núcleo e nos equipamentos do tipo *shell* os enrolamentos são rodeados pelo núcleo.

Outro critério de classificação possível é o fluido de arrefecimento que pode ser: líquido, gasoso ou inexistente. Os transformadores sem fluido de arrefecimento também são conhecidos como do tipo “a seco” e geralmente têm potência menor que os transformadores a óleo.

Apesar de imperfeita, a indústria classifica os transformadores pela sua aplicação. Eles podem ser de potência, de distribuição ou reatores. Algumas empresas definem os transformadores de distribuição como aqueles que possuem potência inferior a 2,5 MVA. Esta classificação é mais ambígua para os reatores, visto que não são transformadores.

2.3 Transformadores de distribuição

Basicamente os transformadores de energia elétrica são muito semelhantes em seu princípio de funcionamento, mas muito diferentes em suas aplicações. Os transformadores de distribuição formam um grupo especial de aplicação, e sobre este grupo recai a atenção deste trabalho.

Figura 2 - Transformador de distribuição



Fonte: (WEG, 2019)

A Companhia Paranaense de Energia (COPEL) tem em seu banco de dados 438.951 transformadores de distribuição registrados, totalizando uma potência

instalada de 13694,5 MVA, e conseqüentemente indicando que a potência média dos transformadores é de 31,2 kVA, conforme pode ser visto em COPEL (2019).

Os transformadores de distribuição, como o da Figura 2, têm algumas características em comum: baixa potência, ausência de refrigeração ativa, instalados em locais distantes e muitos estão na zona rural.

2.3.1 Vida útil dos transformadores de distribuição

É uma preocupação das concessionárias de distribuição de energia elétrica manter o controle de manutenção sobre os transformadores de distribuição instalados.

Para a manutenção identificar os candidatos a substituição ou reabilitação, três informações são importantes: a idade de cada transformador, a vida útil dos transformadores de uma certa categoria e o tempo de vida restante de cada um. Isto tudo pode ser obtido no banco de dados da empresa de energia elétrica.

Segundo CIGRÉ-BRASIL (2013) um dos critérios que define o fim da vida útil de um transformador é a degradação de sua isolação sólida.

O Grau de Polimerização (GP) representa o número médio de anéis de glicose existentes na cadeia celulósica e já foi demonstrada a sua relação com a resistência à tração do papel isolante.

O GP entre 350 e 200 indica que a resistência mecânica do papel está reduzida à metade do valor inicial e o GP abaixo de 200 indica que o papel está quebradiço e aceita-se como fim de vida útil da isolação sólida do transformador.

Os três principais fatores responsáveis pela degradação do papel são a temperatura, o oxigênio e a umidade. Especialistas afirmam que um aumento de temperatura média de operação do transformador entre 5,5°C a 8°C pode reduzir a vida útil do transformador pela metade.

A vida útil de um transformador de distribuição varia muito e depende de fatores como: projeto, qualidade de montagem, materiais utilizados, manutenção fornecida, condições de operação e local da instalação.

Para Filho e Esquerre (2013), o tempo de vida útil de um transformador é definido como: o período desde a instalação até o momento da primeira falha e conseqüente retirada de operação, não importando se após isto o transformador será recuperado ou sucateado. E também afirmam que o tempo de vida útil de certo

grupo de equipamentos se refere a sobrevivência estatística de 50% destes equipamentos.

Desta forma para Filho e Esquerre (2013), no estado da Bahia, a vida média dos transformadores é de 10,4 anos.

Para Filippo, Ávila e Queiroz (2009), em estudos realizados na Concessionária de Energia Bandeirantes, a vida útil dos transformadores é de 15 anos de operação.

Para Ravaglio, Schaefer e Gamboa (2003) na COPEL a vida útil é de 12,4 anos para 50% dos transformadores, 15% sobrevive a 20 anos e raros chegam a 40 anos.

Para Ravaglio et al (2004) na COPEL a vida útil dos transformadores é de 14,4 anos.

Os transformadores de subestações têm um tempo de vida útil bem maior.

Para *United States Department Of The Interior - Bureau of Reclamation* (2003), nos Estados Unidos a vida útil dos transformadores é de 40 anos.

Martins (2009) cita outras perspectivas da vida útil dos transformadores. Para cálculos de depreciação financeira eles duram de 30 a 40 anos. Para os transformadores que operam continuamente em carga nominal duram 22 anos, e para transformadores que operam continuamente com carga abaixo da nominal a vida útil pode alcançar 55 anos. Martins (2009) também cita casos de transformadores operando a mais de 90 anos.

2.4 Manutenção de transformadores

Geralmente os transformadores são equipamentos robustos de alta confiabilidade e exigem pouca manutenção. Estabelecer uma estratégia de manutenção significa acompanhar o nível de confiabilidade e a vida útil restante do equipamento, sempre mantendo um custo mínimo de operação e manutenção.

Fonseca (2014) cita que os tipos ou estratégias de manutenção mais utilizados são: a manutenção preventiva baseada em intervalos fixos de tempo, a manutenção preditiva baseada em monitoramento das condições do equipamento e a manutenção corretiva que aguarda o equipamento apresentar alguma falha.

Além destas, existem outros tipos de manutenção: a manutenção centrada na confiabilidade que considera a importância sistêmica, a manutenção produtiva

total que busca a qualidade do sistema todo, e a manutenção detectiva que utiliza sistemas de proteção do equipamento para indiretamente detectar falhas ocultas,

Geralmente a estratégia de manutenção adotada depende da relação entre o custo e o benefício. A concessionária de energia elétrica tem com custos: as penalizações pelas indisponibilidades do fornecimento de energia, as equipes de manutenção e as intervenções realizadas. Os benefícios são a remuneração com base na disponibilidade dos equipamentos e o aumento da vida útil dos mesmos.

As concessionárias de energia elétrica geralmente a adotam a manutenção corretiva para os transformadores de distribuição, porque são de pequena potência e estão instalados de forma distribuída em uma grande área.

Os transformadores devem ser monitorados para receberem a devida manutenção. As ações de monitoramento podem ser realizadas em grandes intervalos de tempo ou de forma contínua.

Dispositivos eletrônicos de supervisão e controle podem registrar o desempenho e diagnosticar as condições do equipamento de forma contínua. Equipes de campo podem fazer a verificação visual dos equipamentos frequentemente. Até mesmo a população pode, por meio dos canais de relacionamento com o consumidor, relatar falhas no sistema.

2.5 Distorção harmônica elétrica

O próprio transformador e suas cargas geram distorções harmônicas na rede de energia elétrica, e estas distorções harmônicas na rede de energia elétrica são responsáveis pela geração de vibrações mecânicas no transformador.

Uma distorção de forma de onda é dita harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental. Neste caso o espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental, afirma Pomilio (2020).

Esse tipo de deformação ocorre em dispositivos que apresentam uma relação não linear entre tensão e corrente, como os transformadores cujos núcleos ferromagnéticos estão sujeitos à saturação. Quando circula apenas a corrente de magnetização do núcleo aparecem harmônicas ímpares com amplitudes decrescentes na rede elétrica.

Quando uma carga linear é aplicada ao transformador a corrente de magnetização se torna pequena em relação a corrente da carga, e a distorção harmônica causada pelo transformador se torna imperceptível.

Quando cargas não lineares, como retificadores eletrônicos, são utilizadas, harmônicos de ordem par e ímpar são gerados. Isto ocorre porque a soma destes harmônicos resulta na forma de onda gerada pela carga não linear.

A presença de harmônicos na rede onde está o transformador aumenta o nível do ruído produzido por ele, afirma Mota (2017). Isto ocorre devido ao aumento do número de harmônicos da corrente e conseqüentemente do aumento das vibrações ressonantes nas partes estruturais do transformador (núcleo, enrolamentos, tanque, etc.) em várias frequências.

Os transformadores de distribuição dificilmente atingem o ponto de saturação na sua curva de histerese do núcleo. Isto só ocorreria se: a tensão de linha aumentar além do valor nominal, ou a frequência da rede diminuir, ou no breve período de energização do transformador. Mas quando a carga impõe a presença de corrente contínua no transformador, ocorre um aumento do ruído devido ao aumento da área do ciclo de histerese e a perda da sua simetria.

2.6 Ruído acústico em transformadores

A vibração estrutural em transformadores pode ter três origens: no núcleo devido as forças de magnetostricção, nos enrolamentos por conta das forças eletromagnéticas, e no sistema de refrigeração ativa.

Como a frequência do sistema elétrico de potência no Brasil é de 60Hz, a frequência fundamental de ruído estrutural nos transformadores é de 120Hz. Esta frequência também é chamada de primeira harmônica.

As vibrações que ocorrem em frequências múltiplas de 120Hz, são a segunda harmônica (240Hz), a terceira harmônica (360Hz), a quarta harmônica (480Hz) e assim por diante.

Conforme UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR - BUREAU OF RECLAMATION (2003), já existem vários instrumentos disponíveis para a análise de vibração em transformadores. A análise de vibração é apenas uma das ferramentas para ajudar a determinar a condição do transformador e por si só não pode prever muitas falhas.

A origem da vibração pode ter muitas fontes que não estão diretamente relacionadas com o carregamento do transformador, e a avaliação da vibração deve considerar estas possibilidades.

A vibração pode ser diagnosticada erroneamente como um problema dentro do tanque, todavia a origem da vibração pode estar do lado de fora, no painel de controle, onde pode existir uma tampa, porta ou parafuso solto.

Outras fontes de vibração comuns são segmentos do núcleo do transformador soltos, enrolamentos soltos, rolamentos em bombas ou ventiladores de resfriamento.

Cada transformador é único e não existem dois iguais, portanto vibrações do transformador em bom estado devem ser registradas e armazenadas como referências para comparações de linha de base em testes futuros.

Transformadores em bom estado tem a maior amplitude de sinal em 120Hz, o sinal de 240Hz não deve exceder o de 120Hz e nenhum outro sinal deve exceder 20% da amplitude do sinal de 120Hz.

Filippin et al.(2003) dispõem as fontes de vibrações da maior para a menor: núcleo, sistema de ventilação, chaveamento, efeito corona e outros. Mostram que o ruído acústico dos transformadores no local da instalação pode ser reduzido por absorvedores de ruídos instalados no tanque, ou apoiando o núcleo do transformador sobre amortecedores, sendo que o normal é o núcleo do transformador ficar apoiado diretamente na carcaça.

A pesquisa de Mercado Curi (2008) utiliza absorvedores de ruído e amortecedores entre o núcleo e o tanque dos transformadores para adequar o ruído acústico as legislações ambientais. O estudo destaca que o empilhamento das lâminas do núcleo em múltiplos degraus reduz o nível de ruído, apesar de aumentar os custos de montagem. Mercado Curi (2008) relata que a legislação para ruídos tonais é mais rigorosa que a legislação para ruídos de banda larga. O ruído dos transformadores é mono tônico e persiste pelas 24 horas do dia, por este motivo ele irrita mais do que o ruído do tráfego de veículos com um largo espectro de frequência e várias intensidades conforme a hora do dia.

Conforme um caso narrado pela fabricante de equipamentos de medição Fluke (2003), muitas vezes o ruído em transformadores pode indicar defeitos no transformador ou na instalação. O terceiro harmônico na rede indica cargas monofásicas, o quinto e sétimo harmônicos na rede indicam retificadores trifásicos

com corrente simétrica ao redor do zero, e os harmônicos pares indicam corrente contínua no secundário do transformador. A corrente contínua tende a saturar o núcleo do transformador e gerar uma grande vibração.

Hostin (2021) aceita o ruído dos transformadores como uma característica intrínseca, e mostra que o ruído pode ser minimizado com o reposicionamento dos elementos e o desacoplamento mecânico entre as partes.

O trabalho de Azevedo (2014) relaciona a vibração dos transformadores com a tensão e a corrente, aplicados ao mesmo. Realiza experimentos em transformadores de 1kVA e 5kVA com sensores piezoelétricos e acelerômetro. No trabalho vemos que as forças produzidas pela magnetostricção do núcleo e as forças produzidas pelo eletromagnetismo das bobinas fazem o transformador vibrar. O trabalho mostra que a deformação no núcleo e nas bobinas é máxima quando a corrente elétrica é máxima, não importando o sentido da corrente. Portanto, uma corrente alternada de 60 Hz faz o transformador vibra em 120 Hz, o dobro da frequência da rede elétrica.

2.7 Vibrações devido as forças eletromagnéticas nas bobinas

O artigo de Maschio et al. (2020) e a dissertação de Rosentino Junior (2010) mostram que deformações nos enrolamentos dos transformadores podem ocorrer devido a forças axiais e radiais oriundas da interação do campo magnético com as correntes de curto-circuito das bobinas.

Eles partem da equação da densidade de força mostrada na eq.(1) que é a expressão das forças de Lorentz. Onde \vec{f} representa a densidade volumétrica de força magnética (N/m³), \vec{j} é a densidade superficial de corrente (A/m²) e \vec{B} é a densidade de fluxo magnético de dispersão (T).

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (1)$$

A densidade de fluxo magnético de dispersão no ponto médio entre os enrolamentos pode ser determinada pela eq.(2), na qual B_a é o fluxo magnético de dispersão axial (T), n é o número de espiras do enrolamento, I_n é a corrente nominal do enrolamento (A), h a altura do enrolamento (m) e μ_0 a permeabilidade do vácuo ($4\pi 10^{-7}$).

$$B_a = \frac{\sqrt{2} \times 4\pi \times n \times I_n}{10^7 \times h} = \frac{\sqrt{2} \times \mu_o \times n \times I_n}{h} \quad (2)$$

Como a força magneto motriz total ($n \times I_n$) de cada enrolamento encontra-se imersa em uma densidade de fluxo médio ($Ba/2$), é possível determinar a força radial e axial, mediante as expressões (3) e (4).

$$F_r = \frac{2 \times \pi^2 (n \times I_n)^2 \times D_m \times 10^{-7}}{h} \quad (3)$$

$$F_a = \frac{2 \times \pi^2 \times (n \times I_n)^2 \times D_m \times 10^{-7}}{h^2} \times \left(d_0 + \frac{d_i + d_e}{3} \right) \quad (4)$$

As equações desenvolvidas no artigo de Maschio et al. (2020) e na dissertação de Rosentino Junior (2010) demonstram que o campo magnético de dispersão axial interage com a corrente do enrolamento originando uma força radial, e o campo de dispersão radial interage com a corrente originando uma força axial.

Então dois fatos se destacam: A corrente em um enrolamento circula no mesmo sentido a cada volta que dá no núcleo, portanto, os condutores ficam sujeitos a forças de atração entre si, causando uma compressão da bobina na direção radial e na direção axial. Assim com a corrente que circula na bobina primária e na bobina secundária tem sentidos opostos, conforme a Lei de Lens, e criam uma força de expansão na direção axial.

Com isto a cada semiciclo da corrente as bobinas se encolhem no sentido radial e se expandem no sentido axial, causando uma vibração fundamental de 120Hz.

2.8 Vibrações devido as forças de magnetostricção no núcleo

Alguns autores, como Mota (2017), centralizam sua pesquisa na maior fonte de ruído que é a magnetostricção. Mota estuda desde a classificação dos materiais quanto ao comportamento magnético, os ensaios para determinação dos níveis de ruído, a influência dos processos de conformação e corte das chapas e as análises metalográficas.

Quando um campo magnético é aplicado a um corpo de prova, afirma Mota, verifica-se uma deformação anisotrópica suplementar que o alonga ou comprime. O fenômeno é conhecido como magnetostricção de Joule. A ele está associada outra deformação designada por magnetostricção transversa, com a direção ortogonal ao campo e com sinal oposto e metade da amplitude.

Na presença de campos magnéticos reduzidos a magnetostricção de Joule e a transversa não fazem variar o volume do corpo de prova, contudo na presença de campos elevados verifica-se uma pequena variação de volume.

A magnetostricção causa nos transformadores e máquinas rotativas ruídos, vibrações, poluição sonora, perda de potência e maior desgaste.

2.9 Medição de vibração mecânica

Algumas características dos movimentos harmônicos são descritas a seguir:

- a) Frequência é o número de vezes em que a vibração se repete em um segundo ou o número de ciclos por segundo. A unidade é o Hertz;
- b) Comprimento de onda é a distância ocupada no espaço por um ciclo da onda, usualmente designado pela letra lambda (λ);
- c) Amplitude é a altura da onda e está relacionada com a quantidade de energia transmitida pela onda;
- d) Ângulo de fase. Se forem consideradas duas ondas de mesma frequência, porém com uma diferença de tempo entre os picos dessas ondas, esta diferença será denominada de fase;
- e) Forma de onda. É a representação visual do valor instantâneo exibido em relação ao tempo.

Conforme Rao (2008) e Mercuri, Martins e Trautmann (2011), os movimentos oscilatórios podem ser periódicos como um pêndulo simples ou irregulares como o movimento do solo durante um terremoto.

O tipo mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico senoidal simples de uma massa. A posição da massa é determinada pela equação (5) e a unidade de medida do deslocamento pode ser o metro (m).

$$Posição = X_0 \times \sin(\omega \times t) \quad (5)$$

A velocidade da massa é determinada por $V=dx/dt$, dada pela equação (6). À medida que a massa vibratória se move a sua velocidade se altera. A velocidade é zero quando há uma mudança na direção e torna-se máxima quando a massa se encontra na posição neutra.

O valor RMS (*root mean square*) indica o valor eficaz de uma função periódica. O valor da vibração medido em RMS é um dos mais relevantes por considerar o histórico no tempo da onda e o seu nível está relacionado com a energia contida na onda, ou seja, a capacidade destrutiva da vibração.

A velocidade de vibração RMS foi escolhido pela Organização Internacional de Padrões (ISO) para estabelecer os limites aceitáveis de vibração. Na equação (6) a unidade de medida da velocidade é (m/s).

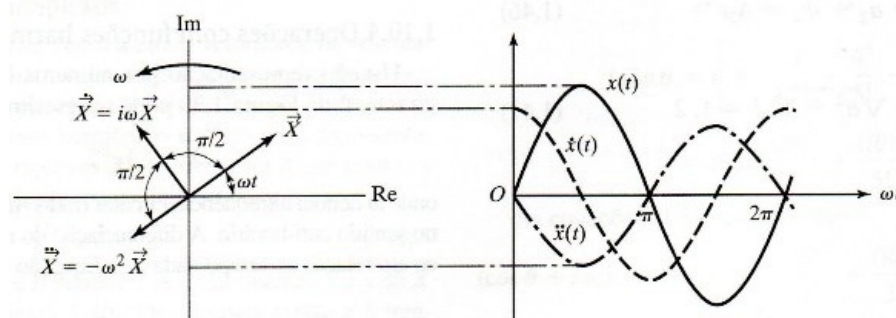
$$Velocidade = X_0 \times \omega \times \cos(\omega \times t) \quad (6)$$

A aceleração da massa é determinada por $A=dv/dt$, dada pela Equação (7). Conforme a Segunda Lei de Newton, a aceleração da massa vibratória é a relação entre a força aplicada sobre o corpo e a sua massa ou a variação da velocidade em um instante de tempo. A unidade de medida da aceleração no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o metro por segundo ao quadrado (m/s^2). Porém, é comum comparar a aceleração dos corpos com a constante gravitacional “g”, onde $1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$.

$$Aceleração = -X_0 \times \omega^2 \times \sin(\omega \times t) \quad (7)$$

A Figura 3 mostra vetores girantes representando: o deslocamento, a velocidade e a aceleração.

Figura 3 - Deslocamento, velocidade e aceleração como vetores girantes



Fonte:(RAO, 2008)

2.10 Medição da vibração aerotransportada

O som, ou vibração aerotransportada, se referem a vibração de um corpo rígido transferida para o ar ao seu redor.

Na medição do som a maior amplitude é a mais importante, pois o seu efeito prevalece na audição, ficando os outros valores como sons secundários de fundo.

Conforme Mercado Curi (2008) a medição da pressão do som geralmente é mostrada no domínio da frequência de três diferentes maneiras: dB(SPL), dB(A) e dB(T).

Nível de pressão sonora, dB(SPL). É o nível de pressão física em uma frequência, definido pela razão indicada na eq.(8).

Onde a pressão de referência é o limiar de audibilidade, $P_{ref} = 2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$.

$$dB_{SPL} = 20 \log \left(\frac{\text{Pressão}}{P_{ref}} \right) \quad (8)$$

Nível de pressão auditiva, dB(A). É uma grandeza psicoacústica chamada de nível de audibilidade e caracterizada pela curva de Fletcher e Munson Bistafa.

Pode ser calculado por faixas parciais de frequência (oitavas), considerando os valores de dB(SPL) e diminuindo uma quantidade constante por intervalo de faixa de frequência. Alguns aparelhos de medição realizam estes cálculos e mostram os valores diretamente em dB(A).

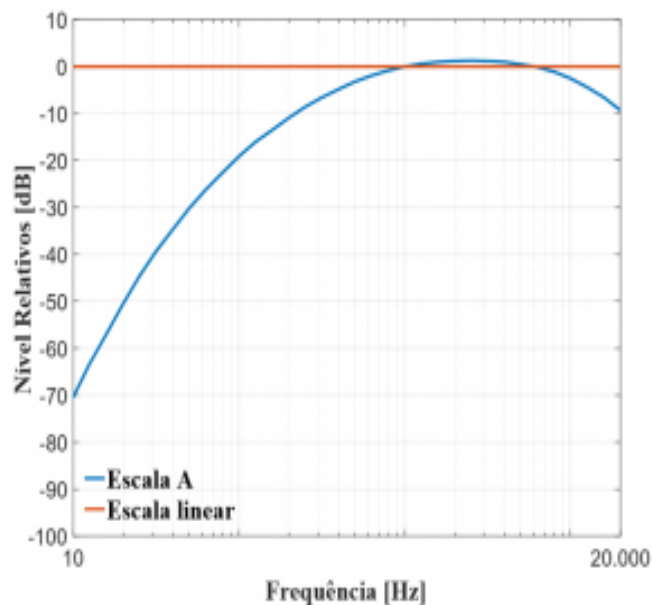
O microfone consegue captar as variações de pressão acústica no ambiente em todas as faixas de frequência desejadas, e então transformá-las em sinais elétricos para serem analisadas pelos instrumentos eletrônicos. O ouvido humano não é igualmente sensível em todas as frequências de som, ele é mais sensível à faixa entre 2000 Hz e 5000 Hz, e menos sensível para as frequências extremamente baixas e altas, conforme a Figura 4.

Nível de pressão global dB(T) ou Lpt. É a soma de todas as pressões em uma banda larga de frequências, conforme a equação (9).

Devido a esse fato criou-se a escala dB(A) que levam em consideração essas influências, modelando o comportamento do ouvido humano, e permitindo estimar a sensação no ouvido humano a um certo nível da pressão sonora.

Por exemplo, para um som de 70 dB em 1000 Hz o ouvido humano percebe integralmente os 70 dB(A), entretanto se este nível está em 50 Hz o ouvido humano percebe apenas 40 dBA.

Figura 4 - Diferença entre escala dB SPL e dBA



Fonte: (LAEP, 2022)

Nível de pressão global dB(T) ou Lpt. É a soma de todas as pressões em uma banda larga de frequências, conforme a equação (9).

$$L_{pt} = 10 \log \left(\sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{pi}}{10}\right)} \right) \quad (9)$$

Outros parâmetros do som são o nível de potência sonora (L_w) e o nível de intensidade sonora (L_i) dados pela equação (10). A diferença entre elas é que o nível de potência é escalar e o nível de intensidade é vetorial.

$$dB = 10 \log \left(\frac{W}{W_{ref}} \right) \quad (10)$$

Onde dB utiliza como potência ou intensidade de referência $W_{ref} = 10^{-2}$ W acústicos/m² ou N/ms no (SI).

2.10.1 Potência sonora e pressão sonora

Segundo a Brüel & Kjær (2022), a potência sonora é a energia sonora aerotransportada irradiada por uma fonte de som por unidade de tempo, e a pressão sonora é o resultado de fontes sonoras que irradiam energia sonora em um ambiente acústico específico e medida em um local também específico. Desta forma a potência sonora é a causa e a pressão sonora é o efeito.

Ambas são expressas em decibéis, dando a impressão de que são iguais, mas cada uma tem um valor de referência diferente.

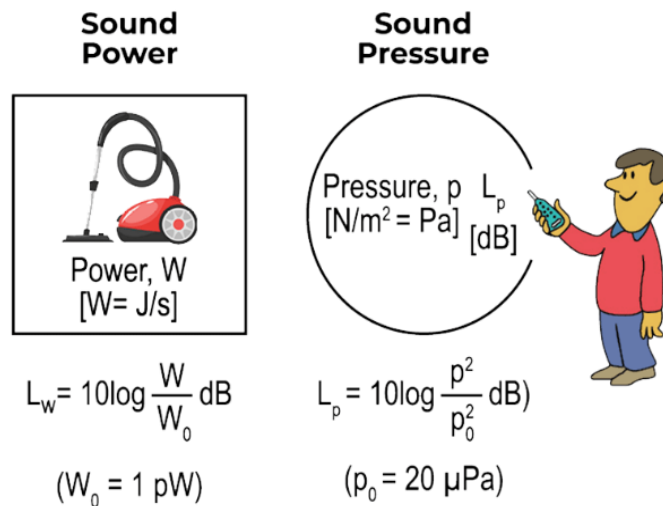
O valor de referência para o nível de pressão sonora é 20 μ Pa ou 20 μ N/m², e para o nível de potência sonora é 1 pW.

A Figura 5 mostra que os valores de referência foram escolhidos para que em um campo livre perfeito, a uma distância em que a área de propagação seja de 1 m², o nível de pressão sonora e o nível de potência sonora sejam iguais.

Conhecer o nível de potência sonora dos dispositivos permite a comparação dos mesmos, sendo desnecessário ter conhecimento do ambiente em que foram testados ou da distância em que as medições foram feitas.

Por isto os níveis de potência sonora servem para a rotulagem de produtos e para especificar limites de emissão de ruído dos dispositivos.

Figura 5 - Diferença entre pressão sonora e potência sonora



Fonte:(BRÜEL & KJÆR, 2022)

Como os níveis de potência sonora são independentes do ambiente acústico e do local de medição, eles permitem calcular as emissões do nível de pressão sonora de um dispositivo para locais específicos em um ambiente acústico conhecido.

Desta forma um consultor acústico pode usar o nível de potência sonora de uma máquina instalada em um local específico para calcular o nível de pressão sonora resultante em uma residência próxima, e então determinar se o ruído resultante na residência atende a regulamentação ambiental.

2.10.2 Métodos para determinar a potência sonora

Existem dois métodos para determinar a potência sonora a partir de medições de pressão sonora: o método direto e o método de comparação.

O método direto é mais usado em ambientes de campo livre, mas pode ser usado em um campo sonoro reverberante. Uma superfície imaginária envolvendo o dispositivo em teste é definida e as medições de pressão sonora são feitas em várias posições na superfície. Essas medições de nível de pressão sonora são calculadas espacialmente e corrigidas para a influência do ambiente acústico, como ruído de fundo.

Assim que o nível médio de pressão sonora for determinado para a superfície de medição, o nível de potência sonora pode ser calculado pela equação

(11), simplesmente ajustando a relação entre a área da superfície e a área da superfície de referência de 1 m². É aqui que o nível de potência sonora é igual ao nível de pressão sonora.

$$L_w = L_p + 10 \log \frac{S}{S_0} \quad (11)$$

O método de comparação só é usado em campos sonoros reverberantes. Neste método uma fonte de som de referência com um nível de potência sonora conhecida e estável é usada.

As medições de pressão sonora são feitas na sala de teste com a fonte sonora de referência e com o dispositivo em teste. O nível de potência sonora do dispositivo em teste pode então ser calculado comparando os níveis de pressão sonora medidos com cada fonte sonora, conforme as equações (12) e (13).

$$L_w - L_{w\ ref} = L_p - L_{p\ ref} \quad (12)$$

$$L_w = L_p + (L_{w\ ref} - L_{p\ ref}) \quad (13)$$

A determinação da potência sonora a partir de medições de intensidade sonora segue um processo semelhante ao método direto com medições de pressão sonora. Mas a intensidade sonora é uma quantidade vetorial com média de tempo, muito mais tolerante com ruídos de fundo e reverberação do que as medições baseadas na pressão sonora. Isso a torna particularmente adequada para medições *in situ*.

Para determinar a potência sonora existem os “padrões básicos” e os “códigos de teste de ruído”.

Os padrões básicos especificam métodos para determinar a potência sonora para todos os tipos de produtos e fontes de ruído em uma variedade de ambientes acústicos e níveis de precisão. São conselhos gerais sobre as condições de operação e montagem do dispositivo em teste, como a ISO3740:2019 - Determinação dos níveis de potência sonora de fontes de ruído.

Os códigos de teste de ruído são específicos para determinados tipos de fontes de ruído e especificam requisitos detalhados para as condições de montagem e operação.

2.10.3 Análise do nível sonoro no domínio do tempo

O nível sonoro no domínio do tempo é a medição mais básica do som, conforme explica o guia da National Instruments (2016).

A raiz quadrada média (RMS) mede a energia da variação de sinais do som.

Calcula-se o nível RMS elevando o sinal ao quadrado, tirando a média em um período de tempo e obtendo a raiz quadrada do resultado.

$$Nível_{RMS} = \sqrt{\frac{X_0^2 + X_1^2 + \dots + X_n^2}{n}} \quad (14)$$

Um problema com medições baseadas em média é que o resultado da medição se modifica com base na duração escolhida para o intervalo médio.

Figura 6 - Nível de pressão sonora



Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2016)

Por isso medições de nível pressão RMS de som tem intervalos padrão como a média linear e a média exponencial.

Na média linear ou nível de som contínuo equivalente (Leq) todos os pontos são calculados igualmente em um período de tempo finito, Figura 6. Ela é utilizada para medir longos prazos exposição em um determinado ambiente, por exemplo a medição de ruído de tráfego em uma intersecção por uma hora.

Calcula-se o Leq integrando o valor quadrado do sinal em um intervalo de tempo fixo e dividindo pelo intervalo de tempo. O resultado representa um som estável imaginário que tem a mesma energia que o som sob medição.

A média exponencial é um processo de media contínua que pondera os dados atuais e antigos de modo diferente. O peso dos dados antigos em relação aos dados atuais depende da constante de tempo exponencial, que define a inclinação de uma janela de decaimento de forma exponencial.

O modo médio exponencial suporta as seguintes constantes de tempo padrão:

- a) Lento: Usa uma constante de tempo de 1.000 ms. É útil para monitorar os níveis de pressão do som de sinais que variam lentamente.
- b) Rápido: Usa uma constante de tempo de 125 ms.
- c) Impulso: Usa uma constante de tempo de 35ms se o sinal estiver subindo, e 1.500ms se o sinal estiver caindo. É útil para monitorar subidas repentinas no nível da pressão do som, durante impactos ou pancadas estrondosas.

2.11 Limites de vibração em transformadores

Os transformadores de energia elétrica em funcionamento emitem ruídos que são medidos em testes prescritos pela norma NBR 7277. O ruído é considerado uma característica operacional dos transformadores.

Os valores medidos devem atender os limites especificados em normas técnicas das concessionárias de energia elétrica e nas normas ambientais que regulamentam o nível de ruído do local de instalação, como a NBR 10151.

A Tabela 1 mostra que para cada faixa de potência dos transformadores existe um certo nível de vibração considerado como normal.

Tabela 1 - Nível médio de ruído dB(A) para transformadores a óleo

Nível médio de ruído dB(A)	Potência nominal do transformador equivalente com dois enrolamentos kVA
48	1-50
51	51-100
55	101-300
56	301-500

Fonte - NBR 5356-3/2014

Existem poucos procedimentos de manutenção relacionados a vibração dos transformadores. O que se encontra são fabricantes buscando melhores materiais e métodos construtivos para reduzir a vibração, compradores utilizando o nível de ruído como um critério de desempate em licitações e estudos de adequação as legislações ambientais do local de instalação.

Tabela 2 - Critério de severidade de vibração em máquinas rotativas

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816					
Machine		Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
In/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28			
	0.02	0.45			
	0.03	0.71		good	
	0.04	1.12			
	0.07	1.80			
	0.11	2.80		satisfactory	
	0.18	4.50			
	0.28	7.10		unsatisfactory	
	0.44	11.2			
	0.70	18.0			
	0.71	28.0		unacceptable	
1.10	45.0				

Fonte:(MERCURI; MARTINS; TRAUTMANN, 2011)

Seria interessante encontrar tabelas para transformadores semelhantes a Tabela 2, que é para motores elétricos e relaciona o nível de vibração das máquinas rotativas a uma escala de severidade.

A vibração nos motores indica o estado dos rolamentos, o alinhamento dos eixos, o balanceamento dos elementos móveis e até a qualidade de energia aplicada a máquina, podendo alertar uma necessidade de manutenção.

2.12 Análise das vibrações no domínio do tempo e da frequência

De acordo com Lathi (2007, apud Mercuri, 2011, pg. 35) os sinais discretos são coleções de números que representam situações discretas, como por exemplo uma amostragem populacional.

Desta forma, um sinal amostrado a partir de um sinal contínuo no tempo se torna um sinal discreto. Isto é feito através de conversores analógico para digital (ADC)

Então quando o sinal de vibração contínuo no tempo é amostrado pelo acelerômetro, ele se transforma em um sinal discreto no tempo.

Desta forma é possível se aproveitar das vantagens do processamento digital de sinais:

- a) Menor sensibilidade as variações da temperatura e da idade;
- b) Mais estabilidade;
- c) Precisão controlada pelo tamanho da palavra binária;
- d) Armazenamento em diversas mídias;
- e) Alta fidelidade com baixa taxa de erro na codificação;
- f) Filtros digitais mais flexíveis, implementados por programas ou sistemas digitais físicos;
- g) Facilidade de alterar a taxa de amostragem do sinal digital. Com a decimação e a interpolação reduzindo e aumentando a taxa de amostragem.

Os sinais de vibração $x(t)$ são analógicos e contínuos no tempo, se eles forem filtrados antes de serem amostrados terão o seu espectro de frequências limitado.

De acordo com Lathi (2007, apud Mercuri, 2011) um sinal $x(t)$ com espectro limitado a um certo valor de frequência f (Hz) pode ser reconstruído a partir de

amostras tomadas a uma taxa uniforme, cuja frequência de amostragem f_s (Hz) seja maior ou igual a $2f$ (Hz).

A frequência de Nyquist é a menor frequência de amostragem (f_s) necessária para recuperar o sinal $x(t)$.

O *sample rate* (sr) é o intervalo entre as amostragens e corresponde a $1/f_s$ (s).

Se os sinais originais não forem limitados na frequência, não haverá limites para a frequência de amostragem, ou frequência de Nyquist. Colocando de outra forma, se for estabelecida uma frequência de amostragem para um sinal original não limitado em frequência, o sinal reconstruído terá perdas. Este fenômeno é conhecido por *aliasing*.

Segundo Lathi (2007, apud Mercuri, 2011, pg. 40) o sinal reconstruído não corresponderá ao sinal original a menos que se utilize um filtro *anti-aliasing* com frequência de corte em $f_s/2$. Desta forma os sinais com frequência maior que $f_s/2$ serão descartados antes de serem amostrados, suprimindo interferências e ruídos com frequências superiores a $f_s/2$.

O guia da National Instruments (2016) cita que *Aliasing* é um problema comum em medições de som e vibração.

O teorema de Nyquist-Shannon afirma que a maior frequência que pode ser analisada é a frequência de Nyquist (f_N), ou a frequência de amostragem do ADC dividida por dois. Então qualquer frequência analógica maior do que a frequência de Nyquist aparecerá como uma frequência entre 0 e f_N após a amostragem e será chamada de frequência de *aliasing*. Esta frequência não pode mais ser distinguida das frequências que estão entre 0 e f_N sem um conhecimento prévio do sinal original.

Os filtros *anti aliasing* são filtros passa baixa que preservam os sinais abaixo da frequência de Nyquist e atenuam os sinais acima da frequência de Nyquist, antes da amostragem, resolvendo o problema chamado de *aliasing*.

2.13 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

A transformada de Fourier leva uma função no domínio do tempo para o domínio da frequência, na qual se pode analisar as frequências mais importantes de uma função, aquelas com maior amplitude de sinal.

O processo inverso que passa uma função do domínio da frequência para o domínio do tempo é chamado de transformada inversa de Fourier.

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo que reduz o número de cálculos computacionais melhorando o tempo de processamento dos sinais digitais.

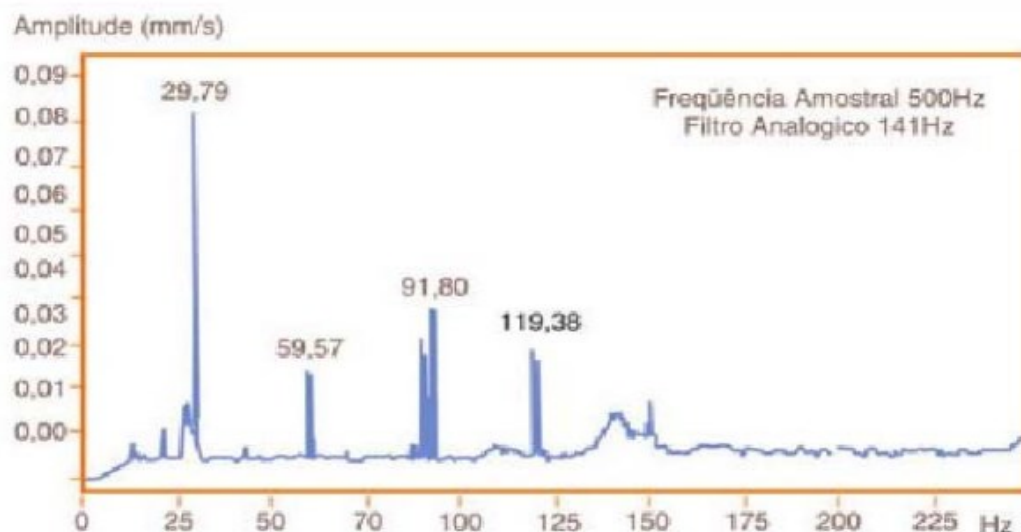
O espectro de um sinal é dado pela amplitude dos coeficientes da sua representação de Fourier. Os valores dos componentes espectrais são obtidos a partir de um conjunto dos valores numéricos do sinal de entrada.

Como o sinal de vibração é composto por várias frequências, a Transformada de Fourier possibilita a análise deste sinal no espectro de frequência, conforme representado pela Figura 7.

A amostragem de um sinal é uma gravação finita do mesmo. Esta descontinuidade da gravação produz ondas truncadas com perda de informação e com características espectrais diferentes do sinal original.

A FFT espera receber um sinal periódico e contínuo, mas recebe um sinal não periódico e descontínuo. Devido ao fato do conversor A/D ter o sinal apenas por um tempo limitado a FFT gera um erro chamado *leakage*.

Figura 7 - Espectro de frequências



Fonte: (MERCURI; MARTINS; TRAUTMANN, 2011)

O janelamento diminui as margens de transição das formas de ondas truncadas, reduzindo as perdas espectrais dos dados finitos que serão analisados através da FFT, Figura 8.

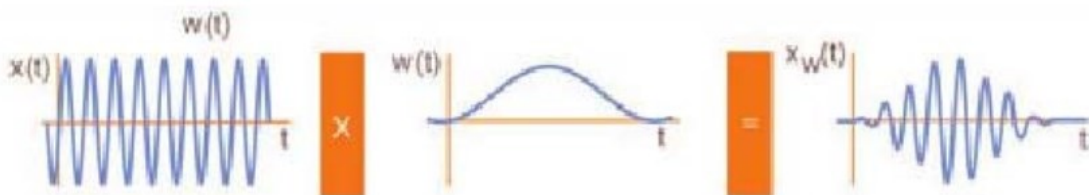
Aplicar uma janela a um sinal no domínio do tempo é equivalente a multiplicar o sinal pela função que representa a janela.

Devido a multiplicação no domínio do tempo ser equivalente à convolução no domínio da frequência, o espectro de um sinal janelado é a convolução do espectro do sinal original com o espectro da janela. Dessa maneira o janelamento modifica a forma do sinal tanto no domínio do tempo quanto no da frequência.

Se for aplicado o janelamento ao sinal que vem do conversor, este sinal passará a ser periódico e o erro não ocorrerá.

A escolha do tipo correto de janela temporal depende do tipo de sinal que está em observação, isto requer um conhecimento prévio do sinal em análise ou a experimentação de diversos janelamentos até encontrar o que melhor se adapta a análise em questão.

Figura 8 - Janelamento



Fonte: (MERCURI; MARTINS; TRAUTMANN, 2011)

Janela Retangular. Aplicá-la é equivalente a não utilizar nenhuma janela. Possui o maior volume de perda espectral. É útil para a análise de transientes que possuem uma duração menor do que a da janela em análise.

Janela de Hanning. Possui uma forma similar a meio ciclo de uma cossenoide. É útil para a análise de transientes maiores que o tempo de duração da janela e para aplicações de objetivos gerais.

Janela de Hamming. Sua forma é similar a uma cossenoide, contudo a janela não se aproxima do zero, como a janela de Hanning. É um meio termo entre as duas janelas anteriores.

2.14 Sensores de vibração comerciais

Os instrumentistas industriais utilizam alguns termos que mudam às vezes de significado conforme o contexto.

Um instrumento de medida é um dispositivo capaz de medir uma grandeza física, e um instrumento de controle é um dispositivo capaz de controlar o valor de uma grandeza física.

A instrumentação é a utilização dos instrumentos para medir e controlar os processos.

Transdutor é o elemento que transforma uma forma de energia em outra forma de energia, geralmente um sinal elétrico, e transmissor é o elemento que garante que o sinal elétrico possa ser transmitido, ele realiza o condicionamento do sinal.

Sensor ou detector é o dispositivo que sente ou detecta algum fenômeno físico e reage de uma forma em particular. Porém, às vezes o termo sensor é utilizado como o dispositivo que engloba o sensor, o transdutor e o transmissor.

As informações captadas pelos sensores são então enviadas aos instrumentos, quer sejam medidores portáteis ou sistemas de supervisão e controle. Nestes instrumentos as informações são tratadas, armazenadas, analisadas e até decisões de operação podem ser tomadas automaticamente.

Os sensores de vibração também são chamados de acelerômetro porque a vibração pode ser expressa em unidades métricas (m/s^2) ou em unidades de constante gravitacional "g", onde $1g = 9,81 m/s^2$.

Os equipamentos comerciais de medição de vibração geralmente utilizam sensores piezoelétricos, fibras ópticas ou sistema micro eletro mecânico (MEMS).

Os acelerômetros são montados diretamente em contato com o elemento que está vibrando e traduzem a aceleração em um sinal elétrico proporcional.

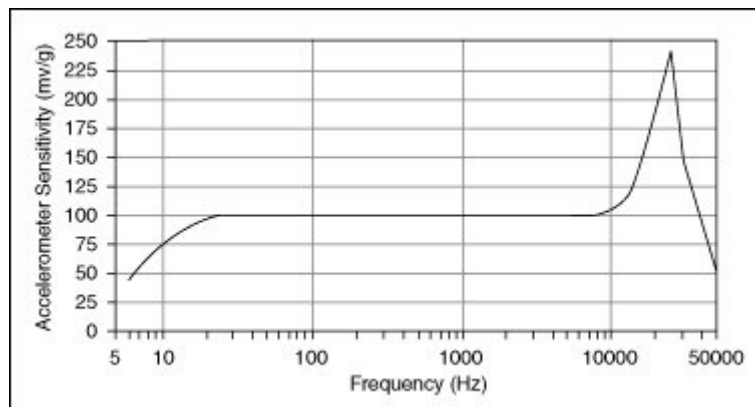
Geralmente possuem circuitos eletrônicos embarcados que melhoram a qualidade do sinal captado, e são lineares em uma extensa faixa de frequência e uma ampla faixa dinâmica.

Os principais critérios de escolha do sensor acelerômetro são:

- a) A amplitude máxima. Por exemplo 10 g;
- b) A sensibilidade. Descreve a conversão entre vibração e tensão em uma frequência de referência conforme a Figura 9. Por exemplo 100 mV/g em 160 Hz;
- c) A quantidade de eixos: um, dois ou três;
- d) O peso. Não deveria ser mais de 10% do peso da estrutura em teste;
- e) As opções de montagem: ponta de prova para frequências até 500 Hz, magnético até 2 kHz, adesivo até 5 kHz e parafusado para frequências maiores;
- f) As restrições ambientais de instalação;
- g) O custo.

A **Figura 9** ilustra a curva de sensibilidade de um sensor comercial, onde se destaca a linearidade do sensor desde 30 Hz até 10 kHz, e a sensibilidade de 100 mV/g nesta região.

Figura 9 - Sensibilidade dos acelerômetros



Fonte: (NI - NATIONAL INSTRUMENTS, 2019)

2.15 Interferência eletromagnética

O Laboratório Especializado em Eletroeletrônica, Calibração e Ensaio (LABELO) da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul avalia o

funcionamento de equipamentos eletrônicos em relação as emissões eletromagnéticas. Dele procedem muitos estudos sobre interferência eletromagnética em circuitos eletrônicos e definições sobre este assunto.

A compatibilidade eletromagnética (EMC) é a capacidade de um produto funcionar corretamente sem sofrer com interferências eletromagnéticas do ambiente, assim como, é a capacidade de um produto não ser a fonte de emissão de interferências no ambiente.

Problemas de EMC podem ser corrigidos na fase de projeto com simulações computacionais que destacam os campos eletromagnéticos e as “antenas acidentais”. As correções geralmente envolvem aterramento, blindagem, alteração na geometria dos condutores e até um novo projeto.

A interferência eletromagnética (EMI) é a emissão eletromagnética gerada no equipamento que perturba o ambiente. Explosões solares e aurora boreal são causas naturais de EMI em menor intensidade.

A susceptibilidade eletromagnética (EMS) é a imunidade que um dispositivo eletrônico possui para operar em um ambiente com perturbações eletromagnéticas sem sofrer alterações em seu funcionamento.

A EMC pode ocorrer de forma conduzida ou radiada.

Perturbações eletromagnéticas conduzidas. Quando o distúrbio atinge o equipamento através de um de seus condutores: linhas de alimentação, cabos de dados ou aterramentos.

Perturbações eletromagnéticas radiadas. Quando o distúrbio atinge o equipamento eletrônico sem contato físico, utilizando o espaço como meio de propagação. Isto ocorre por meio de campos eletromagnéticos acoplados de forma magnética ou capacitiva.

2.16 Instrumentação Virtual

A instrumentação pode ser entendida como a ciência que mede, indica, registra e controla processos. Dela fazem parte os sensores e os instrumentos de medida que podem estar agrupado próximos ao ponto de medição.

Na “instrumentação virtual” um computador é utilizado para substituir muitos instrumentos de medida, e apresentar as medidas e os resultados em uma tela.

Como os instrumentos são criados na tela do computador, eles são chamados de “instrumentos virtuais”.

O computador é um ponto centralizador, e os sensores geralmente estão distribuídos e afastados. Eles trocam as informações através de uma rede de comunicação.

Isto reduz custos porque permite a atualizações dos programas ou a criação de mais instrumentos conforme a necessidade, sem novos investimentos em equipamentos ou hardware.

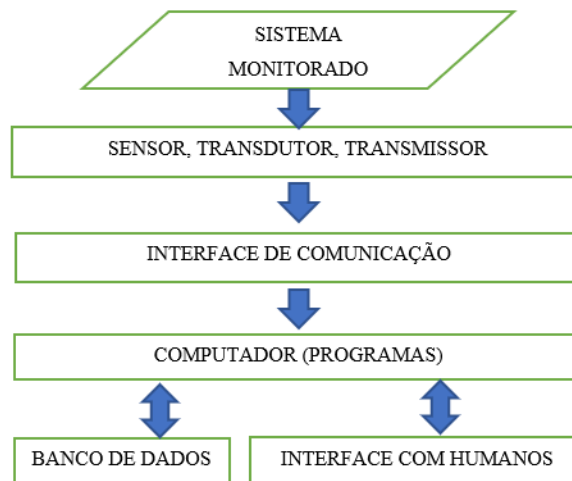
Um sistema de instrumentação virtual é composto por vários elementos, conforme a Figura 10.

O sensor detectar um sinal físico de interesse.

O transdutor converter este sinal, geralmente analógico, em um sinal digital.

O transmissor envia os dados coletados através de protocolos de comunicação de campo (I2C, MODBUS, CAN ou LORA).

Figura 10 - Estrutura de um instrumento virtual



Fonte – Elaboração do autor (2020)

A interface de comunicação converte protocolos comunicação de campo em protocolos de comunicação de computadores (USB, TCP ou WIFI) possibilitando que os dados cheguem ao computador.

O computador executa os programas que manipulam as informações.

O banco de dados armazena as informações processadas pelo computador.

A interface com o usuário mostra na tela os resultados das medições e aceita parametrizações por meio do teclado. É o meio de interações entre humanos e a instrumentação.

2.17 Medição de vibração com microfones

Conforme explica o guia de engenharia para medições da *National Instruments* (2016), alguns conhecimentos e práticas de processamento e condicionamento de sinais devem ser considerados para que vibrações aerotransportadas sejam capturadas utilizando microfones.

O objetivo de realizar medições é chegar no espectro de frequência que indica a assinaturas característica de cada equipamento monitorado.

O microfone de eletreto é o mais utilizado devido ao seu menor custo, facilidade de obtenção e a existência de amplificadores dedicados a eles.

2.17.1 Acoplamento CA

O sinal adquirido a partir do microfone de eletreto tem uma componente CC e uma CA. A tensão de *offset* CC não contém informações e deve ser eliminada com um acoplamento capacitivo.

Isto melhora a resolução de amplitude e a faixa dinâmica utilizável.

Também evita a saturação do amplificador e atenua a variação da tensão CC de longo prazo dos sensores, que é provocada por envelhecimento ou variação de temperatura.

2.17.2 Amplificadores de sinal

Os amplificadores dedicados para microfones necessitam ter baixo ruído, alta impedância de entrada e baixa impedância de saída.

Existem módulos compactos que agrupam o microfone, o amplificador e os circuitos de alimentação, garantindo uma grande imunidade aos ruídos.

2.17.3 Aterramento

O aterramento inadequado de sensores pode resultar em loops de corrente pela terra, que geram ruído no sistema de medição. É correto aterrar o sensor na saída ou na entrada, mas não em ambos os locais.

2.17.4 Faixa dinâmica

A faixa dinâmica é a relação entre o menor e o maior sinal que um dispositivo pode medir ao mesmo tempo. Expresso em decibéis, a faixa dinâmica é dada pela expressão $20\log (V_{\max} / V_{\min})$.

Um dispositivo com faixa dinâmica de 100 dB tem uma relação entre tensões de 100000 vezes, ou seja, pode receber sinais de tensão desde +/-10 V até sinais de tensão de +/-100 μ V.

Os conversores ADCs com resolução de 8 bits oferecem uma faixa dinâmica de 48 dB ou $20\log (256/1)$.

A maioria dos sensores comerciais tem 19 bits de resolução, ou 110 dB de faixa dinâmica.

2.17.5 Amostragem simultânea

Em aplicações como: mapeamento de ruído, teste de impacto e medições de intensidade do som, é fundamental a informação de fase entre dois canais. Nestes casos é necessário realizar a amostragem e a conversão analógico-digital simultaneamente em cada canal.

2.17.6 A qualidade dos sinais em cabos longos

A degradação do sinal em cabos longos ocorre geralmente em frequências altas, acima de 10k Hz, e altos níveis de som.

A capacitância existente em cabos considerados longos, com mais de 30 m, filtra as componentes de alta frequência e distorce o sinal transmitido.

Se o sinal estiver sendo atenuado no cabo deve-se aumentar a corrente utilizada para conduzir o sinal, suprimindo a capacitância do cabo, até que se tenha uma relação um para um.

2.17.7 Outras considerações sobre os microfones

Os microfones são estáveis durante longos períodos se manuseados adequadamente, mas podem ser danificados pelo mau uso. Para se manter a exatidão nas medições com microfones, devem ser observadas as seguintes precauções:

- a) Calibrar toda a rede de medição, incluindo o microfone, antes da medição;
- b) Calibrar toda a rede, para certificar que o sistema ainda está dentro da faixa de tolerância, após as medições críticas;
- c) Proteger o microfone contra: chuva, pássaros e condensação interna;
- d) Utilizar montagem de choque no microfone para evitar que vibrações influenciem na medição;
- e) Usar um braço de extensão para reduzir reflexos indesejados;
- f) Observar as restrições do fabricante quanto ao comprimento do cabo;
- g) Verificar a relação sinal ruído (SNR) do cabo com o microfone conectado;
- h) Verificar se há fontes de interferência eletromagnéticas próximas.

Alguns sensores microfone tem a tecnologia transdutor eletrônico com folha de dados (TEDS), que reduz o tempo de instalação e configuração. Uma EEPROM contém informações sobre o próprio sensor, dados de calibração, sensibilidade e parâmetros do fabricante. Instrumentos compatíveis com TEDS se comunicam com o sensor e fazem a configuração automaticamente.

2.18 Medição de vibração com sensores MEMS

Os sensores com a tecnologia *micro electro mechanical system* (MEMS) vem ganhando espaço no mercado devido ao menor custo em relação aos sensores de vibração piezoelétricos.

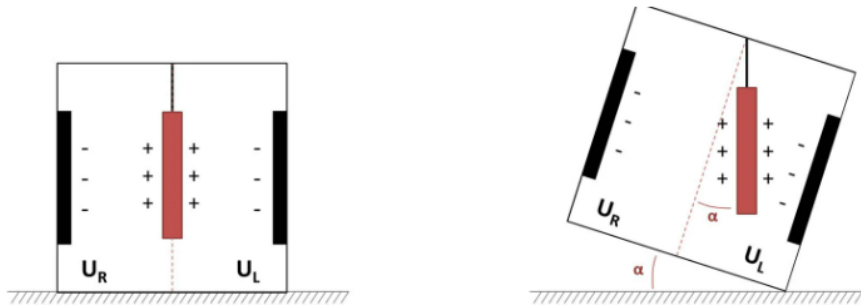
A tecnologia MEMS coloca dentro de um único circuito integrado (CI) todos os componentes necessários para se ter um instrumento de medição de vibração completo e compacto: o sensor, o condicionador do sinal, os circuitos que armazenam os dados e os circuitos de processamento de sinal.

O sensor é composto por uma massa suspensa entre um par de placas capacitivas. Uma diferença de potencial surge entre as placas capacitivas, proporcional a inclinação da massa suspensa, com mostra a Figura 11.

As vantagens deste sensor são: tamanho muito reduzido, grande faixa de temperatura (-40 a +85 °C) e elevado grau de proteção (IP67).

As desvantagens do sensor MEMS em comparação as outras tecnologias são, sua baixa resistência a grandes impactos e sua menor sensibilidade. Ele resiste a impactos de até 10 g enquanto os sensores piezoelétricos chegam a 100 g.

Figura 11 - Sensor Capacitivo MEMS



Fonte: (ALTHEN SENSOR & CONTROL, [s. d.])

Os sensores de vibração são adquiridos na forma de pequenas placas de circuito impresso, chamados de módulos. A Figura 12 mostra o módulo acelerômetro GY5210.

Este módulo contém o sensor de vibração MEMS encapsulado no circuito integrado MPU6050. Este circuito integrado também possui um giroscópio e um termômetro que auxiliam nos ensaios e no posicionamento do sensor.

A característica de sensibilidade transversal dos acelerômetros refere-se a sinais de acelerações em direções diferentes às do eixo ao qual o sensor deve medir.

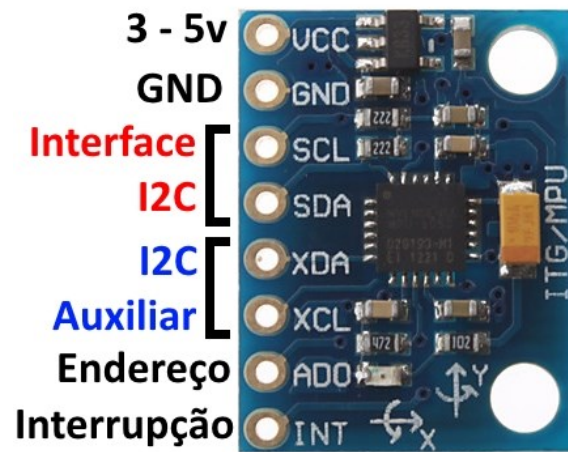
Desta forma com o acelerômetro em uma superfície plana o eixo X e o eixo Y deverão indicar 0 g enquanto o eixo Z deverá indicar 1 g.

A comunicação do microcontrolador com o mundo exterior se dá através de uma interface I2C. Por meio dos pinos SCL e SDA e do pino AD0 pode-se ter até dois módulos na mesma rede de comunicação I2C.

A Invensense é a fabricante do circuito integrado MPU-6000, o principal componente do módulo.

A alimentação do módulo pode variar entre 3 V e 5 V, mas para melhores resultados e precisão recomenda-se utilizar 5 V.

Figura 12 - Módulo sensor de vibração GY521



Fonte: (THOMSEN, 2014)

O módulo GY521 possui as seguintes características:

- Sensibilidade transversal: menor que +/-2%;
- Custo em 2020 de R\$17,90;
- Tensão de Operação: 3-5 V;
- Comunicação, Protocolo padrão I2C;
- I2C frequência de operação 100 kHz ou 400 kHz;
- I2C *slave* para comunicação com a interface;
- Dimensões: 20 x 16 x 1 mm;
- Faixa do Acelerômetro: $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$ (com ou sem filtro);
- Resistencia a choques mecânicos de 10 g;
- Output data rate (ODR) 4 Hz a 1000 Hz;
- Conversor ADC sigma delta de 16 bits para cada canal;
- Sensor de temperatura: -40 e +85 °C;
- Acelerômetro MEMS de três eixos;
- Giroscópio MEMS de três eixos;
- Resolução do giroscópio: ± 250 , ± 500 , ± 1000 , ± 2000 (DPS).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O principal objetivo deste experimento é detectar a vibração gerada pelo transformador para algumas condições de cargas aplicadas, e posteriormente verificar se existe uma relação entre a vibração e estas mesmas cargas.

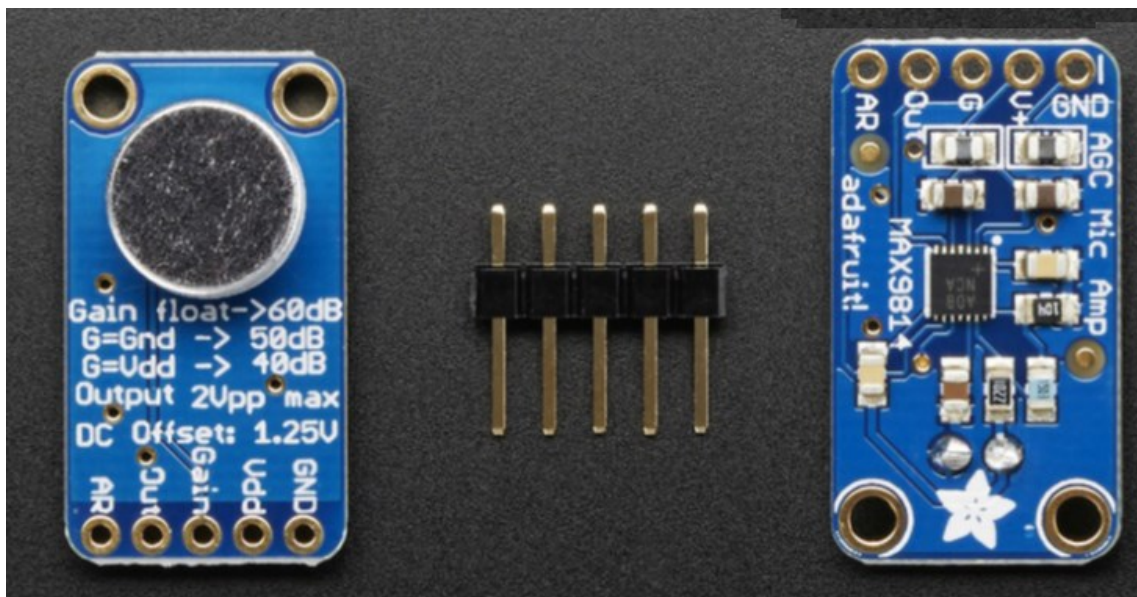
A vibração será captada de duas formas distintas, por um microfone e por um acelerômetro.

Serão utilizados sensores de baixo custo para captar as vibrações do transformador, com o objetivo de viabilizar a instrumentalização e a inserção dos transformadores de distribuição em programas de manutenção preditiva.

3.1 Detecção da vibração por meio de microfones

Os microfones em geral são capazes de detectar o som em toda a faixa audível, que vai de 20 Hz a 20 kHz, muitos os sensores de vibração piezoelétricos comerciais também trabalham nesta faixa.

Figura 13 – Módulo GY-MAX9814 ou Sensor de vibração



Fonte: (ADA, 2014)

A frequência fundamental de vibração dos transformadores de energia é de 120 Hz, o dobro da frequência da rede. Frequências superiores a décima harmônica

não tem energia suficiente para interferir nos resultados. Então quanto ao requisito resposta em frequência o microfone atenderá as expectativas.

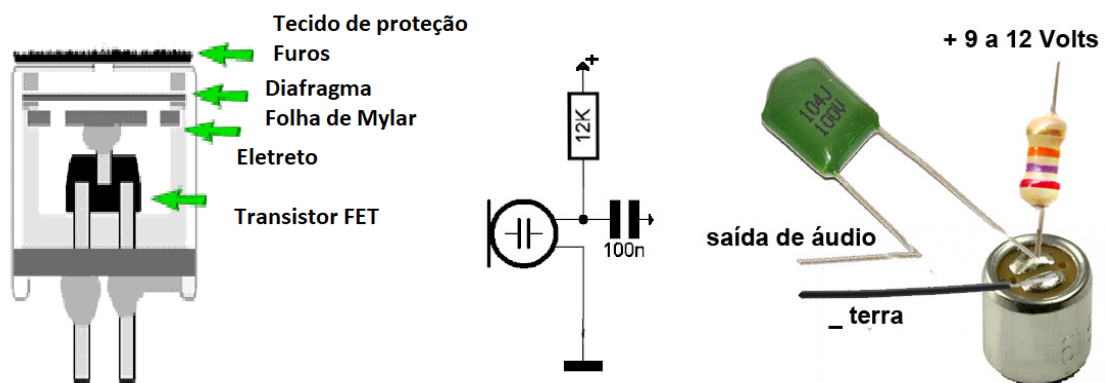
A Figura 13 mostra o módulo captador de som GY-MAX9814 que foi utilizado para construir o sensor de vibração.

Este módulo mede 15 mm por 25 mm e contém; um microfone de eletreto, um circuito integrado amplificador MAX9814 e alguns componentes discretos de polarização. Devido a sua construção compacta e especializada, pequenos sinais são captados e amplificados mantendo uma excelente fidelidade.

3.1.1 Microfone de eletreto

O microfone embutido no módulo captador de som é de eletreto. Este microfone é de construção simples, dimensões reduzidas, alta fidelidade, alta sensibilidade, alta resistência mecânica e resposta estável em toda a faixa de frequência de áudio.

Figura 14 - Microfone de eletreto



Fonte: (BLOG NOVA ELETRÔNICA, 2022)

Como mostra a Figura 14 o microfone necessita de uma alimentação externa de baixa tensão e tem um consumo de aproximadamente 1 mA.

O funcionamento do microfone pode ser resumido da seguinte forma.

O som passa por uma pequena abertura protegida por um tecido fino para evitar a entrada de poeira. Ao entrar, o som provoca a vibração de uma fina folha de poliéster (PET) metalizada, chamada de Folha De Mylar.

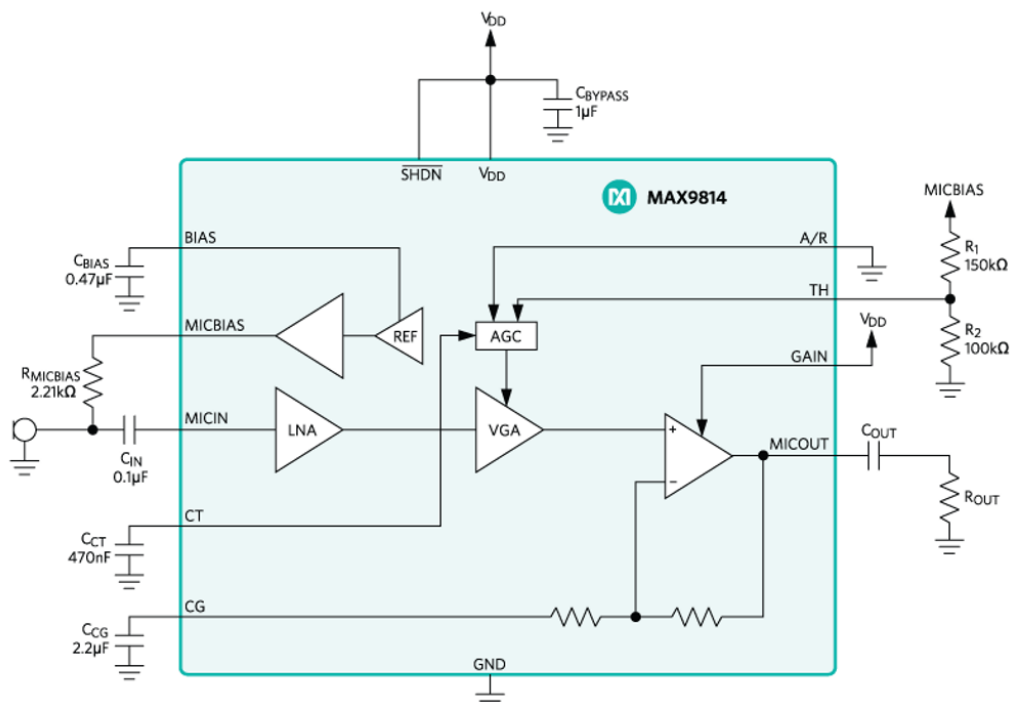
Esta folha juntamente com uma placa fixa chamada de eletreto formam um capacitor permanentemente carregado. As ondas sonoras deformam a folha de Mylar, alterando a capacitância e a tensão elétrica no capacitor. Desta forma o sinal elétrico é proporcional a vibração do som.

Uma das placas do capacitor está conectada diretamente ao terminal de gatilho de um transistor de efeito de campo (FET) que amplifica o sinal do microfone de eletreto.

3.1.2 Circuito amplificador de som

Depois do microfone o som passa por um circuito integrado amplificador fabricado pela empresa Maxim Integrated e chamado de MAX9814.

Figura 15 - Circuito Integrado MAX9814



*THE DEVICE HAS BEEN CONFIGURED WITH AN ATTACK TIME OF 1.1μs, 40dB GAIN, AND AN ATTACK-AND-RELEASE RATIO OF 1:500.

Fonte: (MAXIM INTEGRATED, 2009)

Este circuito amplificador é dedicado ao microfone de eletreto, e em seu diagrama que pode ser visto na Figura 15 se destacam quatro módulos.

- a) Gerador de tensão de baixo ruído para a polarização do microfone (MICBIAS);
- b) Pré-amplificador de baixo ruído (LNA), com ganho fixo de 12 dB;
- c) Amplificador de ganho variável (VGA) com controle de ganho automático (AGC) entre 0 dB e 20 dB;
- d) Amplificador de saída com ganho de: 8 dB, 18 dB ou 28 dB, selecionável pela entrada digital de três estados chamada de "GAIN".

Neste experimento o ganho do amplificador de saída foi ajustado em 28 dB, que somado ao ganho de 12 dB do pré-amplificador totaliza um ganho de 40 dB.

Além disto o controle de ganho automático (ACG) soma mais um valor entre 0 dB a 20 dB ao ganho total. Este ganho depende da tensão de saída e do limiar ajustado no divisor resistivo R1 e R2, que no caso da placa GY-MAX9814 vem fixo de fábrica.

Portanto o módulo tem um ganho entre 40 dB a 60 dB, isto significa que o sinal de entrada terá sua amplitude multiplicada por 100 até 1000 vezes.

Se o ACG perceber que a tensão do sinal de saída está maior que o limiar ajustado, o ganho será reduzido, respeitando três períodos de tempo.

O *attack time* que dura 1,1 ms devido ao valor escolhido para o capacitor CCT. Neste período o ganho é reduzido até que não haja mais saturação no sinal de saída.

O *hold time* que é fixo e dura 30 ms. Nele o ganho é mantido em seu valor reduzido.

O *release time* que pode ser 500, 2000 ou 4000 vezes o valor do *attack time*. A duração é selecionada por uma entrada digital de três estados. Durante este período o ganho volta ao seu patamar inicial.

No experimento o *release time* escolhido foi de 550ms com a intenção de minimizar a influência do ACG sobre o sinal de vibração em análise.

3.1.3 Fontes de ruído indesejáveis

De nada adianta um ganho elevado de sinal se a relação sinal-ruído também não for bem alta. Neste caso o sinal é a vibração que se deseja analisar e o ruído são sinais aleatória que surgem durante todas as etapas do processo.

Os ruídos ambientais externos ao experimento. Eles podem ser reduzidos por abafadores de som feitos de esponjas de poliuretano e colocados ao redor do microfone, como uma câmara anecoica improvisada.

Os ruídos gerados internamente nos circuitos eletrônicos. Apenas o amplificador MAX9814 tem uma distorção harmônica total (DTH) de 0,04% e uma relação sinal ruído (SNR) de 61 dB. Estes números pioram ao serem considerados todos os demais componentes e cabos no percurso do sinal, inclusive o osciloscópio.

A interferência eletromagnética (EMI) gerada pela rede elétrica. Experimentos de medição exigem cuidados com relação a compatibilidade eletromagnética (EMC). As perturbações conduzidas foram minimizadas com uma alimentação proveniente de pilhas e não por fontes acopladas a rede elétrica. As perturbações radiadas foram minimizadas com conexões curtas entre os elementos, além do distanciamento e cruzamento perpendicular entre cabos elétricos.

Outra forma de reduzir os ruídos é limitar a banda passante do sinal, desta forma os ruídos acima e abaixo desta banda serão eliminados.

Na saída do amplificador MAX9814 pode haver uma tensão de até 2 V_{pp} com 1,25 V de polarização contínua. A tensão de polarização contínua é bloqueada por meio do capacitor de desacoplamento (COUT) instalado na saída do sensor.

Este capacitor de 10 nF junto com a impedância de entrada de 2 MΩ do osciloscópio formam um filtro passa alta com frequência de corte de 10 Hz, que pode ser calculado pela equação (15).

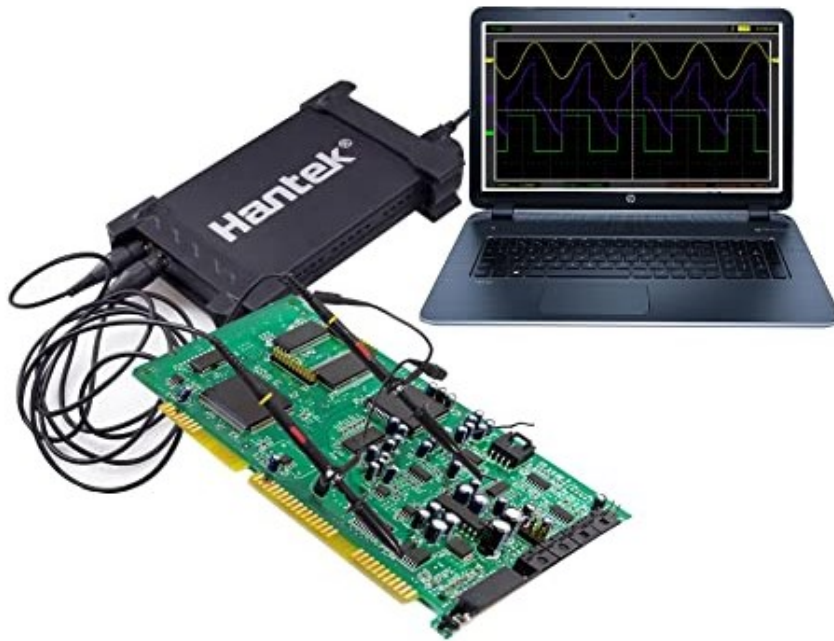
$$f_{c-3dB} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (15)$$

A banda passante de sinal resultante permite analisar as vibrações no transformador a partir de 10 Hz até 20000 Hz.

3.1.4 O osciloscópio analisador de sinais

Após ser captado e amplificado, o sinal de vibração do transformador será analisado em um osciloscópio USB modelo 6074BE da marca Hantek.

Figura 16 - Osciloscópio USB 6022BE



Fonte: (HANTEK, 2022)

Este osciloscópio tem as seguintes características:

- a) Largura de banda de 70 MHz, que pode ser limitada a 20 MHz;
- b) Resistência e capacitância de entrada de 1 M Ω e 25 pF;
- c) Máxima taxa real de amostragem de 1 GSa/s;
- d) Resolução vertical 8 bits;
- e) Memória de até 16 k Bytes por canal;
- f) Armazenamento das ondas na forma de imagem e ou dados;
- g) Ajustes automáticos;
- h) Medidas automáticas de grandeza das ondas;
- i) FFT implementada no hardware;
- j) Janelas dos tipos Retangular, Hanning, Hamming e Blackman.

O osciloscópio foi ajustado para o experimento, e estes ajustes permaneceram fixos durante todas as medições para que as imagens obtidas pudessem ser comparadas entre si.

Cada medição teve sua imagem salva. Todas com o fundo claro e com o sinal em função do tempo e em função da frequência.

Também foi registrado o valor RMS do sinal de vibração analisado, assim como foi salvo um arquivo CSV com quatro mil leituras de cada sinal medido.

3.1.5 Procedimento para medição do transformador com microfone

Como foram feitos muitos ensaios tornou-se necessário criar um procedimento de teste, para que ao final fosse possível realizar uma comparação entre os resultados obtidos. A sequência abaixo tem os ajustes que se tornam fixos entre uma medição e outra, simplificando o trabalho.

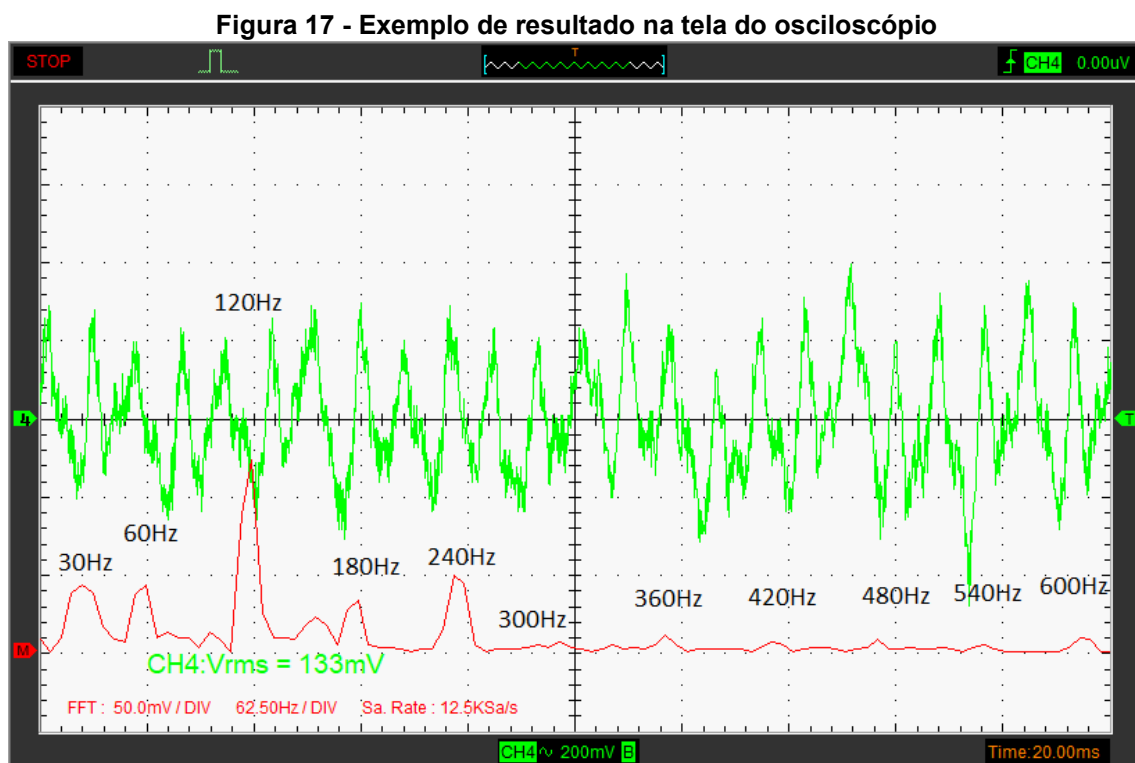
- a) Posicionar o microfone no núcleo do transformador;
- b) Prender a espuma abafadora em torno do microfone;
- c) Ajustar ganho em 28 dB através da desconexão do pino G;
- d) Ajustar a relação de tempos A/R em 1:500 conectando o pino A/R em VCC;
- e) Confirmar a tensão de alimentação de 4,5 V mantida pelas pilhas;
- f) Ligar as cargas no transformador, resistores e ou diodos;
- g) Alimentar o transformador com 127 VCA trifásico através do disjuntor;
- h) Confirmar se o transformador foi alimentado;
- i) Medir a tensão de saída do transformador;
- j) Ajustar a escala horizontal do osciloscópio em 20 ms;
- k) Isto resulta em 62,5 Hz/DIV no gráfico de FFT, como são 10 divisões será exibido até 625 Hz, ou seja, até a quinta harmônica da fundamental de 120 Hz;
- l) Ajustar a escala vertical do osciloscópio em 100 mV/DIV;
- m) Confirmar se o acoplamento é AC e o multiplicador da ponta de prova está em X1;
- n) Ativar o limite de largura de banda (BW) em 20 MHz para reduzir ruídos de alta frequência;
- o) Ativar medição de V RMS do sinal analisado;
- p) Ajustar o FFT para pegar o sinal do canal escolhido como entrada;
- q) Selecionar a janela Hamming que foi a que mais salientou as medições do sinal no domínio das frequências;
- r) Usar uma escala VRMS de 50 mV/DIV no domínio das frequências;
- s) Usar escala horizontal em X10 no domínio das frequências;

- t) Ajustar para que seja feita a média de 8 valores adquiridos a fim de estabilizar a imagem;
- u) Ajustar para que seja impresso no relatório: o canal, o gráfico no tempo, o gráfico de FFT e as informações de referência;
- v) Criar a pasta para armazenar os resultados;
- w) Salvar as MEDIÇÕES.CSV como 'm';
- x) Salvar o SETUP como 's';
- y) Salvar a IMAGEM.BMP como 'i';
- z) Imprimir o RELATÓRIO.PDF como 'r'.

Os resultados destas medições saem do osciloscópio na forma de gráficos, como o ilustrado na Figura 17.

No centro da imagem tem-se destacado o gráfico da amplitude do sinal em função do tempo e a sua tensão RMS.

Na parte inferior da imagem tem-se o gráfico da FFT. Na horizontal temos o eixo de frequências, partindo de 0 Hz até 600 Hertz e na vertical temos o eixo de tensão.



No gráfico da Figura 17 destacamos as frequências que são múltiplos e submúltiplos de 60 Hz e de 120 Hz.

Apesar do gráfico capturado na imagem ser estático, esta vibração tem uma parte aleatória que faz com que a onda não seja estacionária. Portanto não se deve tomar o valor preciso das amplitudes e frequências, principalmente no gráfico da FFT.

Com o intuito de estabilizar a imagem foi requisitado ao osciloscópio que realizasse uma média de 8 medições. O osciloscópio tem a capacidade de realizar a média de até 64 medições, fazendo com que a resposta vá de muito rápida a excessivamente lenta.

3.1.6 O transformador de testes

O transformador utilizado nos testes não foi o ideal para a proposta do trabalho, mas foi o que estava acessível para a realização dos testes.

O ideal seria um transformador trifásico de distribuição ensaiado com tensões nominais e cargas controladas e em curto circuito com tensões fornecidas por Variacs.

Especificações do transformador utilizado no teste:

- a) Fabricante: TRA Eletromecânica LTDA. Campo Limpo Paulista, SP;
- b) Modelo TR 28X42;
- c) Potência 400 VA;
- d) Trifásico;
- e) Frequência 60 Hz;
- f) Refrigerado a seco;
- g) Isolação: 0,6 kV;
- h) Classe: "B" 80 °C;
- i) Primário em DELTA, Secundário em ESTRELA aterrada;
- j) Tensão de linha primária 440 V;
- k) Tensão de linha secundária 18 V;
- l) Relação de transformação 24,44.

Figura 18 - Transformador de 400VA utilizado nos ensaios



Fonte: Autoria própria (2022)

Através da equação (16) de potência trifásica foi deduzido para o transformador suas correntes máximas admissíveis.

$$P = \sqrt{3} \times VL \times IL \times \cos \phi \quad (16)$$

Primário em DELTA:

- a) Corrente máxima primária de linha é de 0,52 A;
- b) Corrente máxima primária de fase é de 0,30 A.

Secundário em ESTRELA:

- a) Corrente máxima secundária de linha é de 12,8 A;
- b) Corrente máxima secundária de fase é de 12,8 A.

Como a única tensão disponível no local do ensaio era de 220 V trifásica de linha, tem-se que esta foi a tensão de linha primária do transformador, e devido a relação de transformação de 24,44 obtém-se:

- a) Tensão de linha primária 220 V;
- b) Tensão de linha secundária 9 V;
- c) Tensão de fase secundária 5,2 V.

3.1.7 A carga utilizada nos ensaios

A carga aplicada ao transformador para a execução dos testes era constituída por um banco de resistores. Este banco de resistores por sua vez era constituído de resistores de 1Ω e 10 W, associados em série e em paralelo conforme a necessidade. A Figura 19 mostra um exemplo deste banco de resistores.

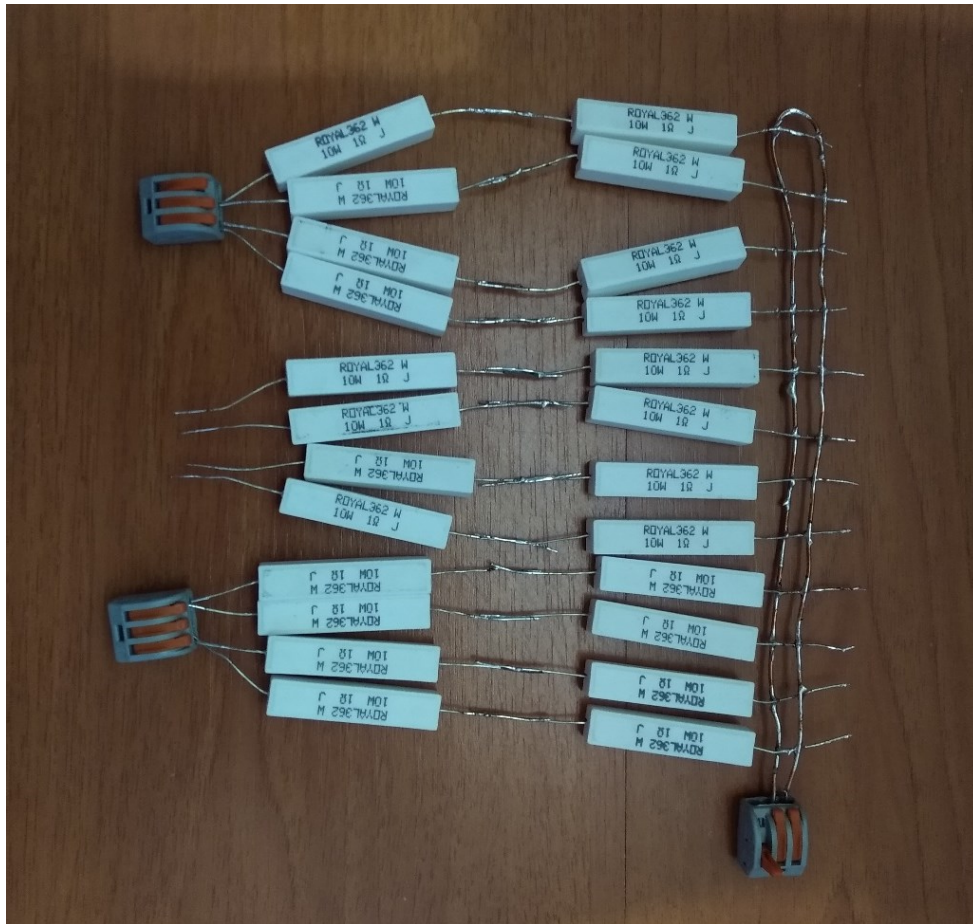
Para aumentar o conteúdo harmônico de vibrações do transformador foi utilizado um diodo retificador em uma das fases carregadas.

Uma corrente retificada imposta ao transformador faz com que circule por ele uma série de harmônicas pares e ímpares, conforme a série de Fourier. Isto leva a magnetização do transformador a um ponto mais próximo da saturação, porque a curva de histerese magnética do núcleo deixa de ser simétrica em relação a origem do gráfico, e devido a circulação de corrente contínua no núcleo, a curva de histerese se desloda do centro, aumentando a magnetização do núcleo em um sentido, ou evitando que ele seja totalmente desmagnetizado.

A Tabela 3 serve para conferir se as especificações de potência utilizadas no experimento, para cada associação de resistores utilizada, não tenham sido ultrapassadas.

A tabela mostra o valor ôhmico da carga aplicada em cada fase do transformador e a corrente máxima de cada fase do transformador. Ela também verifica se cada unidade resistiva não teve suas especificações de potência ultrapassadas.

Figura 19 - Carga resistiva utilizada nos ensaios



Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 3 - Dimensionamento das cargas resistivas

Resistor de carga por fase (Ohm)	Tensão de fase (V)	Corrente de fase (A)	Potência no resistor por fase (W)	Potência fornecida pelo transformador (W)	Quantidade de resistores de 1 Ohm por 10W (n)	Potência do conjunto de resistores (W)
2	5,2	2,6	13,5	40,5	2	20
1	5,2	5,2	27	81,1	4	40
0,5	5,2	10,4	54,1	162,1	8	80

Fonte: Autoria própria (2022)

3.1.8 Condições aplicadas ao transformador para as medições

Foram feitas medições com o sensor de som em algumas situações específicas, para explicitar a relação entre a vibração e a potência exigida do transformador.

O transformador foi ensaiado nas seguintes condições de carregamento:

- a) Desligado. Para verificarmos o limiar de ruído e interferências;
- b) Ligado sem carga;
- c) Ligado com carga de 2 Ω trifásico;
- d) Ligado com carga de 1 Ω trifásico;
- e) Ligado com carga de 0,5 Ω trifásico;
- f) Ligado sem carga, e um diodo retificador em uma das fases;
- g) Ligado com carga de 2 Ω trifásico, e um diodo retificador em uma das fases;
- h) Ligado com carga de 1 Ω trifásico, e um diodo retificador em uma das fases;
- i) Ligado com carga de 0,5 Ω trifásico, e um diodo retificador em uma das fases.

O sensor de vibração por microfone foi posicionado em três localizações:

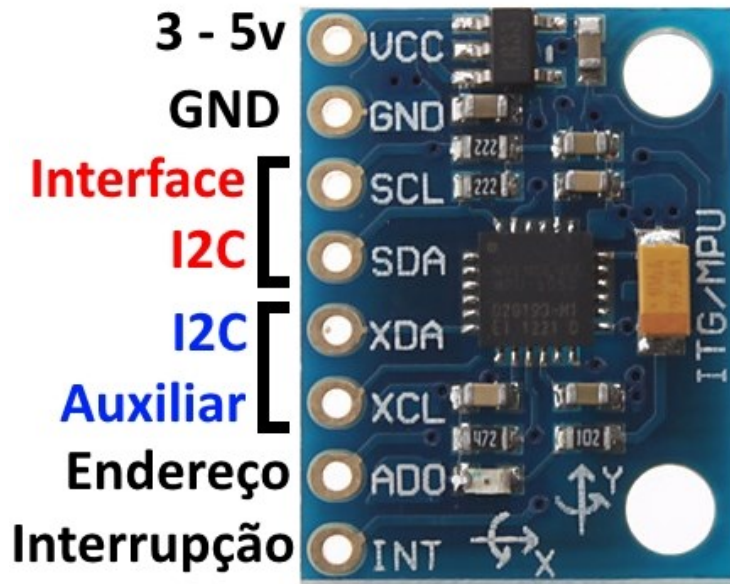
- a) Sobre o enrolamento da bobina de cobre, na lateral do transformador;
- b) Sobre o corpo de aço ou núcleo, na parte superior do transformador, sobre a fase R ou seja, na lateral superior;
- c) Sobre o corpo de aço ou núcleo, na parte superior do transformador, sobre a fase S ou seja, no centro superior.

Não necessariamente todas as combinações de carregamento do transformador e posicionamento do sensor foram ensaiadas, apenas as necessárias para fundamentar as discussões.

3.2 Detecção de vibração por meio de acelerômetro

O sensor de vibração escolhido para o experimento foi o circuito integrado MPU6050 que vem montado no módulo GY521. Portanto os termos MPU6050 e GY521 serão utilizados como sinônimo de sensor de vibração.

Figura 20 - Acelerômetro MPU6050



Fonte: (THOMSEN, 2014)

O circuito integrado MPU6050 é composto por um giroscópio e um acelerômetro, ambos de três eixos.

As informações dos três eixos do giroscópio e de dois eixos do acelerômetro são descartadas, restando apenas as informações do eixo perpendicular a superfície do transformador e que será chamada de aceleração do eixo X (ACX).

O circuito MPU6050 permite que a escala de aceleração seja selecionada entre +/- 2 g, +/-4 g, +/-8 g e +/-16 g. O sensor foi configurado para sua maior sensibilidade, +/-2 g, porque o transformador do experimento estava fazendo um ruído muito baixo.

Este sinal analógico passa por um conversor A/D de 16 bits sem necessidade de multiplexação. Ajustado para uma escala de +/-2 g e com um conversor de 16 bits resulta em uma sensibilidade de 16384 partes de uma aceleração de 1 g.

O resultado da conversão é armazenado em dois endereços de memória de 8 bits cada um, chamados de "ACCEL_XOUT_H" e "ACCEL_XOUT_L", que ficam nos endereços 0x3B e 0x3C respectivamente.

A taxa de amostragem do acelerômetro é de 1 kHz, portanto a memória que contém os valores lidos das acelerações é atualizada a cada 1 ms.

Então de acordo com o teorema da amostragem de Nyquist-Shannon a máxima frequência de vibração que pode ser captada é de 500 Hz.

Mas o manual do fabricante, no registro chamado de `DLPF_CFG [2:0]`, informa que a largura de banda do acelerômetro é de 260 Hz.

O que permite a análise apenas até a segunda harmônica da frequência fundamental de 120 Hz do transformador.

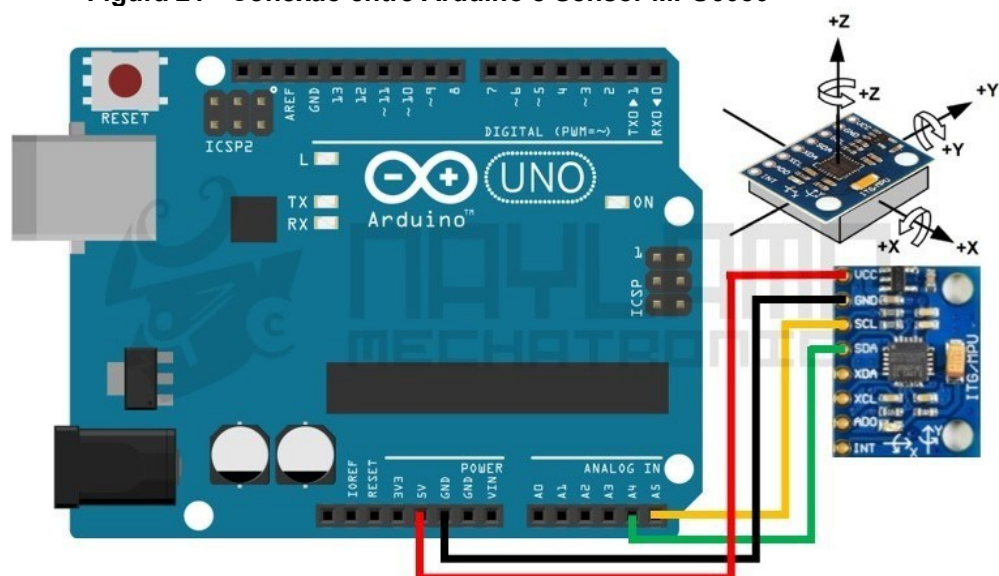
A comunicação entre o módulo MPU6050 e o microcontrolador Arduino se faz por meio do barramento de protocolo I2C. O sensor e o Arduino podem operar este barramento com frequências de 100 kHz no modo padrão e 400 kHz no modo rápido.

O barramento I2C necessita de duas linhas. Uma se chama SDA (*Serial Data* - Dados Seriais) e a outra se chama SCL (*Serial Clock* - Sinal de "Relógio" Serial). Ambas necessitam de resistores de *pull-up*, que são providos pelo microcontrolador Arduino.

O sensor MPU6050 será sempre o escravo da rede e o Arduino será o mestre. O pino AD0 do módulo é utilizado para selecionar um entre dois endereços de barramento I2C, 0x68 se desconectado e 0x69 se alimentado com 3,3 VCC. Neste experimento este pino ficou desconectado, porque quanto menos fios, menos problemas de EMC.

A alimentação de 5 VCC do sensor MPU6050 foi obtida da placa do Arduino, que por sua vez foi alimentado pelo cabo USB que busca energia do computador.

Figura 21 - Conexão entre Arduino e Sensor MPU6050



Fonte: (NAYLAMP, 2021)

3.2.1 A interface entre o sensor de aceleração e o computador

Para o sinal de vibração passar do sensor MPU6050 para o computador foi necessário a utilização de um microcontrolador por três motivos;

- a) O sensor envia os dados pelo protocolo I2C.
- b) O computador recebe os dados pelo protocolo serial USB.
- c) O Arduino ficou com a função de iniciar a leitura das vibrações ao receber um comando do computador, e ler por dois segundos a uma taxa de 1 kHz.

O microcontrolador escolhido foi o ATMEL ATMEGA328 que vem montado em uma placa chamada Arduino Uno. Esta placa oferece muitas facilidades como: fontes reguladoras de tensão de 5 VCC e 3,3 VCC, circuitos de *reset* e oscilador, vinte pinos de entrada ou saída, memória para um programa chamado *bootloader* que facilita a programação e o carregamento de bibliotecas. Mas o principal é que esta placa disponibiliza uma porta USB e uma porta I2C.

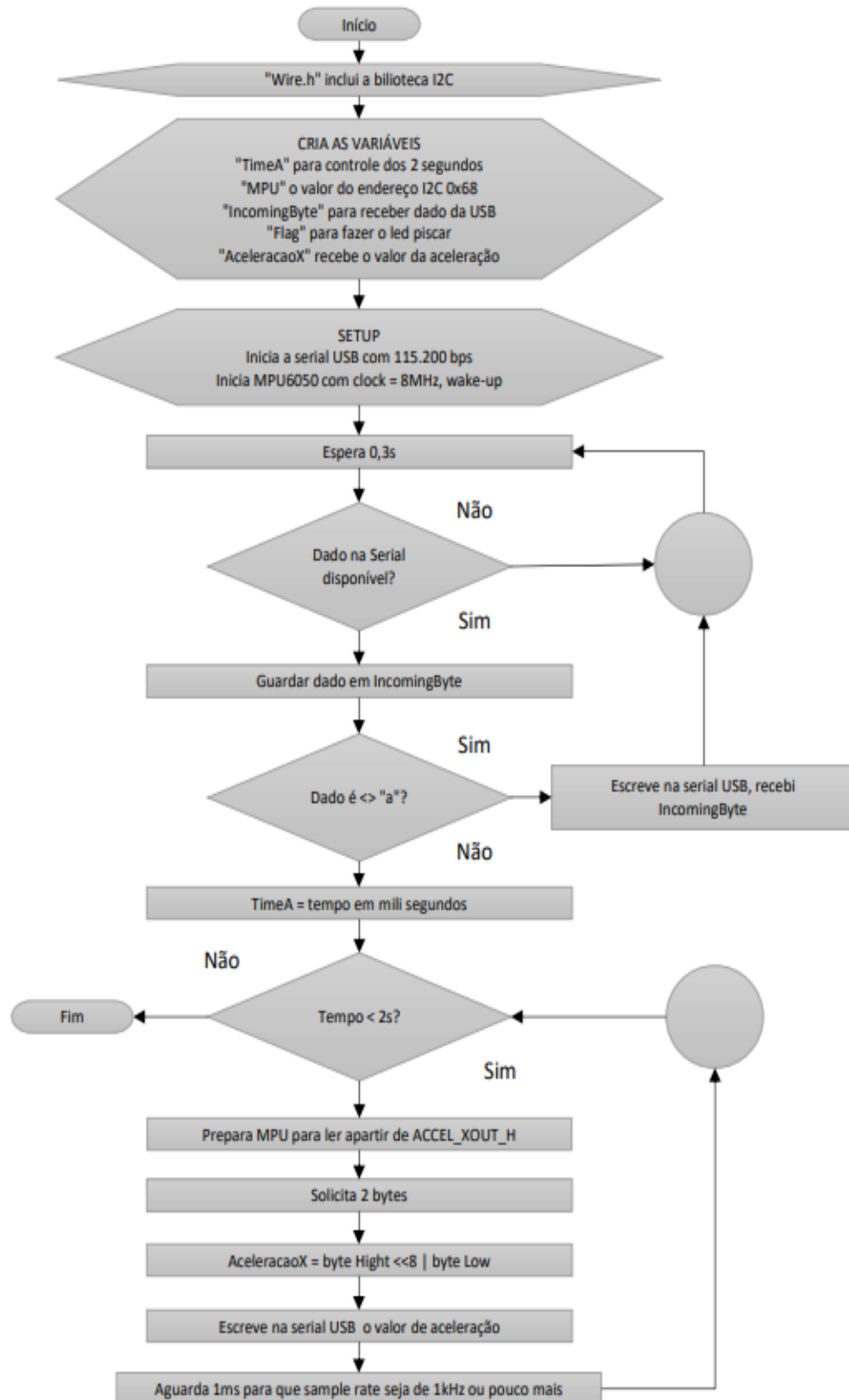
A porta I2C utiliza dois pinos como linhas de comunicação, chamados de SCL e SDA, opera de 100 kHz a 400 kHz, tem resistores de *pull-up* internos de 24 k Ω e uma biblioteca I2C.

A porta USB permite a conexão entre o Arduino e um computador. No computador deve ser instalado um drive que reconheça a placa Arduino conectada a entrada USB, e trate este Arduino como um dispositivo serial USB atribuindo ao mesmo um número de porta "COM".

A porta USB do Arduino pode receber até 500 mA de corrente do computador. Entre a malha de Blindagem do cabo USB e a linha de terra do cabo USB existe um indutor que evita que interferências circulem entre ambos. As linhas de dados do USB têm resistores de 22 Ω em série para evitar surtos de corrente, e varistores em paralelo para evitar surtos de tensão.

No fluxograma apresentado na Figura 22 vemos o programa que roda no Arduino. Ele tem as seguintes tarefas: Preparar a interface I2C e a USB. Esperar uma liberação vinda do computador indicando que o experimento de vibração do transformador está ativado e pronto. Por fim entrar em *loop* por 2 segundos, lendo valores de aceleração a uma taxa de 1 kHz do sensor e enviando para o computador.

Figura 22 – Fluxograma para ler o acelerômetro e envia as informações ao computador



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.2 O programa que analisa as informações do sensor de aceleração

No computador dois programas em Python foram executados.

O primeiro programa é o responsável por receber as informações de aceleração da serial USB e armazená-las em um arquivo do tipo valores separados por vírgulas (CSV). Neste programa os dados chegam e são armazenados de forma *on-line*.

O segundo programa é responsável por abrir o arquivo do tipo CSV e apresenta os gráficos de aceleração em função do tempo e da frequência. Esta análise dos dados é feita de modo *off-line*.

Este modelo atendeu aos experimentos porque não se estava criando um equipamento de medição, mas apenas realizando um número finito de ensaios.

A linguagem Python foi escolhida por ser clara e concisa, além de possuir bibliotecas e módulos que fazem o trabalho pesado. Segue uma descrição da utilidade das bibliotecas e módulos incluídos no projeto.

Pandas. Para manipulação e análise de dados. Manipula tabelas numéricas e séries temporais. Software livre sob licença BSD (NUMFOCUS, 2022).

NumPy. Uma coleção de funções matemáticas para operar sobre matrizes multidimensionais e arranjos. Software livre sob licença BSD (NUMPY, 2022).

Matplotlib. Para criação de gráficos e visualizações de dados. Software é compatível com GPL, mas pertence a Python Software Foundation (PSF), (MATPLOTLIB, 2021).

Pyserial. Acessa a porta serial para o programa Python. O software pertence a Chris Liechti, mas pode ser usado livremente (PYPI, 2022) e (LIECHTI, 2020).

Time. Módulo que contém funções relativas a tempo, temporização e calendário (PYTHON, 2022a).

CSV. Abreviação de *comma separated values*, é um módulo para a troca de dados entre programas (PYTHON, 2022b).

3.2.3 Descrição do primeiro programa Python

Este programa arquiva as leituras de aceleração obtidas do sensor. Para isto ele segue o fluxograma da Figura 23, que pode ser descrito da seguinte forma:

Primeiramente é carregado as bibliotecas e módulos que serão utilizados, depois são criadas as variáveis necessárias e então um canal de comunicação com o Arduino pela serial USB é aberto.

Cria-se o arquivo do tipo CSV no computador para receber e salvar os dados lidos do sensor de aceleração.

Pela serial USB é enviado um sinal para que o Arduino inicie o envio dos dados de aceleração obtidos de forma on-line, isto ocorre por um intervalo de dois segundo.

O programa entra em um laço de mil repetição que dura um segundo, período no qual são recebidos mil valores de amplitude de vibração, dados suficientes para a posterior análise.

Os dados chegam no formador ASCII, eles são transformados em números inteiros e então são anexados ou escritos no arquivo CSV. Ao final de mil valores lidos o arquivo CSV é fechado assim com o canal de comunicação serial USB.

3.2.4 Descrição do segundo programa Python

Este programa serve para criar dois gráficos, o primeiro com os valores das acelerações em função do tempo e o segundo com as amplitudes das vibrações em função das frequências.

Primeiramente se carrega as bibliotecas e módulos que serão utilizados.

Depois cria-se uma variável que recebe os mil valores que serão posteriormente gravados no arquivo CSV.

Esta variável está na memória RAM e é uma matriz de uma dimensão, ou em Python é chamada de Lista.

Os valores de aceleração vêm de um conversor de 16 bits, portando são números inteiros dentro da faixa de -32768 a +32767 e que representam acelerações de -2 g a +2 g.

Divide-se estes valores por 16384 para transformar a escala numérica, em uma escala de aceleração, cuja unidade de medida seja “g”, a aceleração da gravidade.

Desconta-se 1 g dos resultados porque todas as leituras são feitas para vibrações que ocorrem na vertical, portanto sob influência da ação da gravidade, que é de 1 g.

Cria-se o gráfico da amplitude de aceleração em função do tempo. Neste gráfico não existe um objetivo matemático maior, apenas deseja-se mostrar uma parte da onda que se forma com estes valores.

Foram utilizados apenas cem valores de amplitude de aceleração para formar o eixo vertical, e para o eixo horizontal foi criado uma sequência de inteiros de 0 a 100. E então o gráfico foi plotado.

O segundo gráfico criado é o gráfico da amplitude das vibrações em função das frequências. Para isto é aplicado a função da transformada rápida de Fourier (FFT) sobre os mil valores das amplitudes de acelerações.

Dos valores obtidos descartamos a metade deles porque o gráfico resultante é simétrico em relação do eixo horizontal.

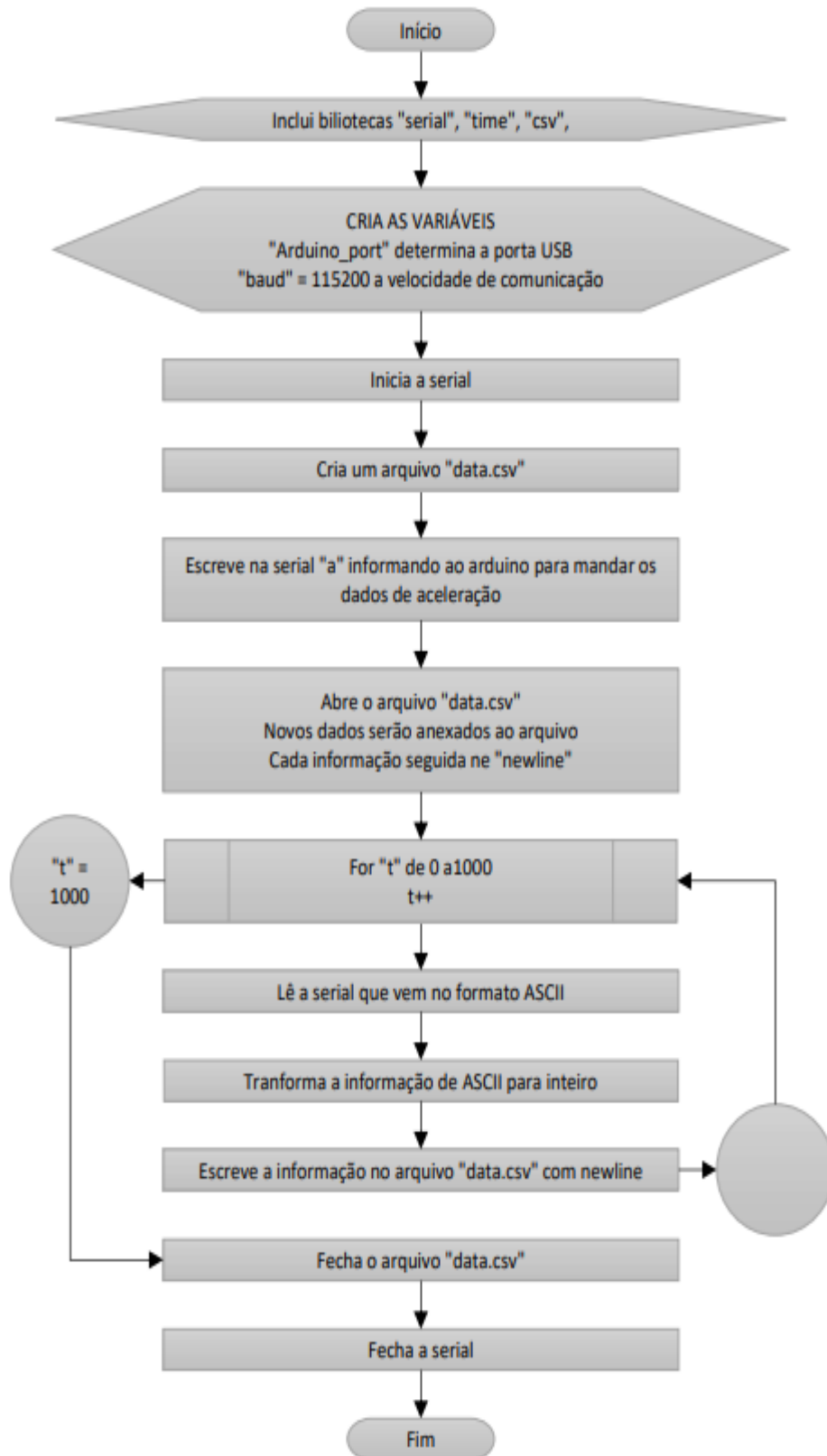
Dos valores restantes são tomados apenas os valores absolutos para desenhar o gráfico. Multiplicamos por dois os valores obtidos da FFT para compensar a aplicação da função absoluto e dividimos os valores pelo tamanho da amostra para normalizar o gráfico.

Para o eixo horizontal cria-se uma sequência com uma quantidade igual a metade do número de amostras, espaçados linearmente sobre um eixo horizontal.

Atribui-se ao eixo horizontal uma escala, de zero a metade do valor da frequência de amostragem, que corresponde a frequência de Nyquist.

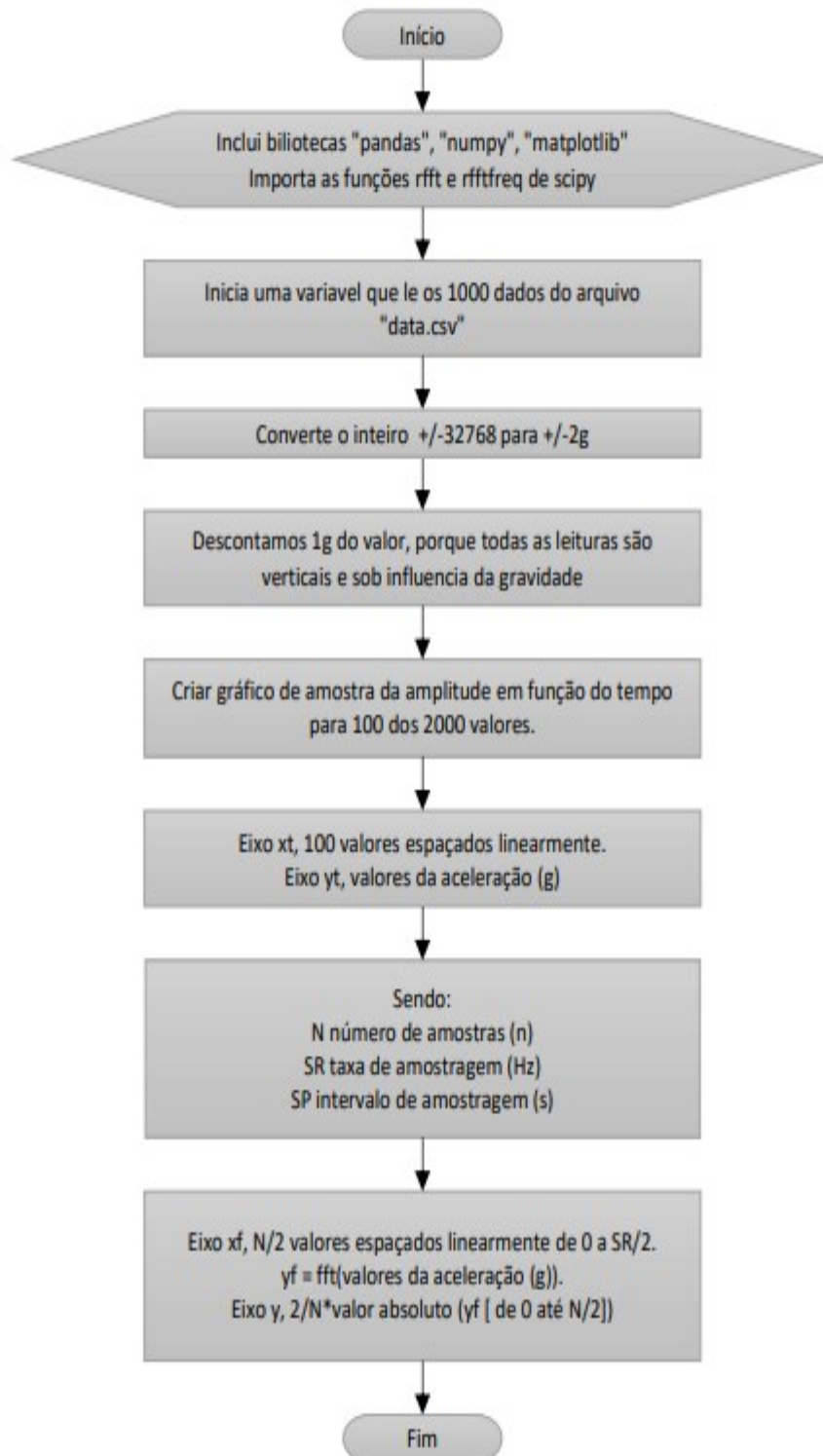
Neste caso a taxa de amostragem é de 1 kHz e então o gráfico irá se estender até a frequência de Nyquist, que é de 500 Hz.

Figura 23 – Fluxograma para ler a entrada USB e grava arquivo dados no arquivo CSV



Fonte: Autoria própria (2022)

Figura 24 – Fluxograma para ler arquivos CSV e gerar gráficos do tipo FFT



Fonte: Autoria própria (2022)

3.2.5 Condições aplicadas ao transformador para as medições

Foram feitas medições com o sensor de vibração em algumas situações para explicitar a relação entre a vibração e a potência exigida do transformador.

Com relação ao carregamento do transformador, ele foi ensaiado nas seguintes condições:

- a) Ligado com carga de 13,5 W ou 2 Ω em uma das fases.
- b) Ligado com carga de 27,0 W ou 1 Ω em uma das fases.
- c) Ligado com carga de 54,1 W ou 0,5 Ω em uma das fases.
- d) Ligado com carga de 27,5 W ou 0,5 Ω e um diodo retificador em uma das fases.

Com relação ao posicionamento do sensor de vibração por aceleração, ele ficou sobre o corpo de aço ou núcleo, na parte superior do transformador, preso por uma base magnética.

Alternou-se o sensor de aceleração entre três localizações: Sobre a fase R, sobre a fase S e sobre a fase T.

Foram ensaiadas estas combinações de potência do transformador e posicionamento do sensor para fundamentar as discussões que buscam demonstrar uma relação entre potência aplicada e vibração no transformador.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Experimentos com o sensor de ruído baseado em microfone.

Os primeiros resultados dos ensaios com o sensor de microfone são apresentados na Tabela 4.

O nível da vibração captada pelo microfone é enviado ao osciloscópio, que informa o valor da vibração em um nível de tensão eficaz, correspondente a todo o espectro de frequências captado pelo microfone, de 20 Hz a 20 kHz.

Na linha 1 da tabela 4, com o transformador desligado e o microfone envolto por um abafador os ruídos externos do meio ambiente, temos um limiar de ruído de fundo que não conseguimos isolar.

Ainda com o transformador desligado, alternando o microfone entre as duas posições escolhidas o ruído ambiente variou de 51,1 mV para 61,1 mV.

Atribuímos esta variação ao fato de primeiro o microfone estar sobre o papel isolante da bobina de cobre e depois sobre o núcleo de aço, como são superfícies de diferentes materiais a vibração conduzida têm diferentes intensidades.

Na segunda linha da Tabela 4, analisando a coluna 1 e 2 simultaneamente, temos o transformador ligado, mas sem carga. Ocorre um aumento no nível médio do sinal captado para 97,7 mV e 147 mV.

Atribuímos este ruído a vibração da magnetização do núcleo, somada ao ruído ambiental. As bobinas ainda não contribuem, pois ainda não temos carga aplicada ao transformador.

Por fim, temos o carregamento progressivo do transformador com cargas trifásicas de 2 Ω , 1 Ω e 0,5 Ω . Um carregamento de 10%, 20% e 40% da capacidade do transformador.

Surge uma nova parcela de ruído para se somar aos anteriores. Atribuímos esta nova parcela de ruído a interação entre o campo magnético dos enrolamentos e as correntes elétricas nos mesmos.

Observamos em cada colunas da Tabela 4, que a corrente e o ruído aumentam na mesma direção.

Temos uma exceção na coluna 2, quando a carga aumenta de 1 Ω para 0,5 Ω não há um incremento no nível médio de ruído. Este fato foi verificado após o experimento ser encerrado e não houve possibilidade de ser refeito.

Na última coluna da tabela 4, temos a carga trifásica resistiva acrescida de um diodo retificador em uma das fases do transformador.

Isto acrescenta inúmeros harmônicos a rede elétrica e também aumenta e desloca a área do gráfico de histerese, causando um aumento na saturação magnética do núcleo.

Portanto há aumento tanto de vibrações oriundas do núcleo como também do enrolamento. O resultado é que na última coluna da Tabela 4 temos os maiores níveis de leitura de vibração.

Tabela 4 - Resultados de amplitude de vibração

Carga do transformador	Posição do sensor microfone Sobre a bobina Na lateral (mV)	Posição do sensor microfone Sobre o núcleo No centro (mV)	Posição do sensor microfone Sobre o núcleo No centro (mV) Com diodo em uma fase
Desligado	51,1	66,1	66,1
Ligado sem carga	97,7	147	147
Ligado com carga trifásica de 2 Ω	115	168	158
Ligado com carga trifásica de 1 Ω	133	179	224
Ligado com carga trifásica de 0,5 Ω	196	179	395

Fonte: Autoria própria (2022)

Na tabela 5 temos os mesmos valores de ruídos captados pelo microfone e mostrados na tabela 4, porém os valores estão descontados matematicamente do ruído ambiental. Por isto quando o transformador está desligado, na primeira linha da tabela 5 temos a indicação do nível zero de ruído.

Observamos logo que ligamos o transformador, o microfone capta mais ruído sobre o núcleo do que sobre a bobina. Atribuímos isto ao fato que no transformador sem carga só o núcleo vibra, as bobinas não vibram porque por elas circula apenas a pequena corrente de magnetização do núcleo.

Analisando a coluna um da tabela 5, quando o microfone está sobre a bobina de cobre. À medida que aumentamos a carga linear o nível do ruído também aumenta. Podemos afirmar que o ruído indicado é a soma do ruído gerado na bobina e no núcleo.

Analisando a coluna dois da tabela 5, quando o microfone está sobre o núcleo de aço, a exceção da última leitura que ficou fora do esperado e não foi refeita, o nível médio de ruído foi maior que na coluna um.

Isto indica que o posicionamento do sensor e a sua interface de acoplamento (papel-microfone ou aço-microfone) privilegia mais o contato com o aço do que o contato com o papel.

Porém analisando as variações de incremento de ruído “delta”, na coluna 1, (17,0; 18,0 e 63,0) comparada a coluna 2, (21,0; 11,0 e 0,0) percebe-se que o ruído está aumentando mais na bobina do que no núcleo, indicando que com o aumento da corrente de carga, circula mais corrente nas bobinas, e a vibração nas mesmas aumenta em um ritmo maior que a vibração originada no núcleo.

Por fim, analisando a coluna três observamos os maiores valores de ruído em relação as outras colunas.

Isto mostra que cargas não lineares retificadas fazem circular mais correntes harmônicas nas bobinas, e aumentam a área e deslocam o gráfico de histerese do transformador, aumentando a saturação do núcleo, a vibração das bobinas e aumentando o nível médio de ruído. Conforme a última coluna da tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de amplitude de vibração descontado o ruído de base

Carga do transformador	Posição do sensor microfone Sobre a bobina Na lateral (mV)	Posição do sensor microfone Sobre o núcleo No centro (mV)	Posição do sensor microfone Sobre o núcleo No centro (mV) Com diodo em uma fase
Desligado	0,0	0,0	0,0
Ligado sem carga	46,6	80,9	80,9
Ligado com carga trifásica de 2 Ω	63,9 (delta 17,3)	101,9 (delta 21,0)	91,9 (delta 11,0)
Ligado com carga trifásica de 1 Ω	81,9 (delta 18,0)	112,9 (delta 11,0)	157,9 (delta 66,0)
Ligado com carga trifásica de 0,5 Ω	144,9 (delta 63,0)	112,9 (delta 0,0)	328,9 (delta 171,0)

Fonte: Autoria própria (2022)

A Figura 25 mostra quinze gráficos. São gráficos de vibração no tempo sobreposto aos gráficos da FFT destes mesmos sinais.

Estes gráficos são obtidos por meio do comando de impressão da tela do osciloscópio.

Na Figura 25 temos três colunas.

- a) Primeira coluna. O microfone está sobre o papel isolante que envolve as bobinas de cobre.
- b) Segunda coluna. O microfone está sobre o núcleo o aço, posicionado no centro e no topo do transformador.
- c) Terceira coluna. O microfone permanece na mesma posição, mas acrescentamos um diodo retificador em uma das fases.

Cada uma das cinco linhas da Figura 25 representa uma situação de carregamento do transformador.

- a) Primeira linha o transformador está desligado.
- b) Segunda linha o transformador está ligado, mas sem carga.
- c) Terceira linha aplicamos uma carga trifásica de 2Ω .
- d) Quarta linha aplicamos uma carga trifásica de 1Ω .
- e) Quinta linha aplicamos uma carga trifásica de $0,5 \Omega$.

O osciloscópio recebe o sinal do microfone, que por sua vez está captando as vibrações do transformador.

Na primeira linha. Com o transformador está desligado. Os três gráficos mostram que o meio ambiente está carregado com vibrações de 30 Hz, 60 Hz e 120 Hz. O gráfico da FFT tem 50 mV por divisão e mostra que o ruído não é maior que 50 mV em nem uma frequência. O osciloscópio indica uma amplitude RMS de 66 mV para o limiar de ruído.

Na segunda linha. Com o transformador ligado e sem carga. Os gráficos da FFT destacam a frequência de 120 Hz. Como não existe carga no secundário do transformador, a única corrente que circula no primário é a corrente de magnetização, e então deduzimos que o sinal de 120 Hz tem origem na magnetostrição do núcleo. A amplitude RMS do ruído dobrou na segunda linha em relação a primeira linha.

Na terceira, quarta e quinta linhas e na primeira e segunda colunas.

Com carga linear no transformador se destacam frequências 30 Hz, 60 Hz, 120 Hz e 240 Hz.

O nível de sinal na quinta linha é maior sobre a bobina do que sobre o núcleo de aço do mesmo. Isto mostra que parte do ruído surge nas bobinas do transformador.

O ruído só ficou maior na quinta linha porque é onde se tem a maior carga aplicada ao transformador. Os efeitos das forças eletromagnéticas só se tornam perceptíveis com o aumento da corrente nas bobinas.

Coluna um e dois. Destaque para a diferença entre os gráficos da FFT.

Na primeira coluna. Com o sensor sobre a bobina. Tem-se vibrações de 30 Hz, 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz e 240 Hz. São vibrações das distorções harmônicas da corrente elétrica devido a curva de histerese do núcleo.

Na segunda coluna. Com o sensor no corpo de aço do núcleo. A vibração predominante é de 120 Hz e 240 Hz, que são frequências típicas da magnetostricção.

Na terceira coluna. A carga tem um retificador de meia onda em uma das fases. Surge uma forte vibração de 60 Hz. Isto porque o período de uma onda retificada é 16,6 ms, e a onda não tem a parte negativa do sinal. Portanto os efeitos de magnetostricção e eletromagnetismo não dobram esta frequência, e a frequência fundamental de vibração permanece em 60 Hz.

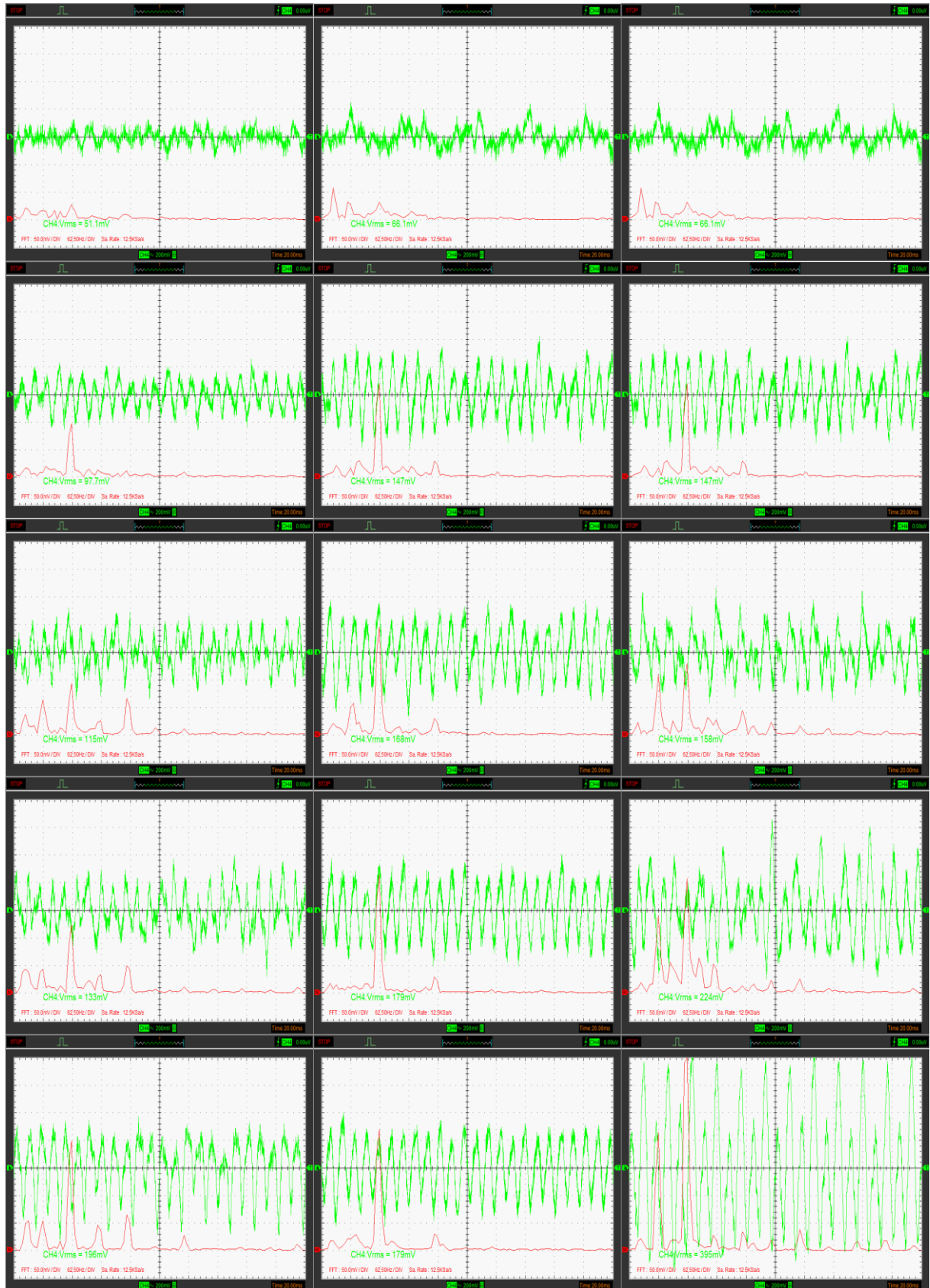
Observamos em alguns gráficos vibrações sub-harmônicas de 30 Hz. Estas frequências podem ter origem em distorções inter-harmônicas.

Ainda na terceira coluna. Com uma carga não linear, um circuito retificador de meia onda, o nível RMS do ruído foi maior que os níveis das colunas um e dois.

No último gráfico, terceira coluna e quinta linha, surgiram frequências de 30 Hz, 60 Hz, 120 Hz, 180 Hz, 240 Hz, 300 Hz, 360 Hz, 420 Hz, 480 Hz, 540 Hz até 600 Hz onde termina nosso gráfico. Com grande destaque para 60 Hz e 120 Hz.

Repetindo a explicação dada na análise da última coluna da tabela 5, cargas não lineares retificadas fazem circular mais correntes harmônicas nas bobinas, e aumentam a área e deslocam o gráfico de histerese do transformador, aumentando a saturação do núcleo, a vibração das bobinas e aumentando o nível médio de ruído.

Figura 25 - Sinal de vibração em relação ao tempo e a frequência



Fonte: Autoria própria (2022)

4.2 Experimentos com o sensor de ruído baseado em acelerômetro.

Os resultados dos experimentos realizados com o sensor de vibração do tipo acelerômetro podem ser vistos na Figura 26.

São doze gráficos do espectro de frequências do transformador.

No eixo horizontal tem-se uma escala de zero a 300 Hz.

No eixo vertical tem-se a escala da intensidade de vibração, onde a unidade de medida é a aceleração da gravidade “g”.

Neste experimento o transformador foi carregado com cargas monofásicas na fase R. Cada linha dos gráficos da Figura 26 representa um carregamento do transformador.

- a) Primeira linha, carga de 1 Ω .
- b) Segunda linha, carga de 0,5 Ω .
- c) Terceira linha, carga de 0,25 Ω .
- d) Quarta linha, carga 0,5 Ω com um diodo retificador.

Cada coluna da figura 26, representa um posicionamento do sensor.

- a) Coluna da direita, sensor sobre a fase R.
- b) Coluna central, sensor sobre a fase S.
- c) Coluna da esquerda, sensor sobre a fase T.

O sensor tem uma base magnética e fica em contato direto com o núcleo de aço do transformador.

Em uma análise visual considerando os três gráficos de cada linha, percebe-se que a figura mostra que a vibração é mais intensa sobre a fase carregada (fase R), e reduz à medida que o sensor se afasta para as demais fases do transformador (fase S e depois fase T).

Isto mostra que é a fase mais carregada a responsável pela maior contribuição nas vibrações do transformador.

Nos gráficos da figura 26 é possível ver um nível base ruído. Este ruído não é do transformador, mas sim do sistema de medição e do meio ambiente em questão. Este nível base de ruído permanece mesmo quando o transformador é desligado.

Sobre esta base de ruído se erguem as indicações de frequências de vibração transformador.

Com carga linear:

- a) Primeira linha. As três colunas destacam a frequência de 120 Hz. A primeira coluna mostra também um sinal de 180 Hz.
- b) Segunda linha. As três colunas destacam apenas a frequência de 120 Hz
- c) Terceira linha. As três colunas destacam a frequência de 120 Hz. Na primeira coluna mostra também um sinal de 240 Hz.

Na quarta linha.

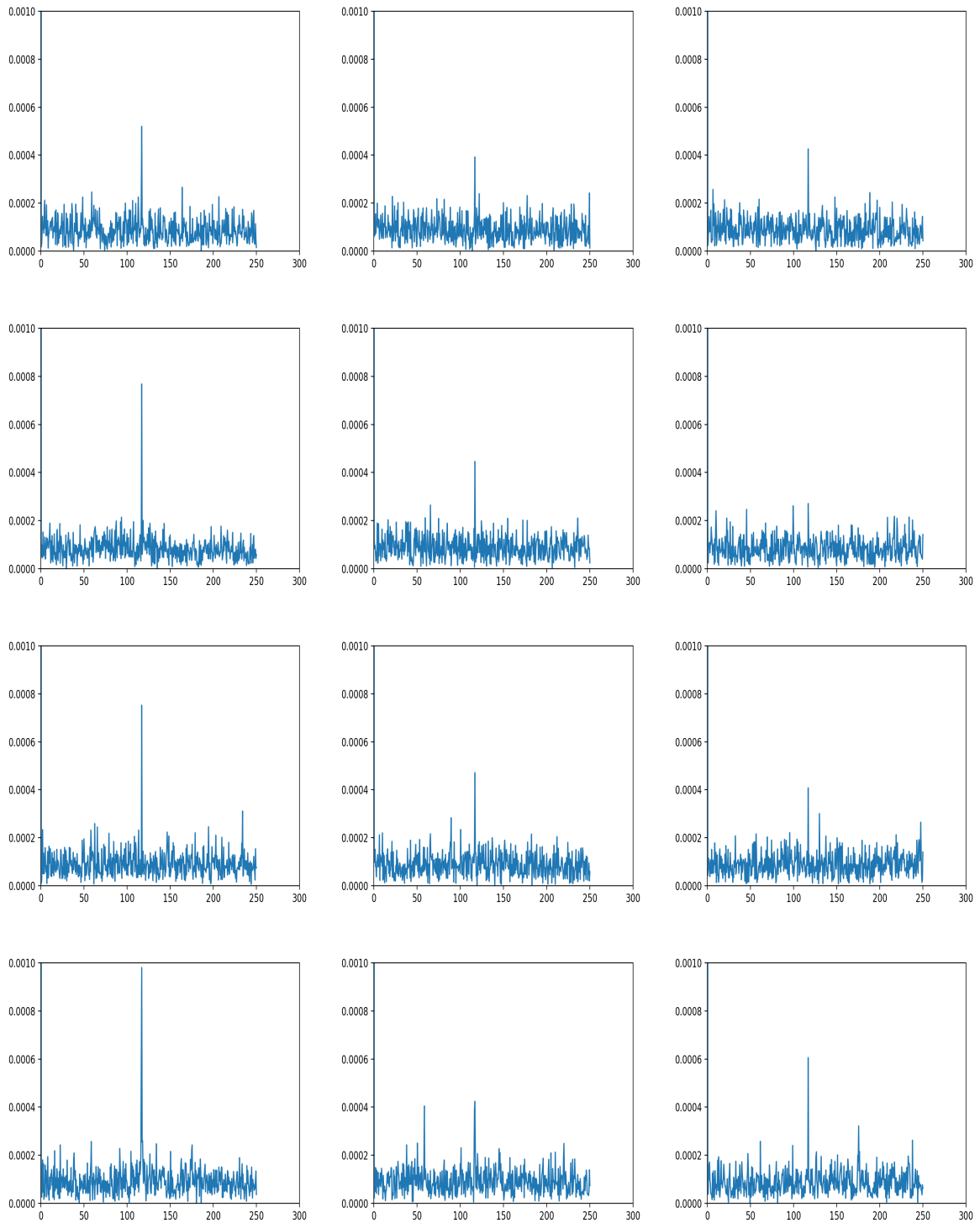
Foi incluído um diodo retificador na fase R. É uma carga não linear.

O ruído como um todo se intensifica e surgem frequências múltiplas da fundamental, 60 Hz, 120 Hz e 240 Hz. E a frequência de 180 Hz das distorções de intermodulação.

Este analisador de vibração é um instrumento desenvolvido unicamente para este experimento. Ele é um protótipo de baixo custo e não está calibrado.

O sensor estava ajustado para detectar ± 2 g e seu conversor ADC é de 16 bits, com isto a sensibilidade é de 0,00006 g/unidade em uma faixa de até 250 Hz.

Comparando os gráficos do sensor de microfone, com o sensor de aceleração, observa-se que os primeiros tem uma faixa maior de frequência e mostram mais detalhes nos gráficos. Por isto este experimento não permite tirar tantas observações quanto o experimento anterior. Mas fica claro que ambos os sensores estão funcionando por apresentarem indicações de frequências coincidentes em muitos gráficos.

Figura 26 - Gráficos de FFT, amplitude em função da frequência**Fonte: Autoria própria (2022)**

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise de vibração é um dos alicerces da manutenção industrial, porém pouco utilizado na manutenção de transformadores.

Em transformadores estudos de vibração são voltados para questões de ruídos ambientais, deformações nos enrolamentos, melhoria dos materiais e da construção.

O motivo é que grandes transformadores são monitorados através de grandezas elétricas, cobrindo quase que todas as necessidades de manutenção e controle, sendo desnecessário monitorar o ruído.

Porém os pequenos transformadores de distribuição ainda não são monitorados de forma *on-line*, devido a relação entre a sua importância no sistema e o custo de incluí-lo em um projeto de manutenção preditiva.

Este trabalho mostra que existe uma relação entre o carregamento do transformador e ruído gerado por ele, mas que a captação deste ruído depende de muitas variáveis, principalmente do posicionamento do sensor.

Foram utilizados no experimento dois sensores de vibração de baixo custo, não invasivos e instalados longe de partes energizadas do transformador. O sensor de vibração sonora forneceu resultados com mais detalhes do que o sensor de aceleração.

Os sensores de vibração se mostraram capazes de monitorar os transformadores quanto ao seu estado de carregamento. Espera-se no futuro que os transformadores de distribuição estejam incluídos nos programas de manutenção preditiva.

5.1 Sugestão para trabalhos futuros

São sugeridos os seguintes assuntos para trabalhos futuros.

Pesquisar os limites de vibração aceitáveis, antes de ser necessária uma intervenção de manutenção no transformador.

Aprimorar os sensores e a instrumentação para análise de vibração dos transformadores, com foco na manutenção, possivelmente incluindo mais de um sensor para monitoramento simultâneo do transformador.

Medir as correntes de magnetização de regime permanente e relacioná-las as vibrações, sem a presença das correntes de cargas. Para avaliar quanto a

corrente de magnetização e a vibração do núcleo colaboram com o ruído total do transformador.

REFERÊNCIAS

- ADA, Lady. **Adafruit AGC Electret Microphone Amplifier - MAX9814**. [S. l.], 2014. Disponível em: <https://learn.adafruit.com/adafruit-agc-electret-microphone-amplifier-max9814>. Acesso em: 23 mar. 2022.
- ALTHEN SENSOR & CONTROL. **MEMS Sensors**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.althensensors.com/althenpedia/mems-sensors-what-are-they-and-how-do-they-work/>. Acesso em: 15 maio 2022.
- AZEVEDO, M. C. **Investigação de vibrações em transformadores de baixa potência**. 2014. 39 f. TCC (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- BLOG NOVA ELETRÔNICA. **Microfone de eletreto - Nova Eletrônica**. 2022. Disponível em: <http://blog.novaeletronica.com.br/microfone-de-eletreto/>. Acesso em: 24 mar. 2022.
- BRÜEL & KJÆR. **O que são potência sonora e pressão sonora**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.bksv.com/pt/knowledge/blog/sound/sound-power-sound-pressure>. Acesso em: 12 maio 2022.
- CIGRÉ-BRASIL. Guia de Manutenção para Transformadores de Potência. **Cigré Brasil**, [s. l.], v. 15, p. 248, 2013.
- COPEL. **COPEL - Número de Transformadores de Distribuição**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2F01CA9BFEB3069990325740B005FF8E5>. Acesso em: 12 maio 2022.
- FILHO, A. M. A.; ESQUERRE, K. P. S. O. R. Modelagem Probabilística do Tempo de Vida dos Transformadores de Distribuição Elétrica do Estado da Bahia. **Iniciação Científica Cesumar**, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 67-76, jan./jun. 2013.
- FILIPPIN, C. G.; et. al. Medição e Controle de Vibração e Ruído em Transformadores de Subestações. **II Citenel**, [s. l.], p. 1106–1112, 2003.
- FILIPPO, J. G.; ÁVILA, J. I. P.; QUEIROZ, L. G. T. Análise de Falhas de Transformadores em Redes Aéreas de Distribuição. **Congresso de inovação tecnológica em energia elétrica (CITENEL)**, Belém, jun. 2009.
- FLUKE CORPORATION. **Transformador com vibração**. Disponível em: https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/2103194_a_w.pdf. Acesso em: 12 maio 2022.
- FONSECA, J. F. **Elementos de manutenção em transformadores de potência**. 2014. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade Estadual Paulista - UNESP, Guaratinguetá, 2014. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/123036/000810886.pdf?sequencia=1>.

HANTEK. **Hantek6002BE Series - Hantek Electronic & Your testing solution provider**. Disponível em: <http://www.hantek.com/products/detail/31>. Acesso em: 24 mar. 2022.

HOSTIN, D. **Como minimizar o ruído do transformador a seco**. Disponível em: http://www.sobretensao.com.br/uploads/downloads/paper_como_minimizar_ruidos_trf_seco_sobretensao.pdf. Acesso em: 22 nov. 2021.

LABELO PUCRS. **O que é Compatibilidade Eletromagnética (EMC)**. Disponível em: <https://www.pucrs.br/labelo/o-que-e-compatibilidade-eletromagnetica-emc/>. Acesso em: 15 maio 2022.

LAEP. **LAEP - Escalas dBSPL e dBA**. Disponível em: <https://laepi.com.br/voce-sabe-qual-a-diferenca-entre-db-e-dba/>. Acesso em: 10 maio 2022.

LIECHTI, C. **PySerial — pySerial 3.4 documentation**. Disponível em: <https://pyserial.readthedocs.io/en/latest/pyserial.html>. Acesso em: 24 mar. 2022.

MARTINS, M. A. G. Gestão da vida útil dos transformadores. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, [s. l.], v. 21, n. 3–4, p. 2–9, 2009.

MASCHIO, G.; *et. al.* **Análise de esforços de curto-circuito em transformadores empregando o método de elementos finitos**. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/553/2020/07/93073-field_submission_abstract_file2.pdf. Acesso em: 5 ago. 2022.

MATPLOTLIB. **Matplotlib — Visualization with Python**. 2021. Disponível em: <https://matplotlib.org/>. Acesso em: 24 mar. 2022.

MAXIM INTEGRATED. **Microphone Amplifier with AGC and Low-Noise MAX9814**. 2009. Disponível em: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX9814.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2022.

MERCADO CURI, E. I. **Metodologia de projeto de alocação de absorvedores dinâmicos para a redução de ruído emitido por transformador de potência**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia) - Controle e automação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MERCURI, J. R.; MARTINS, O. F.; TRAUTMANN, P. V. **Desenvolvimento de um sistema supervisor para análise de motores elétricos através da vibração mecânica**. 2011. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, 2011.

MOTA, J. P. T. **Estudo e caracterização experimental da magnetostricção da chapa magnética de transformadores de potência**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Instituto Superior de Engenharia do Porto - ISEP, [s. l.], 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Guia de engenharia para medições de alta exatidão com sensores**: Artigo técnico 2016. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>. Acesso em: 24 mar. 2022.

NAYLAMP. **Tutorial MPU6050, acelerómetro y giroscopio**. 2021. Disponível em: https://naylampmechatronics.com/blog/45_tutorial-mpu6050-acelerometro-y-giroscopio.html. Acesso em: 24 mar. 2022.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5356/1993. **Transformador de potência**. 1993. Disponível em: <http://www.ifba.edu.br/PROFESSORES/castro/NBR5356.PDF6.PDF> (ifba.edu.br). Acesso em: 12 maio 2022.

NI - NATIONAL INSTRUMENTS. **Medição de vibração com acelerômetro**. 2019. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/innovations/white-papers/06/measuring-vibration-with-accelerometers.html>. Acesso em: 14 maio 2022.

NUMFOCUS. **Pandas - Python data analysis library**. 2022. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/>. Acesso em: 24 mar. 2022.

NUMPY. **NumPy**. 2022. Disponível em: <https://numpy.org/>. Acesso em: 24 mar. 2022.

PLATÃO. **Citação de Platão**. [s. d.]. Disponível em: <https://www.pensador.com/frase/MjY3Mg/>. Acesso em: 24 mar. 2022.

POMILIO, J. A.; Deckmann S. M. **Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas**. 2020. Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2022.

PYPI. **Pyserial · PyPI**. 2022. Disponível em: <https://pypi.org/project/pyserial/>. Acesso em: 24 mar. 2022.

PYTHON. **Csv — CSV File reading and writing — Python 3.10.3 documentation**. 2022b. Disponível em: <https://docs.python.org/3/library/csv.html>. Acesso em: 24 mar. 2022.

PYTHON. **Time — Time access and conversions — Python 3.10.3 documentation**. 2022a. Disponível em: <https://docs.python.org/3/library/time.html>. Acesso em: 24 mar. 2022.

RAO, S. **Vibrações Mecânicas**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

RAVAGLIO, M. A. *et al.* Avaliação da vida útil dos transformadores da COPEL distribuição. **XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - SENDI**, 2004.

RAVAGLIO, M. A. *et al.* Avaliação da vida útil dos transformadores da COPEL distribuição - 2ª Etapa. *In: II CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA. Anais do II CITENEL*, 2003. p. 1081–1087.

ROSENTINO JUNIOR, A. J. P. **Estimativa dos esforços eletromecânicos em transformadores submetidos a um curto-circuito trifásico**. 2010. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal De Uberlândia, Uberlândia, 2010.

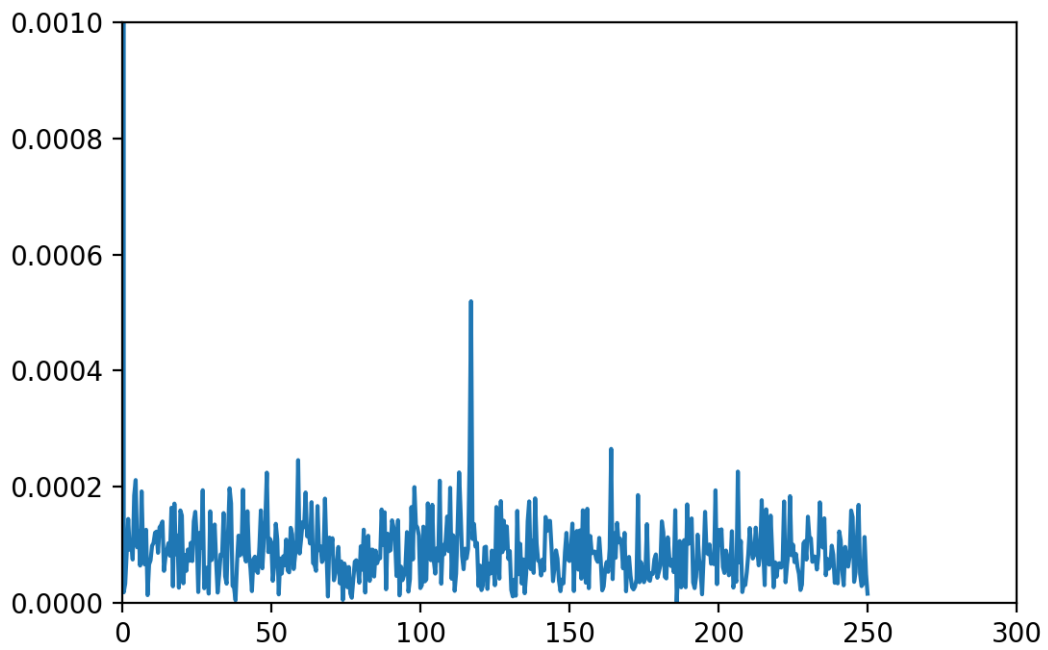
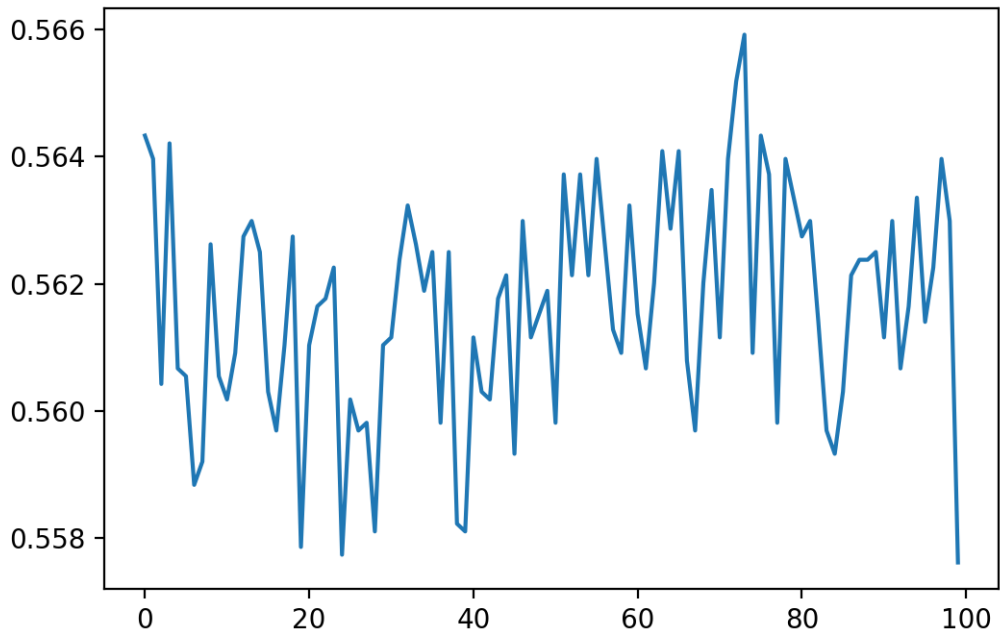
THOMSEN, A. **Tutorial: Acelerômetro MPU6050 com Arduino - FilipeFlop**. 2014. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/tutorial-acelerometro-mpu6050-arduino/>. Acesso em: 24 mar. 2022.

UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR - BUREAU OF RECLAMATION. **Facilities Instructions , standards , and techniques Transformer Diagnostics**: 2003. Denver, Colorado, [s. n.], 2003.

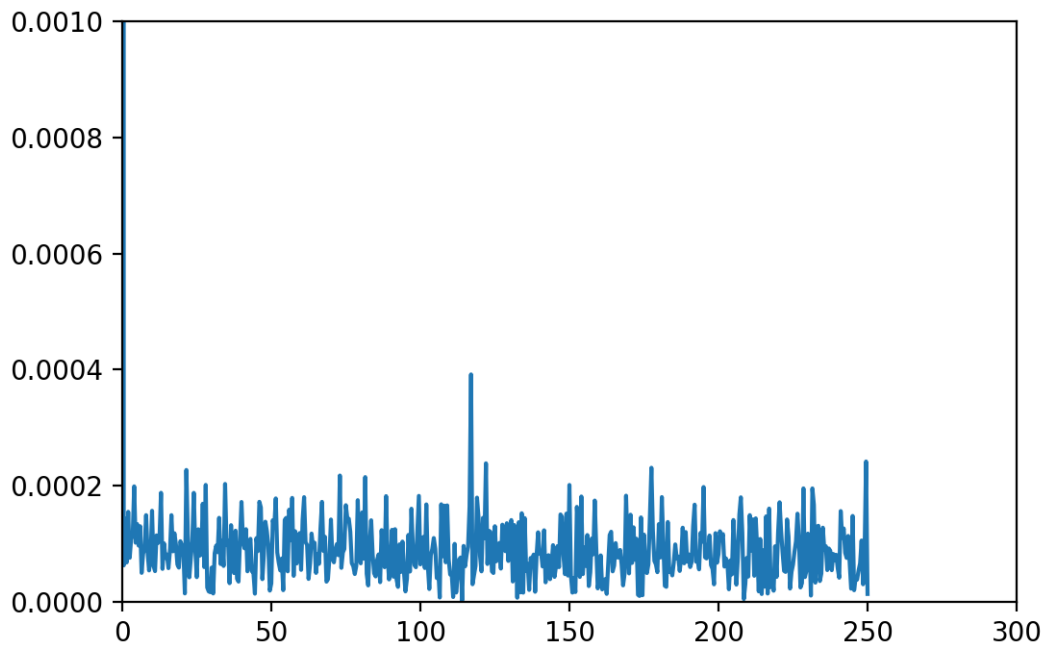
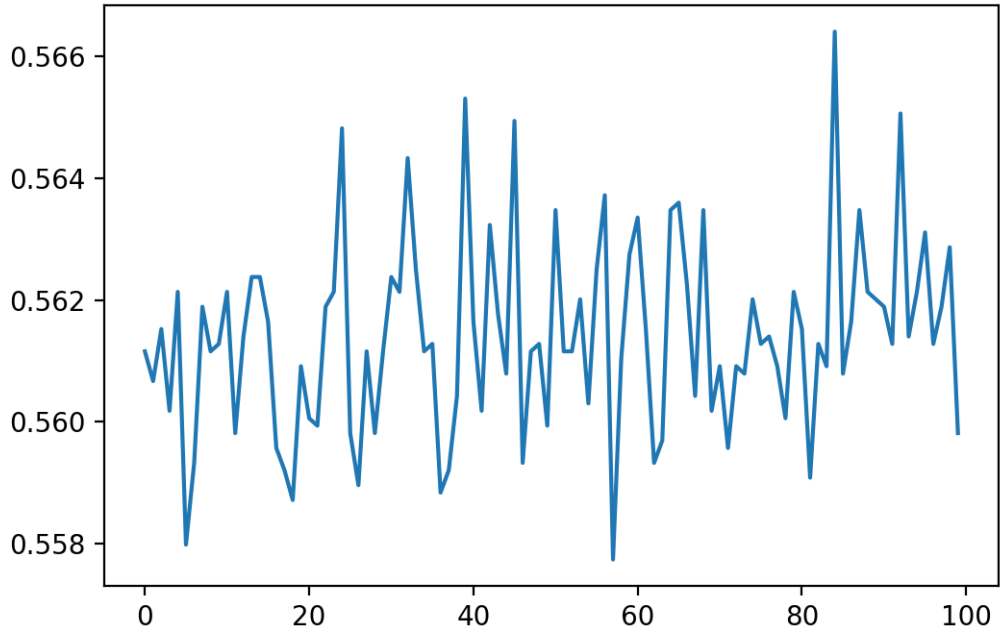
WEG. **Transformador de distribuição pequeno (até 300 kVA)**. 2019. Disponível em: https://www.weg.net/catalog/weg/FR/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%20e-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%9Cleo/Transformadores-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-a-%C3%9Cleo/30-a-300-kVA/Transformador-de-Distribui%C3%A7%C3%A3o-Pequeno-%20at%C3%A9-300-kVA%29/p/MKT_WTD_SMALL_DISTRIBUTION_TRANSFOR. Acesso em: 24 mar. 2022.

APÊNDICE A - Gráficos em maior resolução

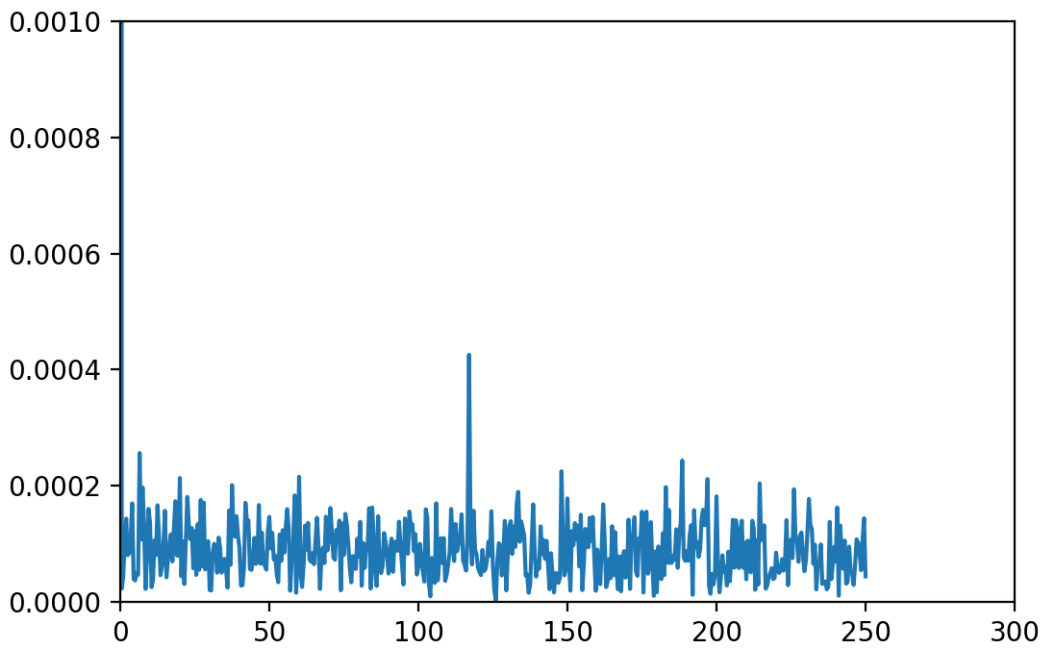
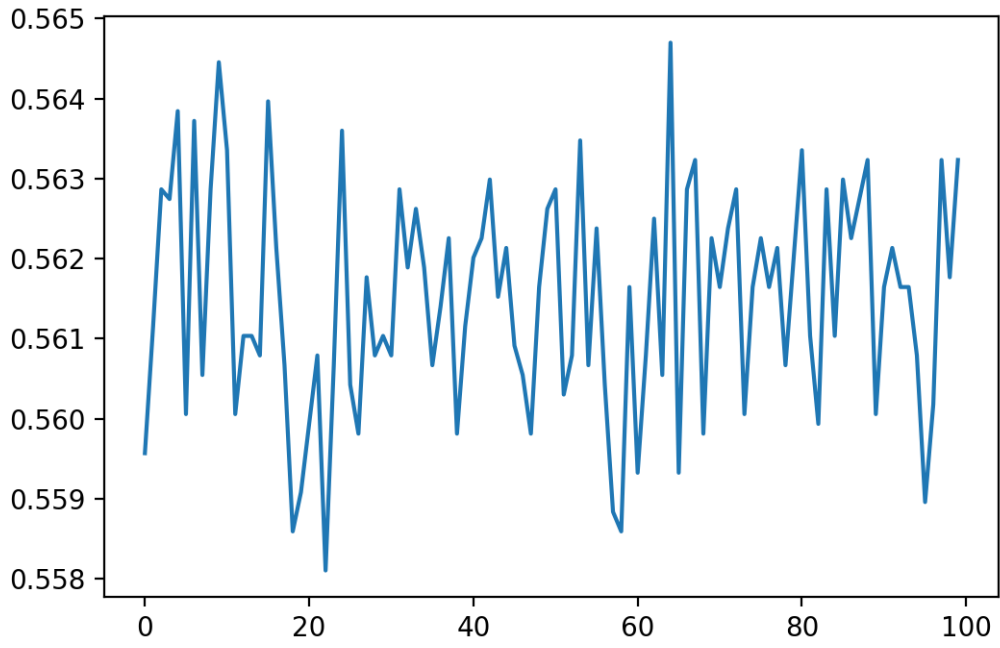
Acelerômetro MEMS, 1ohm, medido na fase R



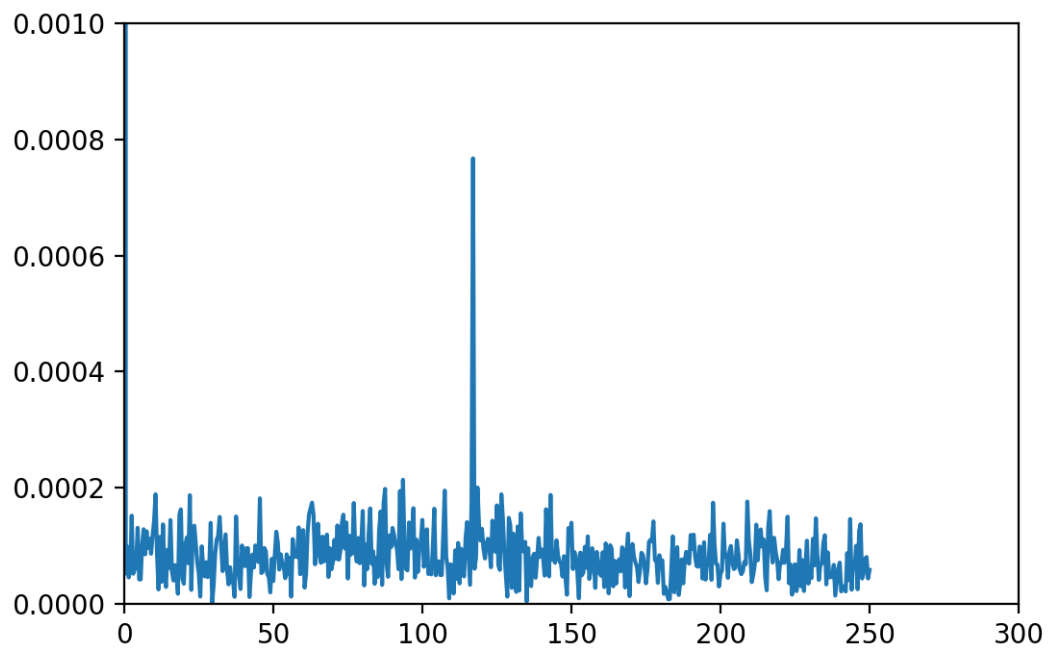
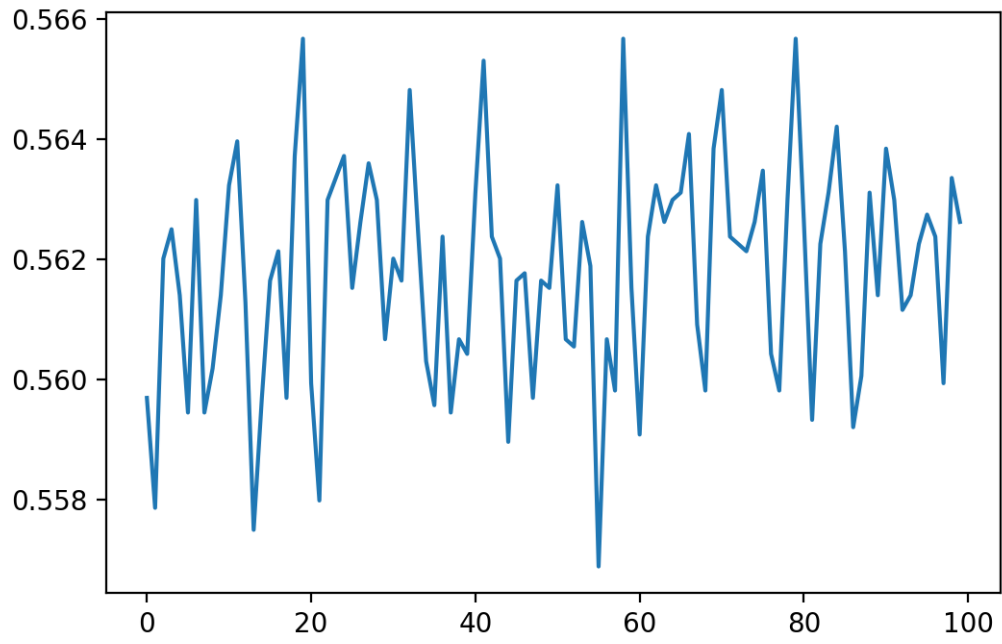
Acelerômetro MEMS, 1ohm, medido na fase S



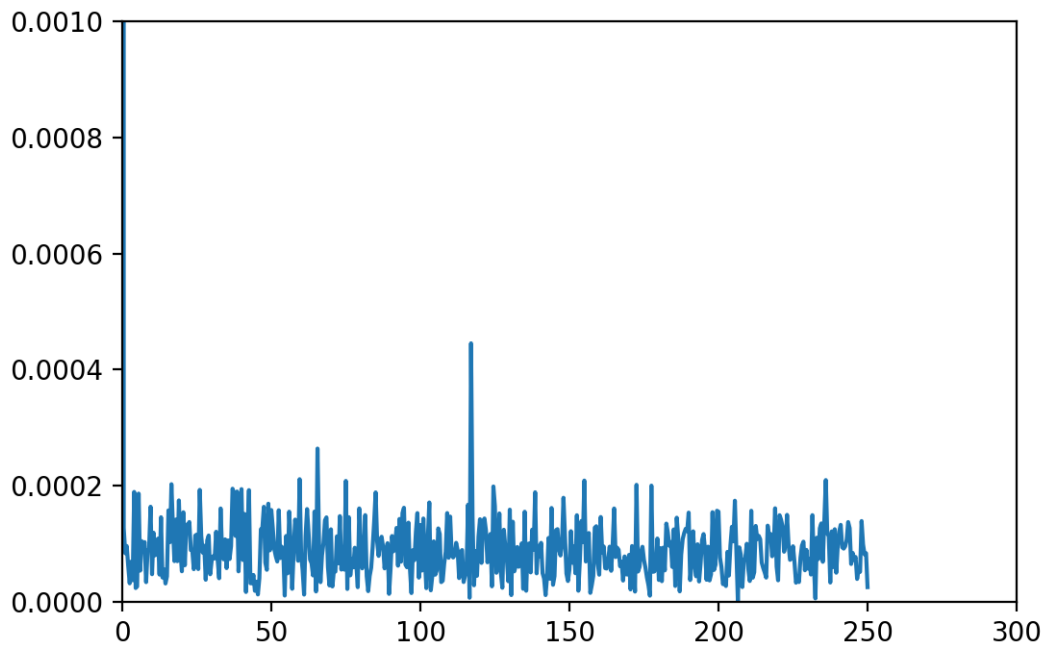
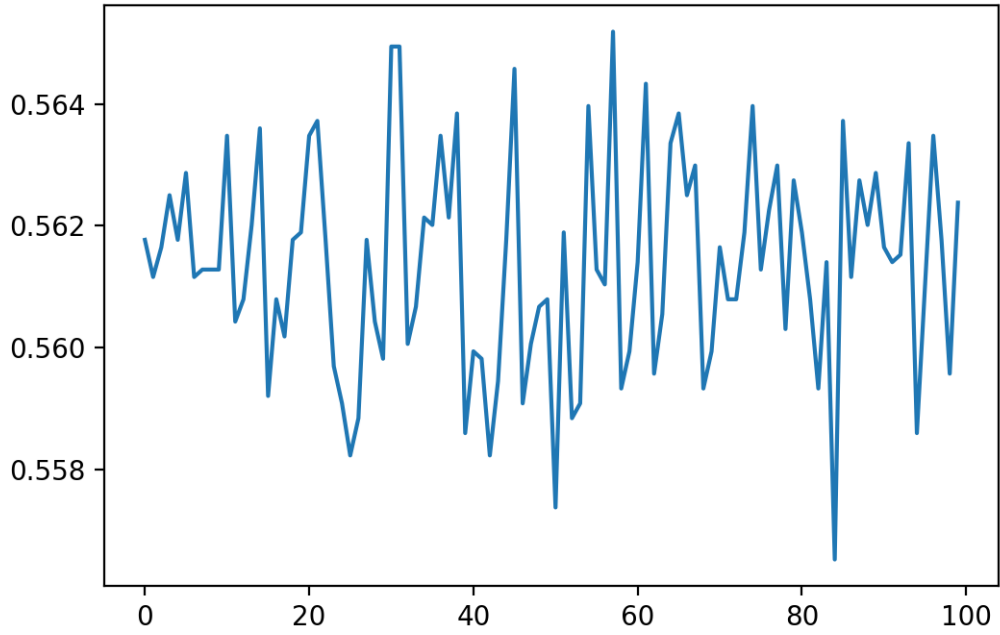
Acelerômetro MEMS, 1ohm, medido na fase T



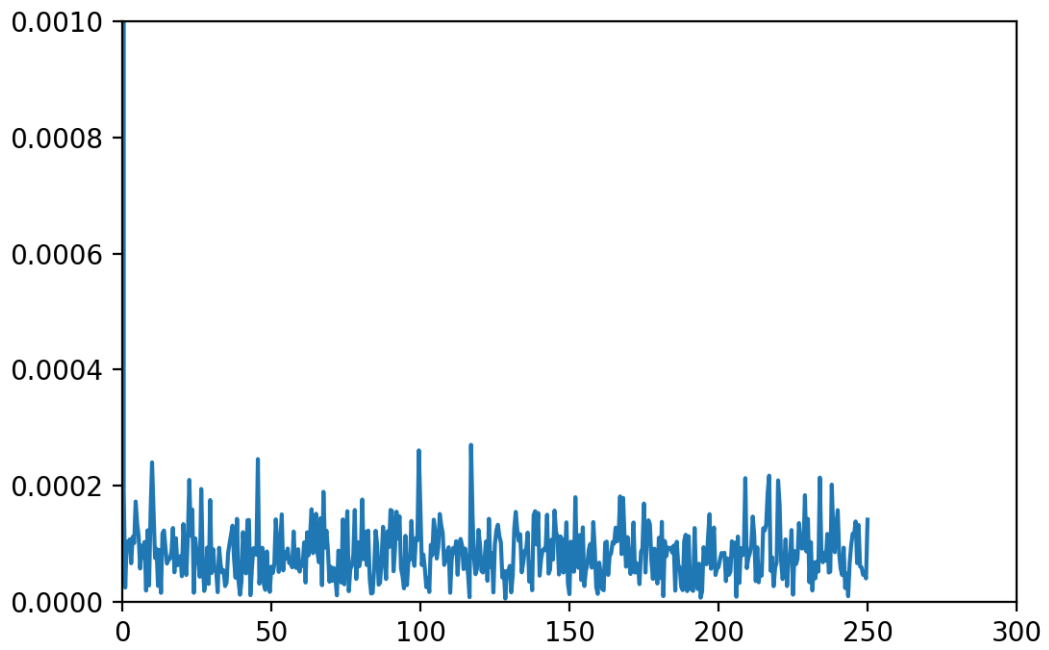
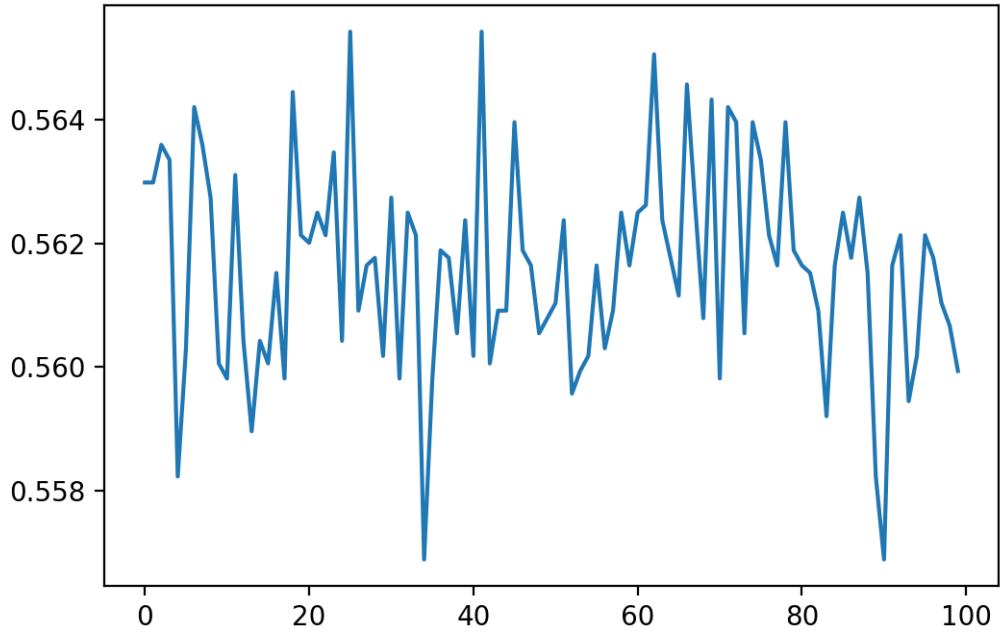
Acelerômetro MEMS, 0,5ohm, medido na fase R



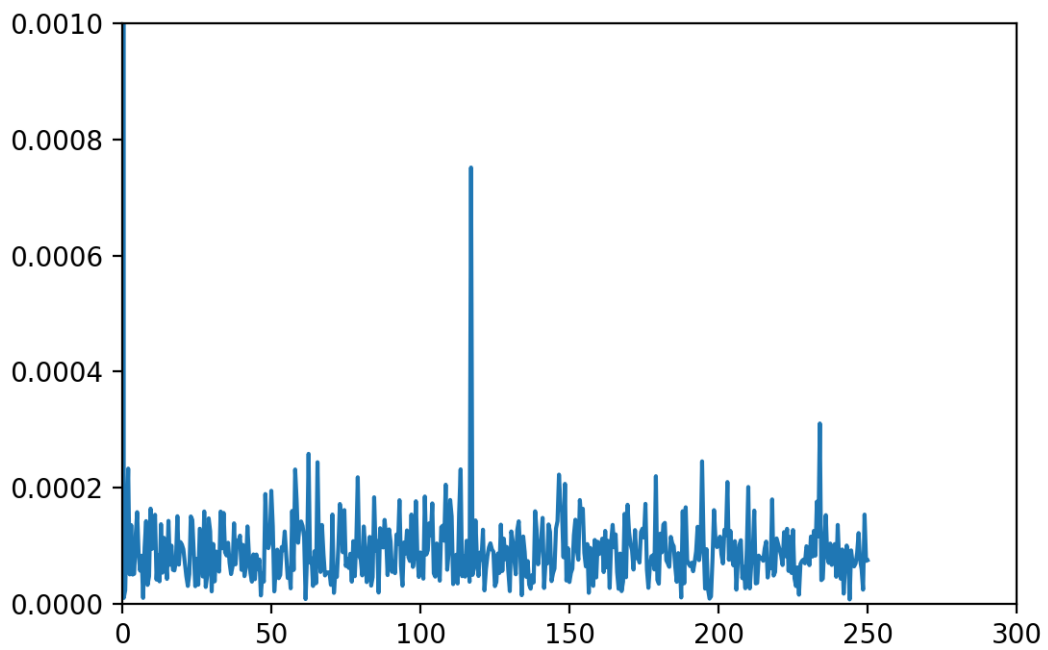
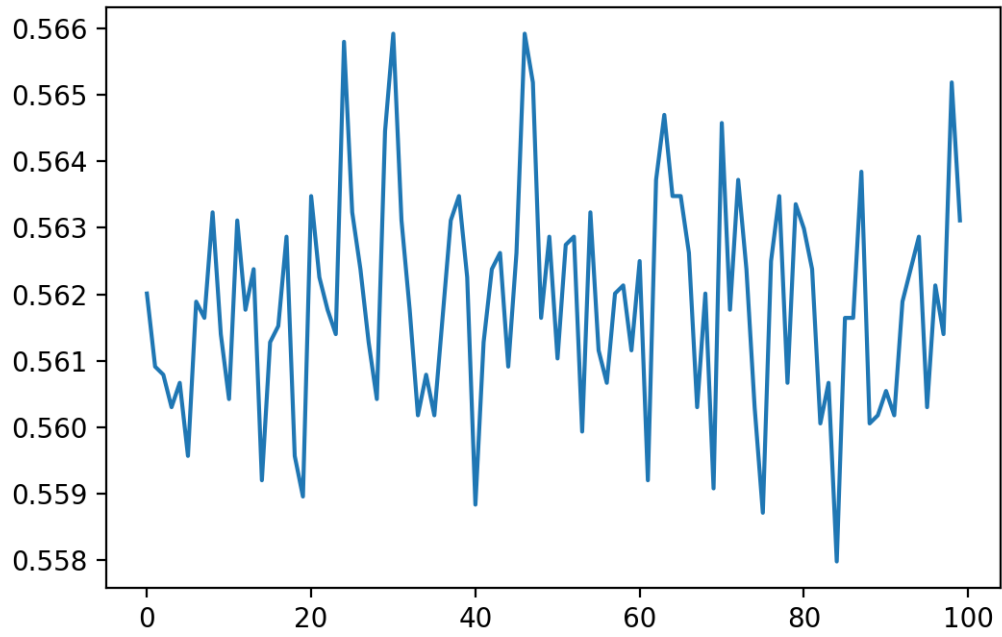
Acelerômetro MEMS, 0,5ohm, medido na fase S



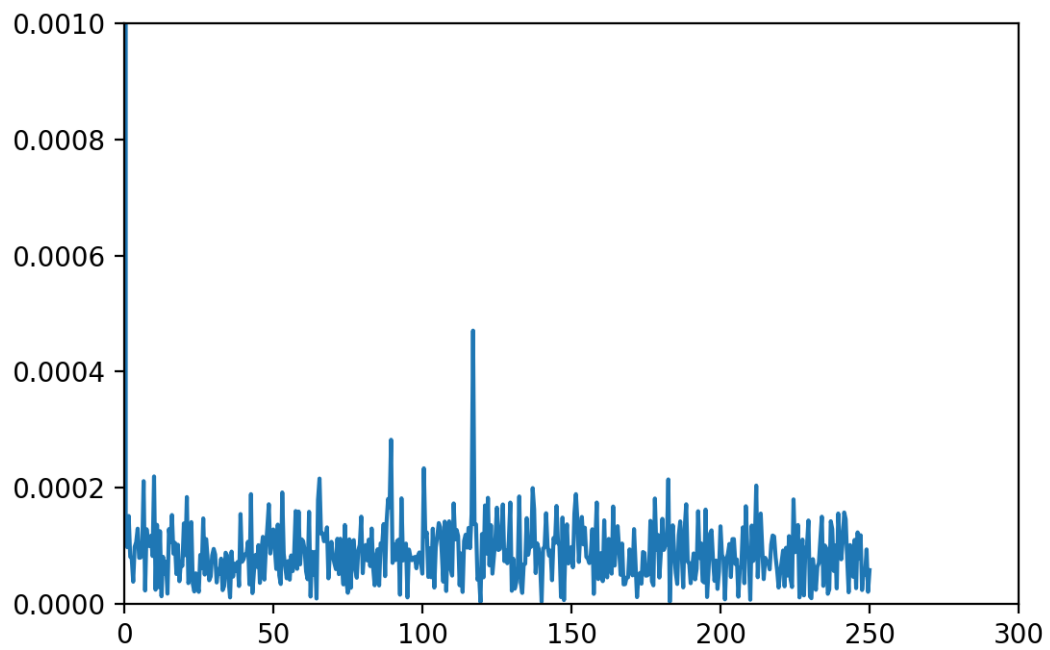
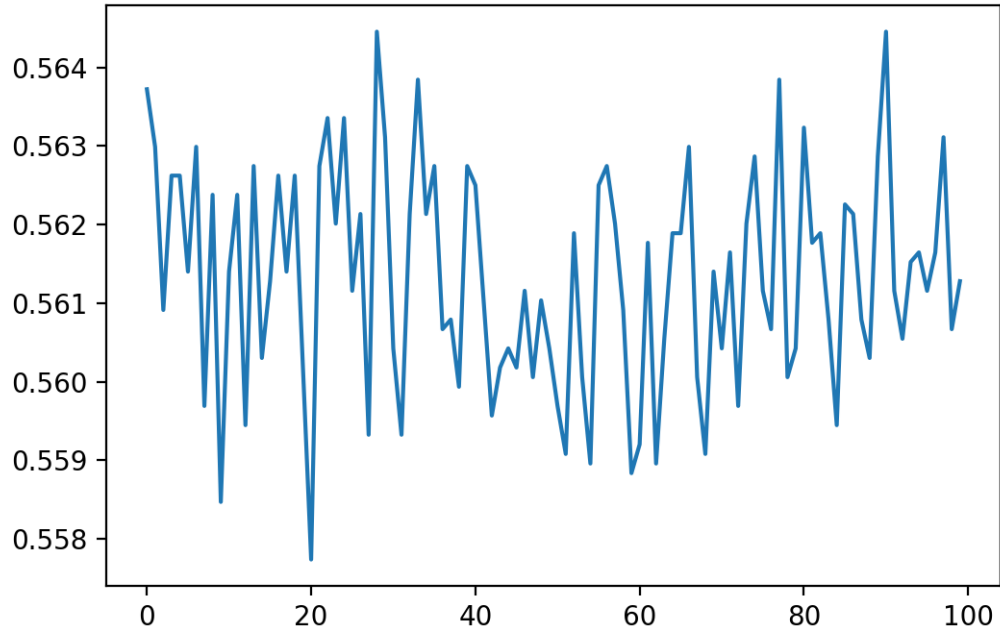
Acelerômetro MEMS, 0,5ohm, medido na fase T



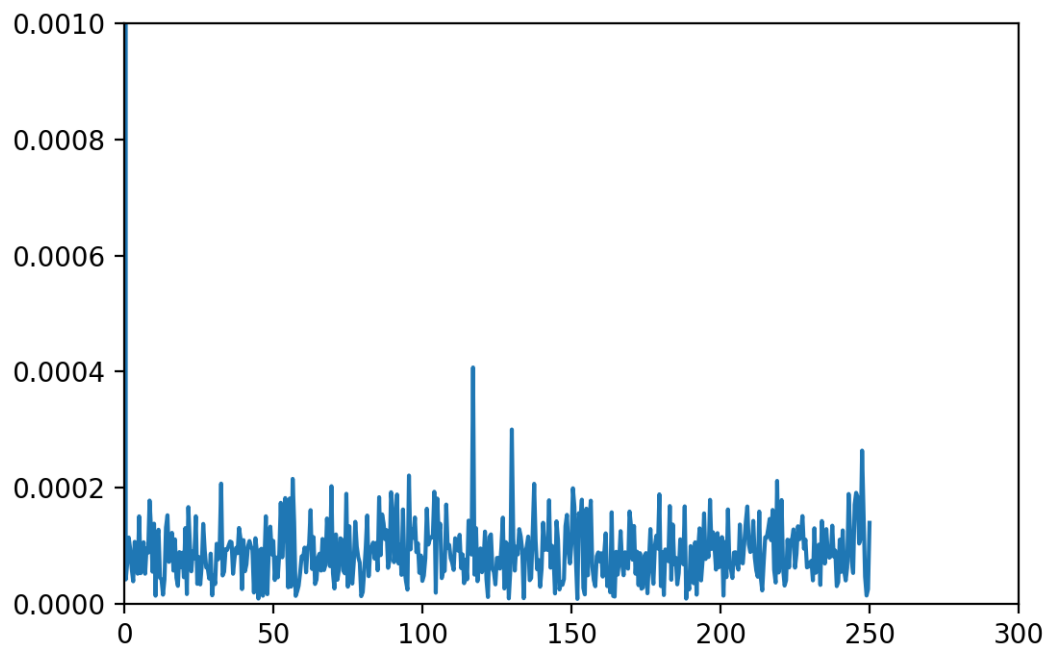
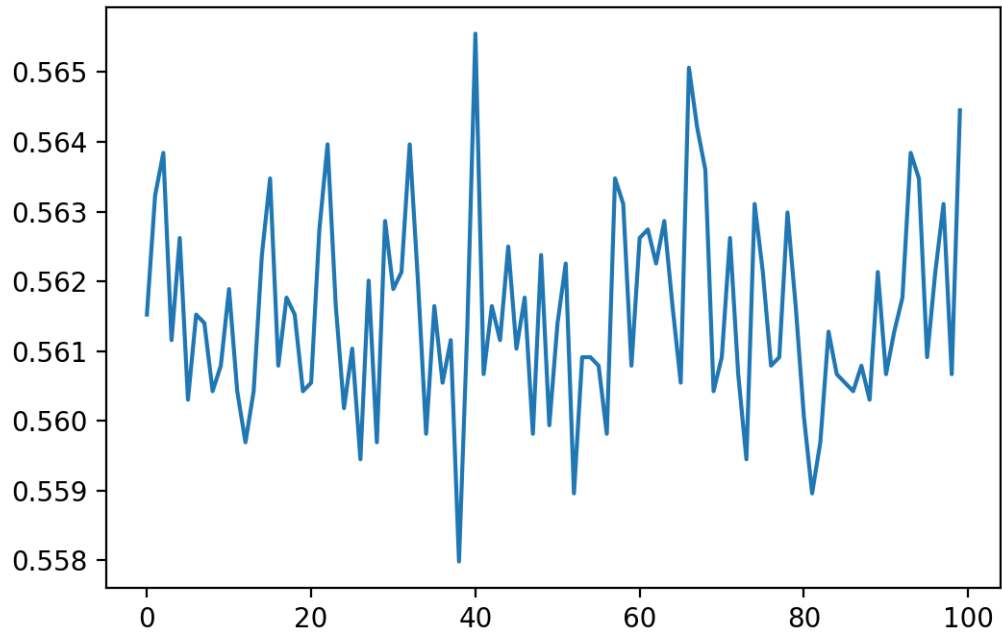
Acelerômetro MEMS, 0,25ohm, medido na fase R



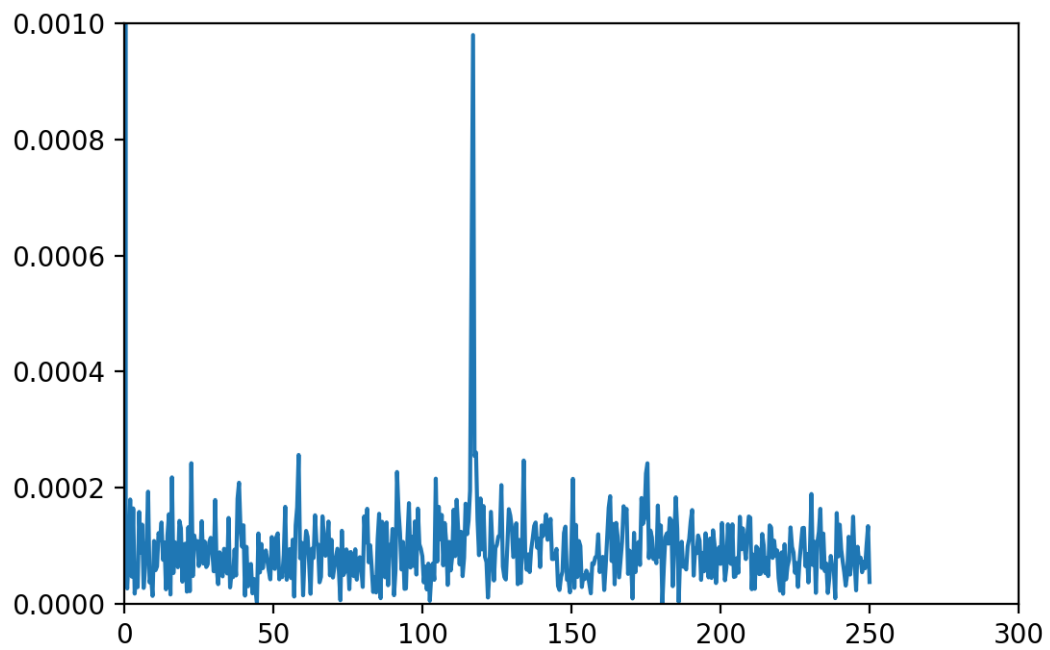
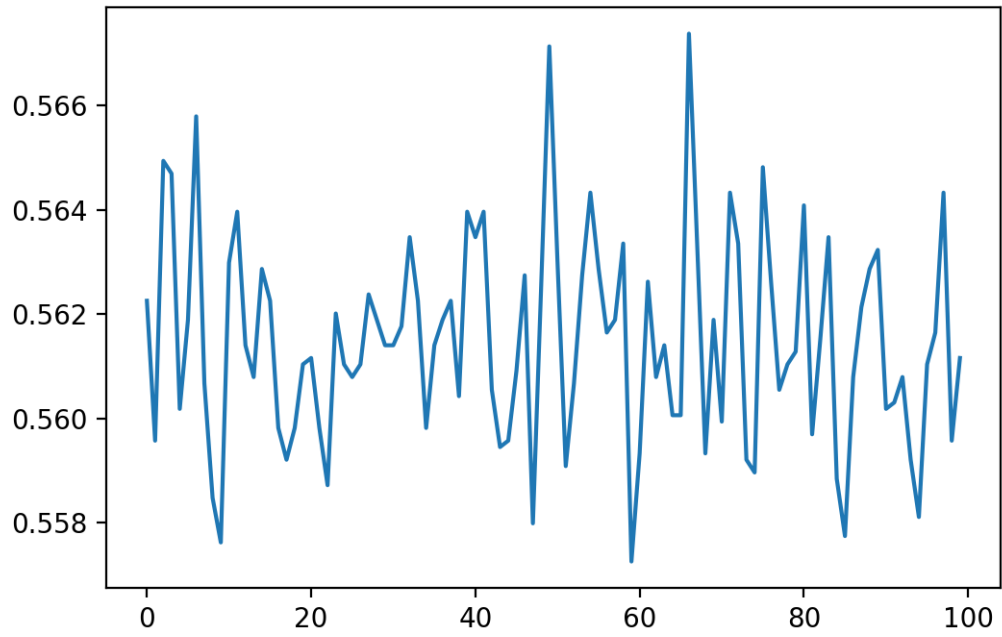
Acelerômetro MEMS, 0,25ohm, medido na fase S



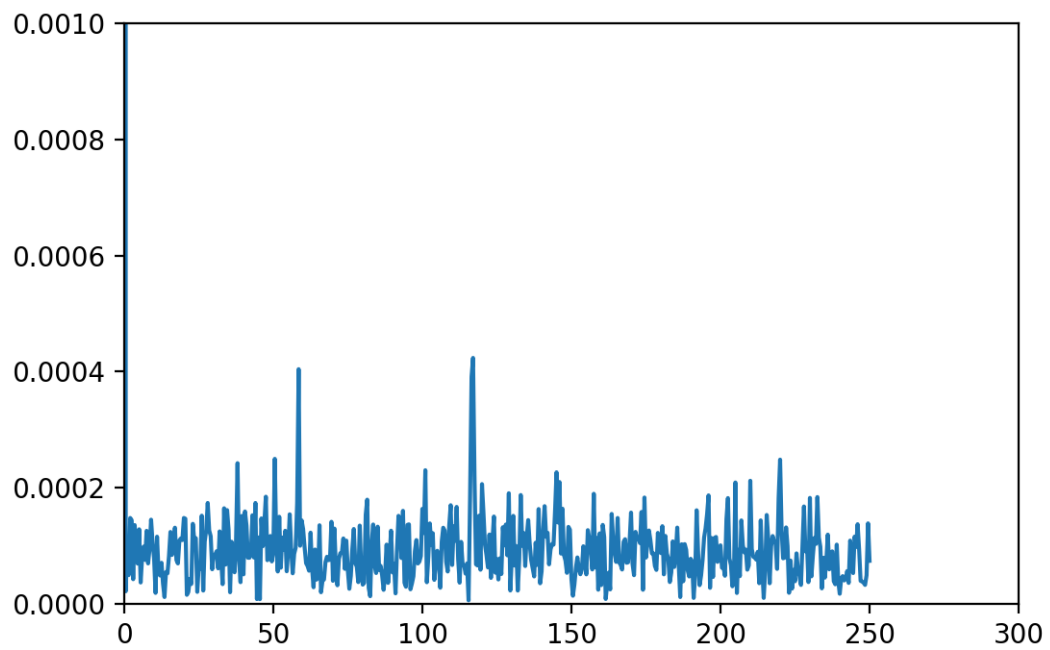
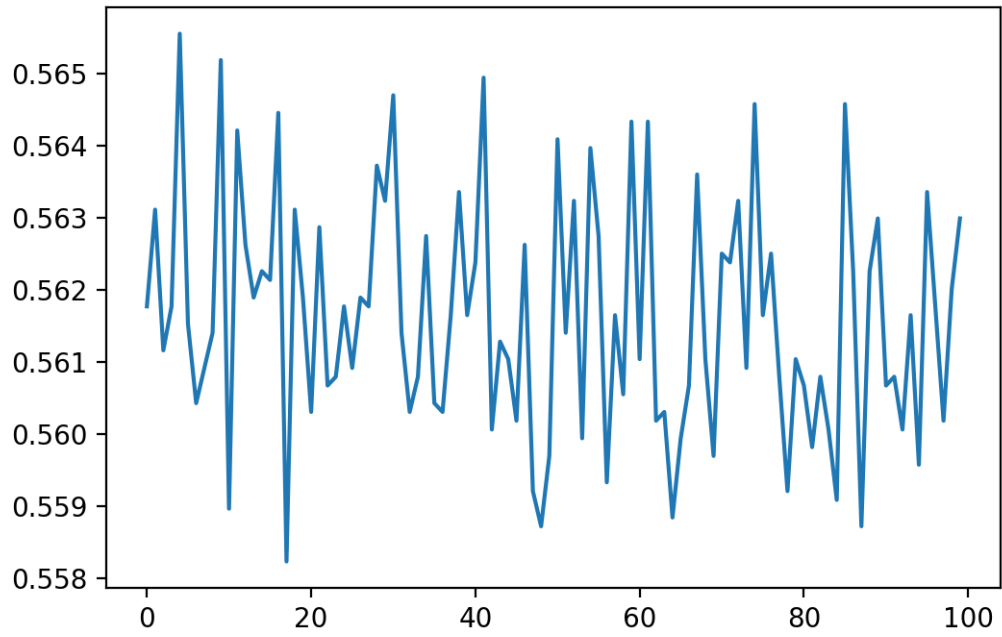
Acelerômetro MEMS, 0,25ohm, medido na fase T



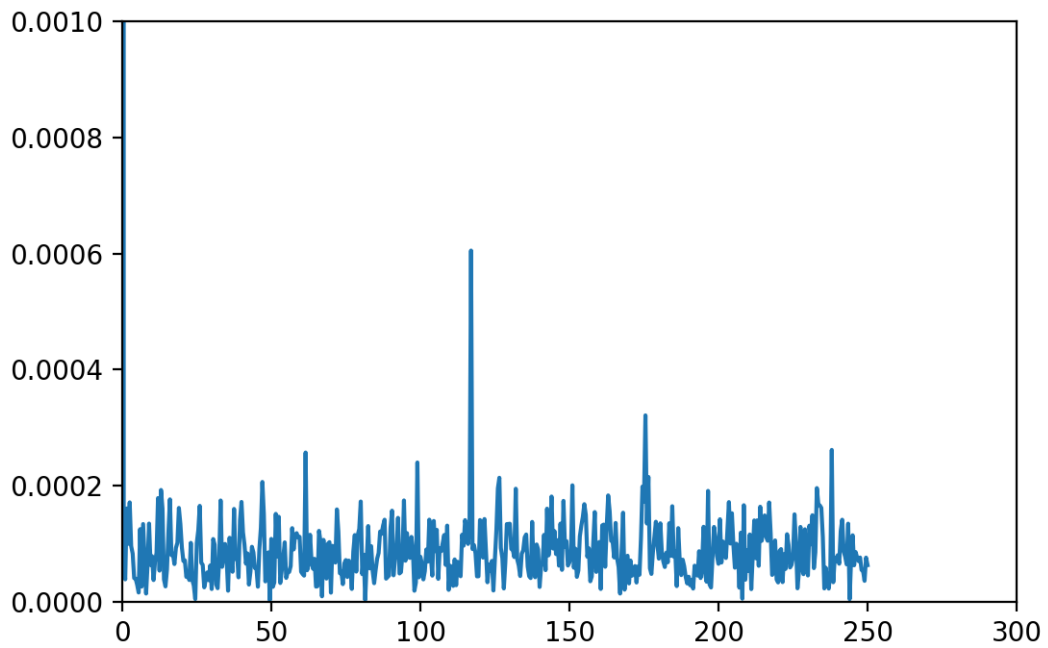
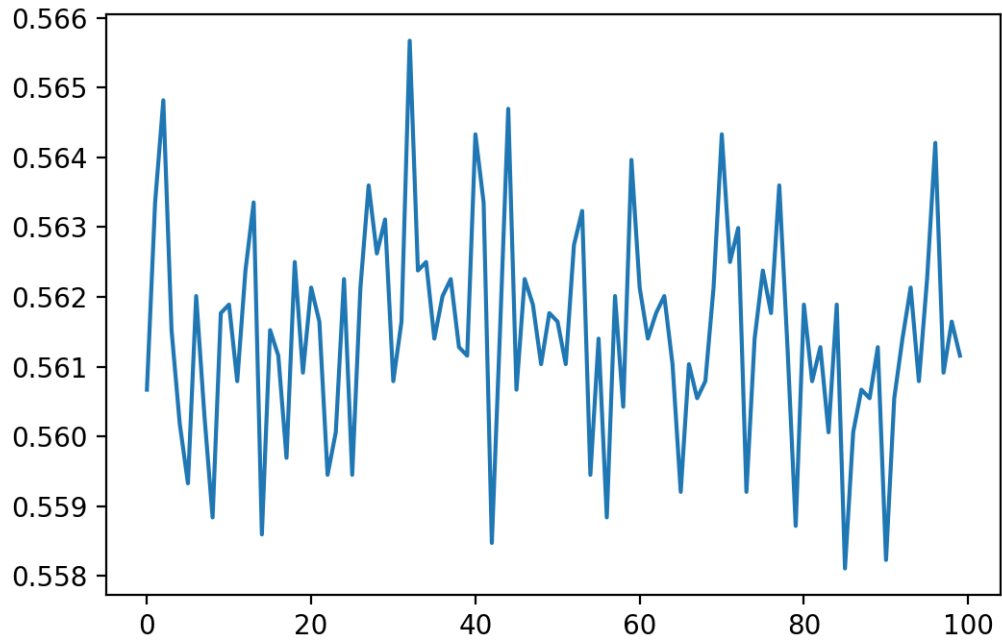
Acelerômetro MEMS, 0,5ohm mais diodo retificador, medido na fase R



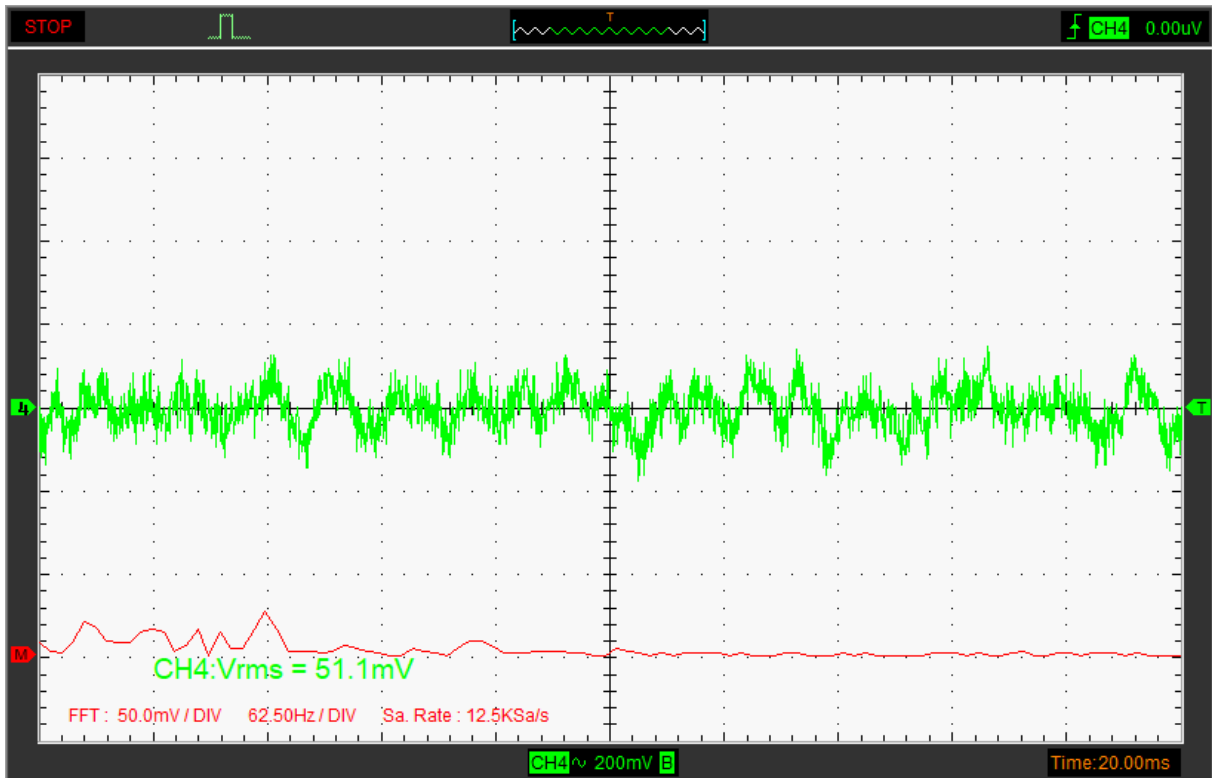
Acelerômetro MEMS, 0,5ohm mais diodo retificador, medido na fase S



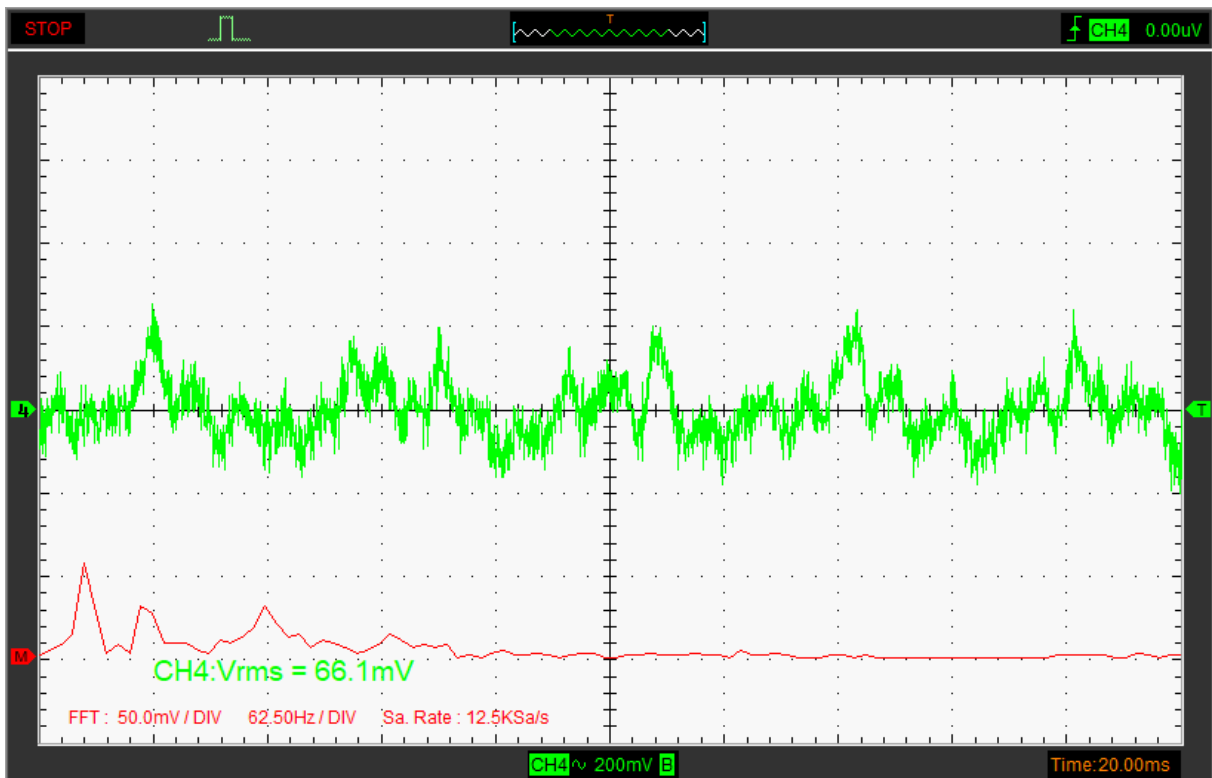
Acelerômetro MEMS, 0,5ohm mais diodo retificador, medido na fase T



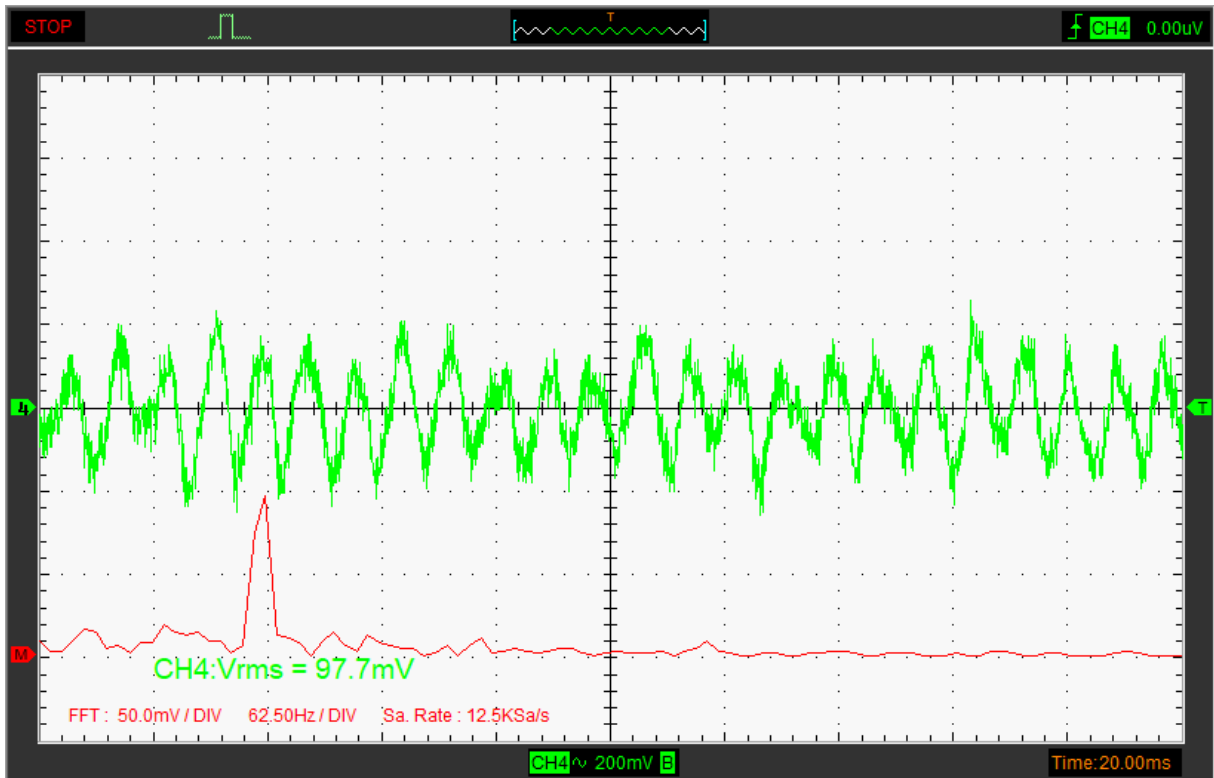
Acelerômetro Microfone, desligado, sobre a bobina de cobre, na lateral R



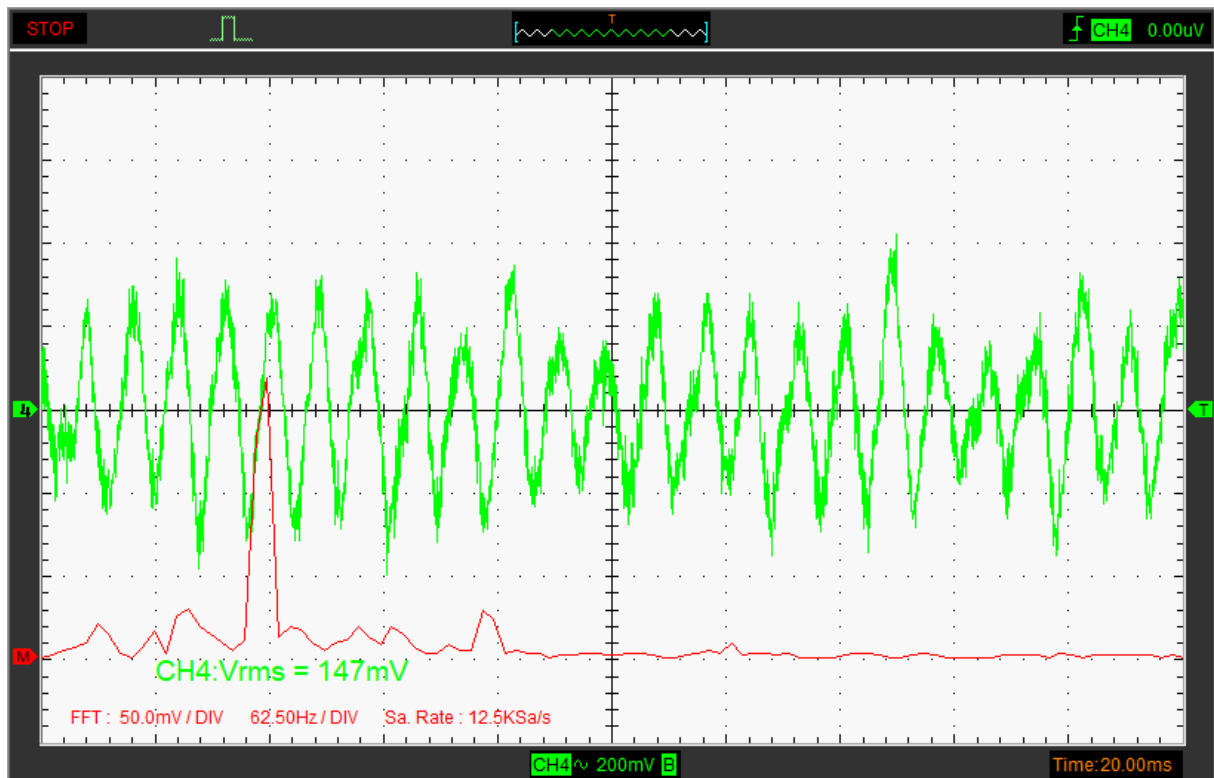
Acelerômetro Microfone, desligado, no alto do transformador, sobre o núcleo de aço, no centro, na bobina S



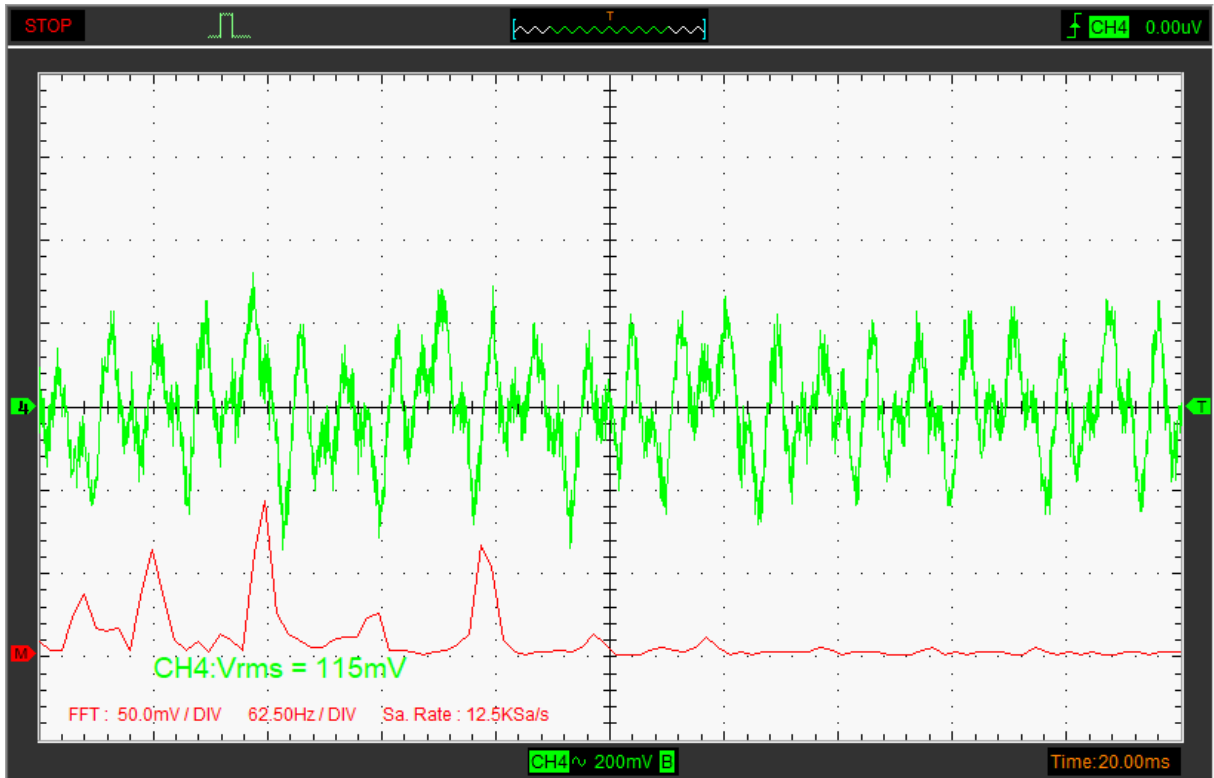
Acelerômetro Microfone, ligado sem carga, sobre a bobina de cobre, na lateral R



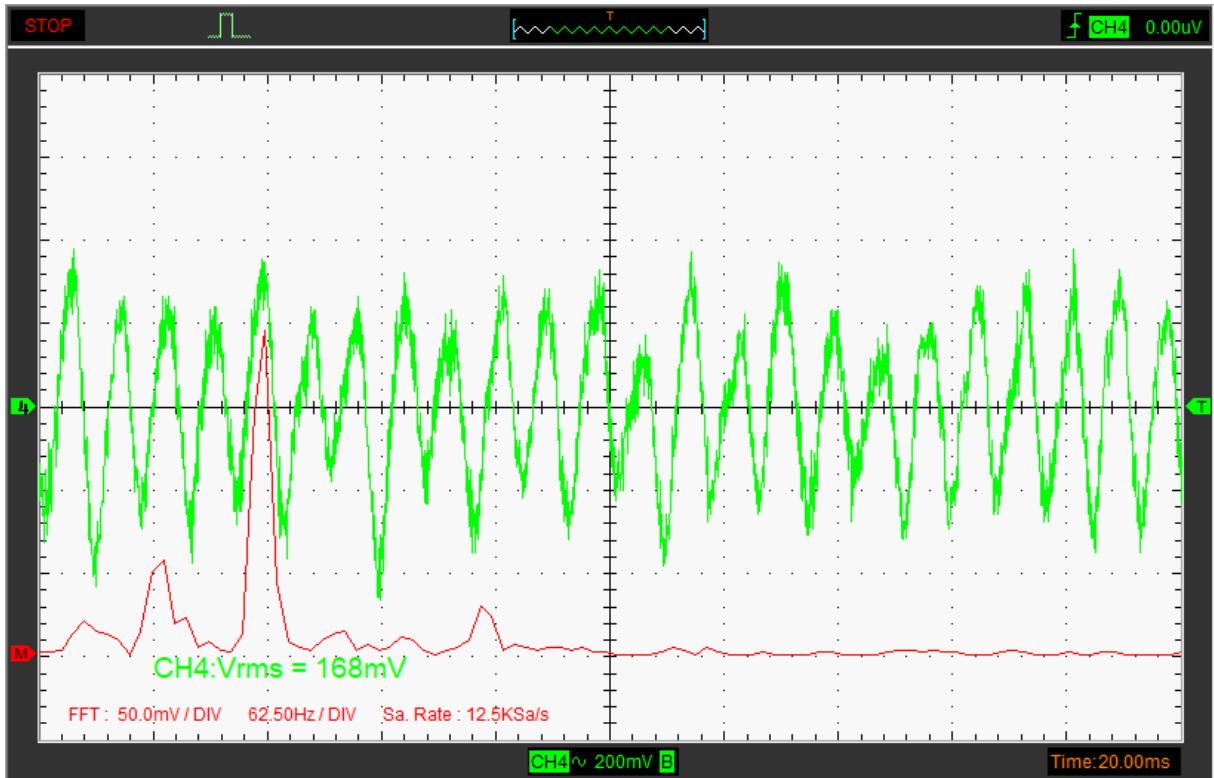
Acelerômetro Microfone, ligado sem carga, no alto do transformador, sobre o núcleo de aço, no centro, na bobina S



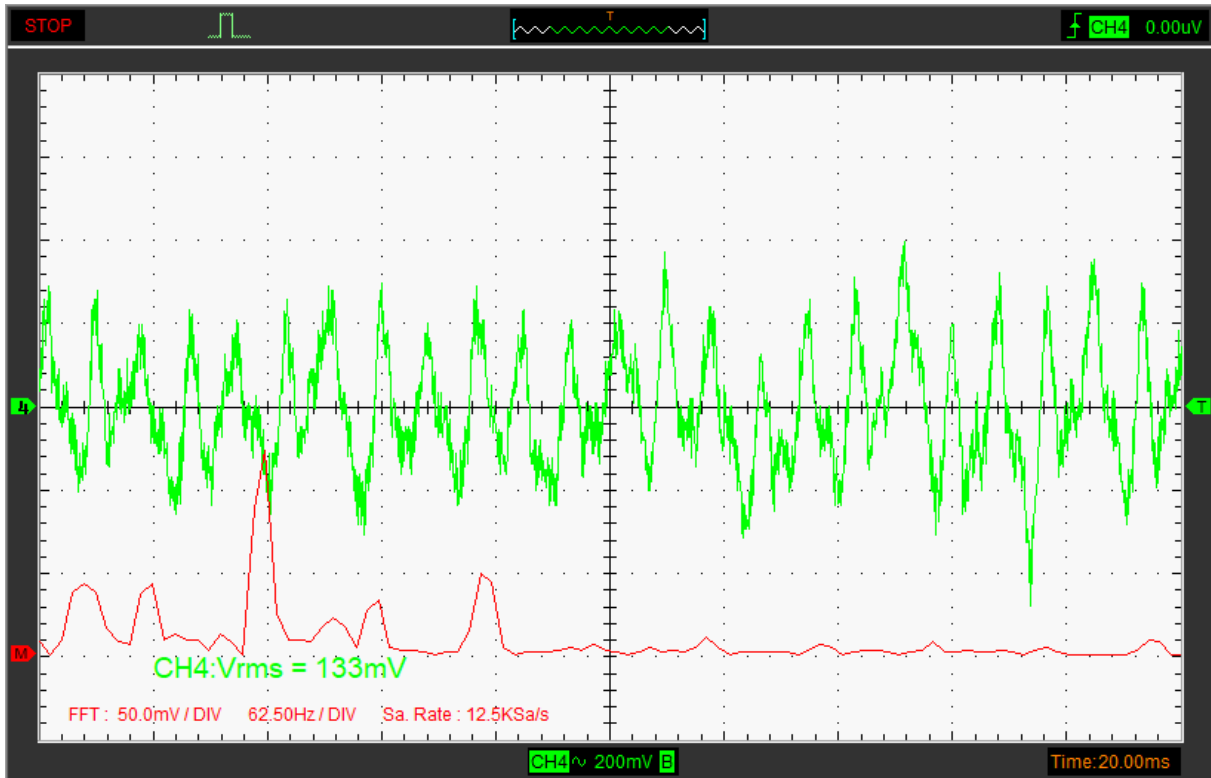
Acelerômetro Microfone, ligado com 2ohm, sobre a bobina de cobre, na lateral R.



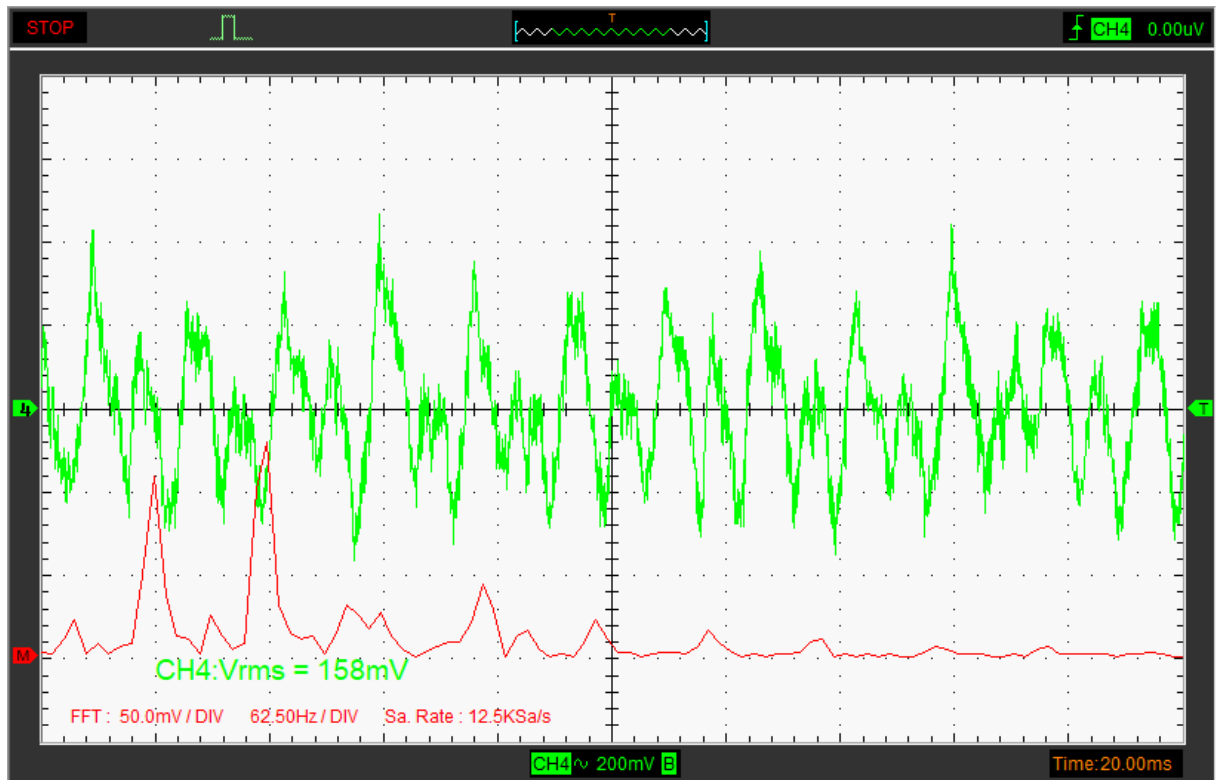
Acelerômetro Microfone, ligado com 2ohm, no alto do transformador, sobre o núcleo de aço, no centro, na bobina S



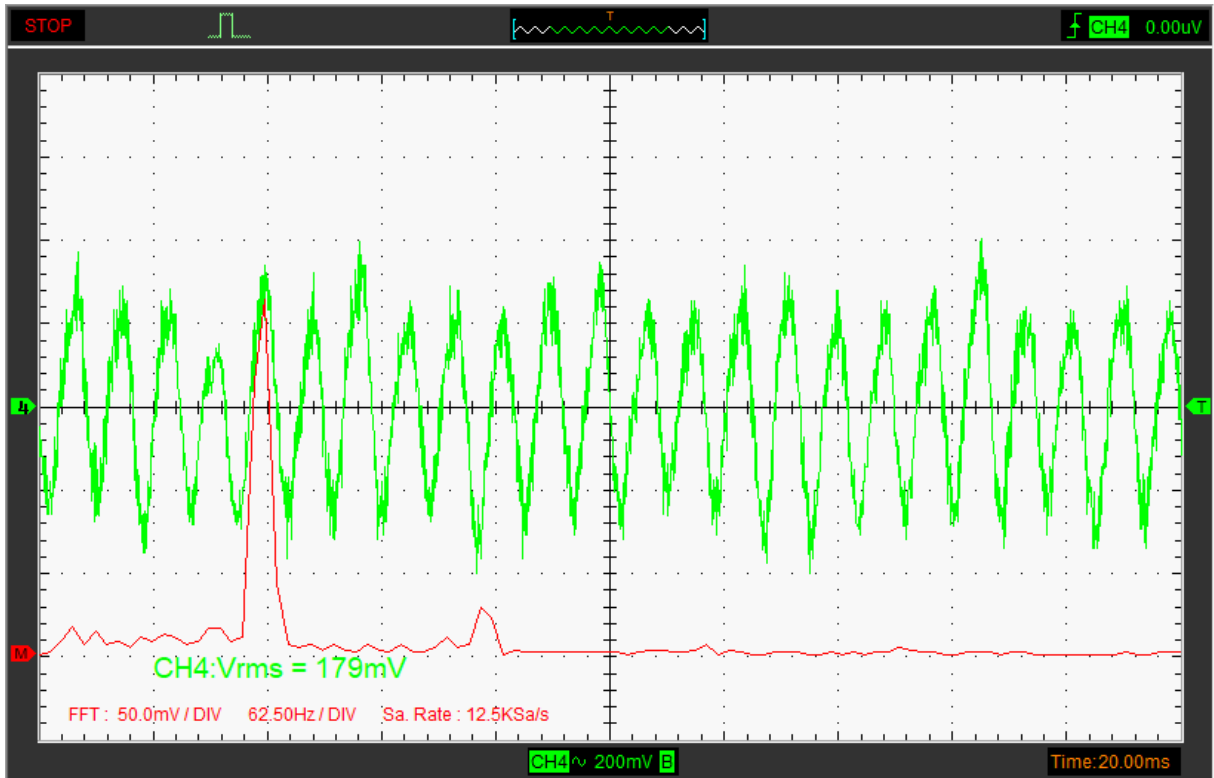
Acelerômetro Microfone, ligado com 2ohm e diodo retificador, no alto do transformador, sobre o núcleo de aço, no centro, na bobina S



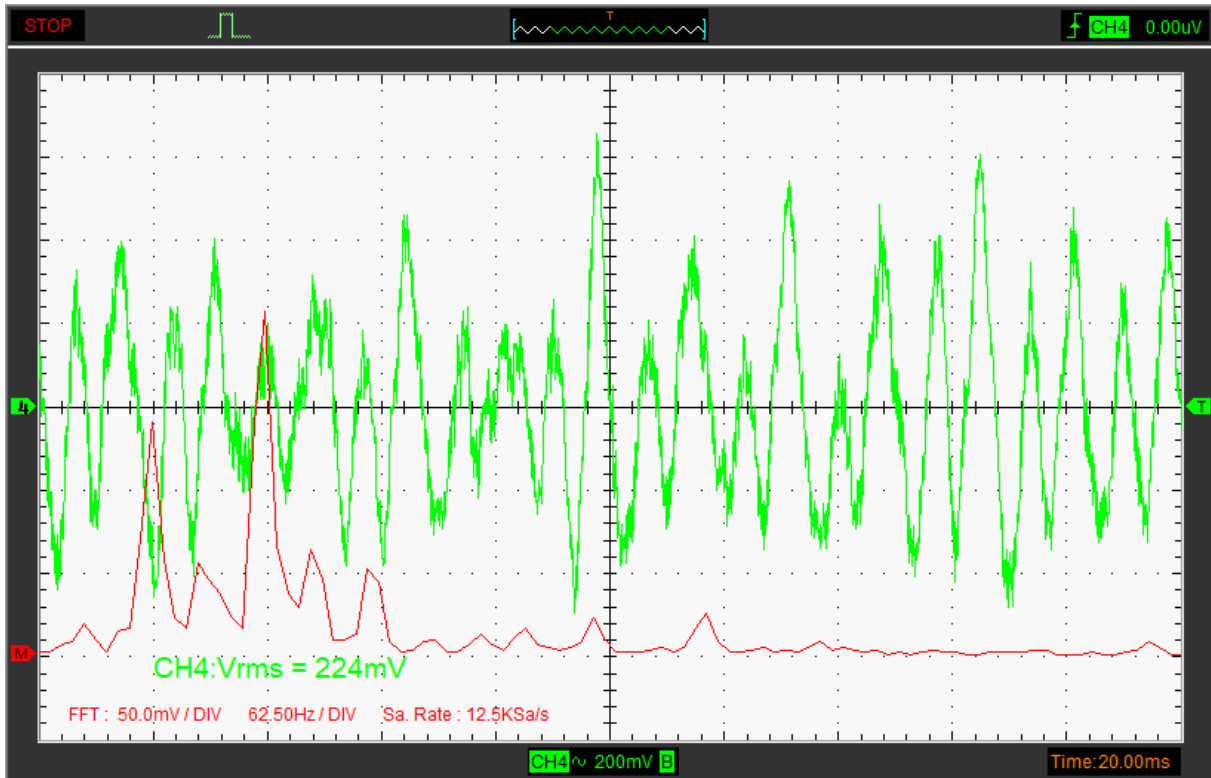
Acelerômetro Microfone, ligado com 1ohm, sobre a bobina de cobre, na lateral R.



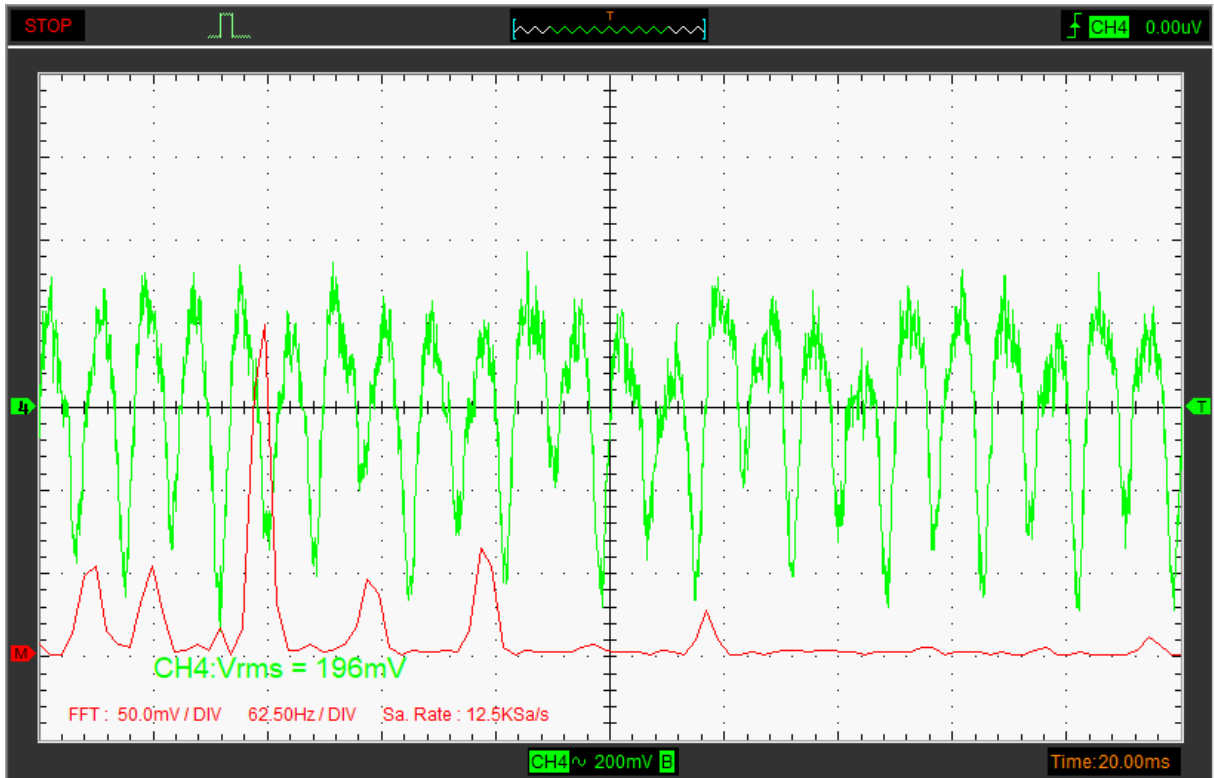
Acelerômetro Microfone, ligado com 1ohm, no alto do transformador, sobre o núcleo de aço, no centro, na bobina S



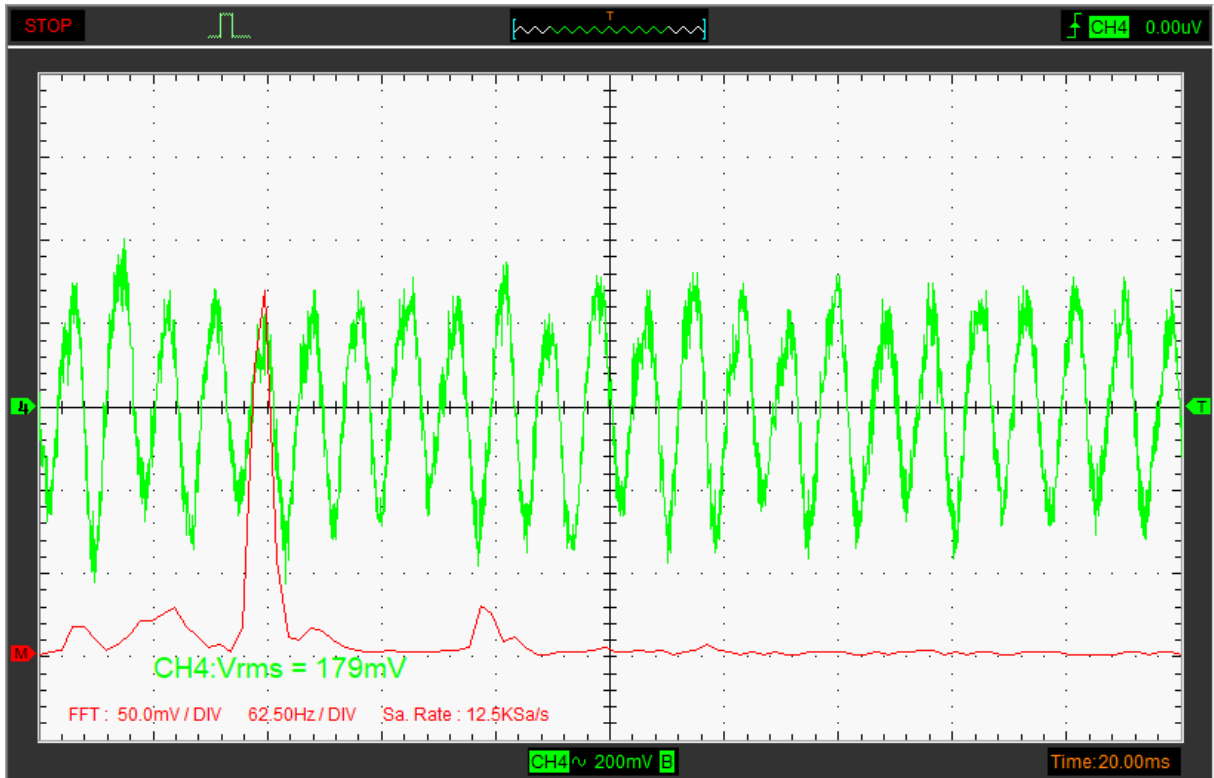
Acelerômetro Microfone, ligado com 1ohm e diodo retificador, no alto do transformador, sobre o núcleo de aço, no centro, na bobina S



Acelerômetro Microfone, ligado com 0,5ohm, sobre a bobina de cobre, na lateral R.



Acelerômetro Microfone, ligado com 0,5ohm, no alto do transformador, sobre o núcleo de aço, no centro, na bobina S



Acelerômetro Microfone, ligado com 0,5ohm e diodo retificador, no alto do transformador, sobre o núcleo de aço, no centro, na bobina S

