

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO DE UM VIBRADOR ELETRODINÂMICO (*SHAKER*) PORTÁTIL PARA
APLICAÇÕES DIDÁTICAS

por

Tito Conrado Stoffel Efrom

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 09 de julho de 2019.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO DE UM VIBRADOR ELETRODINÂMICO (*SHAKER*) PORTÁTIL PARA
APLICAÇÕES DIDÁTICAS

por

Tito Conrado Stoffel Efrom

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof^a. Dr^a. Thamy Cristina Hayashi
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto, Fabricação e Automação.**

Orientador: Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Prof. Dr. Flávio José Lorini

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 09 de julho de 2019.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho, que iniciou de uma forma despreziosa - principalmente devido ao prazo exíguo para sua realização – acabou tornando-se mais extenso e complexo no seu decorrer. Se foi possível e se, de alguma forma, teve um resultado satisfatório, foi porque muitas mãos o construíram, às quais é preciso agradecer:

Primeiramente ao Prof. Perondi, por ter aceitado o desafio de me orientar, por ter sugerido o tema e por todo o suporte, com o qual sempre pude contar.

Aos meus pais Belkis e Dante e aos meus irmãos, Bianca, Caio, Andreas e Cora, cada um contribuindo de sua maneira, todos de suma importância nesse trabalho. Em um momento como este é uma grande felicidade poder contar como uma família numerosa e próxima. Mãe, obrigado pela confiança e apoio incondicional e pai, obrigado pelas dicas, ajuda na marcenaria e pelas ferramentas emprestadas. Bianca, obrigado pela torcida. Caio, obrigado pela revisão do trabalho. Andreas obrigado pela ajuda na usinagem e Cora, obrigado pela revisão do abstract.

Finalmente, mas não menos importante, agradeço à minha noiva, amiga e companheira Mariana, por todo apoio psicológico nesta fase e por toda a compreensão com o tempo que dediquei a esse trabalho.

EFROM, T.C.S. **PROJETO DE UM VIBRADOR ELETRODINÂMICO (SHAKER) PORTÁTIL PARA APLICAÇÕES DIDÁTICAS**. 2019. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

RESUMO

O presente trabalho apresenta o projeto de um *shaker* (vibrador eletrodinâmico) portátil, com ímã permanente, visando a aplicações didáticas. Foi utilizado um modelo com um grau de liberdade (GDL) para análise de suas características vibratórias. O desenvolvimento do projeto foi realizado objetivando atender os requisitos da aplicação e possuir parâmetros operacionais semelhantes aos produtos comerciais (fabricados fora do país). Um protótipo foi construído e teve suas principais características medidas. A frequência de ressonância, a rigidez e o amortecimento do sistema construído foram levantados experimentalmente, tendo como base a curva de impedância elétrica. A curva de aceleração no domínio frequência foi também obtida, por meio de acelerômetro. Os resultados mostraram que o *shaker* construído apresenta características semelhantes às do modelo teórico, sendo as principais diferenças causadas, na maior parte, pela não consideração – no modelo simulado – da influência da indutância da bobina móvel. O projeto atingiu os requisitos iniciais, podendo ser empregado com ou sem sistema de controle realimentado, dependendo da exigência da aplicação. Foram testadas fontes de alimentação em tensão e em corrente, tendo sido verificado que a resposta de aceleração mostra-se mais homogênea no caso de excitação por fonte de corrente.

PALAVRAS-CHAVE: vibrador eletrodinâmico, vibração, teste de vibração;

EFROM, T.C.S. **PROJECT OF A PORTABLE ELECTRODYNAMIC SHAKER FOR EDUCATIONAL APPLICATIONS.** 2019. 26 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

ABSTRACT

This study presents the project of a portable electrodynamic shaker with permanent magnet, focused on educational applications. A one degree of freedom (DOF) model was used to analyze its vibratory characteristics. The development of the project was carried out in order to meet the application requirements and to have operational parameters similar to commercial products (manufactured abroad). A prototype was built and its main performance characteristics collected. The resonance frequency, the rigidity and the damping factor of the built system were measured experimentally, based on the electrical impedance curve. The acceleration curve in the frequency domain was also obtained, with the use of accelerometer. The results showed that the built shaker presents characteristics similar to those of the theoretical model, the main differences being due, for the most part, to the nonconsideration - in the simulated model - of the influence of the coil inductance. The project met the initial requirements, being able to be used with or without a feedback control system, depending on the demanded application. Voltage and current drive were tested, and the acceleration response is found to be more homogeneous in the case of current excitation.

KEYWORDS: electrodynamic shaker, vibration, vibration testing.

INDICE

	Pág
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos:	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
3.1 Vibrador Eletrodinâmico	2
3.2 A grandeza βL e a linearidade do sistema.....	3
3.3 O sistema de suspensão	3
3.4 Modelagem como um sistema de 1 GDL.....	3
3.5 Modelagem como um sistema com mais de 1 GDL.....	4
3.6 Impedância elétrica	5
4. PROJETO e TESTES	6
4.1 Requisitos de projeto.....	6
4.2 Projeto conceitual.....	7
4.3 Projeto executivo	8
4.4 Fabricação do protótipo.....	8
4.5 Medidas mecânicas do protótipo	9
4.6 Medidas elétricas do protótipo.....	10
4.7 Obtenção da curva de aceleração.....	11
4.8 Limitações dos métodos.....	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	12
6. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE I: Levantamento dos fatores de qualidade total (Qts), mecânico (Qms) e elétrico, (Qes) a partir da curva de impedância elétrica.	16
APÊNDICE II: Fotografias dos componentes e da medida de aceleração.....	18
APÊNDICE III: Medida da aceleração no domínio tempo.....	19
APÊNDICE IV: Medida da resistência elétrica R_e	20

1. INTRODUÇÃO

Vibradores eletrodinâmicos, chamados popularmente de *shakers*, são amplamente empregados na indústria para ensaios de equipamentos e componentes mecânicos. Responsáveis por excitar mecanicamente o corpo sob teste, podem ser utilizados para verificar a sua confiabilidade estrutural ou levantar suas características vibratórias. Menos comuns, os pequenos *shakers* de ímã permanente podem ser utilizados para verificação em corpos menores (como componentes eletroeletrônicos) e para fins didáticos, em demonstrações sobre ressonância e modos de vibração em uma estrutura ou ainda para averiguação e calibração de sensores. Um equipamento de menores dimensões tem a vantagem de ser facilmente transportado a um laboratório - ou sala de aula - para demonstrações, por exemplo, além de ser construtivamente mais econômico e de consumir menos energia.

1.1 Motivação

Não obstante a existência e a fabricação de *shakers* comerciais em território nacional, há uma carência de produtos de pequeno porte, ideais para uso portátil. Ademais, trabalhos acadêmicos usualmente se referem a produtos industrializados de grandes dimensões. Assim, percebeu-se a oportunidade de desenvolvimento de um dispositivo que possa ter emprego no ambiente acadêmico e que também possa contribuir para o ensino e para a pesquisa.

1.2 Objetivos:

O objetivo principal é projetar um vibrador eletrodinâmico portátil, que seja adequado ao uso em ambiente acadêmico. Além disso, os objetivos secundários são:

- Investigar, na bibliografia sobre o tema, o funcionamento eletromecânico de vibradores eletrodinâmicos. Analisar os principais parâmetros que definem seu funcionamento e também definir métodos de levantamento das grandezas mensuráveis experimentalmente;
- Levantar os requisitos fundamentais para um *shaker* portátil, visando o uso em aplicações didáticas;
- Projetar um sistema que cumpra os requisitos levantados, usando um modelo teórico;
- Construir um protótipo a partir do projeto, medir e avaliar suas grandezas mecânicas e elétricas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar de não terem sido encontrados trabalhos focados diretamente no projeto de vibradores, a literatura é rica ao tratar de sua mecânica. Lang e Snyder, 2001, apresentam um trabalho detalhado, focado na definição das características mais importantes de desempenho de um vibrador eletrodinâmico, a partir de um modelo com 3 graus de liberdade (GDL). Dentre as conclusões do trabalho, destacam a importância do controle da corrente elétrica de alimentação, para que não sejam excedidos os limites mecânicos, de dissipação de potência e de excursão da bobina móvel do *shaker*.

Ferreira, 2017, realizou a análise do comportamento da membrana de um *shaker*, comparando um modelo matemático com uma simulação por elementos finitos da estrutura. Os resultados foram limitados por restrições associadas ao software, mas foi possível observar a importância de o *shaker* trabalhar restrito às frequências superiores à de sua ressonância fundamental, onde ocorrem as maiores solicitações estruturais.

A maior parte dos trabalhos encontrados é focada na questão do controle em ensaios de vibrações. Donadel, 2012, implementou um algoritmo de controle heurístico para controlar o movimento de um *shaker*. Comparou os resultados com outro controlador PID e

concluiu que ambos são eficientes, com vantagem para o controle heurístico em situações de grandes amplitudes.

Della Flora, 2009, fez um estudo detalhado de sistemas de controle para sinais senoidais em um vibrador comercial, em duas abordagens distintas, com estratégia de controle no domínio tempo e com estratégia no domínio frequência. Para projetar os sistemas, modelou o *shaker* com 2 GDL. Dentre os resultados, obteve sucesso em controlar o sinal de saída do amplificador para que se aproximasse do sinal senoidal, mas constatou a dificuldade em compensar a ocorrência do fenômeno de ressonância com a própria estrutura ensaiada, devido à ampla possibilidade de valores em diferentes estruturas.

Percebida a semelhança dinâmica entre vibradores eletrodinâmicos e alto-falantes, buscou-se revisar o funcionamento destes últimos. Silva, 2008, faz um estudo das analogias eletromecânicas de alto-falantes e estratégias para levantar seus principais parâmetros através da impedância elétrica, comparando diversas técnicas de medição.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Vibrador Eletrodinâmico

O vibrador (ou *shaker*) é a principal ferramenta utilizada na realização de testes de vibração em laboratório, pois é o equipamento responsável por produzir a oscilação mecânica necessária para excitar e fazer vibrar um corpo de prova. Entre as principais máquinas de vibração, tem-se as hidráulicas, inerciais e eletrodinâmicas, além dos *shakers* pneumáticos e piezoelétricos. Os equipamentos do tipo eletrodinâmico têm maior utilização, pois podem operar com boa linearidade em ampla faixa de frequências e com diferentes formatos de onda [Silva, 2005]. Com um *shaker* eletrodinâmico é possível obter vibração de maneira controlada (aceleração, frequência, etc), podendo, portanto, ser usado em diversas aplicações, como a determinação das características dinâmicas de máquinas e estruturas, ou ainda em teste de fadiga de materiais [Rao, 2010].

É observado por Lang e Snyder, 2001, que a estrutura de um vibrador eletrodinâmico é semelhante à de um alto-falante comum. No centro do *shaker* há uma bobina de fio, suspensa em um campo magnético radial fixo. Quando uma corrente elétrica passa através desta bobina, uma força axial – proporcional à corrente - é produzida e é transmitida à mesa, onde é fixado o componente a ser testado. A Figura 3.1 ilustra as partes básicas do sistema.

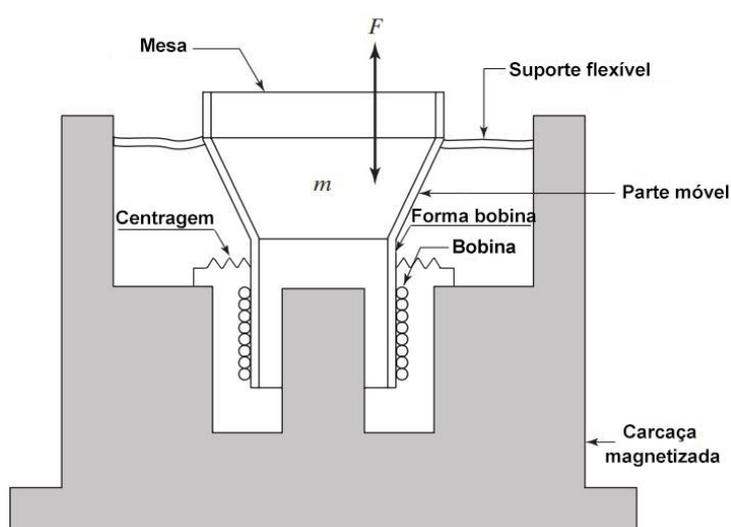


Figura 3.1 - Estrutura básica de um vibrador eletrodinâmico.

Harris e Piersol, 2002, informam que nos *shakers* maiores, o fluxo magnético é gerado por bobinas de campo - com núcleo de ferro doce - geralmente integradas à carcaça da máquina. Alternativamente, em pequenos *shakers*, o campo magnético é gerado por ímãs permanentes.

3.2 A grandeza βL e a linearidade do sistema

A intensidade da força mecânica causada pela interação dos campos magnéticos é indicada pelo termo βL , onde β representa a densidade de fluxo magnético gerado pelo ímã (em Tesla) e L é o comprimento de fio da bobina exposto ao fluxo (em metros). Multiplicando pela corrente elétrica (I , em Amperes) que percorre o fio, resulta na força disponibilizada pelo sistema, em Newtons:

$$F = \beta LI \quad [N] \quad (3.1)$$

Quando se eleva a corrente aplicada à bobina, ela tende a se afastar da região de maior intensidade de campo magnético até um ponto onde inicia a queda do produto βL . Desta forma, diz-se que o sistema opera linearmente se o número de espiras que geram o campo é mantido constante, e opera não-linearmente se o número se alterar [Dickason, 2006].

3.3 O sistema de suspensão

O sistema de suspensão típico de um vibrador eletrodinâmico envolve dois elementos: a base (ou suporte) flexível e o sistema de centragem. A base flexível liga a mesa do *shaker* à carcaça, servindo como vedação superior e ajudando a manter o sistema centrado, evitando assim possíveis deslocamentos laterais. Por ser de material de baixa rigidez, é responsável por uma pequena fração da força restitutiva axial. Já o sistema de centragem conecta a forma da bobina à carcaça e é o principal componente da suspensão, fornecendo a maior parte da rigidez - cerca de 80%, segundo Dickason, 2006.

A frequência de ressonância (F_0 , dada em Hz, ou ω_0 - dada em rad/s) do sistema pode ser obtida a partir da compliância (o inverso da rigidez) da suspensão Cm_s , dada em m/N e da massa total suspensa M_s , que inclui a massa da base, bobina e da suspensão e é dada em kg:

$$F_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{Cm_s M_s}} \quad \text{ou} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{Cm_s M_s}} \quad (3.2)$$

Outro parâmetro fundamental da suspensão é seu amortecimento. Uma forma de expressar o amortecimento é através do coeficiente de amortecimento viscoso C_s , expresso em N.s/m, que indica as perdas de energia por efeito Joule no sistema. O amortecimento pode ser definido a partir do fator de qualidade do sistema, conforme mostrado no Apêndice I.

3.4 Modelagem como um sistema de 1 GDL

Segundo Donadel, 2012, o vibrador eletrodinâmico pode se adequar a um modelo de um grau de liberdade se for simplificado, desprezando as características dinâmicas (rigidez e amortecimento) do objeto em teste. Na modelagem em 1 GDL (grau de liberdade), considera-se a massa do objeto em teste como rigidamente conectada à massa suspensa do sistema. Assim, a única ressonância possível será devido ao próprio mecanismo do *shaker*. Na utilização desta simplificação também se supõe que a carcaça do sistema está rigidamente fixa em relação ao solo, de modo a não apresentar ressonância própria, conforme mostra a Figura 3.2:

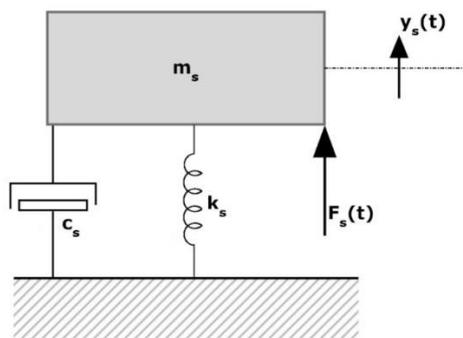


Figura 3.2 - Modelo de 1 GDL de um *shaker*.

Na Figura 3.2, m_s indica toda massa móvel (incluindo o objeto em teste), k_s é a rigidez da suspensão, c_s é o fator de amortecimento da suspensão, $F_s(t)$ é a força aplicada à mesa pela interação dos campos magnéticos e $y_s(t)$ é o deslocamento vertical da mesa. Supondo um comportamento linear (βL constante), o modelo mecânico pode ser representado pelo circuito equivalente ilustrado na Figura 3.3, onde as características dinâmicas do *shaker* se refletem na forma de força contraeletromotriz $E_s(t)$.

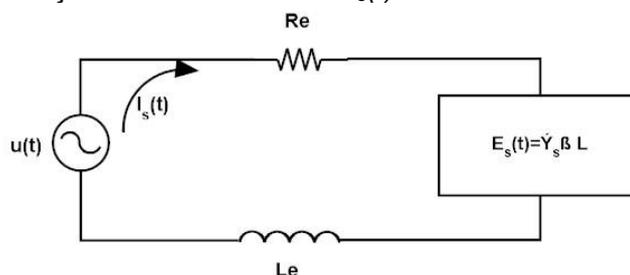


Figura 3.3 - Circuito elétrico equivalente ao modelo.

No circuito equivalente, $u(t)$ é o sinal de entrada, L_e é a indutância e R_e a resistência elétrica da bobina, E_s é a força eletromotriz equivalente, $I_s(t)$ é a corrente elétrica e \dot{y}_s é a velocidade da mesa. A força $F_s(t)$ e a força contra eletromotriz $E_s(t)$ podem ser representadas respectivamente por:

$$F_s(t) = \beta L I_s(t) \quad e \quad E_s(t) = \beta L \dot{y}_s \quad (3.3)$$

A equação do circuito fica, portanto:

$$L_e \dot{I}_s(t) + R_e I_s(t) + E_s(t) = u(t) \quad (3.4)$$

E o equilíbrio de forças na direção vertical é dado por:

$$m_s \ddot{y}_s + c_s \dot{y}_s + k_s y_s = F_s(t) = \beta L I_s(t) \quad (3.5)$$

É possível aplicar a Transformada de Laplace nas equações 3.4 e 3.5 e encontrar a função de transferência, do deslocamento y_s em relação à tensão fornecida $u(t)$.

3.5 Modelagem como um sistema com mais de 1 GDL

Segundo Donadel, 2012, na abordagem com 2 GDL assume-se que o objeto sendo testado possui massa, rigidez e amortecimento próprios. Assim, seu deslocamento é distinto do da mesa. O modelo em 2 GDL inclui a consideração de que a carcaça do equipamento permanece fixa em relação ao solo. Neste modelo, o *shaker* possui pelo menos duas frequências naturais, uma correspondente à sua própria suspensão e outra

correspondente à frequência natural do componente preso a mesa. Segundo Rao, 2010, a faixa de frequência ideal de operação do vibrador está localizada entre as duas frequências de ressonância, região onde a aceleração fica aproximadamente constante, como indicado na Figura 3.4:

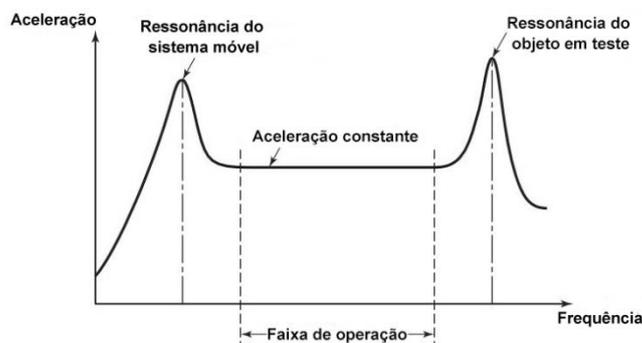


Figura 3.4 - Faixa recomendável de operação de um *shaker*.

Já os autores Lang e Snyder, 2001, adotam um modelo de um *shaker* eletrodinâmico com 3 GDL, onde assume-se que a estrutura do sistema não é mais fixada rigidamente ao solo e que há liberdade de movimento entre a bobina móvel e a mesa. O sistema apresentado é resolvido na forma matricial e os resultados mostram um sistema mais complexo, com uma ressonância para cada componente móvel.

3.6 Impedância elétrica

Segundo Silva, 2005, a impedância mostra a relação entre duas variáveis, uma de “esforço aplicado” e outra de “fluxo”, expressas como funções de transferência no domínio frequência. A impedância mecânica de um sistema (Z_m) é dada pelo quociente complexo entre a força harmônica aplicada e a velocidade com que o componente se desloca. Já a impedância elétrica Z_e é um indicativo da oposição de um circuito à passagem de corrente elétrica alternada, e pode ser representada pelo quociente entre a tensão e corrente elétricas alternadas. É possível relacionar a impedância mecânica do sistema dinâmico do *shaker* com a impedância elétrica que ocorre nos terminais de sua bobina, o que é útil na determinação de características de funcionamento do vibrador.

Os parâmetros de um sistema mecânico 1 GDL podem ser convertidos em parâmetros elétricos de um circuito equivalente RCL [Borwick, 2001]. A bobina móvel de um *shaker* pode ser considerada um conversor, onde a impedância mecânica de um lado se reflete como impedância elétrica do outro, e vice-versa.

A Figura 3.5 ilustra o comportamento da bobina móvel quando é considerada um transformador. De um lado temos grandezas elétricas e do outro as grandezas mecânicas são modeladas com análogos elétricos. A conexão entre os circuitos primário e secundário pode ser expressa por intermédio do fator βL e a força contraeletromotriz produzida. No secundário, a velocidade é um análogo para a tensão do primário, assim como a força é um análogo para a corrente elétrica.

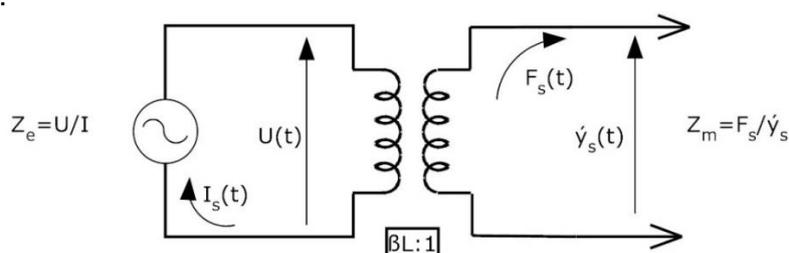


Figura 3.6 - Relação de transformação pela bobina móvel.

A relação de impedância entre os enrolamentos é dada por βL^2 , pois é considerada uma relação de espiras de $\beta L:1$. Já a impedância elétrica nos terminais da bobina é o recíproco da impedância mecânica do sistema, ou seja:

$$Z_e = \frac{U(t)}{I_s(t)} = \frac{(\beta L)^2 \dot{Y}_s}{F_s(t)} = \frac{(\beta L)^2}{Z_m} \quad (3.6)$$

Usando as analogias eletromecânicas, pode-se substituir a compliância do sistema por um indutor, assim como a massa tem um capacitor como seu equivalente elétrico. Já o amortecimento comporta-se como uma resistência, dissipando energia. Dessa forma, é possível expressar o sistema de 1 GDL pelo seu circuito elétrico equivalente, conforme mostrado na Figura 3.7, onde já foi aplicada a conversão realizada pelo transformador. O circuito equivalente pode ser inserido em um software de simulação eletrônica *SPICE* (*Simulated Program with Integrated Circuits Emphasis*), a partir do qual é possível obter a curva de impedância elétrica em relação à frequência.

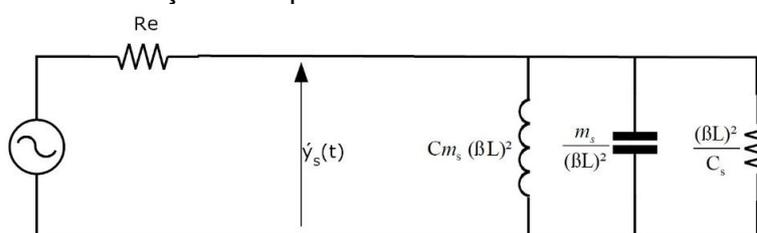


Figura 3.7 - Circuito equivalente elétrico ao modelo de 1 GDL.

Da mesma forma que é possível traçar a curva de impedância em função da frequência, a partir de parâmetros mensuráveis do sistema (como R_e , a resistência elétrica equivalente da bobina, C_{ms} , a compliância da suspensão, M_s a massa total suspensa e C_s , o amortecimento da suspensão), também pode-se realizar o processo inverso, ou seja, levantar os parâmetros mecânicos usando a curva de impedância elétrica como fonte de dados.

4. PROJETO E TESTES

Para realizar o projeto do sistema é necessário, primeiramente, levantar seus requisitos de operação. No projeto e na análise do protótipo é adotado o modelo de 1 GDL. Com essa simplificação, o movimento da estrutura móvel do *shaker* pode ser totalmente determinado pela sua massa, rigidez, amortecimento da suspensão e pela força aplicada. [Borwik, 2001].

4.1 Requisitos de projeto

Um levantamento entre os modelos semelhantes (aqueles com pequenas dimensões, de uso portátil e com ímã permanente), disponíveis no mercado exterior, possibilitou elencar os parâmetros típicos, que são apresentados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Parâmetros dos modelos comercialmente disponíveis.

Fabricante	Modelo	Força [N]	Faixa de frequência [Hz]	Deslocamento máximo [mm]	Potência elétrica [W]	Peso [Kg]
Brüel-Kjaer	4809	45	10-20000	8	75	8,3
Brüel-Kjaer	4824	100	2-5000	25,4	120	21
Sentek	VT-50	50	10-10000	5	200	12
Sentek	VT-100	100	10-10000	10	200	26
Tenlee	MS-50	50	0-5000	7,5	100	12,5
Tira	TV-50018	18	2-20000	5	50	5

Em caráter preliminar, considerando os parâmetros típicos, e levando em consideração o uso em ambiente acadêmico, são propostos os seguintes atributos desejáveis ao *shaker* a ser projetado:

- sistema relativamente leve e de dimensões reduzidas, capaz de ser transportado por apenas uma pessoa, que possa ser levado para sala de aula para demonstrações. Estipulou-se 10 kg como limite de massa;
- frequência de operação de $20\text{-}1000\text{ Hz}$;
- funcionar linearmente com deslocamentos maiores de 10 mm . Aceitar, sem dano, deslocamentos maiores que 20 mm ;
- ser capaz de produzir força de pelo menos 30 N em sinais senoidais;
- aceitar alimentação por amplificador comum (fonte de tensão, com saída de 4 ohms);
- ter bom desempenho, mesmo sem uso de sistema de controle realimentado;
- ser capaz de suportar sinal senoidal de 100 watts continuamente, sem problema de aquecimento.

Além disso, por se tratar de um trabalho acadêmico, o projeto deve contemplar um sistema de construção simples e de baixo custo.

4.2 Projeto conceitual

Com os requisitos levantados, foi feito um projeto conceitual para guiar o projeto executivo, mostrado na Figura 4.1:

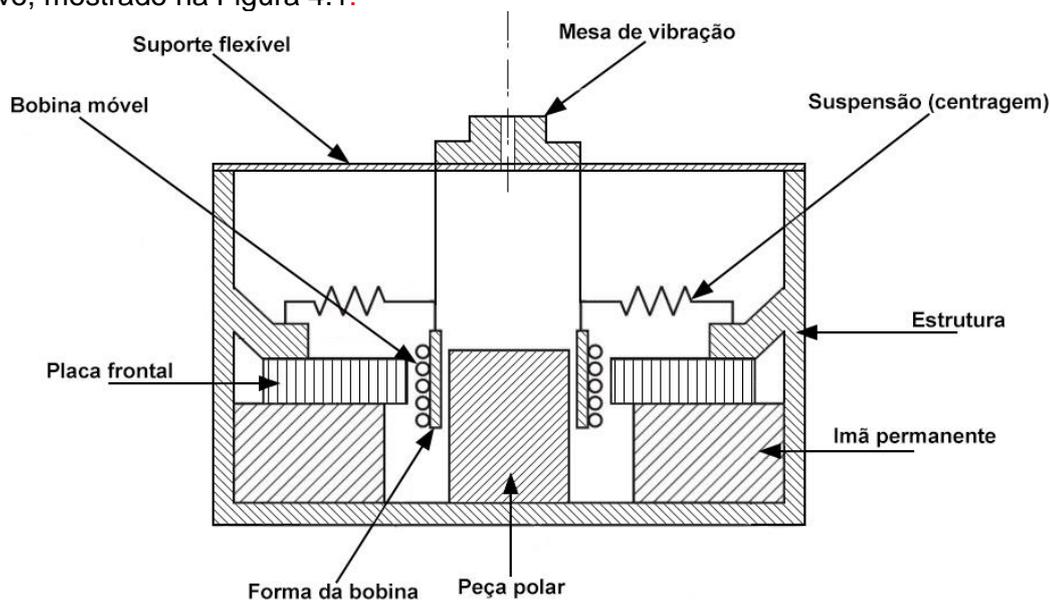


Figura 4.1 - Vista em corte do projeto conceitual.

A figura ilustra o desenho em corte do modelo conceitual, para melhor visualização dos componentes internos. Adotou-se um sistema de ímã permanente, como usual nos modelos de pequenas dimensões. A suspensão é dividida em dois componentes, o dispositivo de centragem e o suporte flexível. A centragem, colada à forma da bobina, é responsável por maior parte da rigidez, enquanto que o suporte flexível serve principalmente para restringir movimentos laterais do sistema suspenso. A mesa possui um furo roscado para fixação do componente em teste e é presa diretamente à forma da bobina móvel. A estrutura é cilíndrica, para melhor aproveitamento de espaço e por facilidade de fabricação e montagem.

4.3 Projeto executivo

A partir do conceito criado, dimensionou-se o *shaker* de forma a cumprir os requisitos de projeto. Anteriormente à construção do protótipo, o vibrador foi desenhado em software *CAD*. A Figura 4.2 ilustra uma vista explodida do projeto executivo, para melhor visualização dos componentes internos.

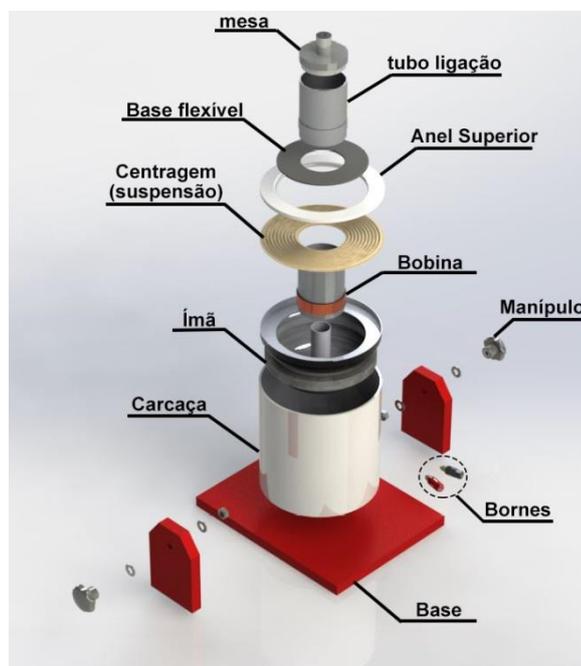


Figura 4.2 - Vista explodida do projeto.

O ímã e a bobina móvel foram escolhidos dentre modelos comercialmente disponíveis - optando-se por componentes utilizados em na indústria de alto-falantes - que fornecessem βL , deslocamento máximo e potência máxima dentro da faixa de projeto. A bobina possui forma de poliamida, com 75 Ø mm, 100 mm de altura e enrolamento de 21 mm. O conjunto magnético é composto por ferrite de bário e possui massa de 4,8 kg. Os dois componentes são fabricados pela *Harman do Brasil*.

Para a carcaça, optou-se por uma peça cilíndrica polimérica de policloreto de vinila (*PVC*), material escolhido por sua baixa massa específica e não ser ferromagnético.

A mesa de vibração foi projetada de forma a ser usinada a partir de um tarugo de alumínio, liga 6351-T6, escolhido devido a sua baixa massa específica e boa usinabilidade. No centro da mesa desenhou-se um furo roscado M8-125, a ser usado para fixação do componente em teste.

O suporte flexível da mesa foi concebido para ter pouca rigidez, assim optou-se pelo uso de uma manta de borracha SBR de 3 mm. Para facilitar a fixação da manta à carcaça, projetou-se um anel em madeira compensada de 8 mm.

A ligação mecânica entre a bobina móvel e a mesa foi projetada em tubo de alumínio, de modo a contribuir pouco com massa suspensa do sistema.

Foi desenhada uma base que possibilitasse o giro do *shaker* para aplicações horizontais. Sua fixação com a carcaça foi feita através de manipulões fêmeas de baquelite, com medida M10, de maneira a possibilitar aperto rápido, sem uso de ferramentas.

4.4 Fabricação do protótipo

A fabricação do protótipo iniciou com a manufatura dos componentes a serem utilizados na montagem. A mesa de alumínio foi usinada em torno mecânico, a partir de um

tarugo cilíndrico de 101,7 Ø mm. A peça de ligação mecânica entre a bobina móvel e a mesa também foi usinada em torno mecânico, a partir de um tubo circular de alumínio, com diâmetro de 76,2 Ø mm e parede de 3,17 mm esp. Os componentes de madeira foram usinados em fresa manual. A carcaça de PVC foi serrada manualmente no comprimento correto.

Para as fixações, utilizou-se adesivo epóxi bicomponente de cura lenta entre o ímã e a base da carcaça. Entre a bobina móvel e o tubo de ligação foi empregado adesivo de base fenólica com polímero acrilonitrila-butadieno e, para a fixação da base flexível no anel superior, cola de contato.

A ligação elétrica entre a bobina e os terminais foi feita com cabos flexíveis, soldados de forma a manter certa folga, e assim não prejudicar o movimento dos componentes móveis durante o uso.

A Figura 4.3 apresenta o protótipo fabricado. Uma fotografia dos principais componentes utilizados na montagem é apresentada no Apêndice II.

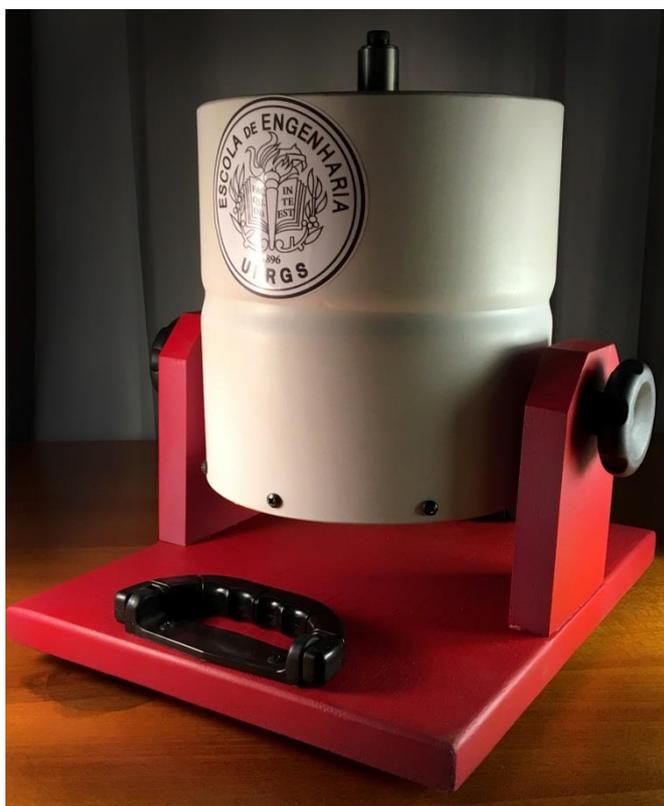


Figura 4.3 - Imagem do protótipo construído.

4.5 Medidas mecânicas do protótipo

O produto βL foi medido em bancada através do método da força contrária, o qual consiste em adicionar ao sistema uma massa de valor conhecido M_a , de modo que exista um deslocamento significativo a partir de sua posição neutra [Dickason, 2006]. Foi fornecida uma tensão crescente à bobina, até que a base volte à sua posição inicial antes da adição da massa. Com a tensão fornecida, mede-se a corrente I e pode-se chegar ao produto βL por:

$$\beta L = \frac{9,81 M_a}{I} \quad (4.1)$$

A massa do sistema móvel foi encontrada através da comparação da frequência natural do sistema com a frequência de ressonância do sistema, após a adição de uma massa conhecida, conforme a Equação 4.2, onde: M_s é a massa do sistema móvel, M_a é a massa

adicionada para medição, F_0 é a frequência natural do sistema e F_{0a} é a frequência natural medida após a adição de massa.

$$M_s = \frac{M_a}{\left(\frac{F_0}{F_{0a}}\right)^2 - 1} \quad (4.2)$$

O deslocamento máximo foi levantado usando a posição observada em que a bobina toca a parte inferior da estrutura. A medida foi realizada com relógio comparador, a partir da posição de repouso e adicionando massa à mesa, até se perceber o contato.

A excursão máxima linear foi levantada a partir dos dados do fabricante da bobina, ou seja, o valor de deslocamento possível onde todas as espiras permaneçam dentro do campo magnético.

4.6 Medidas elétricas do protótipo

A resistência equivalente da bobina móvel, R_e , é medida diretamente nos terminais conexão do *shaker*. É um parâmetro crítico para modelagem do sistema. Então, para maior precisão, utilizou-se o multímetro digital e uma fonte de corrente constante, em um circuito conhecido método *Kelvin* ou “medida de quatro fios”. A técnica utilizada é apresentada com mais detalhes no Apêndice IV.

Outra medida elétrica realizada foi o levantamento da curva de impedância da bobina do *shaker*. Para isso, foi utilizado um resistor de referência, conectado entre um gerador de sinais e o dispositivo do qual deseja-se conhecer a curva de impedância, conforme ilustrado na Figura 4.4:

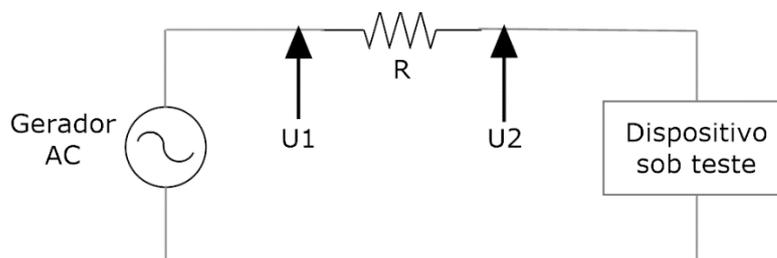


Figura 4.4 – Circuito para medição da impedância elétrica.

Na Figura 4.4, U_1 e U_2 são pontos de medição de tensão. A impedância elétrica Z_e é definida como uma função da frequência de excitação $Z_e = Z_e(f)$. Enquanto altera-se a frequência do sinal gerado, medem-se as tensões $U_1(f)$ e $U_2(f)$ e, conhecendo o valor de referência R , pode-se calcular a impedância do dispositivo como:

$$Z_e(f) = \left(\frac{U_2(f)}{U_1(f) - U_2(f)} \right) R \quad (4.3)$$

Como gerador de sinais utilizou-se uma placa de som de um computador e o programa *LIMP*, do desenvolvedor *ARTALABS*, que permite gerar ondas de sinal senoidal puro em intervalos de 1/48 de oitavas. Na saída da placa de som foi conectado um resistor de referência de 100 ohms, em série com a bobina móvel do *shaker*. Além de gerar o sinal de excitação, o programa faz, simultaneamente, a leitura do sinal nas entradas da placa, que foram conectadas aos terminais do resistor de referência, conforme mostrado na Figura 4.5. Após filtragem de ruído e distorção, o software processa os sinais de entrada e fornece as curvas de impedância (magnitude e fase, em função da frequência).

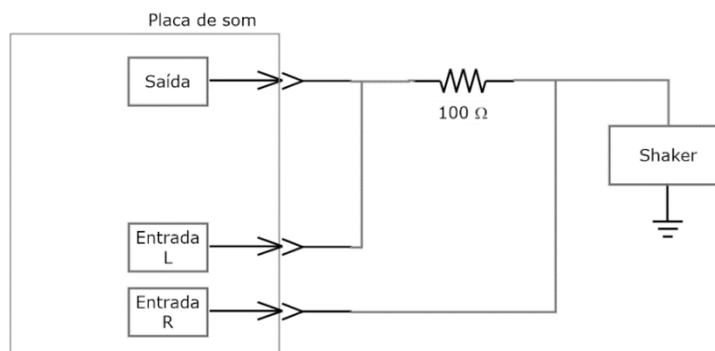


Figura 4.5 - Ligação entre o *shaker* e o computador, para medição de impedância.

De posse do gráfico da impedância elétrica, é simples determinar visualmente a frequência de ressonância principal do sistema, F_0 , que ocorre no pico de seu módulo ou na posição de fase nula. A frequência de ressonância é utilizada para determinar a compliância Cm_s da suspensão, segundo a Equação 3.2.

A curva de impedância elétrica ainda permite a determinação dos fatores de qualidades mecânicos e elétricos do sistema, conforme apresentado no Apêndice I. Usando o fator de qualidade mecânico, Q_{ms} , é possível calcular o amortecimento C_s da suspensão por meio de:

$$C_s = \frac{2\pi F_0}{Q_{ms}} (M_s) \quad (4.4)$$

4.7 Obtenção da curva de aceleração

O levantamento dos valores de aceleração foi feito com um módulo GY-61 (baseado em um acelerômetro ADXL335). Segundo o fabricante do ADXL335, o acelerômetro é capaz de medir acelerações de $\pm 3g$, com sensibilidade de $0,3V/g$, precisão de 10% e leitura a partir de $0,5 Hz$ [Analog Devices, 2009]. Uma imagem do sensor em uso é apresentada no Apêndice II.

Um teste preliminar do funcionamento do protótipo foi realizado com a conexão do acelerômetro a um osciloscópio digital. Excitou-se o *shaker* com sinal senoidal e com onda quadrada, ao mesmo tempo em que foi feita a leitura da tensão fornecida pelo sensor ADXL335. Os resultados são apresentados no Apêndice III.

Para o levantamento da resposta de aceleração em função da frequência de excitação, utilizou-se aquisição de dados através da placa de som do computador e software ARTA, do desenvolvedor ARTALABS. O diagrama da ligação utilizada para a medida é mostrado na Figura 4.6.

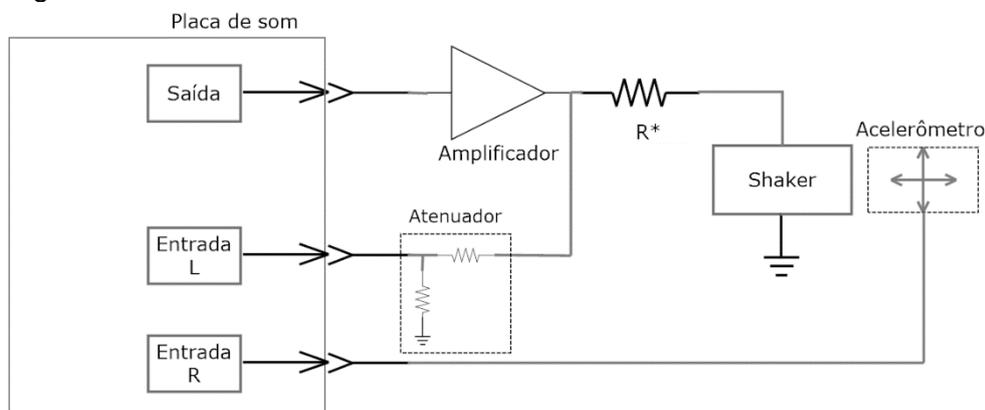


Figura 4.6 - Diagrama de ligação para medida de aceleração.

Para correta excitação do *shaker*, utilizou-se um amplificador capaz de fornecer o nível de sinal necessário à medição. A resistência R na Figura 4.6 foi utilizada para simular uma alimentação por fonte de corrente (modo de transcondutância), caso no qual se adotou um valor de 50Ω . Para a medida usual, utilizando o amplificador como fonte de tensão, R não é utilizada, sendo o amplificador ligado diretamente ao *shaker*.

4.8 Limitações dos métodos empregados

A modelagem simplificada em 1 GDL é uma limitação da análise, pois não leva em consideração a influência das características dinâmicas do objeto em teste e de outros componentes, que não são idealmente rígidos.

Além disso, optou-se inicialmente por desprezar a indutância da bobina móvel, por julgar-se que a reatância indutiva teria pouco efeito em frequências baixas, que são as mais importantes no projeto.

Ademais, o comportamento mecânicos da suspensão foi considerado linear, assim como o parâmetro βL . A simplificação é adequada para pequenos sinais, mas para modelar o funcionamento do *shaker* em altos deslocamentos dever-se-ia levar em consideração o comportamento não linear da suspensão e de βL .

Sobre as técnicas de medição da impedância elétrica e da aceleração, a principal limitação identificada é a precisão da placa de som em gerar e medir os sinais. Para se certificar da adequação do procedimento, realizou-se um teste, conectando as saídas da placa nas suas entradas, em modo *loop*. O próprio pacote do desenvolvedor ARTA possui um módulo que realiza a medição da resposta de frequência através de ruído rosa e Transformada Rápida de Fourier (FFT). O resultado da medição indicou uma resposta $\pm 1dB$ de $13Hz$ até $25kHz$. O ponto de $-3dB$ está próximo de $4Hz$, então julgou-se que o método de medição é adequado às frequências de operação do *shaker*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com a curva de impedância elétrica levantada, juntamente com as medidas realizadas de βL , R_e e M_s , foi possível calcular os principais parâmetros de o funcionamento do *shaker*. A Tabela 5.1 apresenta as medidas realizadas, os valores obtidos e de onde se originam.

Tabela 5.1 - valores obtidos para os principais parâmetros do sistema.

Parâmetro	Descrição	Valor levantado	Unidade	Fonte
βL	Fator de força magnético	10,95	$T.m$	Eq. 4.1
M_s	Massa suspensa	0,424	kg	Eq. 4.2
P_e	Potência elétrica suportada	800	watts	Fabricante da bobina
X_{lim}	Excursão linear	8,1	mm	Comprimento da bobina
$X_{máx}$	Deslocamento máximo	30	mm	Medida direta
R_e	Resistência equivalente	3,65	ohms	Medida direta
F_0	Frequência de ressonância	19,41	Hz	Gráfico de impedância
Cm_s	Complância da suspensão	$1,58 \cdot 10^{-4}$	m/N	Eq. 3.2
Qt_s	Fator de qualidade total	1,16	-	Eq. 1.3
Qe_s	Fator qualidade elétrico	1,57	-	Eq. 1.6
Qm_s	Fator qualidade mecânico	4,47	-	Eq. 1.5
C_s	Amortecimento suspensão	11,57	N s/m	Eq. 4.4
M	Massa total do <i>shaker</i>	7,5	kg	Medida direta

A partir dos parâmetros levantados, calcularam-se os valores dos componentes do circuito elétrico equivalente ao sistema eletromecânico. O circuito calculado foi simulado em software de simulação eletrônica *SPICE*, onde foi possível traçar a curva de impedância elétrica. Para comprovar a validade dos métodos empregados, comparou-se a curva de impedância simulada por software com a curva experimental, medida através da placa de som. A Figura 5.1 ilustra ambas no mesmo gráfico, sendo que a linha vermelha representa os valores experimentais e a linha azul, os valores simulados a partir do circuito.

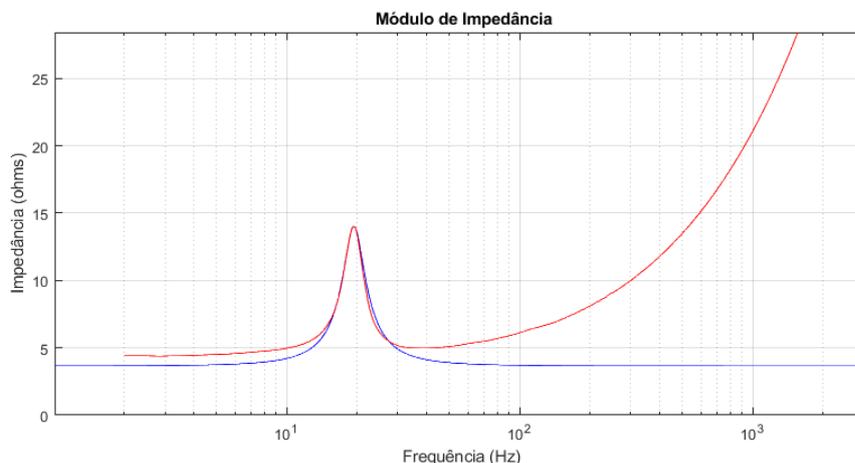


Figura 5.1 - Módulos da impedância elétrica. Em vermelho os valores medidos e em azul, os simulados.

Conforme pode se observar, os gráficos coincidem nas frequências próximas à ressonância. Com o aumento da frequência, a diferença entre os módulos cresce, devido à variação da reatância indutiva da bobina móvel, a qual foi desprezada por conta das simplificações adotadas. A pequena diferença em frequências baixas pode ser causada pela resistividade e capacitância dos cabos de medição, que não foram consideradas no modelo desenvolvido. Apesar disso, considera-se aceitável a diferença até a frequência de ressonância, sendo a forma do pico - que define o amortecimento do sistema - muito semelhante. O pico mostra a frequência de ressonância obtida para o sistema: **19,41 Hz**.

A curva de aceleração por frequência, medida por acelerômetro, foi comparada com a função de transferência do sistema, calculada a partir das equações do sistema de 1 GDL (Eqs. 3.4 e 3.5). Na Figura 5.2 estão representadas ambas, em azul a função de transferência calculada e em vermelho a curva de resposta medida. Para maior clareza, os valores medidos foram escalonados de forma a ficarem próximos aos da função de transferência.

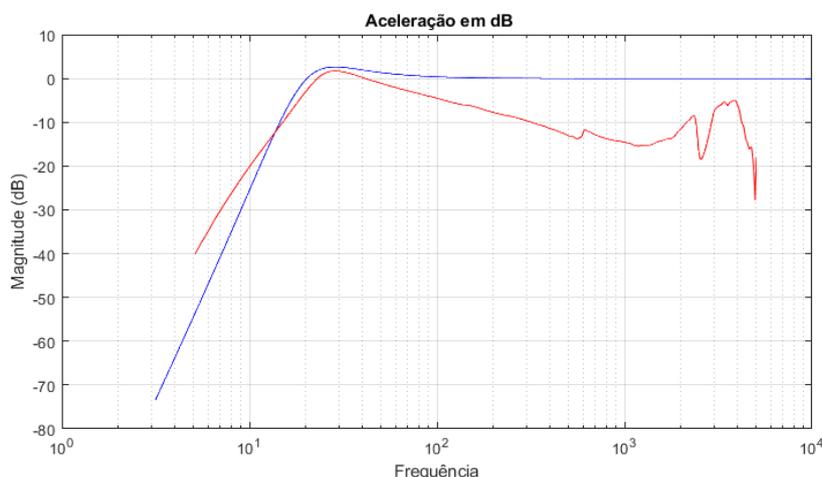


Figura 5.2 - Curvas de aceleração. Em vermelho os valores medidos e em azul a curva de transferência do modelo.

Observam-se semelhanças razoáveis – considerando as simplificações adotadas - na posição, no formato do pico e no *roll-off* (a inclinação da reta, abaixo da ressonância) das curvas. Porém, em altas frequências, o comportamento difere, pois a reatância indutiva da bobina móvel causa um efeito semelhante à de um filtro passa-baixa. Além disso, é possível notar irregularidades na resposta a partir da frequência de 2 kHz, que mostram ressonâncias de componentes que não foram levadas em conta no modelo simplificado.

Por fim, foi feito outro levantamento da aceleração do sistema, dessa vez investigando o comportamento do *shaker* ao ser alimentado por uma fonte de corrente (amplificador de transcondutância). A Figura 5.3 apresenta as medidas realizadas: em azul com uma resistência em série, para simular uma fonte de corrente, em vermelho o amplificador conectado diretamente ao *shaker*, como fonte de tensão.

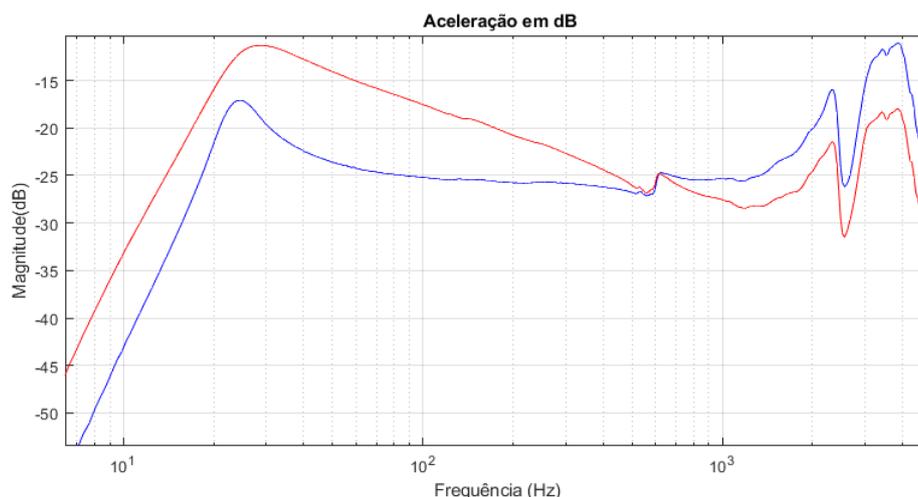


Figura 5.3 - Curvas de aceleração. Em azul os valores obtidos com fonte de corrente e em vermelho os valores obtidos com fonte de tensão.

Observa-se que a resposta de frequência com o amplificador em transcondutância apresenta um patamar mais homogêneo, sendo, por isso, mais indicada para uso sem sistema de controle realimentado. No caso de alimentação com fonte de tensão, a resposta é menos homogênea, apresentando, porém, um pico de ressonância mais amortecido e maior extensão nas baixas frequências.

6. CONCLUSÕES

Para os parâmetros ensaiados, o *shaker* projetado apresentou comportamento adequado à proposta inicial. A frequência de ressonância ficou abaixo de 20 Hz, indicando que a faixa de operação está dentro do que foi estipulado como requisito. Quando excitado por fonte de corrente, a resposta da aceleração ficou significativamente homogênea (“plana”), podendo – dependendo da exigência da aplicação - ser usado sem sistema de controle realimentado.

Os resultados obtidos com a curva de impedância elétrica mostram que é válido o método de levantamento dos parâmetros mecânicos do sistema vibratório através do circuito elétrico análogo. As maiores discrepâncias apareceram em frequências mais altas, onde a indutância da bobina móvel (desconsiderada no modelo adotado) exerce maior influência.

Por fim, a massa total do protótipo ficou em 7,5 kg, inferior ao máximo estipulado e indicando, assim, que pode ser facilmente transportado e utilizado de forma portátil. Os parâmetros obtidos são semelhantes aos de modelos comerciais, mostrando que o *shaker* projetado pode ser empregado em aplicações didáticas. Ao mesmo tempo sugere-se o projeto e adoção de um sistema de controle dedicado, para estender a faixa de frequência utilizável e caso seja necessária maior linearidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANALOG DEVICES. **ADXL335 Datasheet**. 2009. Disponível em: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADXL335.pdf>. Acesso em: 6 jun. 2019.

ARTALABS. **Software ARTA**. Versão 1.9.2. Kastel Luksic, Croácia: Ivo Mateljan, Disponível em: <http://www.artalabs.hr/>. Acesso em: 6 jun. 2019.

ARTALABS. **Software LIMP**. Versão 1.9.2. Kastel Luksic, Croácia: Ivo Mateljan. Disponível em: <http://www.artalabs.hr/>. Acesso em: 6 jun. 2019.

BORWICK, J. (ed.). **Loudspeaker and Headphone Handbook**. 3th. ed. Woburn, MA: Focal Press, 2001.

DELLA FLORA, L. **Contribuição ao Controle de Máquinas de Vibração Eletrodinâmicas**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DICKASON, V. **Loudspeaker Design Cookbook**. 7th. ed. Peterborough, NH: Audio Amateur Press, 2006.

DONADEL, J. **Implementação de um Sistema de Controle Heurístico de Aceleração e Tensão Mecânica para Ensaios em Shaker Eletrodinâmico**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

FERREIRA, T. M. **Análise do Comportamento Vibratório da Membrana de um Shaker Eletrodinâmico**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2017.

HARRIS, C. M.; PIERSOL, A. G. (ed.). **Harris' Shock and Vibration Handbook**. 5th. ed. USA: McGraw-Hill, 2002.

LANG, George Fox; SNYDER, Dave. **Understanding the Physics of Electrodynamic Shaker Performance**. SOUND AND VIBRATION, Outubro 2001.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. 5th. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2010.

SILVA, C. W. de (ed.). **Vibration and Shock Handbook**. 1th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.

SILVA, H. S. **Medição dos Parâmetros Thiele-Small de Alto-Falantes, com Diferentes Instrumentos** - II. *In*: XII CONVENÇÃO NACIONAL DA SOCIEDADE DE ENGENHARIA DE ÁUDIO (AES BRASIL), 2008, São Paulo, SP. Artigo de Convenção [...]. São Paulo, SP: [s. n.], 2008.

APÊNDICE I:
Levantamento dos fatores de qualidade total (Q_{t_s}), mecânico (Q_{m_s}) e elétrico, (Q_{e_s}) a partir da curva de impedância elétrica.

Uma forma de levantar a razão de amortecimento de um sistema oscilatório simples, de 2ª ordem, é através do seu fator de qualidade mecânico, por meio do método da largura de banda para meia potência [Silva, 2005]. Em um gráfico no domínio frequência, o fator de qualidade indica a largura do pico na ressonância, conforme mostrado na função de transferência da Figura I.1:

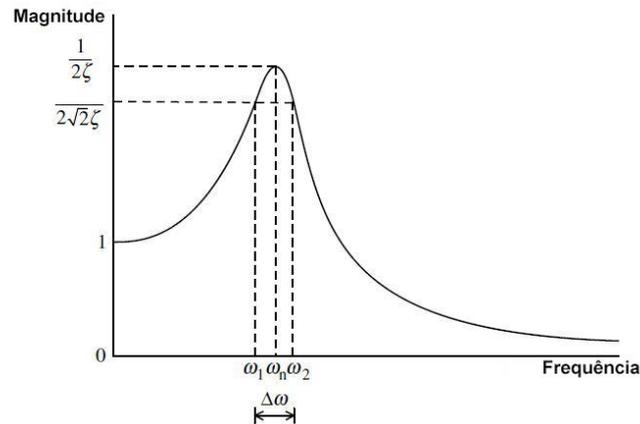


Figura I.1 - função de transferência para demonstrar o fator de qualidade

Conforme mostrado na figura, a ressonância do sistema ocorre na frequência ω_n , onde a magnitude da função de transferência é máxima e equivalente a $(2\zeta)^{-1}$, onde ζ é o fator de amortecimento. O método da largura de banda de meia potência consiste em determinar as frequências ω_1 e ω_2 , no entorno de ω_n , e com metade da potência de ω_n , ou seja:

$$\omega_1 < \omega_n < \omega_2$$

$$f(\omega_1) = f(\omega_2) = \frac{f(\omega_n)}{\sqrt{2}} \quad (I.1)$$

O fator de qualidade é definido como:

$$Q_{Fator} = \frac{\omega_n}{\Delta\omega} = \frac{1}{2\zeta} \quad (I.2)$$

No caso do sistema que forma o Shaker, com bobina móvel, é possível dividir o fator de qualidade em dois, um correspondente a parte elétrica e outro correspondente a parte mecânica. Chama-se de Q_{t_s} o fator de qualidade total, Q_{e_s} o fator de qualidade elétrico e Q_{m_s} o fator de qualidade mecânico. Segundo Silva, 2008, a relação entre eles é dada por:

$$\frac{1}{Q_{t_s}} = \frac{1}{Q_{e_s}} + \frac{1}{Q_{m_s}} \quad (I.3)$$

A partir da curva do módulo da impedância elétrica escolhem-se as frequências f_1 e f_2 correspondentes aos pontos de metade da potência, ou seja:

$$Z_1 = Z_2 = \frac{Z_{máx}}{\sqrt{2}} \quad (I.4)$$

Assim, é possível calcular o fator de qualidade mecânico Qm_s com:

$$Qm_s = \left(\frac{f_s}{f_2 - f_1} \right) \frac{1}{\sqrt{1 - 2 \left(\frac{Re}{Z_{máx}} \right)^2}} \quad (I.5)$$

E o fator de qualidade elétrico Qe_s com:

$$Qe_s = \frac{Qm_s}{\left(\frac{Z_{máx}}{Re} - 1 \right)} \quad (I.6)$$

APÊNDICE II: Fotografias dos componentes e da medida de aceleração

A Figura II.1 apresenta os principais componentes utilizados na montagem do protótipo do *shaker*. A figura II.2 ilustra o procedimento para a medida de aceleração, onde fixou-se o módulo GY-61 à mesa do *shaker*, através de um perfil L.

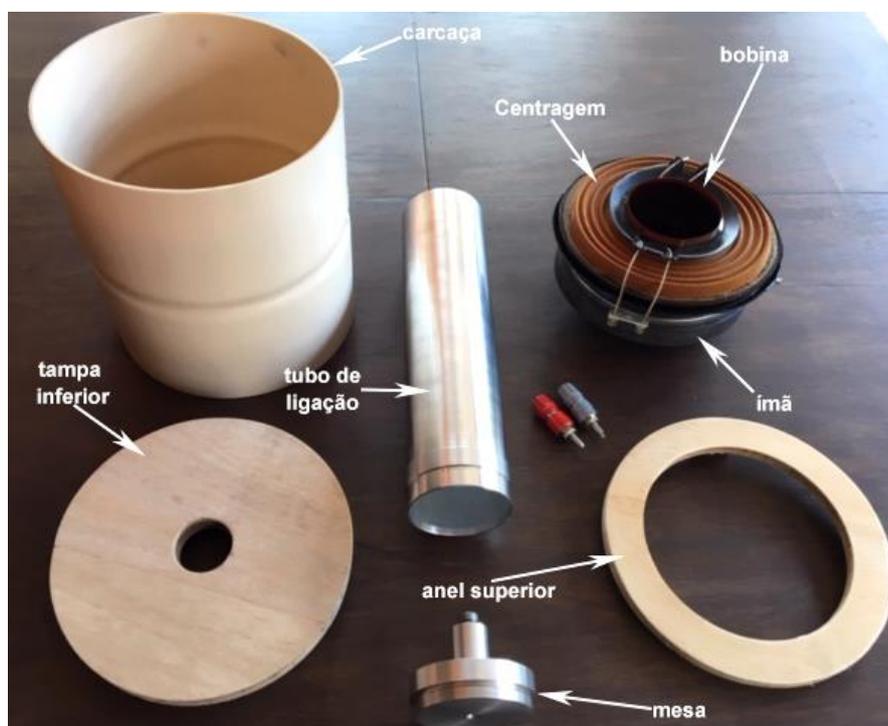


Figura II.1 - Principais componentes do sistema construído



Figura II.2 - Medida da aceleração

APÊNDICE III: Medida da aceleração no domínio tempo

Um teste preliminar do funcionamento do protótipo foi feito com a excitação do *shaker* com tensão senoidal e com onda quadrada, enquanto liam-se – com osciloscópio digital - os valores de tensão fornecidos pelo sensor *ADXL 335*. A análise dos dados fornece valores no domínio tempo, sendo assim possível comparar a medida da aceleração da mesa do *shaker* com o sinal de excitação fornecido pelo amplificador. A Figura III.1 mostra a resposta de aceleração a um sinal senoidal de 20 Hz: a linha em azul é a leitura do sinal fornecido ao protótipo, enquanto a linha vermelha indica a tensão medida no acelerômetro.

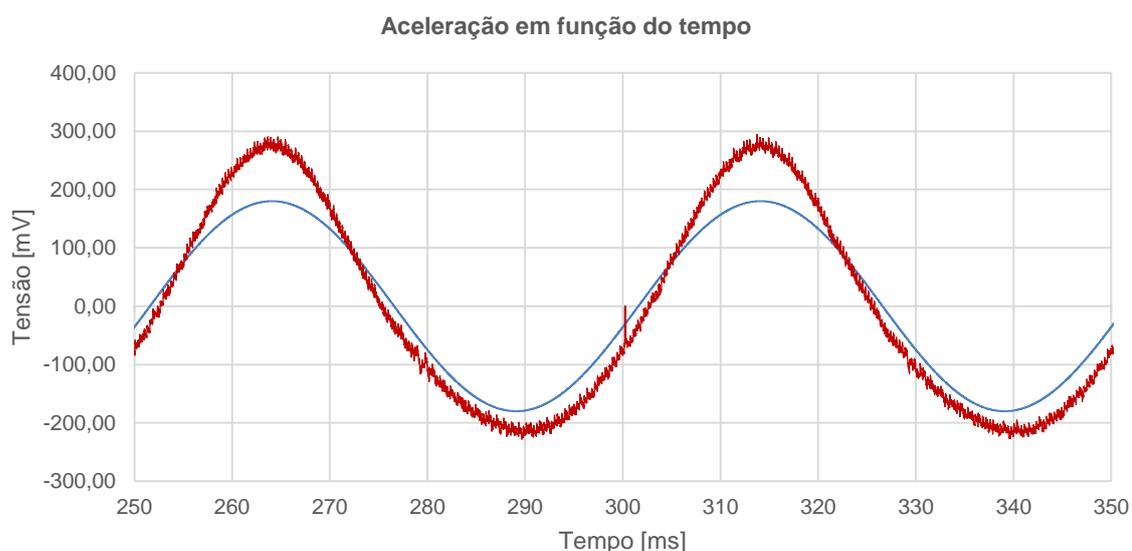


Figura III.1 – Resposta a sinal senoidal no domínio tempo

A Figura III.2 mostra a resposta de aceleração a um sinal não-senoidal, de onda quadrada, com frequência 20 Hz. A linha azul é a leitura do sinal de excitação do *shaker*, enquanto a linha vermelha mostra a tensão medida no acelerômetro.

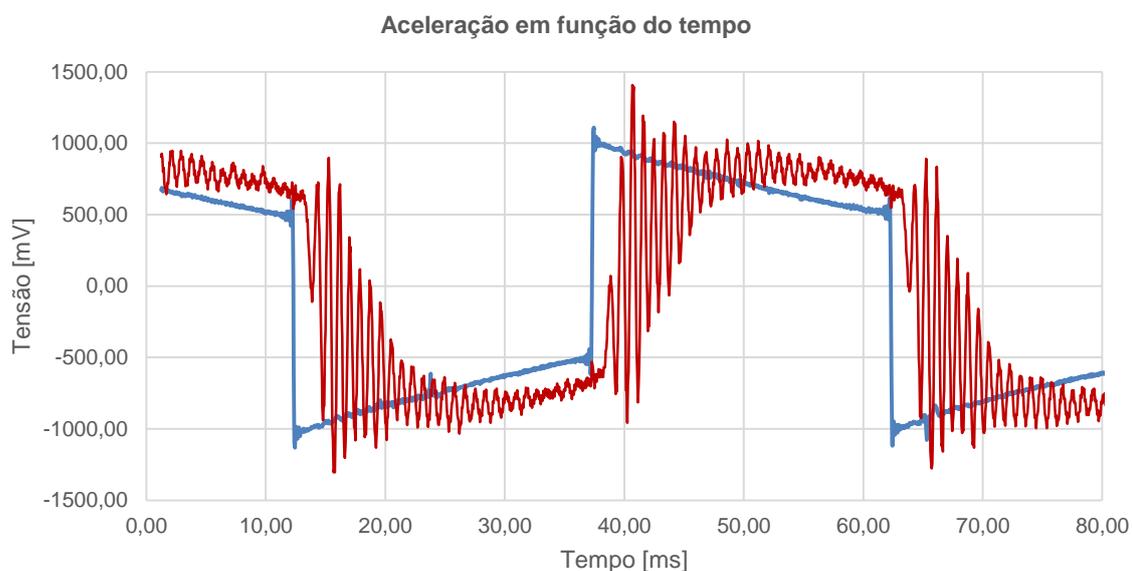


Figura III.2 – Resposta a onda quadrada no domínio tempo

APÊNDICE IV:
Medida da resistência elétrica R_e

A resistência equivalente da bobina móvel, R_e , é medida diretamente nos terminais de conexão do *shaker*. É um parâmetro crítico para modelagem do sistema, então, para maior precisão, utilizou-se o multímetro digital em um circuito conhecido método *Kelvin* ou “medida de quatro fios”.

O multímetro utilizado (*Minipa ET-2082*), com *display* de 3 e $\frac{1}{2}$ dígitos, apresenta – segundo o fabricante - uma precisão de $\pm(0,8\% + 5 \text{ dígitos})$ na escala mais baixa de medida de resistência. Já para medida de tensão contínua, na escala de 2V, a precisão indicada é de $\pm(0,5\% + 3D)$. A tabela IV.1 mostra os erros potenciais nas duas medidas.

Tabela IV.1 - Comparação entre a o erro potencial de duas escalas diferentes do multímetro

Medida	Valor verdadeiro aproximado	Escala utilizada	Precisão do equipamento	Acurácia no valor verdadeiro	Erro potencial
Resistência	4 ohms	200 ohms	$\pm 0,8\% + 5 \text{ dígitos}$	$4 \pm 0,5 \text{ ohms}$	12,5%
Tensão	0,4 volts	2 volts	$\pm 0,5\% + 3 \text{ dígitos}$	$0,4 \pm 0,005 \text{ Volt}$	1,25%

Desconhecido de antemão o valor verdadeiro da resistência da bobina, sabe-se que é de aproximadamente 4 ohms. Caso o multímetro seja utilizado para medida deste valor aproximado, na escala de 200 ohms, ter-se-ia um erro potencial de até 12,5%. Caso se utilize a escala de 2 volts, o erro pode ser reduzido a 1,25%. Uma forma de valer-se da maior precisão na medida de tensão é alimentando a bobina com uma corrente conhecida e medindo a diferença de potencial nos terminais da mesma. Usando o valor da corrente conhecida e a tensão medida, aplica-se Lei de Ohm para se obter a resistência equivalente da bobina móvel.

Junto com a fonte de corrente, foi utilizado o método de medição chamado *Kelvin*, que utiliza quatro fios para medição. Dois fios fornecem a corrente e outros dois são conectados diretamente aos terminais do componente a ser medido, servindo apenas para medida de tensão, conforme mostra o diagrama da Figura IV.1:

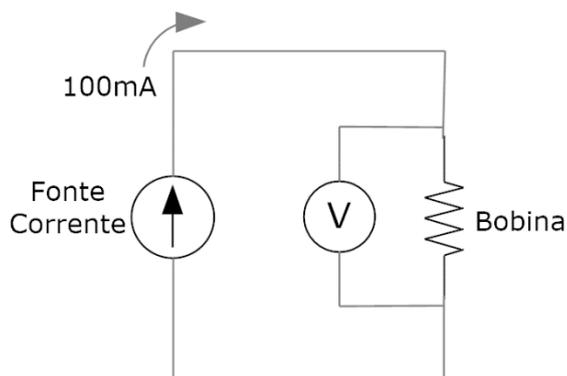


Figura IV.1 - Diagrama do circuito utilizado para medida da resistência da bobina

Durante a medição, os fios usados para a medida de tensão são percorridos por uma corrente muito inferior quando comparada à dos fios da fonte. Assim, as resistências elétricas dos terminais utilizados na conexão podem ser desprezadas.