

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

LIZIANE VICTÓRIA PEREIRA SANTANA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO DE UM *SHAKER*
ELETRODINÂMICO**

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

Porto Alegre

2021

LIZIANE VICTÓRIA PEREIRA SANTANA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ELETROMAGNÉTICO DE UM *SHAKER*
ELETRODINÂMICO**

Projeto de Diplomação apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica na Universal Federal do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Joel e Lourdete, que sempre fizeram o impossível por mim.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais e meus irmãos por todo apoio e por sempre acreditarem em mim.

Aos meus colegas e amigos, por tornarem inesquecível todo tempo que passei na UFRGS.

Ao meu orientador, Professor Luiz Tiarajú, por toda paciência, todos os conselhos e por ser um grande incentivador de seus alunos.

Ao *Reliability Laboratory* na empresa TDK Electronics do Brasil Ltda, por ter proporcionado a estrutura para realização deste projeto.

Ao Otávio Nunes, por ter me despertado o interesse sobre o tema e me ensinado grande parte do que sei.

Ao Fábio Nunes, por todo auxílio nos experimentos com o *shaker*, sempre com muita paciência.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por ter me proporcionado ensino público, gratuito e de excelência.

RESUMO

O desenvolvimento de componentes para aplicações automotivas deve estar pautado em garantir robustez e confiabilidade dos produtos. Uma parte importante deste processo é considerar as condições físicas que serão impostas aos componentes em campo ao longo de sua vida útil. Neste contexto, os ensaios de vibração são realizados para qualificar um componente, simulando os esforços vibratórios aos quais ele será submetido em campo. O *shaker* eletrodinâmico é a peça fundamento do sistema de ensaios de vibração e sua aplicação, seu princípio de funcionamento e seu comportamento durante a operação serão discutidos neste trabalho. Ao longo do texto são apresentados conceitos relacionados ao sistema de ensaios de vibração, às propriedades construtivas e a operação de um *shaker* eletrodinâmico. Além disso, uma análise de elementos finitos foi realizada para modelagem do equipamento, a fim de obter valores de grandezas magnéticas como densidade de fluxo magnético e força magnética quando um perfil de vibração senoidal é reproduzido pelo *shaker*. O comportamento do *shaker* foi avaliado em três frequências de vibração distintas, obtendo gráficos que quantificam a densidade de fluxo magnético ao longo da superfície 2D, bem como os valores de força agindo na armadura.

Palavras chave: *shaker* eletrodinâmico; eletromagnetismo; vibração; componentes automotivos.

ABSTRACT

The development of automotive electronic parts should ensure with assuring endurance and reliability of the products. A significant step of the process is to consider the environmental conditions that the components will experience throughout their useful life. In this context, the vibration tests are performed during a component qualification, simulating the vibration load that it will be imposed to the parts in field application. The electrodynamic shaker is the essential part of the vibration testing system and its application, the working principle and the behavior during operation will be discussed in this work. In the course of the text, the concepts related to the vibration test system, to the constructive properties and the operation of an electrodynamic shaker. Besides that, a finite elements analysis was performed to modeling the equipment, in order to reach the values of magnetic parameters as the magnetic flux density and magnetic force when a sinusoidal vibration profile is reproduced by the shaker. The shaker behavior was evaluated in three distinct vibration frequencies, obtaining graphics that quantify the magnetic flux density along the 2D surface, as well as the values for the force acting on the armature.

Key words: electrodynamic shaker; electromagnetism; vibration; automotive parts.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Exemplo de parâmetros de ensaio de vibração para capacitores eletrolíticos de alumínio
- Figura 2 – Especificação para ensaios de vibração da norma IEC 60068-2-6
- Figura 3 – Típica relação aceleração vs frequência em um ensaio senoidal
- Figura 4 – Diagrama de blocos simplificado do sistema de realização de ensaios de vibração
- Figura 5 – Diagrama de blocos de um amplificador classe D
- Figura 6 – Modelo mecânico de um *shaker* eletrodinâmico
- Figura 7 – Estrutura de um *shaker* eletrodinâmico
- Figura 8 – Armadura de um *shaker* eletrodinâmico
- Figura 9 – Construção interna de um *shaker* eletrodinâmico
- Figura 10 – Modelo elétrico de um *shaker*
- Figura 11 – Diagrama de componentes do sistema de ensaios de vibração
- Figura 12 – Regra da mão direita para determinar o sentido da força de Lorentz
- Figura 13 – *Shaker* utilizado para análise
- Figura 14a – Componentes do sistema de ensaios de vibração analisado – Acelerômetro
- Figura 14b – Componentes do sistema de ensaios de vibração analisado – Controlador integrado ao *software*
- Figura 14c – Componentes do sistema de ensaios de vibração analisado – Amplificador de potência
- Figura 15 – Gráfico de frequência vs aceleração do ensaio senoidal
- Figura 16 – Seção transversal de um *shaker* eletrodinâmico
- Figura 17a – Modelo inicial da análise – Geometria
- Figura 17b – Modelo inicial da análise – Malha
- Figura 17c – Modelo inicial da análise – Representação física
- Figura 18 – Refinamento do modelo de análise
- Figura 19 – Propriedades físicas do modelo
- Figura 20 – Representação gráfica da intensidade do fluxo magnético para f_1
- Figura 21 – Linhas de campo atravessando a armadura para f_1
- Figura 22 – Detalhe das linhas de campo atravessando a armadura para f_1
- Figura 23 – Isossuperfícies da densidade de fluxo magnético para f_1

Figura 24 – Força apresentada pelo *software* controlador do *shaker*

Figura 25 – Estruturas internas do *shaker*: flexores e conectores da armadura

Figura 26 – Representação gráfica da intensidade do fluxo magnético para f_2

Figura 27 – Linhas de campo atravessando a armadura para f_2

Figura 28 – Isossuperfícies da densidade de fluxo magnético para f_2

Figura 29 – Representação gráfica da intensidade do fluxo magnético f_3

Figura 30 – Linhas de campo atravessando a armadura para f_3

Figura 31 – Isossuperfícies da densidade de fluxo magnético para f_3

LISTA DE SÍMBOLOS

f	Frequência
g	Aceleração da gravidade
F	Força
B	Densidade de fluxo magnético
I	Corrente elétrica
l	Comprimento do condutor
m	Massa
a	Aceleração
H	Intensidade do campo magnético
μ	Permeabilidade magnética
μ_r	Permeabilidade relativa
μ_0	Permeabilidade do vácuo
J	Densidade superficial de corrente
$d\mathbf{l}$	Elemento diferencial linear [
$d\mathbf{A}$	Elemento diferencial de área
N	Número de espiras em uma bobina
l_{mag}	Comprimento do caminho magnético
f_1	Frequência inicial do ensaio senoidal
f_2	Frequência de <i>cross-over</i> do ensaio senoidal
f_3	Frequência final do ensaio senoidal

LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 – Características do sistema de vibração para ensaios senoidais
- Quadro 2 – Parâmetros de configuração do *shaker* para ensaio senoidal
- Quadro 3 – Valores de corrente e tensão vs frequência (continua)
- Quadro 4 – Parâmetros definidos na análise (continua)
- Quadro 5 – Permeabilidade magnética dos materiais utilizados para modelagem
- Quadro 6 – Parâmetros eletromagnéticos da armadura
- Quadro 7 – Frequências de vibração analisadas
- Quadro 8 – Erro obtido em relação aos valores de B calculados para f_1
- Quadro 9 – Erro obtido em relação aos valores de F calculados para f_1
- Quadro 10 – Erro obtido em relação aos valores de B calculados para f_2
- Quadro 11 – Erro obtido em relação aos valores de F calculados para f_2
- Quadro 12 – Erro obtido em relação aos valores de B calculados para f_3
- Quadro 13 – Erro obtido em relação aos valores de F calculados para f_3

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
2.1.	Ensaaios de vibração	14
2.2.1.	Testes de vibração senoidais	15
2.2.	Sistema para realização de ensaios de vibração	17
2.2.1.	Software controlador	18
2.2.2.	Amplificador de potência	19
2.2.3.	Acelerômetro	20
2.2.4.	Shaker eletrodinâmico	20
2.3.	Considerações sobre eletromagnetismo	25
2.3.1.	Densidade de fluxo eletromagnético	26
2.3.2.	Força magnética	27
2.3.3.	Método dos elementos finitos	28
3.	METODOLOGIA	30
3.1.	Parâmetros do shaker e setup do sistema	30
3.1.1.	Especificações do sistema	30
3.1.2.	Perfil de vibração utilizado	33
3.2.	Modelagem do sistema	35
3.2.1.	Modelagem matemática	35
3.2.2.	Materiais	36
3.3.	Construção do modelo bidimensional no software CAD Flux	37
4.	RESULTADOS	42
4.1.	Frequência f_1	42
4.1.1.	Densidade de fluxo magnético	42
4.1.2.	Força magnética	46
4.2.	Frequência f_2	47
4.2.1.	Densidade de fluxo magnético	47

4.2.2.	Força magnética	49
4.3.	Frequência f_3	50
4.3.1	Densidade de fluxo magnético	50
4.3.2	Força magnética	52
4.4.	Considerações finais	52
5.	CONCLUSÃO	54
6.	REFERÊNCIAS	56

1 INTRODUÇÃO

O mercado automotivo é, sem dúvida, responsável por muitas inovações tecnológicas presentes em nossa vida, sendo elas em forma de produtos e serviços ou metodologias, diretrizes e normas. Robustez e confiabilidade devem ser pilares fundamentais quando do desenvolvimento de componentes eletrônicos para aplicações automotivas pois a segurança das pessoas e cidades está envolvida quando um automóvel é utilizado. Além disso, os componentes eletrônicos devem ser testados com rigor, explorando e prevenindo possíveis modos de falha, a fim garantir uma vida útil maior, reduzindo o consumo dos materiais envolvidos em sua fabricação, cada vez mais escassos, e gerando menos lixo. Em suma, produtos com funcionalidade prolongada contribuem para a segurança de seus usuários diretos e indiretos e geram menor impacto ambiental negativo.

Neste contexto, considerando os testes realizados para atestar resistência mecânica de componentes eletrônicos, a proposta deste trabalho consistia em analisar as estruturas internas e quantificar alguns parâmetros eletromagnéticos de um *shaker* eletromecânico, equipamento fundamental de um sistema de ensaios de vibração. Escolheu-se os ensaios de vibração realizados em capacitores eletrolíticos de alumínio desenvolvidos para aplicações automotivas como base da análise, de modo que o comportamento do *shaker* fosse avaliado durante a realização de um ensaio deste tipo.

A fim de simular as vibrações impostas aos componentes eletrônicos quando operando em um veículo, é comum na cadeia de fornecimento da indústria automotiva a exigência de testes de vibração para atestar confiabilidade e robustez tanto contra vibrações intrínsecas ao funcionamento do veículo como contra impactos não previstos. Essas vibrações podem danificar os produtos e causar mau funcionamento. Isso pode se traduzir em perda de desempenho ou comprometer sistemas importantes do veículo, como itens de segurança ou responsáveis por funções básicas.

Os parâmetros que descrevem um ensaio de vibração aplicados a componentes eletrônicos automotivos podem ser obtidos nas normas regulatórias e de referências para atestar confiabilidade e requisitos mínimos que são adotadas na indústria. Além disso, é comum que cada fabricante na cadeia produtiva estabeleça seus próprios requisitos de vibração a ser atendido pelo componente eletrônico, chamado de perfil de vibração. Pode-se também classificar os perfis com base no tipo

de vibração descritos por eles, como por exemplo os perfis senoidais que descreve ensaios com varredura em um intervalo de frequências definidas, geralmente buscando pontos de ressonância que possam comprometer a resistência mecânica do dispositivo

Para a realização de ensaios de vibração é indispensável a utilização de um excitador vibratório, ou *shaker*, que consiste em um equipamento que vibra por ação de força magnética em uma estrutura chamada de armadura, uma parte metálica com uma bobina que fica imersa em um campo magnético e impedida de se mover em qualquer eixo senão o axial. O *shaker* está inserido em um sistema próprio para realização de ensaios de vibração que, além do excitador, é composto de um amplificador de potência, acelerômetros e um *software* controlador, formando um controle em malha fechada.

Motivado pela aplicabilidade de um excitador nas etapas de qualificação de componentes eletrônicos automotivos, o propósito deste trabalho foi investigar o comportamento do campo magnético na armadura de um *shaker* eletrodinâmico durante a realização de um perfil de vibração senoidal. O estudo foi feito analisando três pontos de frequência distintos para quantificar o fluxo magnético com base em um modelo bidimensional construído através do *software* CAD Altair Flux™, inspirado um modelo de *shaker* eletrodinâmico de médio porte, bastante utilizado na indústria.

Uma revisão de artigos e publicações nas áreas de vibração e elétrica é apresentada, de modo a definir o contexto de utilização e as propriedades de funcionamento do excitador vibratório e dos principais componentes do sistema de ensaios de vibração. Além disso, são discutidos os métodos utilizados para modelagem matemática e construção do modelo de simulação em *software* aplicados na análise eletromagnética. Por fim, os valores obtidos da simulação como força magnética e o campo magnético, são apresentados, com uma breve discussão sobre o erro em comparação com os valores calculados e os valores verificados no controlador do sistema de ensaios de vibração.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nas próximas seções serão apresentados conceitos relevantes a respeito do tema, embasados em uma revisão bibliográfica de livros, artigos, catálogos e materiais especializados no tema. Serão abordados tópicos relacionados a ensaios de vibração, estrutura e funcionamento de um *shaker* eletrodinâmico, bem como uma revisão de conceitos de eletromagnetismo, incluindo o método dos elementos finitos para resolução de problemas.

2.1 Ensaios de vibração

No contexto do mercado automotivo, os ensaios de vibração são realizados como parte de qualificações de confiabilidade ou etapa de desenvolvimento de produtos em laboratórios ou na indústria. A fim de simular condições extremas verificadas na aplicação em campo, diversos dispositivos, como componentes eletrônicos, módulos e máquinas, são submetidos a ensaios com perfis de vibração determinados pelos fabricantes ou requeridos por normas.

Como são aplicados em sistemas indispensáveis para o funcionamento e segurança de veículos, um componente ou módulo deve suportar a mesma carga de vibração aplicada ao ambiente onde está instalado. Isso inclui vibrações advindas do atrito com o piso e com o ar, vibrações do motor ou de impactos repentinos. Com este objetivo, os fabricantes de componentes com aplicações automotivas devem atender a requisitos de vibração e garantir a confiabilidade antes da aplicação em campo através de uma simulação em ambiente de laboratório. Com um auxílio de um sensor acelerométrico verifica-se a carga total de vibração no ponto desejado durante o funcionamento de um veículo, nas condições que podem ser experimentadas em campo ou condições extremas, então, a partir dos dados obtidos, é estabelecido um perfil de vibração que o dispositivo deve suportar. Além disso, há a possibilidade de utilizar parâmetros de normas como referência para o nível de resistência à vibração de um componente.

Os ensaios realizados podem ter variados propósitos e, conseqüentemente, diversas especificações diferentes. Entre os principais tipos, mais frequentemente aplicados para componentes automotivos, estão os ensaios senoidais, que podem ser utilizados para investigar o comportamento em frequência do dispositivo testado. Há ainda os ensaios do tipo randômico, para simulação do ambiente de aplicação, onde

o sinal correspondente à vibração é distribuído em um espectro de frequências e o parâmetro de aceleração é dado como densidade espectral de potência. Por último, existem os ensaios combinando vibração senoidal e randômica, onde o dispositivo sob teste é estressado pelos dois modos ao mesmo tempo, geralmente utilizado para componentes com aplicações aerodinâmicas (HARRISON, 2009).

2.1.1 Testes de vibração senoidais

Na indústria automotiva, algumas das normas mais utilizadas como referência em vibração para componentes eletrônicos passivos, por exemplo, são a AEC-Q200, IEC-60068-2 e MIL-STD-202. Alguns parâmetros para ensaios de vibração que são especificados para capacitores eletrolíticos de alumínio são apresentados na Figura 1, tendo como referência a norma IEC 60068-2-6.

Figura 1 - Exemplo de parâmetros de ensaio de vibração para capacitores eletrolíticos de alumínio

Teste de vibração	IEC 60068-2-6, Teste Fc <i>Range</i> de frequência 10 Hz... 2 kHz, deslocamento máximo 1,5 mm, máxima aceleração 20 <i>g</i> , duração 3 x 2 h. Capacitor preso pelo corpo
-------------------	---

Fonte: Adaptador de Databook TDK (2019)

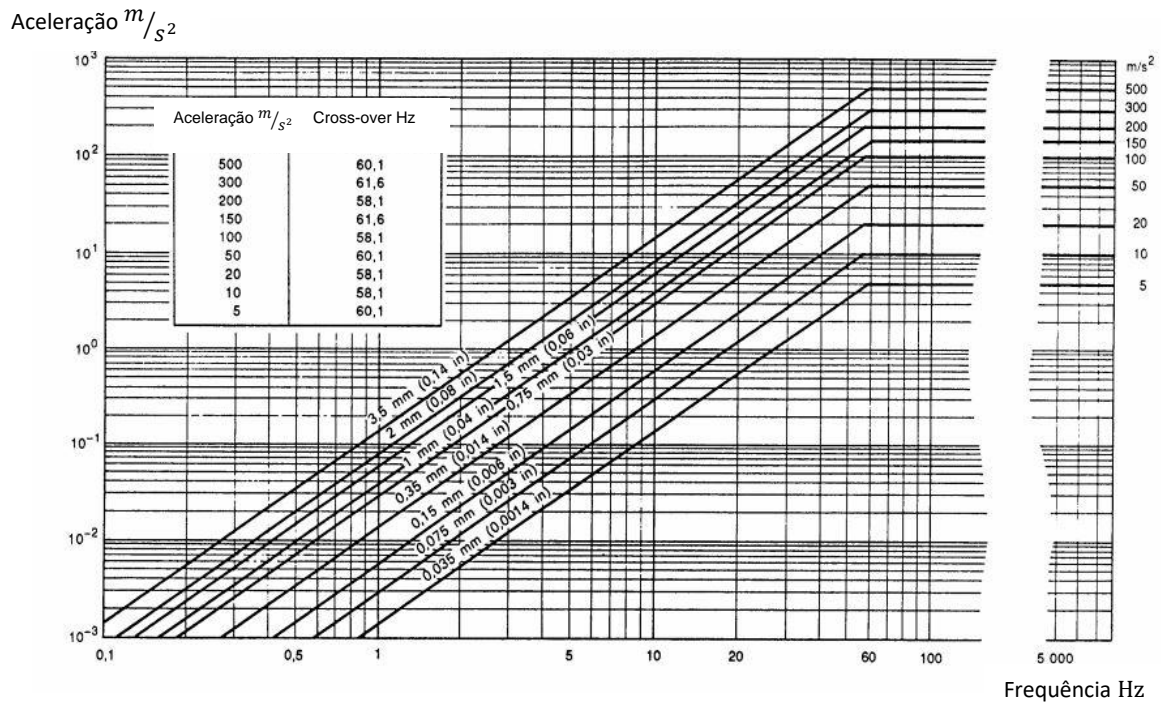
Os parâmetros necessários para caracterizar um teste de vibração, como o da Figura 2, são:

- Aceleração - medida em unidades gravitacionais, *g* ou m/s^2 , é a aceleração máxima a ser aplicada ao dispositivo sob teste;
- Deslocamento - medido em *mm*, é a amplitude máxima que deve ser alcançada pelo dispositivo sob teste;
- Frequência - medida em *Hz*, é a faixa de frequências que deve ser coberta durante a realização do teste;
- Duração - medido em horas, é o período de tempo pelo qual o dispositivo sob teste deve ser submetido à vibração;

- Montagem - é a forma como o componente deve ser fixado no *shaker* durante a realização do ensaio, ou também, onde a vibração deve ser aplicada.

Consultando a norma indicada pelo fabricante de capacitores, pode-se obter um parâmetro adicional, apresentados na Figura 2:

Figura 2 - Especificação para ensaios de vibração da norma IEC 60068-2-6



Fonte: Adaptado de IEC 60068-2-6

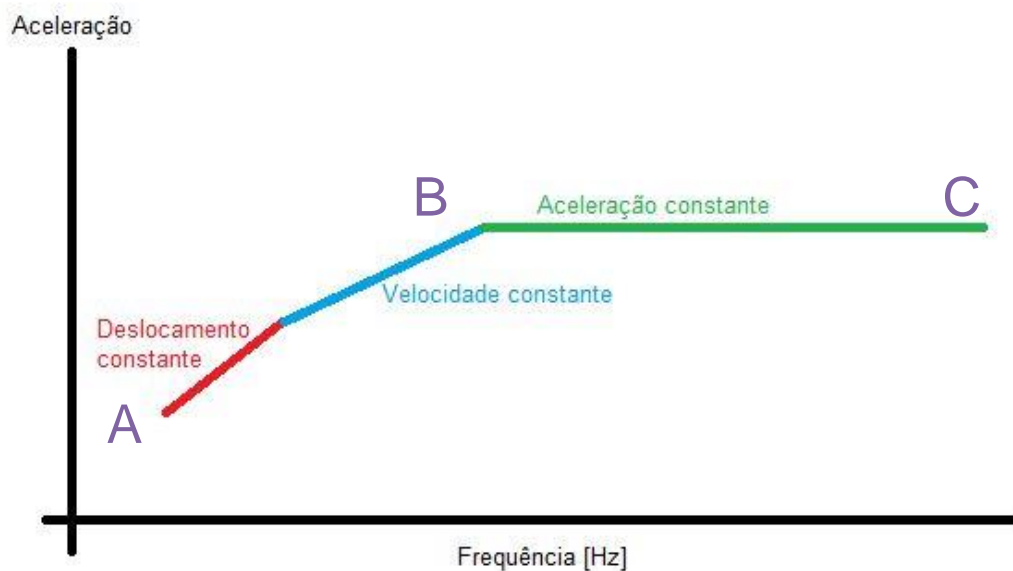
A frequência de *cross-over* é a frequência onde a vibração passa de deslocamento constante para aceleração constante. Cada valor de deslocamento, está associado a um valor correspondente de aceleração, que na frequência *cross-over* produzem a mesma amplitude de vibração (IEC 60068-2-6, 2007). O valor da frequência de *cross-over* está diretamente ligado a capacidade de operação do equipamento vibratório, que são os limites de deslocamento, velocidade, aceleração e força.

Os ensaios de vibração do tipo senoidal buscam percorrer uma faixa de frequências, geralmente entre 10 e 2000 *Hz* procurando por pontos de ressonância. Também é possível submeter o dispositivo sob teste a um número definido de ciclos de varredura entre baixa e alta frequência durante um período de tempo; com uma razão logarítmica constante, para garantir que o dispositivo seja estressado com todas

as frequências pelo mesmo período de tempo. Embora muito aplicado, este perfil não simula a vibração experimentada em campo pelos componentes.

Quando realizado em ensaio do tipo descrito na Figura 1, é comum que o gráfico de aceleração vs frequência seja utilizado para observar os pontos de ressonância. Assim, um acelerômetro deve ser posicionado próximo ao dispositivo sob teste, de forma a fornecer a informação precisa e obter um gráfico como o da Figura 3, onde não há nenhum ponto de ressonância representado.

Figura 3 - Típica relação aceleração vs frequência em um ensaio senoidal



Fonte: A autora.

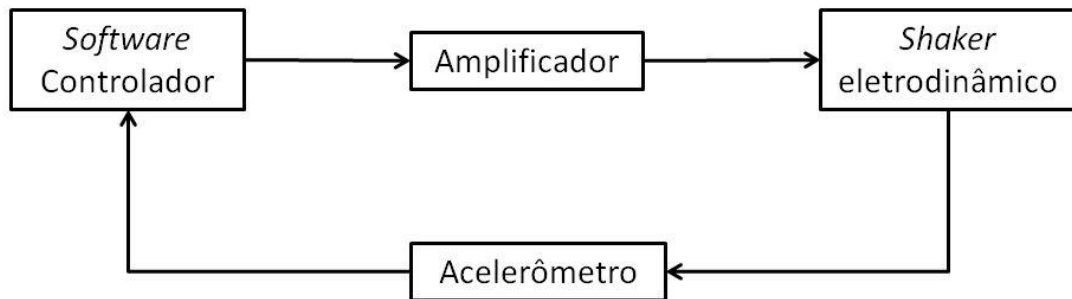
O ponto A, marca a frequência de início do ensaio, ou a mais baixa frequência de teste, com deslocamento (amplitude) fixo. O ponto B marca a frequência de *cross-over*, quando a aceleração passa a ser constante, já o ponto C marca a maior frequência utilizada no ensaio. Quando atinge o ponto C, um ciclo é finalizado e então um novo ciclo de varredura se inicia a partir do ponto C, da mais alta para a mais baixa frequência.

2.2 Sistema para realização de ensaios de vibração

Como simplificação, pode-se dizer que o sistema próprio para ensaios de vibração a ser estudado é composto de quatro elementos principais: um *shaker*, um

amplificador de potência, um controlador e um acelerômetro, apresentados em diagrama de blocos, na Figura 4.

Figura 4 - Diagrama de blocos simplificado do sistema de realização de ensaios de vibração



Fonte: A autora.

Um perfil de vibração é inserido no software controlador, que o converte em parâmetros de entrada para o amplificador. O amplificador de potência envia os sinais necessários para o *shaker* eletrodinâmico, que aplica a carga de vibração descrita pelo perfil ao dispositivo sob teste. Os dados do acelerômetro posicionado próximo ao dispositivo sob teste são fornecidos ao software controlador para verificar se o perfil de vibração está sendo aplicado conforme programado e corrigir os sinais do amplificador, estabelecendo assim o controle em malha fechada (UCHIYAMA; MUKAI; FUJITA, 2009).

2.2.1 Software controlador

O controlador é responsável por traduzir os parâmetros de teste que estão descritos em perfis de vibração, como aceleração, densidade espectral de potência ou frequência, em parâmetros de entrada para o amplificador de potência. Além disso, é função do controlador fornecer informações de monitoramento ao longo da realização dos ensaios. O controlador é integrado a um *software* com *interface* com o usuário, onde é possível inserir o perfil de vibração que se deseja impor ao dispositivo sob teste (HARRISON, 2009).

A função do controlador é enviar pequenos sinais analógicos de tensão ao amplificador de potência que serão convertidos em vibração pelo *shaker* eletrodinâmico. O controlador também recebe os sinais do acelerômetro com a

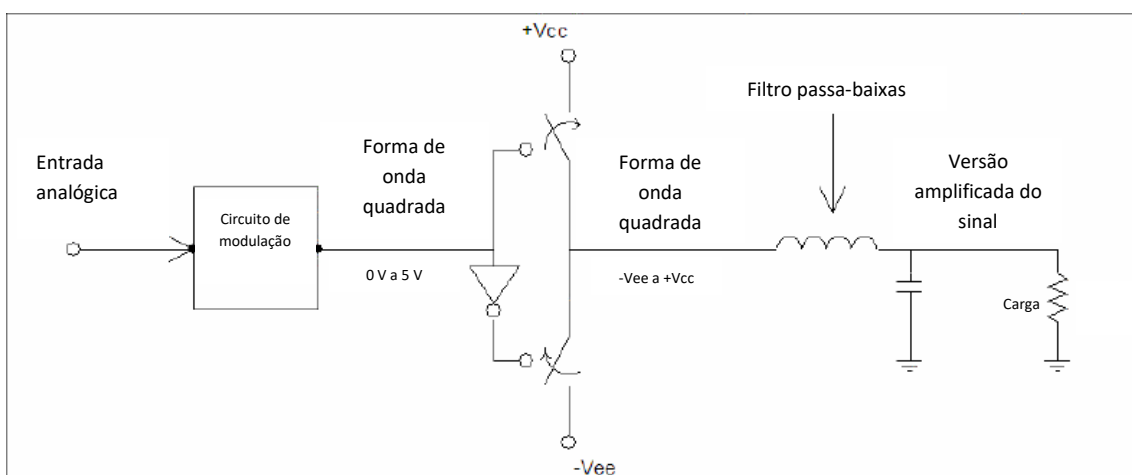
informação de aceleração do dispositivo sob teste, do topo do *shaker* e algum outro ponto desejado (se houveram acelerômetros ou canais suficientes e a fixação for possível).

2.2.2 Amplificador de potência

O amplificador de potência é o elemento intermediário do sistema de ensaios de vibração. Os parâmetros de entrada são pequenos sinais analógicos provenientes do controlador, que são amplificados para alimentar o circuito de campo e a armadura do *shaker* de forma contínua durante a realização do ensaio. O amplificador empregado neste tipo de sistema é chamado de *Switching Power Amplifier*, ou amplificador de potência de classe D, projetados para maximizar a eficiência e reduzir o tamanho em comparação com amplificadores usados anteriormente.

Um sinal de onda quadrada contendo o sinal analógico (sinal original de forma codificada) é modulada, e aciona os transistores na saída. O princípio de funcionamento deste tipo de amplificador consiste em operar os transistores como chaves de modo que, quando desligados, a potência dissipada seja nula, atingindo alta eficiência, em torno de 95% (BLOECHL; BATAINEH; HARRELL, 2004). A Figura 5 apresenta um diagrama de funcionamento do amplificador classe D.

Figura 5 - Diagrama de blocos de um amplificador classe D



Fonte: Adaptado de BLOECHL; BATAINEH; HARRELL (2004)

O amplificador utilizado para alimentar o *shaker* é construído de forma modular, de modo que se uma das unidades fica fora de operação a função do

amplificador não é afetada por completo. Além disso, mais unidades de potência podem ser adicionadas conforme a necessidade do *shaker* que deve ser acionado (HARRISON, 2009).

2.2.3 Acelerômetro

Um acelerômetro pode ser descrito como um dispositivo capaz de medir variações de força. O tipo utilizado no sistema de ensaios de vibração é o acelerômetro de carga piezoelétrico, que possui um cristal sensível a aplicação de força. O cristal piezoelétrico, por sua vez, é acoplado em uma massa que comprime o cristal quando algum nível de vibração é imposto ao acelerômetro, emitindo, assim, um sinal elétrico proporcional à vibração aplicada.

Como o sinal de saída do cristal é uma pequena tensão elétrica, é necessário um circuito adicional de instrumentação para que este sinal seja útil ao controlador em forma de tensão elétrica. Os parâmetros do acelerômetro que devem ser considerados são a faixa de frequência, que depende da ressonância mecânica do componente, sensibilidade, mensurada em mV/g (tensão por unidade de aceleração da gravidade) e intervalo de temperatura de operação.

2.2.4 *Shaker* eletrodinâmico

Um *shaker* eletrodinâmico (referido também como *shaker* no restante desta seção) é ideal para ensaios de vibração com aplicações da indústria automotiva, pois tem capacidade de altas frequências e altas acelerações (MENEGETI, 2017), requeridas por normas e algumas especificações. O amplificador alimenta o circuito de campo, fazendo com que uma corrente elétrica passe pelas bobinas e produza um campo magnético radial que interage com a corrente que circula na armadura do *shaker* (LANG & SNYDER, 2001). Essa interação entre uma corrente que circula em uma bobina imersa em um campo magnético radial produz uma força axial de intensidade proporcional, que é transmitida ao topo do *shaker*, onde o objeto a ser testado é fixado (MARTINO & HARRI, 2019). A força resultante agindo sobre a armadura é proporcional ao fluxo magnético ao qual a bobina é submetida, à corrente elétrica que passa pela armadura, e ao comprimento do fio, e pode ser determinada através da Equação 1 (SADIKU, 2012).

$$F = BIl \quad (1)$$

onde, F é a força, em N ,

B é a densidade de fluxo magnético, em T ,

I é a corrente elétrica, em A , e

l é o comprimento da bobina, em m .

Outra equação de extrema importância para descrever o funcionamento de um *shaker* é a Segunda Lei de Newton, ou princípio fundamental da dinâmica, descrita na Equação 2. Aplicando a análise ao *shaker*, como o produto da massa e da aceleração é igual a força resultante agindo sobre a armadura e a vibração é mensurada em unidades gravitacionais de aceleração, pode-se dizer que, quanto maior a massa do dispositivo sob teste ou quanto maior a aceleração requerida no ensaio, mais corrente na armadura é necessária. Essa afirmação pode ser provada, quando a Equação 2 é combinada com a Equação 1, e ilustrada através da figura 6, que apresenta o modelo mecânico do sistema. Apesar da interferência das propriedades mecânicas, elas não serão abordadas neste estudo.

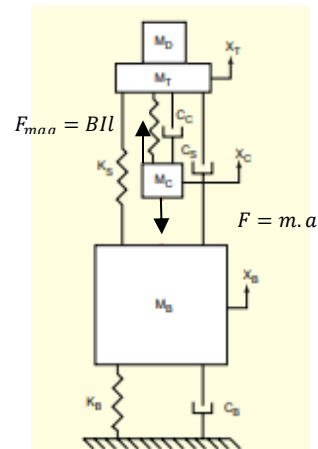
$$F = m \cdot a \quad (2)$$

onde, F é a força, em N ,

m é a massa do corpo que sofre ação da força, em kg , e

a é a aceleração, em m/s^2 .

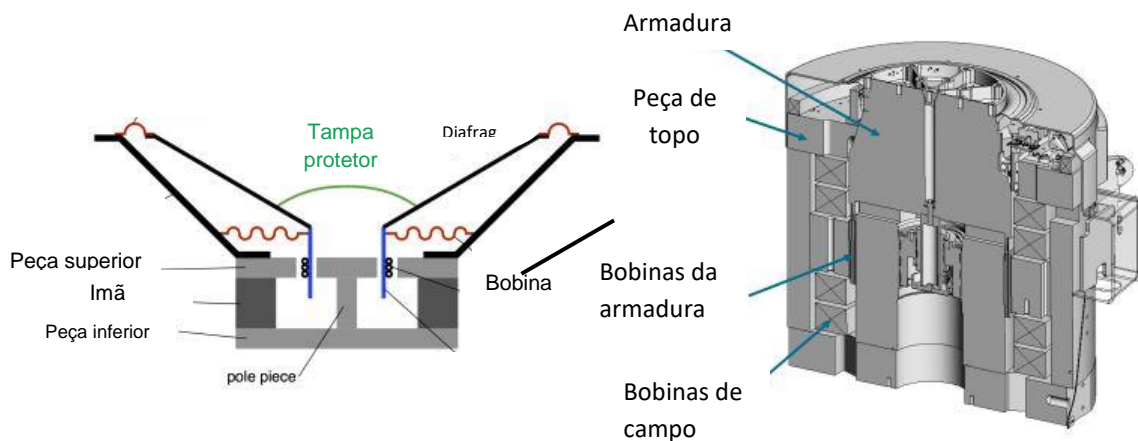
Figura 6 – Modelo mecânico de um *shaker* eletrodinâmico



Fonte: Adaptado de LANG & SNYDER, 2001

Conforme ilustrado na Figura 7, onde as estruturas principais são destacadas, também pode-se dizer que um *shaker* tem a estrutura semelhante a de um alto-falante (HARRIS & BUSH, 2014).

Figura 7 - Estrutura de um *shaker* eletrodinâmico



Fonte: Adaptado de Brüel & Kjær

A armadura, apresentada na Figura 8, é fixada de forma concêntrica ao eixo do *shaker* e suspensa por uma estrutura flexível de baixa rigidez axial, os flexores, para que seu movimento seja restritamente axial. Na parte inferior interna da armadura, há um outro mecanismo de sustentação para equilibrar a armadura chamado de diafragma, uma câmara de ar que pode ser regulada para manter a

armadura na posição de repouso conforme uma carga maior é adicionada ao topo do *shaker*.

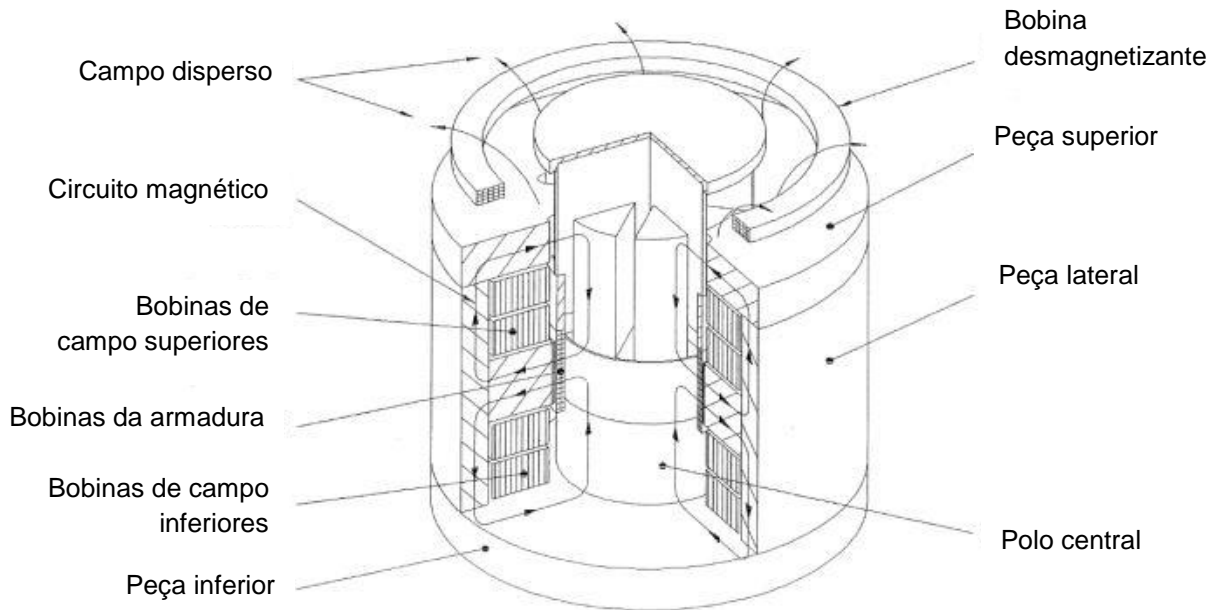
Figura 8 - Armadura de um *shaker* eletrodinâmico



Fonte: Sdyn ®

Ainda, pode-se analisar detalhadamente as estruturas internas de um *shaker* observando a Figura 9. A armadura é envolvida por peças de material ferromagnético, responsáveis por fechar o caminho para o fluxo magnético produzido pelas bobinas de campo. Na parte superior existe uma bobina desmagnetizante, que tem como função limitar o campo magnético residual que pode ser percebido no exterior do equipamento. Nas laterais, se encontram mais partes de material ferromagnético, envoltas por um encapsulamento, geralmente constituído de aço estrutural, somente para fins de sustentação.

Figura 9 - Construção interna de um *shaker* eletrodinâmico

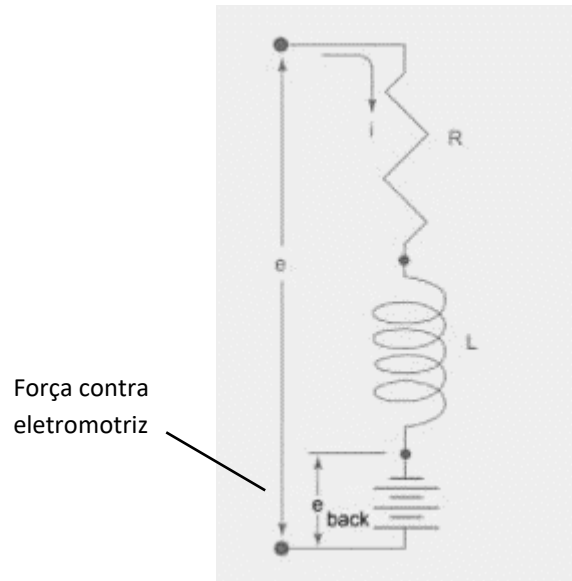


Fonte: Adaptado de Falk (2015)

O modelo elétrico de um *shaker*, que pode ser representado pela resistência e pela indutância da armadura, é apresentado na Figura 10. A resistência representa o valor mínimo da impedância verificado no terminal da máquina, visto que, durante a realização de um ensaio onde há liberação de calor, a resistência aumenta com a temperatura (nos materiais condutores, como o cobre, a resistência tem dependência positiva da temperatura). Além disso, seu valor é diretamente proporcional à frequência devido ao efeito pelicular, quando os elétrons associados a corrente que circula no condutor da bobina tendem a se distribuir em uma fina camada de sua superfície, que tem a profundidade reduzida (menor seção transversal) conforme a frequência aumenta (LAMB, 1883).

A indutância L apresenta um alto valor devido ao forte acoplamento magnético entre a bobina e as peças do circuito de campo do *shaker* (LANG & SNYDER, 2001). A indutância também tem dependência da corrente que passa nos condutores da armadura e do campo magnético interno do *shaker* (SADIKU, 2012). Também há um efeito de força contra eletromotriz, e_{back} na Figura 10, que é proporcional à velocidade com que a armadura se move através do campo magnético radial do interior do *shaker* (UCHIYAMA; MUKAI; FUJITA, 2009).

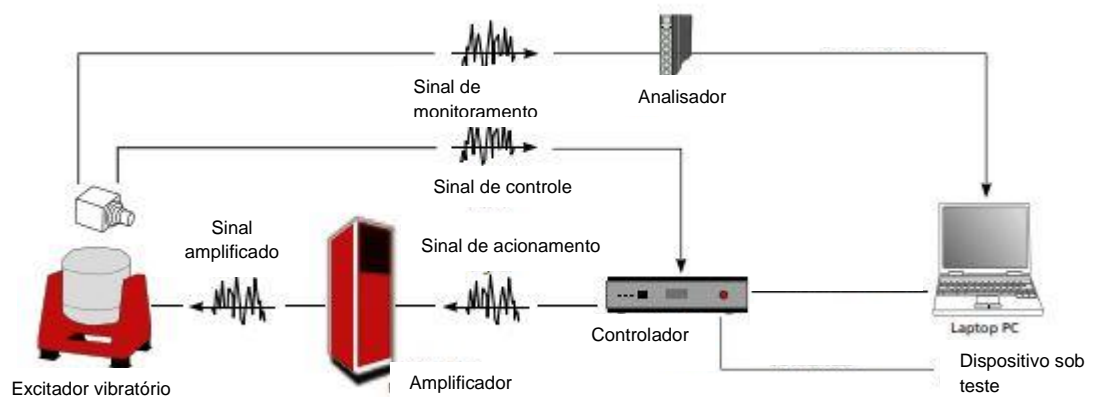
Figura 10 - Modelo elétrico de um *shaker*



Fonte: LANG & SNYDER, 2001.

Em suma, considerando todos os conceitos em relação aos componentes de um sistema de ensaios de vibração apresentados, pode-se dizer a operação em malha fechada ocorre como na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama de componentes do sistema de ensaios de vibração



Fonte: Adaptado de Brüel & Kjær ©

2.3 Considerações sobre eletromagnetismo

Alguns conceitos relevantes de eletromagnetismo que são indispensáveis para análise e compreensão do funcionamento do *shaker* são abordados nos próximos tópicos.

2.3.1 Densidade de fluxo eletromagnético

A densidade de fluxo eletromagnético, ou campo magnético, pode ser definida como a quantidade de fluxo magnético passando por uma superfície. Seu módulo por ser obtido através da Equação 3:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3)$$

onde \mathbf{B} é a densidade de fluxo magnético, em Wb/m^2 ou T ($1 N/A \cdot m$),

\mathbf{H} , é a intensidade do campo magnético, em A/m e

$\mu = \mu_r \mu_0$, é a permeabilidade magnética do meio dada em H/m .

Geralmente o valor de μ é dado em função da permeabilidade do vácuo $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ (GRIFFITHS, 1999). A permeabilidade magnética descreve a capacidade magnética de um material (CHAPMAN, 2013). Pode-se observar o efeito da permeabilidade ao analisar o comportamento de materiais diamagnéticos ($\mu_r \leq 1,0$), paramagnéticos ($\mu_r \geq 1$) ou ferromagnéticos ($\mu_r \gg 1$), contudo, tal análise não está no escopo deste trabalho.

Com o valor de \mathbf{B} é possível calcular outro conceito relevante para a análise proposta neste trabalho, o fluxo magnético líquido que atravessa uma superfície. A Equação 4 apresenta a expressão para o fluxo magnético, medido em Wb :

$$\varphi = \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (4)$$

O vetor intensidade do campo magnético, \mathbf{H} , pode ser determinado através da Lei de Biot-Savart, e depende da geometria da distribuição da corrente elétrica. Ainda, pode-se utilizar a Equação 5, denominada Lei de Ampère, para determinar a corrente total que passa por uma superfície fechada, logo, vê-se que uma densidade de corrente pode ser origem do campo magnético (SADIKU. 2012).

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{A} \quad (5)$$

A Lei de Ampère pode ser utilizada pra calcular o valor da intensidade do campo magnético de comprimento para o caso de um caminho magnético de comprimento l_{mag} composto por um núcleo de material ferromagnético, uma bobina com um número N de espiras percorridas por uma corrente I , resultando na expressão da Equação 6 (CHAPMAN, 2013). A expressão é uma simplificação adotada para quando a Lei de Ampère é abordada no contexto de circuitos magnéticos.

$$H = \frac{NI}{l_{mag}} \quad (6)$$

Conhecendo a permeabilidade do meio e a geometria da distribuição da corrente, a densidade de fluxo B pode ser determinada e utilizada para calcular o fluxo magnético φ , considerando a área da seção que é atravessada perpendicularmente pelo campo magnético. O fluxo, dado em Wb atravessa a superfície imersa em um campo magnético B e o caminho percorrido pelas linhas de fluxo é chamado de circuito magnético (UMANS, 2014).

2.3.2 Força magnética

Uma maneira de compreender o conceito de B é apresentada por Sadiku (2012), onde o campo magnético B é definido como uma medida de força por unidade de elemento de corrente sofrida pelo circuito imerso ao B e por onde circula a corrente. Essa afirmação pode ser deduzida a partir da Equação 1, onde é possível obter o módulo para a força sobre a bobina da armadura do *shaker*, e também observada a partir da Equação 7, derivada da Lei de Força de Lorentz, que fornece informações sobre a direção da força de uma carga em movimento:

$$d\mathbf{F} = dQ\mathbf{u} \times \mathbf{B} \quad (7)$$

A expressão $Q\mathbf{u}$, que representa uma carga em movimento, pode ser substituída por um elemento de corrente $I d\mathbf{l}$ pois são equivalentes (GRIFFITHS, 1999). Assim, a expressão obtida anteriormente pode ser reescrita como na Equação

8. É importante ressaltar que as expressões obtidas nas Equações 7 e 8 são simplificações da equação da força magnética aplicada para o caso um condutor, ou fio, delgado.

$$d\mathbf{F} = I d\mathbf{l} \times \mathbf{B} \quad (8)$$

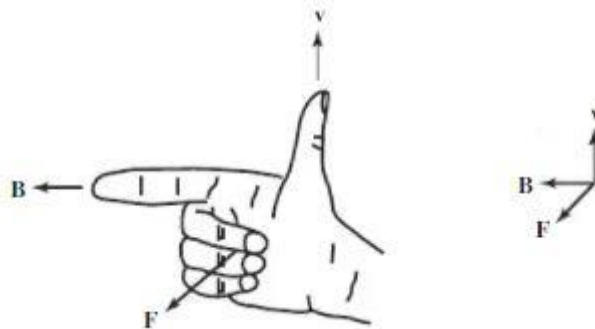
Ou então:

$$F = I l B \sin \alpha \quad (9)$$

em que α é o ângulo entre a direção da corrente e o campo magnético.

A partir daí pode-se dizer que força resultante sobre a armadura é sempre perpendicular a direção da corrente e a direção do campo magnético sobre o qual o condutor está imerso (SADIKU, 2012). Além disso, a regra da mão direita pode ser utilizada para determinar o sentido da força, conhecidos os sentidos da corrente e do campo magnético \mathbf{B} (UMANS, 2014). A Figura 12 indica o sentido dos vetores e a aplicação da regra da mão direita.

Figura 12 - Regra da mão direita para determinar o sentido da força de Lorentz



Fonte: Umans, 2014

2.3.3 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos pode ser aplicado para resolução de Equações diferenciais, mais precisamente, problemas de valor de contorno. A aplicação do método consiste basicamente em discretizar a região sob análise em um número finito de elementos e, através de um sistema de Equações, encontrar a solução do problema para a região como um todo. (SADIKU, 2012). Para empregar o método dos elementos finitos, algumas etapas precisam ser observadas:

1. Detalhar o problema de valor de contorno a ser resolvido, as variáveis e as condições de contorno;
2. Discretizar o domínio em um número finito de elementos de um formato adequado para o problema;
3. Obter a Equação que descreve um elemento;
4. Conectar os elementos do sistema através de um sistema de Equações;
5. Resolver o sistema.

Para encontrar a Equação que rege o elemento típico da região discretizada os nós que unem os elementos devem ser considerados, para que as Equações possam ser posteriormente resolvidas como um sistema. Geralmente, por ser utilizado na resolução de problemas com geometrias complexas ou em uma região discretizada em um grande número elementos, o método dos elementos finitos é aplicado computacionalmente através de algum software dedicado a aplicação desejada. Diversos problemas de eletromagnetismo podem ser solucionados através do método, especialmente os que envolvem Equações diferenciais ou quando se tem a necessidade de conhecer o potencial elétrico em alguma região.

3 METODOLOGIA

O *shaker* eletrodinâmico e o sistema de ensaios de vibração que é a base do modelo de análise e discussões é do tipo LDS V875-240 alimentado pelo amplificador SPA40K, ambos do fabricante Brüel & Kjaer. Para realizar a análise magnética da armadura, os seguintes passos foram seguidos:

1. Preparação do sistema para executar um ensaio;
2. Selecionar um perfil de vibração do tipo senoidal a ser realizado pelo *shaker* durante a coleta de dados;
3. Monitoramento da corrente e tensão na armadura do *shaker* afim de coletar valores e, posteriormente, modelar matematicamente o sistema;
4. Modelagem matemática do *shaker*, considerando as Equações de referência do sistema, apresentadas na seção 2;
5. Construção do modelo em *software* CAD para avaliação do campo magnético na armadura.

3.1 Parâmetros do *shaker* e *setup* do sistema

Nesta seção são apresentadas as especificações e procedimentos que precedem a coleta de dados no sistema de ensaios de vibração. O sistema precisa ser preparado pelo operador, assim como um perfil de vibração deve ser selecionado e inserido no *software* controlador.

3.1.1 Especificações do sistema

O *shaker* utilizado é do modelo V875-240, apresentado na Figura 13, um *shaker* eletrodinâmico de médio porte, ideal para ensaios de peças e módulos automotivos, sistemas eletrônicos em geral e sistemas para aviação. A aplicação deste *shaker* em particular é testar resistência a vibração de capacitores utilizados em sistemas automotivos, projetados e produzidos em uma multinacional reconhecida do setor.

Figura 13 - *Shaker* utilizado para análise

Fonte: A autora.

O sistema de ensaios é ainda composto pelo amplificador SPA40K, com 5 módulos de 8 kVA de potência, que fornece alimentação para o circuito de campo e para a amadura. O amplificador é controlado pelo controlador $LASER_{USB}^{\circledR}$, um controlador integrável a um computador, onde é possível obter dados em tempo real durante a realização dos ensaios e consultar relatórios dos perfis de vibração que foram executados pelo *shaker*. Além disso, o sistema conta com o uso de 2 acelerômetros para monitoramento da aceleração do tipo Dytran $^{\circledR}$ 3030B5H, com sensibilidade de 10 mV/g , faixa de frequência de operação de 5 Hz a 10 kHz e faixa de temperatura entre $-54^{\circ}C$ e $163^{\circ}C$, sendo ideal para a aplicação neste sistema. Na Figura 14, abaixo, são apresentados o amplificador de potência (Figura 14a), o controlador (Figura 14b) e o acelerômetro (Figura 14c) utilizados. Os parâmetros do sistema utilizado estão sintetizados no Quadro 1.

Figura 14 - Componentes do sistema de ensaios de vibração analisado



(a) Acelerômetro

(b) Controlador integrado ao *software*

(c) Amplificador de potência

Fonte: Brüel & Kjaer e Dytran

Quadro 1 - Características do sistema de vibração para ensaios senoidais

Parâmetro	Valor Nominal
Força máxima de pico senoidal	35,6 <i>kN</i>
Aceleração máxima	163 <i>g</i>
Velocidade máxima	2 <i>m/s</i>
Deslocamento <i>pk-pk</i> (pico a pico)	50,8 <i>mm</i>
Massa da armadura	22,3 <i>kg</i>
Frequência de ressonância da armadura	2280 <i>Hz</i>
Diâmetro da armadura	240 <i>mm</i>
Rigidez de suspensão axial	79 <i>kN/m</i>
Eficiência do amplificador	93 %

Fonte: A autora

O sistema deve ser preparado por um operador para realizar o ensaio seguindo os passos descritos abaixo:

1. Os equipamentos devem ser energizados;
2. O ambiente de programação e monitoramento do controlador deve ser iniciado;
3. O dispositivo sob teste deve ser fixado no topo do *shaker* através de um *fixture* projetado especialmente para o dispositivo em questão (nesta análise o *shaker* operou a vazio, ou seja, sem nenhum dispositivo sendo testado);
4. Os acelerômetros devem ser posicionados nos pontos de interesse e a conexão com o controlador deve ser verificada;
5. O perfil de vibração selecionado deve ser inserido no *software* controlador, que informará se o *shaker* tem capacidade de operar com as especificações inseridas (o *range* de operação deve ser mantido a 80% da capacidade);
6. O ensaio deve ser iniciado com o comando do operador no *software* controlador.

3.1.2 Perfil de vibração utilizado

O perfil de vibração senoidal utilizado como base dos cálculos e análises é aplicado em capacitores eletrolíticos de alumínio. Os parâmetros de configuração do *shaker* para o perfil de vibração acima são mostrados no Quadro 2.

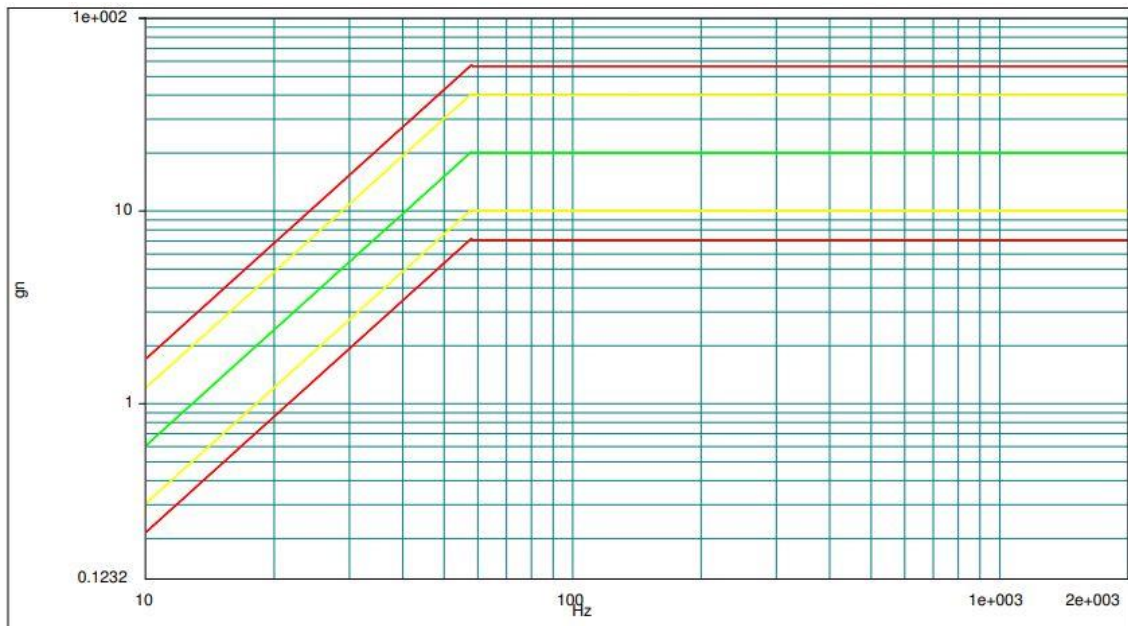
Quadro 2 - Parâmetros de configuração do *shaker* para ensaio senoidal

Parâmetro	Valor utilizado
Frequência mínima	10 Hz
Frequência máximo	2 kHz
Deslocamento <i>pk-pk</i> (pico a pico)	3 mm
Aceleração	20 g
Frequência de <i>cross-over</i>	58,1 Hz
Duração total	3x 2 h (2 h de vibração por eixo)
Quantidade de ciclos (10 Hz a 2 kHz)	16 ciclos
Duração do ciclo (10 Hz a 2 kHz)	7,5 min

Fonte: A autora.

Apenas um ciclo do perfil é suficiente para obter toda a informação necessária para os cálculos realizados durante esta análise, pois a mesma varredura em frequência se repetirá ao longo do tempo programado para o ensaio. Logo, após *setup* do sistema e definição do perfil, é preciso executá-lo apenas uma vez e o operador pode interromper o ensaio através do controlador. O gráfico na Figura 15 representa a relação entre frequência e aceleração para o ensaio senoidal executado.

Figura 15 – Gráfico de frequência vs aceleração do ensaio senoidal



Fonte: A autora

Ao longo da varredura, o campo magnético na armadura foi analisado em três frequências diferentes, portanto é importante que a tensão e a corrente sejam monitoradas nos pontos de interesse. Como o amplificador de potência possui uma interface que apresenta os valores instantâneos de tensão e corrente fornecidos para o *shaker*, para encontrar os valores de corrente na armadura para cada ponto de frequência analisado, os valores mostrados na tela do amplificador foram gravados durante a execução de um ciclo do perfil, obtendo os valores apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Valores de corrente e tensão vs frequência (continua)

Frequência [Hz]	Corrente [A]	Tensão [V]
20	4	9
58,1	53	27
2000	40	1

Fonte: A autora

3.2 Modelagem do sistema

Para a correta análise matemática do sistema, a modelagem foi dividida em duas etapas: aplicação das Equações e escolha dos materiais e valores utilizados com base na observação dos equipamentos e nos catálogos disponibilizados pelo fabricante.

3.2.1 Modelagem matemática

Duas das equações que regem o comportamento físico do *shaker* foram utilizadas como base de toda a análise: Equação 1 e a Equação 2, definidas na seção 2. Além disso, os valores dos parâmetros devem ser estabelecidos de modo a reproduzir o sistema real.

Com o auxílio da Equação 1, o valor da força exercida em cada uma das três situações (diferentes frequências) foi calculado. A massa da armadura é constante em todas as frequências e a aceleração foi obtida do gráfico na Figura 14. Combinando com a Equação 2, todos os parâmetros podem ser encontrados. Os valores da corrente na armadura são obtidos do Quadro 3, baseados no monitoramento da saída do amplificador. O valor do comprimento do condutor foi obtido considerando as dimensões da armadura do *shaker* observado, após medição do diâmetro interno, onde a bobina está inserida. Os valores do Quadro 4 representam os parâmetros obtidos na primeira análise do modelo matemático. Para todos os cálculos desta seção, g foi considerada como $9,81 \text{ m/s}^2$.

Quadro 4 - Parâmetros definidos na análise

Parâmetro	Frequência [Hz]		
	20	58,1	2000
Aceleração [g]	2,3	20	20
Massa da armadura [kg]	22,3		
Massa do <i>base plate</i> [kg]	3,20		
Força exercida na armadura [N]	575,36	5003,1	5003,1
Corrente na armadura [A]	4,0	53,0	40,0
Comprimento da bobina [m]	94,26		
Número de espiras	75		
Densidade de fluxo magnético do circuito de campo [T]	1,53	1,00	1,33
Comprimento do caminho magnético do circuito de campo [m]	0,8905		

Fonte: A autora

3.2.2 Materiais

Afim de construir um modelo em *software* CAD e calcular o campo magnético na armadura do *shaker*, deve-se definir os materiais que compõem a estrutura. Os materiais ferromagnéticos estão presentes na estrutura fixa e na parte móvel do *shaker*. No modelo de análise as partes fixas serão constituídos de ferro, já as bobinas de campo e da armadura são fabricadas em cobre.

Assim, considerando os materiais definidos, as propriedades que são significativas neste modelo são resumidas no Quadro 5.

Quadro 5 - Permeabilidade magnética dos materiais utilizados para modelagem
(continua)

Estrutura	Material	Propriedade
Núcleo do circuito de campo	Ferro-silício	$\mu_r = 7000$
Bobinas de campo	Ferro silício	$\mu_r = 7000$

Bobinas da armadura	Cobre	$\mu_r = 0,9999906$
---------------------	-------	---------------------

Fonte: Sadiku, 2012

Com os valores de permeabilidade do cobre e do ferro, o valor do campo magnético na armadura pode ser calculado por meio da Equação 6. Os valores calculados estão dispostos no Quadro 6.

Quadro 6 – Parâmetros eletromagnéticos da armadura

Parâmetro	Frequência [Hz]		
	20	58,1	2000
Campo magnético da armadura [A/m]	3,18	42,17	3,98
Campo magnético do circuito de campo [A/m]	170,52	113,68	150,85
Corrente nas bobinas de campo [A]	0,690	0,460	0,611

Fonte: A autora

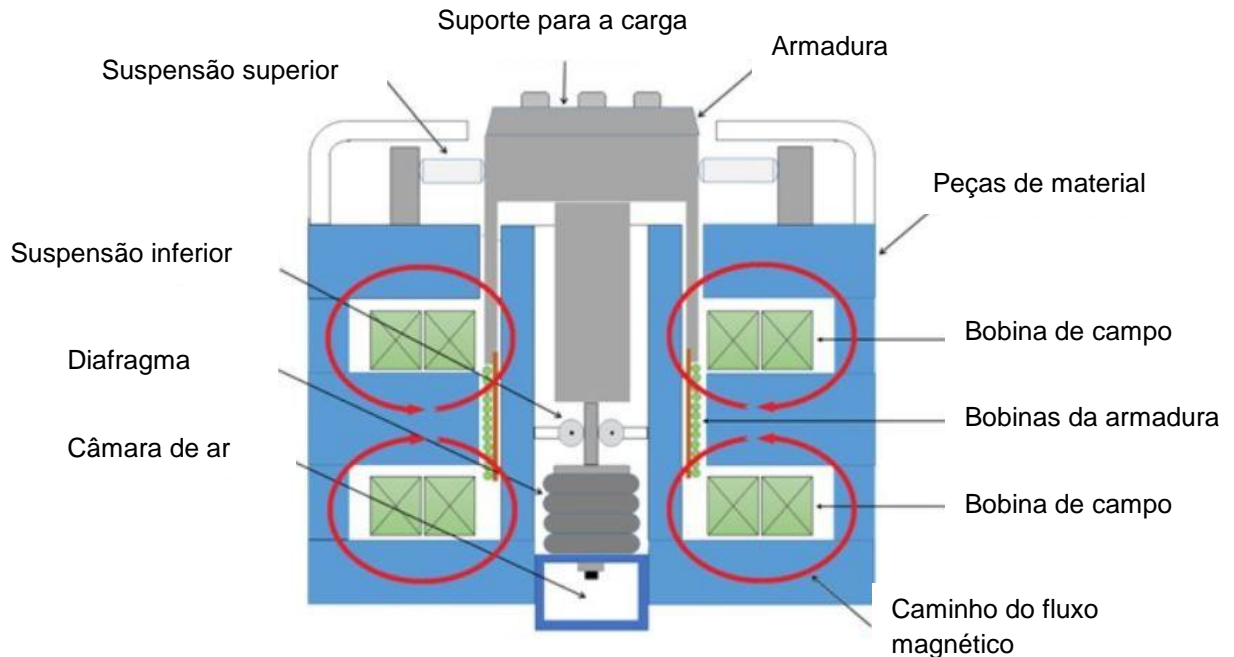
O campo magnético da armadura foi calculado com base na corrente elétrica fornecida pelo amplificador em cada uma das frequências de ensaio, considerando o cobre como material condutor. O valor da intensidade do campo magnético considera o campo total, produzido pelas bobinas inferiores e superiores do circuito de campo, na direção radial onde cada bobina contribui com metade do campo magnético, de modo a obter a corrente elétrica em cada uma das bobinas com a Equação 6, somente metade do valor deve ser considerado. Os núcleos são constituídos por ferro silício e o caminho magnético médio, apresentado no Quadro 4, foi estimado considerando as dimensões reais do *shaker* analisado. A densidade de fluxo magnético foi calculada por meio da Equação 3, com os dados apresentados nos Quadros 5 e 6.

3.3 Construção do modelo bidimensional no software CAD Flux

Na Figura 15 pode-se verificar o arranjo interno das principais estruturas presentes no *shaker* eletrodinâmico como a armadura, as bobinas de campo e as partes ferromagnéticas que completam o circuito, bem como as estruturas mecânicas

como os suportes superiores e inferiores da armadura. Utilizando as Figuras 9 e 16, como base, a seção transversal do *shaker* LDS V875-240 foi representada em *software* CAD para análise dos parâmetros eletromagnéticos.

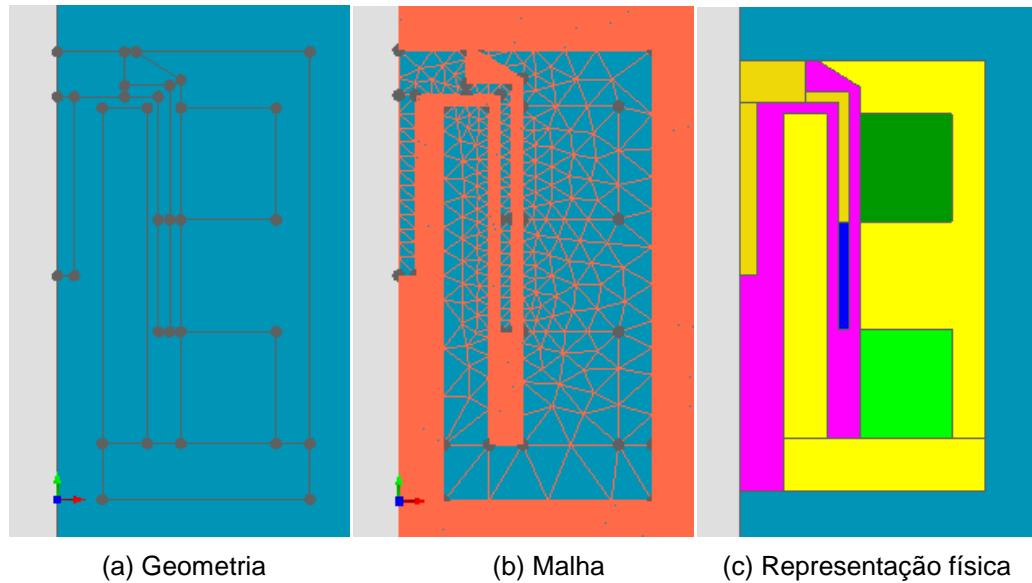
Figura 16 - Seção transversal de um *shaker* eletrodinâmico



Fonte: Adaptado de Sentek Dynamics ©

Um modelo bidimensional, como o da Figura 17, foi construído no *software* Flux™ para simular as condições modeladas nesta análise. Utilizando-se de simetria radial no eixo Y e afim de obter a resolução do problema tridimensional, um corte lateral direito foi modelado. A Figura 17a mostra a geometria do problema, enquanto as Figuras 17b e 17c mostram a aplicação do método dos elementos finitos e a divisão das regiões por propriedades materiais e a representação das bobinas de campo e armadura, respectivamente.

Figura 17 - Modelo inicial da análise

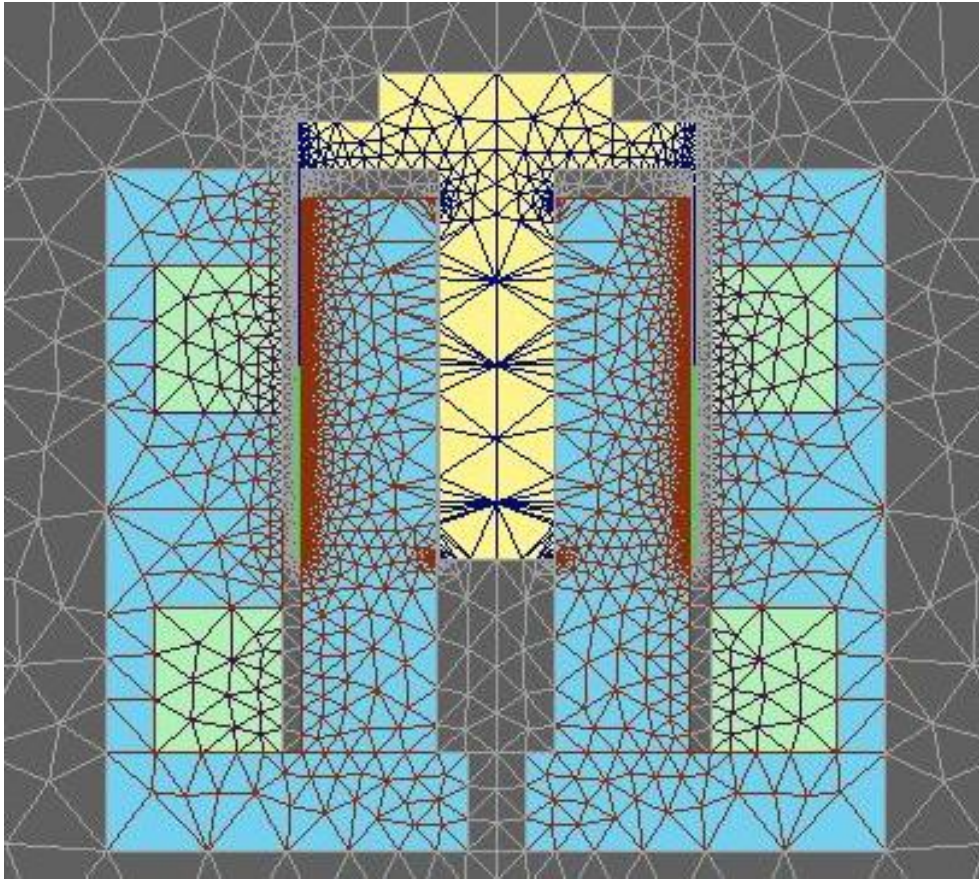


Fonte: A autora

Infelizmente o modelo considerado para análise não pode ser aplicado devido às condições de contorno impostas aos diferentes componentes que estão em contato. O *software* empregado na simulação não processou a modelagem bidimensional de uma bobina de cobre, material com a permeabilidade magnética próxima a do ar, fazendo com que o espaço no entorno da área que representa a bobina não fosse corretamente discretizado.

Um segundo modelo foi construído de modo a representar com maior fidelidade as propriedades físicas e o funcionamento do *shaker* eletrodinâmico. A Figura 18 apresenta o modelo reformulado, considerando melhorias como revisão de algumas dimensões e aplicação das condições de contorno, sendo possível observar também que a malha foi refinada de modo a trazer maior precisão para os resultados. A malha foi gerada com as configurações automática do *software* utilizado, contendo 6327 elementos e 12736 nós. Na Figura 18 é possível visualizar uma parte do domínio com os elementos da malha, neste caso, triângulos.

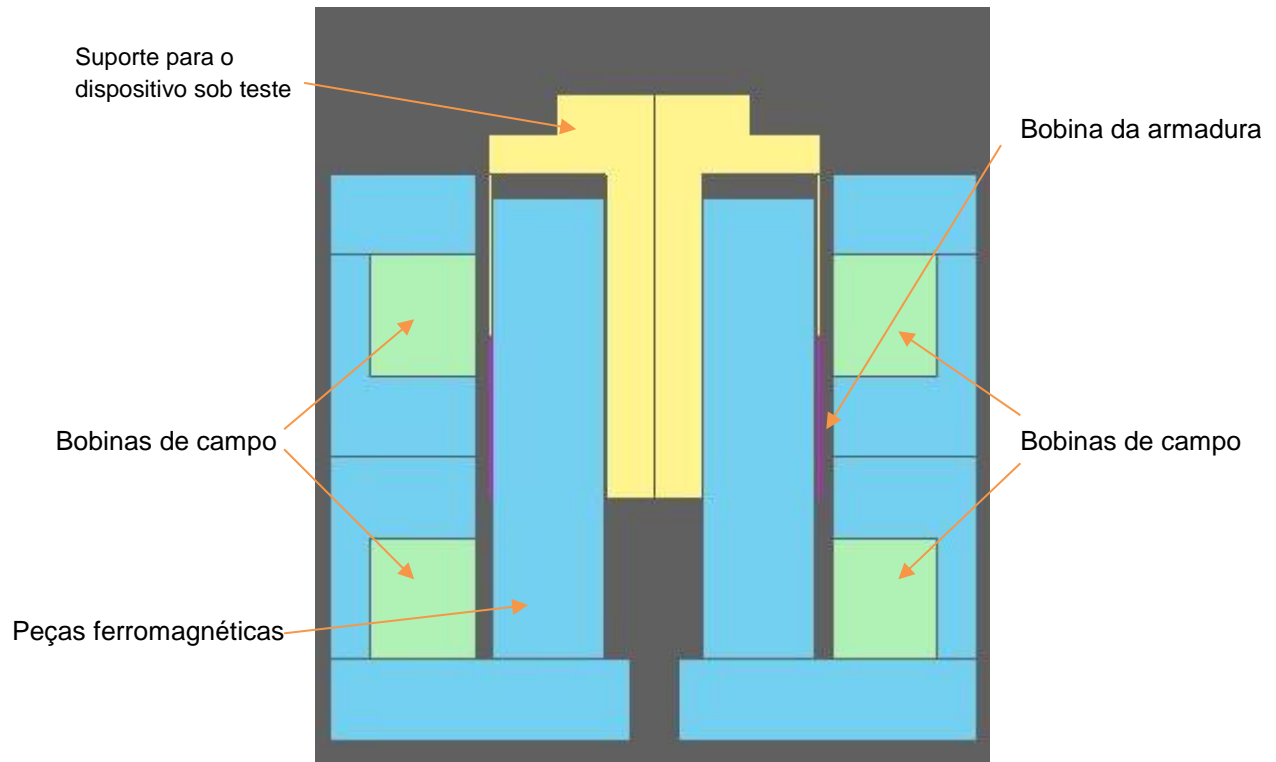
Figura 18 – Refinamento do modelo de análise



Fonte: A autora

Após a reformulação do modelo, verificada sua aplicabilidade, foram definidos os parâmetros da malha e a determinação das condições de contorno. As propriedades físicas da estrutura foram modeladas conforme a Figura 18, também foi necessária a determinação dos materiais escolhidos, assim como a delimitação das partes da estrutura que correspondiam às bobinas de campo e de armadura. Pode-se observar, na Figura 19, todos os parâmetros, definidos e calculados no decorrer da análise, aplicados ao modelo. Além disso, as estruturas presentes no modelo foram classificadas como fixas ou móveis, de forma a ação da força causando movimento na armadura do *shaker* pudesse ser considerada na análise.

Figura 19 – Propriedades físicas do modelo



Fonte: A autora

Em comparação com o modelo projetado para esta análise, algumas estruturas foram omitidas pois não têm relevância para os parâmetros eletromagnéticos da armadura ou possuem funções relacionadas a parte mecânica do equipamento. As estruturas de sustentação, conectores e também os mecanismos de resfriamento não foram considerados na modelagem.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção estão apresentados e discutidos os resultados obtidos através da simulação em *software*. A densidade de fluxo magnético, B , e a força magnética, F , foram quantificados para os casos das três frequências analisadas. O Quadro 7 apresenta as frequências de análise, que nesta seção serão referidas por seus respectivos símbolos:

Quadro 7 – Frequências de vibração analisadas

Parâmetro	Frequência [Hz]	Símbolo
Frequência inicial	20	f_1
Frequência de <i>cross-over</i>	58,1	f_2
Frequência final	2000	f_3

Fonte: A autora.

4.1 Frequência f_1

O primeiro caso analisado diz respeito aos parâmetros de corrente elétrica, aceleração e força quando o *shaker* está impondo vibrações na frequência de 20 Hz. Apesar de o ensaio avaliado iniciar formalmente na frequência de 10 Hz, uma frequência superior (uma oitava acima) foi escolhida de forma que qualquer comportamento transitório pudesse ser desconsiderado, dessa forma a ideia central consistia em obter resultados válidos somente em regime permanente. Os parâmetros experimentais associados à frequência f_1 são apresentados no Quadro 4, na seção 3.

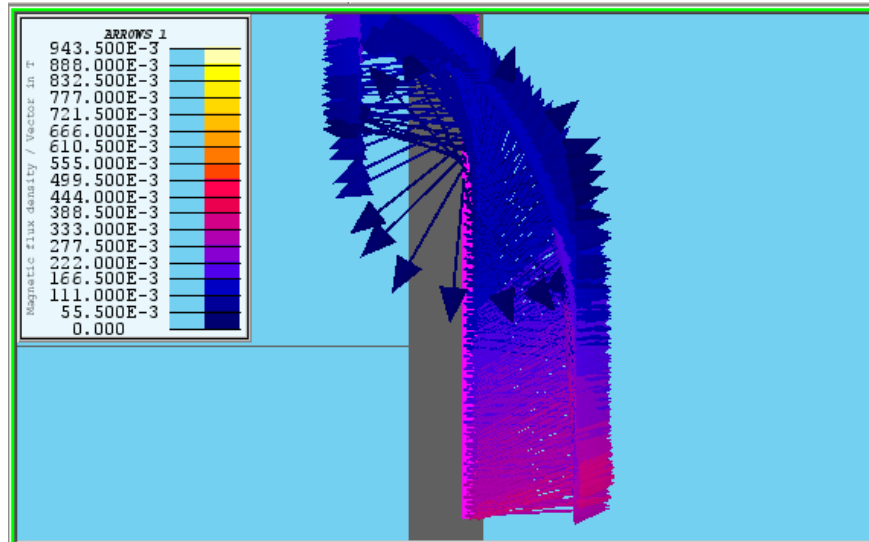
4.1.1 Densidade de fluxo magnético

De forma a analisar o comportamento magnético das estruturas internas do *shaker*, escolheu-se a densidade de fluxo magnético para ser quantificada. Como o funcionamento do *shaker* depende diretamente da intensidade e direção de B , a densidade de fluxo é uma das grandezas mais importantes do equipamento.

A Figura 20 apresenta uma representação gráfica dos valores de B ao longo da superfície do corte do modelo. Em comparação com os valores obtidos no Quadro

4 calculou-se o erro relativo aos valores, apresentado no Quadro 8 para a densidade de fluxo referente às bobinas de campo e à bobina da armadura.

Figura 20 – Representação gráfica da intensidade do fluxo magnético para f_1



Fonte: A autora.

Quadro 8 – Erro obtido em relação aos valores de B calculados para f_1

Valor calculado [T]	Valor simulado [T]	Erro obtido [%]
1,53	1,26	17,64%

Fonte: A autora.

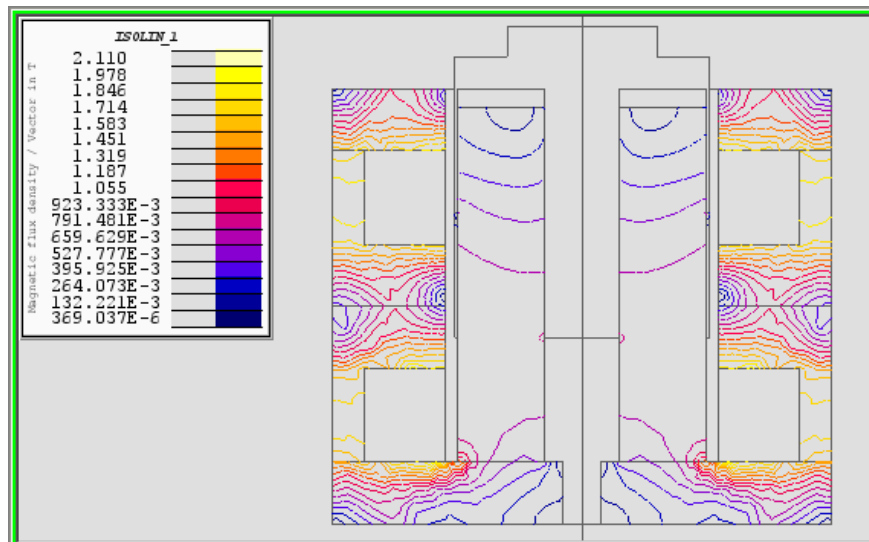
Avaliando a metodologia adotada é possível levantar algumas razões que justificam a diferença encontrada entre modelagem matemática e simulação. Como não foi possível obter acesso físico ao condutor da armadura, de modo que o comprimento pudesse ser mensurado com auxílio de um instrumento de medição, foi necessário calcular o comprimento com base no diâmetro interno da armadura, estimando o número de espiras através da Figura 8. Tal método carrega algumas imprecisões, já que a resistência atribuída ao condutor pode ser erroneamente considerada devido à quantidade de material e o comprimento exposto ao campo magnético também carrega a incerteza.

Ainda pode-se atribuir uma parcela do erro ao material utilizado na simulação, que não representa com exatidão o material que constitui os condutores das bobinas de campo, bem como os núcleos ferromagnéticos do circuito magnético de campo. Portanto, ao realizar uma simulação onde uma computação precisa do valor da

densidade de fluxo magnético é esperada, as propriedades do material utilizado na estrutura devem ser cuidadosamente estudadas afim de obter um resultado confiável. Na figura 20 também pode-se notar entre a área que representa a bobina de armadura e a estrutura móvel, há uma certa dispersão do fluxo. Essa dispersão pode ser atribuída à diferença entre a permeabilidade dos materiais.

Através da simulação executada ainda pode-se visualizar as linhas do campo gerado pelas bobinas de campo atravessando perpendicularmente os condutores da armadura, na Figura 21. Verifica-se que há um ângulo de 90° entre a direção da corrente elétrica e a direção do campo, respeitando assim a regra da mão direita para direção da força de Lorentz gerada.

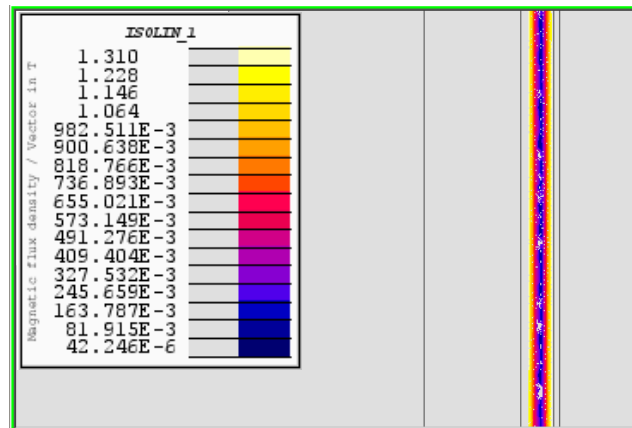
Figura 21 – Linhas de campo atravessando a armadura para f_1



Fonte: A autora.

Com auxílio da Figura 22, magnificação da Figura 21, observa-se o detalhe da densidade de fluxo magnético na armadura, representada através de linhas de campo. É possível notar que as linhas estão concentradas na direção radial, demonstrando o alto valor de B atravessando a armadura, conforme indicado pela modelagem matemática. Esse é um indicativo de que o material utilizado na construção das partes ferromagnéticas do *shaker* tem grande capacidade de magnetização.

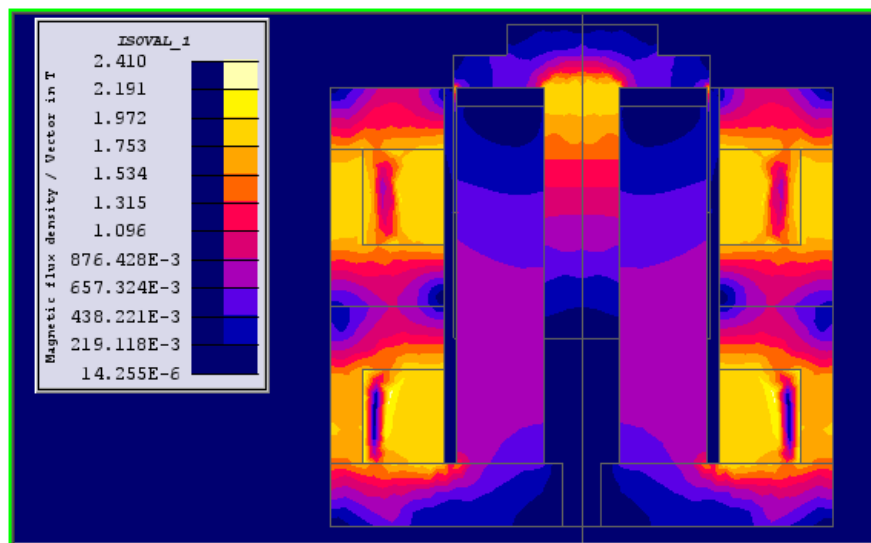
Figura 22 – Detalhe das linhas de campo atravessando a armadura para f_1



Fonte: A autora.

O campo magnético produzido pela corrente de armadura também pode ser analisado com uma representação de isossuperfície, demonstrada na Figura 23. Nota-se, pela geometria do modelo, que na posição onde os parâmetros foram avaliados durante a simulação o campo produzido ao redor dos condutores da armadura pode interagir com a corrente das bobinas de campo e gerar uma força atuando nesta região. Entretanto, como a massa do circuito de campo é consideravelmente maior do que a massa da armadura e a corrente de campo possui menor intensidade, essa força não é suficiente para provocar movimento ou perturbações na parte fixa do *shaker*.

Figura 23 – Isossuperfícies da densidade de fluxo magnético para f_1



Fonte: A autora.

4.1.2 Força magnética

A força magnética que age na armadura, ou força de Lorentz, é a responsável por impor vibração ao dispositivo sob teste em forma de aceleração. O controlador do *shaker* apresenta a força considerando a aceleração máxima descrita pelo perfil, como na Figura 24.

Figura 24 – Força apresentada pelo *software* controlador do *shaker*

Maximum Values of Profile		Shaker Parameters		Limits Check	
Peak Acceleration(gn):	20.3830		163.0000	13%	●
Peak Velocity(m/s):	0.5476		1.9990	27%	●
Peak-Peak Displ.(mm):	3.0000		50.8000	6%	●
Force(Newton):	5100.6		35585.8	14%	●

Load	
DUT	Default 3.20 kg
JIG	Default 0.00 kg

Fonte: A autora.

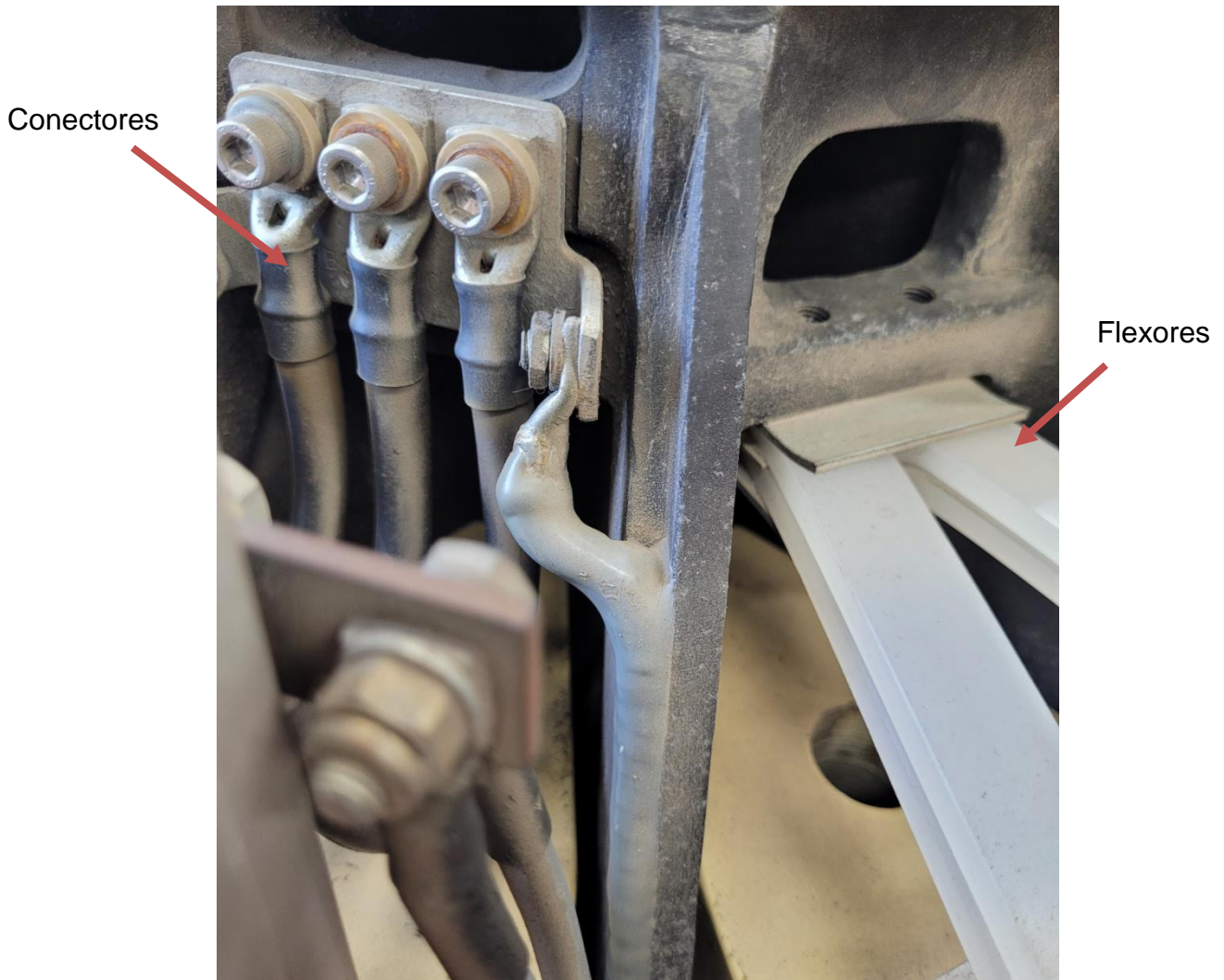
No Quadro 9 os valores de força obtidos na simulação estão comparados com os valores calculados, considerando a aceleração imposta na frequência de 20 Hz. Também é apresentado o erro em relação ao valor calculado, que pode ser atribuído à massa total sofrendo ação da força, que no ensaio real é composta pelas massas da armadura, do dispositivo sob teste, do *base plate*, dos flexores e da massa dos conectores e terminais da armadura. Na Figura 25 pode-se visualizar os conectores e flexores do *shaker* analisado. Além disso, para o caso da frequência f_1 , a magnitude do erro obtido se deve ao deslocamento constante, que não considerado durante a análise em detrimento da aceleração.

Quadro 9 – Erro obtido em relação aos valores F calculados para f_1

Valor calculado [N]	Valor simulado [N]	Erro obtido [%]
575,36	351,64	40,62%

Fonte: A autora.

Figura 25 – Estruturas internas do *shaker*: flexores e conectores da armadura



Fonte: A autora.

4.2 Frequência f_2

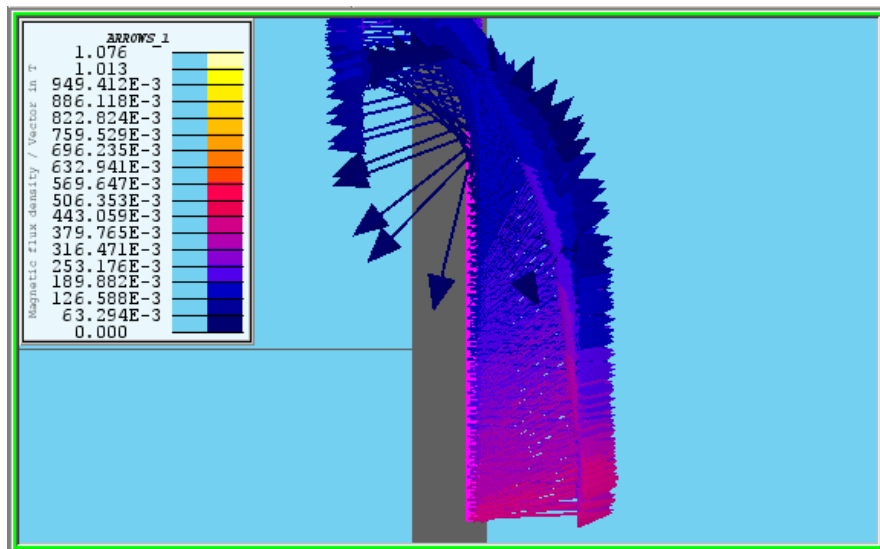
Outro caso analisado se refere aos parâmetros de corrente elétrica, aceleração e força quando o ensaio de vibração atinge a frequência de *cross-over*. A partir dessa frequência a aceleração passa a ser constante no valor máximo, neste caso, de $20g$. Os parâmetros experimentais associados à frequência f_2 são apresentados no Quadro 4, na seção 3.

4.2.1 Densidade de fluxo magnético

A análise conduzida para os parâmetros obtidos na frequência f_2 é semelhante ao caso da frequência inicial de ensaio, f_1 . Os valores colhidos durante o experimento e utilizados para a construção do modelo no *software* de simulação são

apresentados no Quadro 4, na seção 3. As Figuras 26, 27 e 28 apresentam a representação gráfica dos vetores da densidade de fluxo magnético, as linhas de campo que atravessam a armadura e as isossuperfícies da densidade de fluxo, respectivamente. No Quadro 10 é possível obter o valor do erro obtido quando os valores calculados e os valores simulados de B são comparados. A diferença pode ser atribuída às mesmas fontes de imprecisão encontradas no caso da frequência f_1 , que são posteriormente discutidas nesta seção.

Figura 26 – Representação gráfica da intensidade do fluxo magnético para f_2



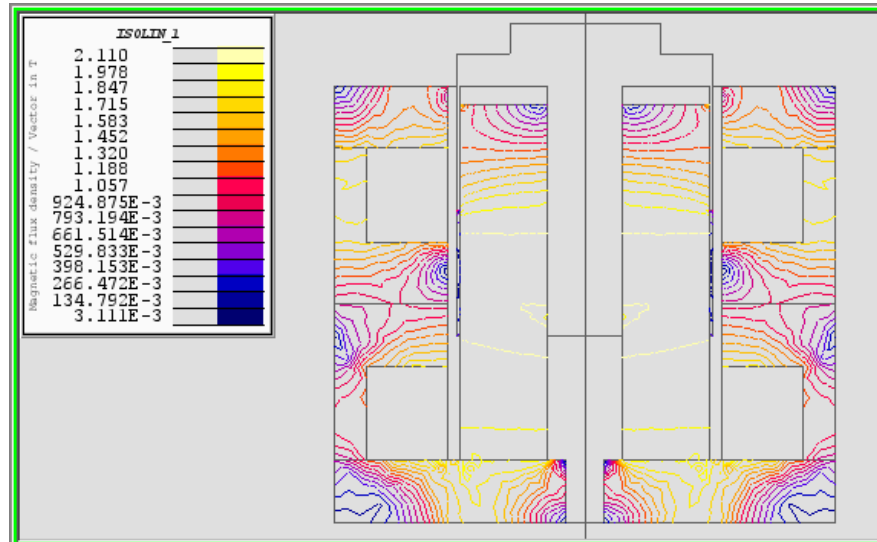
Fonte: A autora.

Quadro 10 – Erro obtido em relação aos valores de B calculados para f_2

Valor calculado [T]	Valor simulado [T]	Erro obtido [%]
1,00	0,913	8,7%

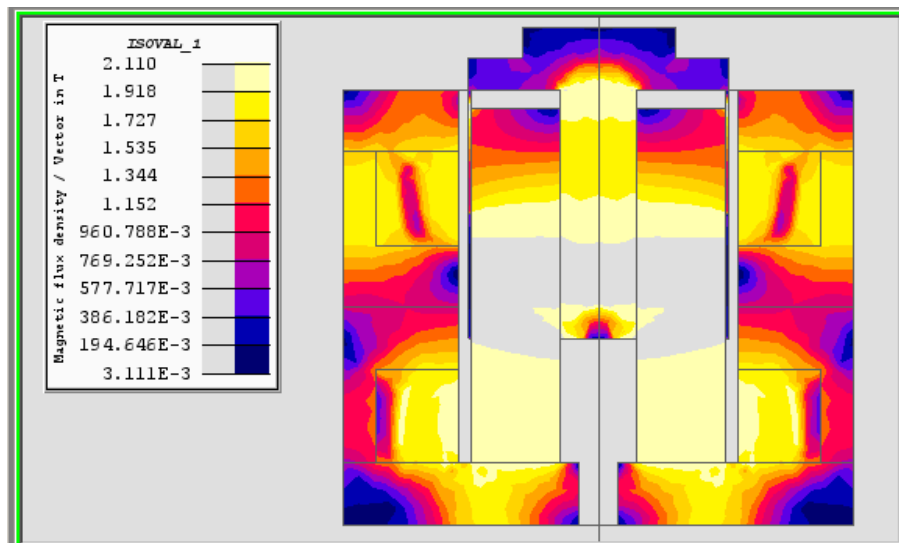
Fonte: A autora.

Figura 27 – Linhas de campo atravessando a armadura para f_2



Fonte: A autora.

Figura 28 – Isossuperfícies da densidade de fluxo magnético para f_2



Fonte: A autora.

4.2.2 Força magnética

Para a força resultante agindo na armadura no caso da frequência de *cross-over* f_2 , 58,1 Hz, obteve-se uma comparação adicional já que havia informação da magnitude da força indicada pelo *software* controlador. No Quadro 11 são apresentados os dados de valores obtidos e erro encontrado, quando o *shaker* impõe vibrações na frequência f_2 ao dispositivo sob teste.

Quadro 11 – Erro obtido em relação aos valores de F calculados para f_2

Valor calculado [N]	Valor simulado [N]	Valor no software controlador [N]	Erro obtido - parâmetro calculado [%]	Erro obtido - parâmetro simulado [%]
5003,1	5425,95	5100,6	1,91	6,38

Fonte: A autora.

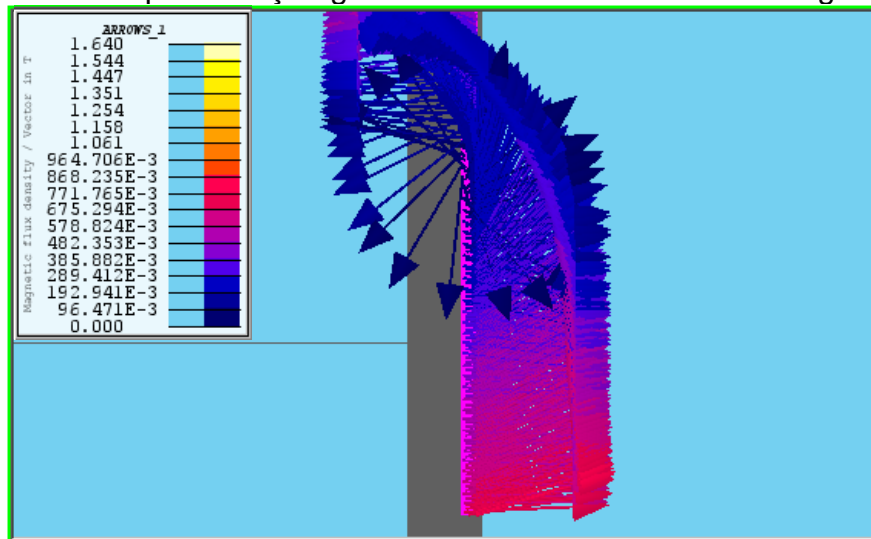
4.3 Frequência f_3

Por fim, analisou-se os parâmetros de corrente elétrica, aceleração e força na frequência mais alta do ensaio, 2000 Hz . Quando o ensaio atinge a frequência máxima, completa-se um ciclo da varredura em frequência e o próximo ciclo inicia-se a partir dessa frequência até a mais baixa. Os parâmetros experimentais associados à frequência f_3 são apresentados no Quadro 4, na seção 3.

4.3.1 Densidade de fluxo magnético

A densidade de fluxo magnético para a frequência f_3 foi calculada utilizando o mesmo método dos casos anteriores. As Figuras 29, 30 e 31 apresentam os gráficos e os valores obtidos na simulação, como representação vetorial, linhas de campo e isossuperfícies. Também pode-se visualizar no Quadro 12 os valores de magnitude de B que atravessam a armadura e o erro obtido entre modelagem matemática e simulação.

Figura 29 – Representação gráfica da intensidade do fluxo magnético f_3

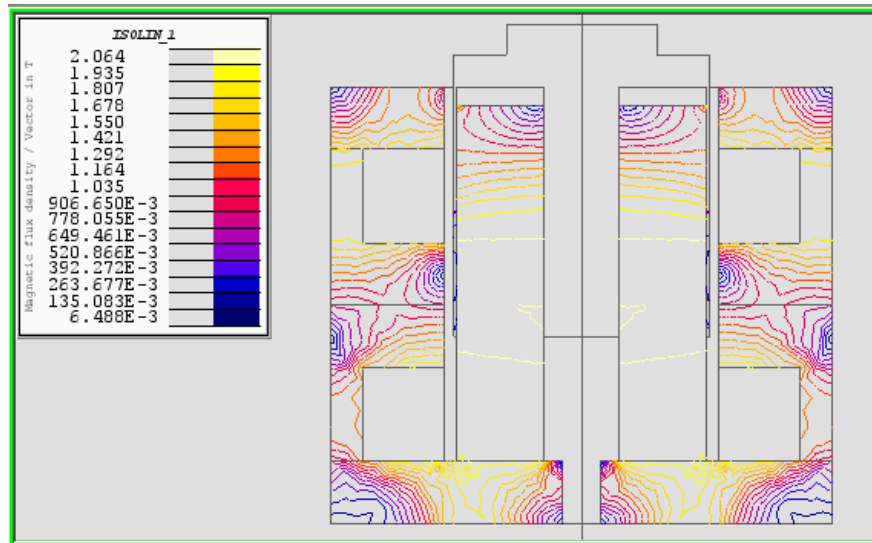


Fonte: A autora.

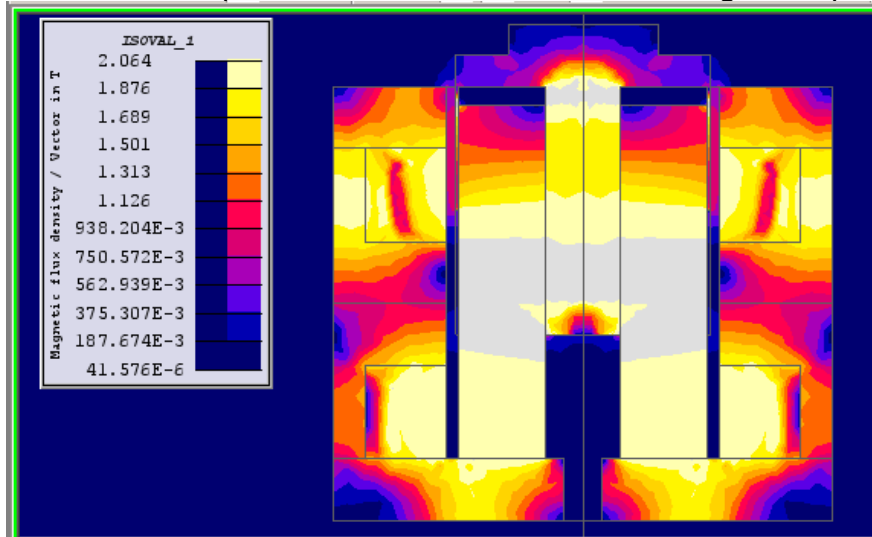
Quadro 12 – Erro obtido em relação aos valores de B calculados para f_3

Valor calculado [T]	Valor simulado [T]	Erro obtido [%]
1,33	0,985	26%

Fonte: A autora.

Figura 30 – Linhas de campo atravessando a armadura para f_3 

Fonte: A autora.

Figura 31 – Isossuperfícies da densidade de fluxo magnético para f_3 

Fonte: A autora.

4.3.2 Força magnética

A força magnética observada em f_3 tem o mesmo valor da força em f_2 pois nos dois casos a aceleração possui o mesmo valor. Essa frequência é a mais alta atingida durante o ensaio, geralmente um ponto de grande interesse para observar ressonâncias no dispositivo testado. O Quadro 13 apresenta os valores calculados e os valores obtidos na simulação, assim como o erro encontrado na comparação entre os dois.

Quadro 13 – Erro obtido em relação aos valores de F calculados para f_3

Valor calculado [N]	Valor simulado [N]	Valor no <i>software</i> controlador [N]	Erro obtido - parâmetro calculado [%]	Erro obtido - parâmetro simulado [%]
5003,1	4898,52	5100,6	1,91	3,96

Fonte: A autora.

4.4 Considerações finais

Analisando a magnitude dos erros encontrados quando os valores calculados foram comparados aos valores da simulação, algumas conclusões podem ser extraídas a respeito dos procedimentos experimentais de modelagem, coleta de dados e de simulação. Esta seção propõe uma discussão acerca dos resultados obtidos na análise.

Primeiramente, o método utilizado para coletar os parâmetros elétricos e construtivos se baseava na observação direta durante a operação do *shaker* com o perfil de vibração escolhido, um ensaio senoidal aplicável a capacitores eletrolíticos de alumínio. Para obter os valores da corrente elétrica, foram coletados os valores de saída do amplificador para cada uma das três frequências, enquanto os valores de aceleração foram extraídos do gráfico de aceleração vs frequência gerado pelo *software* controlador do *shaker*.

O valor apresentado pelo amplificador de potência diz respeito ao valor instantâneo da corrente elétrica fornecida à armadura do *shaker*, não considerando o deslocamento da armadura e, conseqüentemente, o comprimento total do condutor que está submerso no campo magnético produzido pelo circuito de campo. Para o

cálculo da densidade de fluxo magnético utilizando a Equação 1 em conjunto com a Equação 2, esse procedimento experimental pode gerar um erro proporcional a porção do condutor que estava fora do campo magnético. Uma forma de solucionar o problema é realizar a medição de corrente diretamente nos terminais da armadura, o que requer acesso físico à bobina da armadura, inviável quando da realização deste estudo.

Os números de espiras das bobinas de armadura e das bobinas de campo foram estimados com base nos estudos que foram referenciais para a presente análise, e também no *shaker* modelado, até o ponto onde foi possível visualizar a estrutura. As dimensões destes condutores também são prováveis fontes de erro, pois impactaram no resultado da simulação. Esses problemas, bem como o comprimento do caminho magnético percorrido pelo fluxo, também seriam mitigados com o acesso físico ao interior do *shaker*.

Os materiais utilizados na simulação foram escolhidos com a intenção de simplificar a construção do modelo. Para isso se faria necessária uma análise das propriedades $B(H)$ do material ferromagnético próprio para aplicação em um *shaker*, e tal análise não faz parte do escopo deste estudo. As propriedades de resistência e indutância da armadura na simulação também podem ter sido afetadas pela escolha dos materiais, já que fenômenos como o efeito pelicular (especialmente nesta aplicação onde há operação em variadas frequências) e a dependência da temperatura precisam ser consideradas. Como os materiais utilizados são especificados por fabricantes, é provável que não possam ser modelados como exatidão fora do projeto do original, principalmente utilizando-se de um modelo para simulação ao qual o acesso é restrito.

Adicionalmente, o erro obtido comparando a força calculada e a força resultante da simulação pode ser atribuído, principalmente, a rigidez dos flexores encarregados de posicionar a armadura no eixo central do *shaker* e impedir movimentos em outras direções senão a axial. Ainda há os cabos de alimentação da armadura, que se deslocam junto com a parte móvel e podem estar contabilizados no valor de força apresentado pelo *software* controlador.

5 CONCLUSÃO

Durante a realização da análise foi possível observar a estrutura de um *shaker*, bem como mensurar alguns parâmetros durante seu funcionamento *in situ*, como monitoramento da corrente elétrica, medição de aceleração e medição dimensional. Também foi necessário realizar modelagem matemática, aplicando conceitos de eletromagnetismo, considerando algumas características do sistema analisado que não puderam ser acessadas fisicamente ou que fazem parte da especificação do fabricante, como, por exemplo, os materiais e dimensões das estruturas internas. Um passo importante na análise proposta por este trabalho foi a construção de um modelo em software CAD, com os valores extraídos experimentalmente e os valores calculados, onde as grandezas eletromagnéticas foram quantificadas através do método dos elementos finitos.

Por fim, pode-se considerar que o presente estudo foi significativo pois aborda etapas que podem ser aplicadas no projeto de um *shaker* eletrodinâmico. A análise empregada pode ser utilizada para verificar a influência de diferentes materiais utilizados na estrutura e nos condutores, assim como observar como parâmetros como corrente de armadura e corrente de campo podem se relacionar para melhor eficiência. Esses últimos são tópicos que podem ser explorados em trabalhos futuros, juntamente com a simulação e investigação do comportamento dos outros componentes do sistema de ensaios vibração durante a realização de um teste, pois quanto maior a capacidade de um *shaker* (e de todo o sistema) de replicar as circunstâncias impostas por aplicações reais, mais confiáveis serão os produtos testados e maior qualidade poderá ser alcançada ao longo da cadeia produtiva. Acredita-se que um dos passos para contribuir para a melhoria contínua está no entendimento e análise das funções básicas, neste caso propondo uma análise de parâmetros fundamentais para o funcionamento do dispositivo, portanto o objetivo deste trabalho foi alcançado.

6 REFERÊNCIAS

BARROS, Everaldo de. **ANÁLISE DA FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA DE UM VIBRADOR ELETRODINÂMICO**. Faculdade Anhanguera de Taubaté – unidade 1. v5 n5. 2010. P 27-45..

BLOECHL, M.; BATAINEH, M.; HARRELL, D.. Class D Switching Power Amplifiers: theory, design, and performance. **Ieee Southeastcon, 2004. Proceedings**. [S.L.], mar. 2004. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/secon.2004.1287908>.

BRÜEL & KJÆR. **Sound & Vibration Measurement A/S**. VIBRATION TEST SYSTEMS. DK 2850 Nærum · Denmark, 2009

BRÜEL & KJÆR. **Product Data: LDS-V875-240 metric shaker**. Nærum · Denmark. Disponível em: <
<https://www.bksv.com/~media/literature/Product%20Data/bn0542.ashx> >

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 700p. Tradução, Anatólio Laschuk.

FALK, Per. **Test Fixtures for Vibration Testing of Components**. Stockholm: KTH, 2015.

GRIFFITHS, David Jeffrey. **Introduction to Electrodynamics**. 3. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 596 p.

HARRIS, Daniel M.; BUSH, John W.M.. Generating uniaxial vibration with an electrodynamic shaker and external air bearing. **Journal Of Sound And Vibration**, [S.L.], v. 334, p. 255-269, jan. 2015. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2014.09.015>. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X14007457?via%3Dihub>. Acesso em: 15 set. 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60068-23-6. **Environmental testing – Part 2-6: Tests – Test Fc: Vibration (sinusoidal)**. 7. ed. Switzerland: IEC, 2007. 86p.

LAMB, Horace. XIII. On electrical motions in a spherical conductor. **Philosophical Transactions Of The Royal Society Of London**, [S.L.], v. 174, p. 519-549, 31 dez.

1883. The Royal Society. <http://dx.doi.org/10.1098/rstl.1883.0013>. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rstl.1883.0013>. Acesso em: 02 out. 2021.

LANG, George Fox; SNYDER, Dave. Understanding the Physics of Electrodynamic Shaker Performance. **Sound & Vibration - Dynamic Testing reference issue**. Data Physics Corporation, San Jose, California, 2001.

LDS. **Short Forme Catalogue**, Brüel & Kjær and LDS – The Perfect Match, 2009.

MARTINO, Jonathan; HARRI, Kristof. Two-port modeling and simulation of an electrodynamic shaker for virtual shaker testing applications. **Journal Of Sound And Vibration**, [S.L.], v. 460, p. 114835, nov. 2019. Elsevier BV.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2019.07.001>. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X19303815?via%3Dihub>. Acesso em: 16 set. 2021.

MENEGHETI, Thiago. **ANÁLISE DO COMPORTAMENTO VBIRATÓRIO DA MEMBRANA DE UM SHAKER ELETRODINÂMICO**. 2017. 88 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava. 2017.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: <http://www.more.ufsc.br/>. Acesso em: 03/10/2021.

SADIKU, Matthew N. O. **Elementos de eletromagnetismo**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 704 p. Tradução de Jorge Amoretti Lisboa, Liane Ludwig Loder.

SENTEK DYNAMICS. **How to Select a Vibration Testing System**. Santa Clara, 2016. Disponível em: <https://static1.squarespace.com/static/5526e8e7e4b0356ed20c43fe/t/56904b742399a31801604a8b/1452297081937/How+to+Select+a+Vibration+Testing+System.pdf>. Acesso em: 14/11/2021.

TDK Electronics AG 2019. **Aluminum Electrolytic Capacitors**, dez. 2019.

Disponível em: <[https://www.tdk-](https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/20/30/db/aec/B41689_B41789.pdf)

[electronics.tdk.com/inf/20/30/db/aec/B41689_B41789.pdf](https://www.tdk-electronics.tdk.com/inf/20/30/db/aec/B41689_B41789.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2021.

UCHIYAMA, Y.; MUKAI, M.; FUJITA, M.. Robust control of electrodynamic shaker with 2dof control using filter. **Journal Of Sound And Vibration**, [S.L.], v. 326, n. 1-2, p. 75-87, set. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2009.04.024>.

Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X09003502?via%3Dihub>.

Acesso em: 09 out. 2021.

UMANS, Stephen D.. **Máquinas Elétricas: de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre: Amgh, 2014. 708 p. Tradução, Anatólio Laschuk.