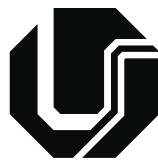


FABRÍCIO NASCIMENTO SFALSIN

**MODELAGEM NUMÉRICA MULTIFÍSICA DE UM
REGENERADOR DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICO
UTILIZANDO O SOFTWARE COMSOL
MULTIPHYSICS®.**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2023

FABRÍCIO NASCIMENTO SFALSIN

**MODELAGEM NUMÉRICA MULTIFÍSICA DE UM
REGENERADOR DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICO
UTILIZANDO O SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS®.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia como parte dos requisitos
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Aeronáutica.

Área de Concentração: Simulações Numéricas
Multifísicas

Orientador: Prof. Dr. Aldemir Aparecido
Cavallini Junior

Uberlândia - MG

2023

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S522 2023	Sfalsin, Fabricio Nascimento, 1997- MODELAGEM NUMÉRICA MULTIFÍSICA DE UM REGENERADOR DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICO UTILIZANDO O SOFTWARE COMSOL MULTIPHYSICS [recurso eletrônico] / Fabricio Nascimento Sfalsin. - 2023. Orientador: Aldemir Aparecido Cavallini Junior. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Aeronáutica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. 1. Aeronáutica. I. Cavallini Junior, Aldemir Aparecido ,1983-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Aeronáutica. III. Título. CDU: 629.7
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

FABRÍCIO NASCIMENTO SFALSIN

**MULTIPHYSICAL NUMERICAL MODELING OF AN
ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTER USING THE
COMSOL MULTIPHYSICS® SOFTWARE.**

Final Paper submitted to the Faculty of Mechanical Engineering from Federal University of Uberlândia in partial fulfillment of the requirements for the degree of Aeronautical Engineer.

Concentration Area: Multiphysics Numerical Simulations

Advisor: Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavallini Junior

Uberlândia - MG

2023

*Dedico esse trabalho ao meu pai, à minha mãe e aos meus irmãos,
pois é graças a vocês que hoje posso concluir meu curso.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me conceder a vida, saúde, força e todos os dons que me foram dados.

Agradeço ao meu pai, Rildo, à minha mãe, Maria da Conceição, e aos meus irmãos, Anderson e Rudiley, por todo amor, carinho e apoio que me deram durante toda a minha caminhada. Obrigado por sempre estarem ao meu lado e serem tão presentes em todas as minhas conquistas e dificuldades.

Agradeço a todos os meus professores por terem participado ativamente da minha formação acadêmica e pessoal. Obrigado pela dedicação, conhecimentos e experiências compartilhadas.

Agradeço a todas as pessoas do Laboratório de Mecânica de Estruturas que me acolheram como aluno de iniciação científica por mais de dois anos. Obrigado pelas experiências, projetos desenvolvidos e oportunidades que eu tive graças aos trabalhos de excelência realizados nesse laboratório. Agradeço em especial ao meu orientador, professor Aldemir, pelo apoio, dedicação e por acreditar no meu trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer a todos os meus amigos por estarem sempre presentes e pelos momentos incríveis que vivenciamos juntos e a cada pessoa que de alguma forma esteve presente na minha vida e fez parte da minha formação.

*“As invenções são, sobretudo,
o resultado de um trabalho de teimoso.”
(Santos Dumont)*

RESUMO

SFALSIN, F. N. **Modelagem Numérica Multifísica de um Regenerador de Energia Eletromagnético Utilizando o Software COMSOL Multiphysics®**. 2023. 64 p. Projeto de Conclusão de Curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2023.

O ramo de pesquisa dedicado a tornar os sistemas elétricos energeticamente mais autônomos é constantemente agraciado com novas tecnologias. Os requisitos de projetos cada vez mais específicos aliados as atualizações nas políticas ambientais são grandes propulsores para o surgimento de inovações nessa área. Duas das apostas desse segmento é o aumento da capacidade energética de baterias e a redução do consumo de energia dos hardwares. Contudo, sistemas alimentados apenas com baterias possuem seu tempo de operação limitado, fazendo-se necessário recargas e trocas periódicas. Nesse contexto, os energy harvesters são dispositivos capazes de coletar diferentes tipos de energia disponível no meio ambiente e transformá-las em energia elétrica para alimentar sistemas eletrônicos. Vários modelos com princípios de funcionamento diferentes foram propostos na literatura. Para esse trabalho serão abordados os regeneradores de energia eletromagnéticos. Esses dispositivos captam a energia proveniente de vibrações mecânicas através de um ímã móvel que realiza um movimento oscilatório em frente a uma bobina de cobre. O movimento do ímã causa a variação da densidade do fluxo magnético que atravessa a bobina, induzindo sobre ela uma força eletromotriz. Devido ao seu princípio de funcionamento, estes dispositivos podem ser construídos com baixo volume, permitindo que possam ser aplicados em pequenos sistemas elétricos. No entanto, para viabilizar a construção e aplicação desses modelos é necessário maximizar sua capacidade de conversão energética. Nesse sentido, as simulações numéricas multifísicas são utilizadas para solucionar problemas que envolvem diferentes fenômenos físicos, obtendo resultados mais estáveis e assertivos para os modelos simulados. Nesse trabalho é proposto uma metodologia de simulação numérica multifísica para um modelo simplificado de um regenerador de energia eletromagnético utilizando o software de simulação COMSOL Multiphysics®. Através dessas simulações foram obtidos resultados qualitativos animadores e que asseguram o potencial e escalabilidade dessa metodologia.

Palavras-chave: Energy Harvesters, Eletromagnetismo, Baixo Consumo, Simulações, Multifísico.

ABSTRACT

SFALSIN, F. N. **MULTIPHYSICAL NUMERICAL MODELING OF AN ELECTROMAGNETIC ENERGY HARVESTER USING THE COMSOL MULTIPHYSICS® SOFTWARE..** 2023. 64 p. Projeto de Conclusão de Curso (Bacharelado - Engenharia Aeronáutica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2023.

The field of research dedicated to making electrical systems more energy autonomous is constantly being graced with new technologies. Increasingly specific project requirements combined with environmental policy updates are major drivers for the emergence of new innovations in this area. Two of the bets in this segment are to increase the energy capacity of batteries and reduce the power consumption of hardware. However, systems powered only by batteries have a limited operating time, requiring periodic recharging and replacement. In this context, energy harvesters are devices capable of collecting different types of energy available in the environment and transforming them into electrical energy to power electronic systems. Several models with different operating principles have been proposed in the literature. For this work we will discuss electromagnetic energy harvesters. These devices capture the energy from mechanical vibrations through a moving magnet that performs an oscillatory movement in front of a copper coil. The movement of the magnet causes the magnetic flux density that passes through the coil to vary, inducing an electromotive force upon it. Due to their working principle, these devices can be built with low volume, allowing them to be applied to small electrical systems. However, to enable the construction and application of these models, it is necessary to maximize their energy conversion capacity. In this scenario, multiphysics numerical simulations are used to solve problems involving different physical phenomena, obtaining more stable and assertive results for the simulated models. In this work, a multiphysics numerical simulation methodology is proposed for a simplified model of an electromagnetic energy harvester using COMSOL Multiphysics® simulation software. Through these simulations, encouraging qualitative results have been obtained that ensure the potential and scalability of this methodology.

Keywords: Energy Harvester, Electromagnetic, Low Consumption, Simulations, Multiphysics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de um SEEA com a utilização de um <i>energy harvester</i>	25
Figura 2 – Foto e esquema do <i>energy harvester</i>	27
Figura 3 – Esquema e imagem do protótipo <i>energy harvester</i>	28
Figura 4 – Diagrama de um sistema massa, mola e amortecedor de um grau de liberdade com excitação harmônica externa.	29
Figura 5 – Protótipo utilizado no experimento realizado no LMEst.	34
Figura 6 – Geometria do ímã construído no COMSOL Multiphysics®.	34
Figura 7 – Geometria da bobina construída no COMSOL Multiphysics®.	35
Figura 8 – Dimensões da bobina.	35
Figura 9 – Disposição espacial dos elementos do modelo.	36
Figura 10 – Interface da ferramenta <i>deformed geometry</i>	37
Figura 11 – Domínios deformáveis e móveis da modelagem 1.	37
Figura 12 – Interface <i>magnetic fields</i>	38
Figura 13 – Configurações das características eletromagnéticas do ímã.	39
Figura 14 – Configurações dos parâmetros da bobina.	40
Figura 15 – Superfície configurada como entrada da bobina. A seta vermelha mostra o sentido adotado para a corrente na bobina.	41
Figura 16 – Diagrama do circuito elétrico.	42
Figura 17 – Interface <i>electrical circuits</i>	43
Figura 18 – Configurações do nó <i>External U vs. I 1</i>	43
Figura 19 – Interface <i>multibody dynamics</i>	44
Figura 20 – Janela de configuração do sub-nó <i>prescribed displacement at center of rotation</i> para o ímã.	44
Figura 21 – Janela de configuração do sub-nó <i>prescribed displacement at center of rotation</i> para a bobina.	45
Figura 22 – Malha da bobina gerada pela interface <i>mesh</i>	45
Figura 23 – Geometria parametrizada do modelo 2.	46
Figura 24 – Disposição dos componentes de modelo 2.	47
Figura 25 – Domínios deformáveis e móveis da modelagem 2.	48
Figura 26 – Isolamento eletromagnético representado pelas superfícies azuis.	49
Figura 27 – Geometria convencional com linhas do campo magnético deformadas.	49
Figura 28 – Geometria com domínios de elementos infinitos.	50
Figura 29 – Geometria final da modelagem 2.	50

Figura 30 – Interface <i>multibody dynamics</i> da modelagem 2.	51
Figura 31 – Janela de configuração do sub-nó <i>prescribed displacement at center of rotation</i> para o ímã do modelo 2.	52
Figura 32 – Janela de configuração do sub-nó <i>prescribed displacement at center of rotation</i> para o movimento da base móvel e da bobina do modelo 2.	53
Figura 33 – Refinamento da malha nas regiões próximas à bobina e ao ímã.	54
Figura 34 – Malha final do modelo 2.	54
Figura 35 – Resultado do processamento da geometria da bobina.	55
Figura 36 – Simulação dependente do tempo. Nós que compõem o solver.	56
Figura 37 – Simulação dependente do tempo.	56
Figura 38 – Tensão obtida no protótipo reproduzida no <i>display</i> do osciloscópio.	57
Figura 39 – Tensão obtida na bobina através da simulação realizada.	58
Figura 40 – Deslocamento do ímã representado pela curva azul e deslocamento relativo entre o ímã e a bobina representado pela curva verde.	59
Figura 41 – Tensão obtida na bobina e na carga resistiva.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades configuradas do NdFeB N50.	38
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EDO	equações diferenciais ordinárias
EDP	equações diferenciais parciais
LMEst	Laboratório de Mecânica de Estruturas
PetG	polietileno tereftalato glicol
SEEAs	sistemas elétricos energeticamente autônomos
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Sistemas Elétricos Energeticamente Autônomos	25
2.2	Energy Harvesters	26
2.2.1	<i>Regeneradores de Energia Eletromagnéticos por Vibração</i>	26
2.3	Sistemas Dinâmicos de 1 Grau de Liberdade	29
2.4	Simulações Multifísicas	32
3	METODOLOGIA	33
3.1	Primeira Modelagem	33
3.1.1	Geometria	34
3.1.1.1	<i>Geometria Deformável</i>	36
3.1.2	Materiais	37
3.1.3	Fenômenos Eletromagnéticos	38
3.1.3.1	<i>Ampère's Law 1</i>	38
3.1.3.2	<i>Magnetic Insulation 1</i>	39
3.1.3.3	<i>Initial Values 1</i>	39
3.1.3.4	<i>Ampère's Law - Manget</i>	39
3.1.3.5	<i>Coil 1</i>	40
3.1.3.6	<i>Gauge Fixing for A-field 1</i>	41
3.1.3.7	<i>Force Calculation 1</i>	41
3.1.4	Fenômenos Elétricos	42
3.1.5	Fenômenos Dinâmicos	43
3.1.5.1	<i>Rigid Domain 1</i>	44
3.1.5.2	<i>Rigid Domain 2</i>	44
3.1.6	Malhas	45
3.2	Segunda Modelagem	46
3.2.1	Geometrias	46
3.2.1.1	<i>Geometrias Deformáveis</i>	47
3.2.1.2	<i>Domínios de Elementos Infinitos</i>	48
3.2.2	Fenômenos Dinâmicos	51
3.2.2.1	<i>Rigid Domain 1</i>	51

3.2.2.2	<i>Rigid Domain 2</i>	52
3.2.3	<i>Malhas</i>	53
3.3	Configuração das Soluções	55
3.3.1	<i>Análise da Geometria da Bobina</i>	55
3.3.2	<i>Simulação Dependente do Tempo</i>	55
4	RESULTADOS	57
4.1	Primeira Modelagem	57
4.2	Segunda Modelagem	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS		63

INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se que grande parte das inovações tecnológicas são resultado de requisitos de projeto cada vez mais específicos, aliados às atualizações nas políticas ambientais de consumo energético e de emissão de poluentes. A concorrência entre grandes empresas e a necessidade de atender um mercado consumidor cada vez mais exigente também contribuem para o surgimento de novas soluções. Como exemplo do benefício desse tipo de concorrência, pode-se citar a corrida espacial, que foi uma competição entre os Estados Unidos e a União Soviética durante a Guerra Fria, que resultou, além das conquistas espaciais, no surgimento de tecnologias inovadoras que ainda fazem parte dos dias atuais.

Dentre as diversas áreas de pesquisa que constantemente são agraciadas com novas tecnologias, pode-se citar o ramo dedicado a tornar os sistemas elétricos energeticamente mais autônomos. A necessidade dessa demanda é notada, por exemplo, em aparelhos celulares. Estes dispositivos possuem pouco espaço para alocação da bateria e precisam ter boa autonomia energética, independe dos constantes avanços de software e hardware, que aumentam seu consumo. Outro exemplo são os marca-passos, dispositivos médicos implantados em pacientes para regular os batimentos cardíacos. Esses dispositivos precisam ter baixo consumo de energia e serem pequenos (para não causar desconforto e ser minimamente invasivo).

Nesse sentido, um dos grandes desafios enfrentados por esse seguimento de pesquisa é a maximização da capacidade energética de baterias. Contudo, sistemas autônomos alimentados com pilhas e/ou baterias têm seu tempo de operação limitado, fazendo-se necessário recargas ou trocas periódicas. A partir disso, insere-se o conceito de regeneradores de energia, os *energy harvesters*.

Os *energy harvesters* são dispositivos capazes de coletar e converter diferentes tipos de energia disponíveis no meio ambiente em energia elétrica. Esses dispositivos podem ser combinados com baterias e pilhas ou usados como fonte única de sistemas autônomos, dependendo da sua capacidade energética e do consumo desses sistemas. Os painéis de geração fotovoltaica e as

turbinas eólicas são exemplos de *energy harvesters*, em que o primeiro coleta a energia solar e o segundo coleta a energia cinética proveniente de correntes de ar, transformando-as em energia elétrica.

Em sistemas de tamanho reduzido com baixo consumo energético, como módulos sensores e dispositivos portáteis, são comumente aplicados os regenerados de energia eletromagnéticos. Esses dispositivos captam energia proveniente de vibrações mecânicas e as transformam em energia elétrica através do princípio da indução eletromagnética, descrita pela Lei de Faraday. Os princípios físicos que regem os *energy harvesters* eletromagnéticos permitem que, mesmo com tamanho reduzido, estes sejam capazes de captar e converter energia suficiente para alimentar dispositivos de baixo consumo. Segundo Beker, Özgüven e Külah (2013), o consumo típico de sensores autônomos está na faixa de μW e mW .

Contudo, a aplicação dos *energy harvesters* eletromagnéticos em sistemas de tamanho reduzido trás consigo a necessidade de maximizar a capacidade energética desses regeneradores. Alguns fatores são essenciais para determinar a capacidade de entrega de energia elétrica desses dispositivos, sendo esses determinados por diferentes fenômenos físicos, como apresentado no capítulo 2. Devido a isso, as simulações multifísicas se mostram como uma importante ferramenta para obter resultados mais aproximados para regeneradores de energia eletromagnéticos.

As simulações multifísicas são aplicadas com o objetivo de solucionar problemas acoplados, aqueles que possuem interação entre diferentes fenômenos físicos, obtendo maior precisão e robustez nos resultados. Atualmente, alguns softwares de simulação, como o COMSOL Multiphysics®, são desenvolvidos propriamente para solução de problemas acoplados, tornando-os menos sujeitos às limitações computacionais.

Portanto, o objetivo desse trabalho é propor um método de simulação multifísica utilizando o software COMSOL Multiphysics® capaz de acoplar os principais princípios físicos (mecânicos, magnéticos e elétricos) que regem o funcionamento de regeneradores de energia eletromagnéticos. Dessa forma, outras propostas de pesquisa poderão se beneficiar dessa ferramenta para obter resultados cada vez mais precisos para seus projetos.

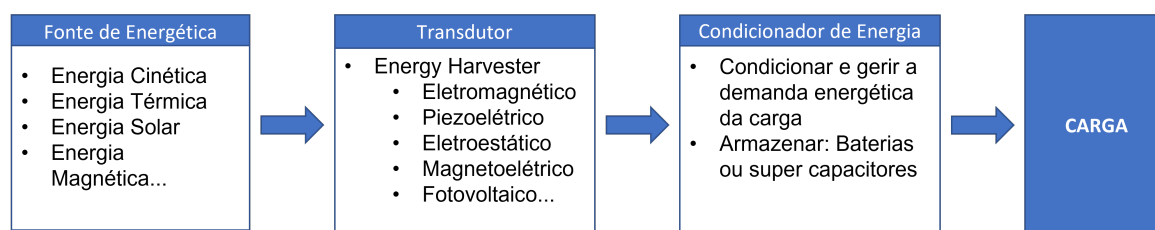
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Sistemas Elétricos Energeticamente Autônomos

De acordo com [Belleville et al. \(2009\)](#), os sistemas elétricos energeticamente autônomos (SEEA) são sistemas que operam sem estar conectados fisicamente a uma rede de energia externa. A alimentação elétrica é feita através de baterias, pilhas ou geradores internos. Contudo, como discutido na introdução desse trabalho, a alimentação feita apenas com baterias e/ou pilhas limita o tempo de operação dos sistemas, sendo necessário recargas ou trocas periódicas. Como artifício para tornar estes sistemas ainda mais autônomos são utilizados os regeneradores de energia, *energy harvesters*, que serão discutidos na seção 2.2 desse capítulo.

O sistema proposto por [Santos \(2015\)](#) apresenta os quatro componentes necessários para a construção de um sistema energeticamente autônomo utilizando um *energy harvester*. Esses componentes estão apresentados abaixo na figura 1.

Figura 1 – Diagrama de um SEEA com a utilização de um *energy harvester*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O primeiro componente, a fonte de energia, é definida como toda a energia disponível no ambiente (mecânica, térmica, magnética, solar, entre outras). O segundo trata-se do dispositivo transdutor, o *energy harvester*, que coleta e transforma os tipos de energia supracitadas em energia elétrica. Em seguida, faz-se necessário um circuito eletrônico capaz de condicionar o

signal de energia elétrica gerada pelo transdutor e armazená-la em baterias ou super capacitores, para que possa ser entregue ao último componente, a carga elétrica.

2.2 Energy Harvesters

Os *energy harvester* (coletores de energia ou regeneradores de energia) são dispositivos capazes de coletar e converter diferentes fontes de energia disponíveis no meio ambiente em energia elétrica. O desenvolvimento de sistemas utilizando essa tecnologia se mostra bastante promissor devido à alta densidade e disponibilidade de energia no meio, sendo essas características potencialmente infinitas, assegurando a autonomia do sistema.

Atualmente vários *energy harvesters* têm sido propostos na literatura com diferentes modelos e aplicações. Nesse trabalho a proposta será dedicada apenas aos regeneradores de energia por vibração. Logo, dentre as fontes de energia ambientais existentes (mecânica, térmica, magnética, solar, entre outras), será abordada apenas a energia mecânica cinética. O desempenho desses conversores por vibração depende não apenas das características da fonte externa de excitação, como frequência e amplitude, mas também dos princípios físicos adotados em sua construção.

Dessa forma, dentre os *energy harvesters* por vibração mais aplicados atualmente, podem-se citar os piezoelétricos, eletroestáticos, magnetoelétricos e eletromagnéticos. Visando potencializar a contribuição científica desse trabalho, será considerado para este estudo o regenerador de energia eletromagnético, devido à variedade de propostas existentes na literatura para esse princípio (BOUENDEU, 2010).

2.2.1 Regeneradores de Energia Eletromagnéticos por Vibração

Em 1831 o físico e químico britânico Michael Faraday descobriu que a variação no fluxo de um campo magnético através de materiais condutores induz o surgimento de uma corrente elétrica. Essa descoberta é amplamente conhecida como a Lei de Faraday e é descrita pela equação 2.1:

$$F_{em} = -\frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

na qual nota-se que a força eletromotriz induzida, F_{em} , é diretamente proporcional à variação do fluxo magnético em função do tempo, $\frac{d\phi}{dt}$.

Baseado na Lei de Faraday, os regeneradores de energia eletromagnéticos convertem energia cinética em energia elétrica utilizando o movimento relativo entre ímãs permanentes e bobinas. O movimento relativo entre os ímãs e as bobinas causa a variação da densidade

do fluxo magnético que atravessa a bobina, induzindo uma tensão elétrica. Para conversores eletromagnéticos, a força eletromotriz gerada é dada pela equação 2.2:

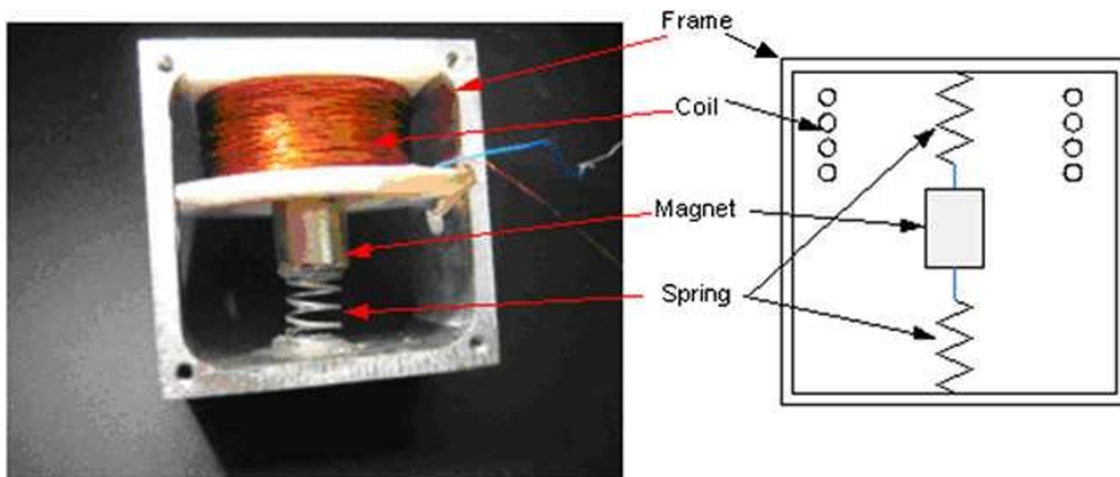
$$F_{em} = N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

na qual pode-se observar que a F_{em} é diretamente proporcional à quantidade de enrolamentos na bobina, N , e à variação do fluxo magnético que atravessa cada bobina em função do tempo, $\frac{d\phi}{dt}$.

Dentre os conversores eletromagnéticos por vibração existentes, pode-se citar os baseados em viga *cantilever* e à base de molas mecânicas ou magnéticas. Nesse trabalho será considerado o conversor de vibração a base de molas mecânicas. Esses conversores consistem em sistemas massa e mola, no qual o ímã é a massa do sistema.

Cheng, Wang e Arnold (2007) propuseram um modelo em que um ímã cilíndrico com 13mm de diâmetro e 19mm de comprimento é fixado à carcaça do modelo por duas molas e realiza um movimento linear de um grau de liberdade através do interior de uma bobina cilíndrica de 400 voltas, como pode-se observar na figura 2. Esse modelo, para um frequência de excitação de 68Hz, foi capaz de gerar uma potência de saída de 12,5mW. Os resultados obtidos por Cheng, Wang e Arnold (2007) comprovam a capacidade de conversão de energia dos *energy harvesters* eletromagnéticos.

Figura 2 – Foto e esquema do *energy harvester*.



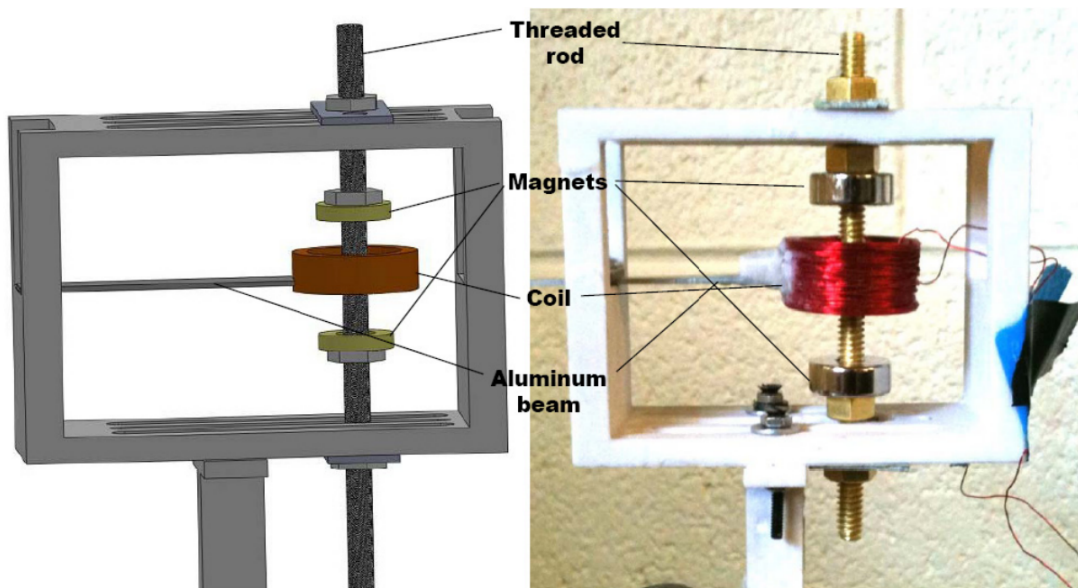
Fonte: Cheng, Wang e Arnold (2007).

O desempenho dos *energy harvesters* eletromagnéticos pode ser otimizado considerando diversos fatores. Dentre eles, três se destacam, como relatado por Challa, Cheng e Arnold (2012). Primeiramente, o coeficiente de transdução do conversor de energia está diretamente associado à densidade do fluxo magnético na bobina (CHALLA; CHENG; ARNOLD, 2012). Em segundo lugar, fatores mecânicos, como o coeficiente de amortecimento mecânico e o coeficiente de

rigidez das molas, e por fim a impedância da carga alimentada pelo conversor eletromagnético, (CHALLA; CHENG; ARNOLD, 2012).

No modelo proposto por Challa, Cheng e Arnold (2012), apresentado na figura 3, é possível ajustar o gap existente entre os dois ímãs utilizados, mantendo-os equidistante da bobina, de forma a alterar a força de acoplamento do sistema. Foram realizados 7 experimentos com diferentes configurações, os quais possibilitaram observar o aumento do acoplamento eletrodinâmico efetivo de 0.53 para 0.92 e da eficiência da conversão mecânica para elétrica de 21% para 45.3% (CHALLA; CHENG; ARNOLD, 2012). Como consequência, a potência de saída do sistema aumentou de 0.64 para 1.06mW.

Figura 3 – Esquema e imagem do protótipo *energy harvester*.



Fonte: Challa, Cheng e Arnold (2012).

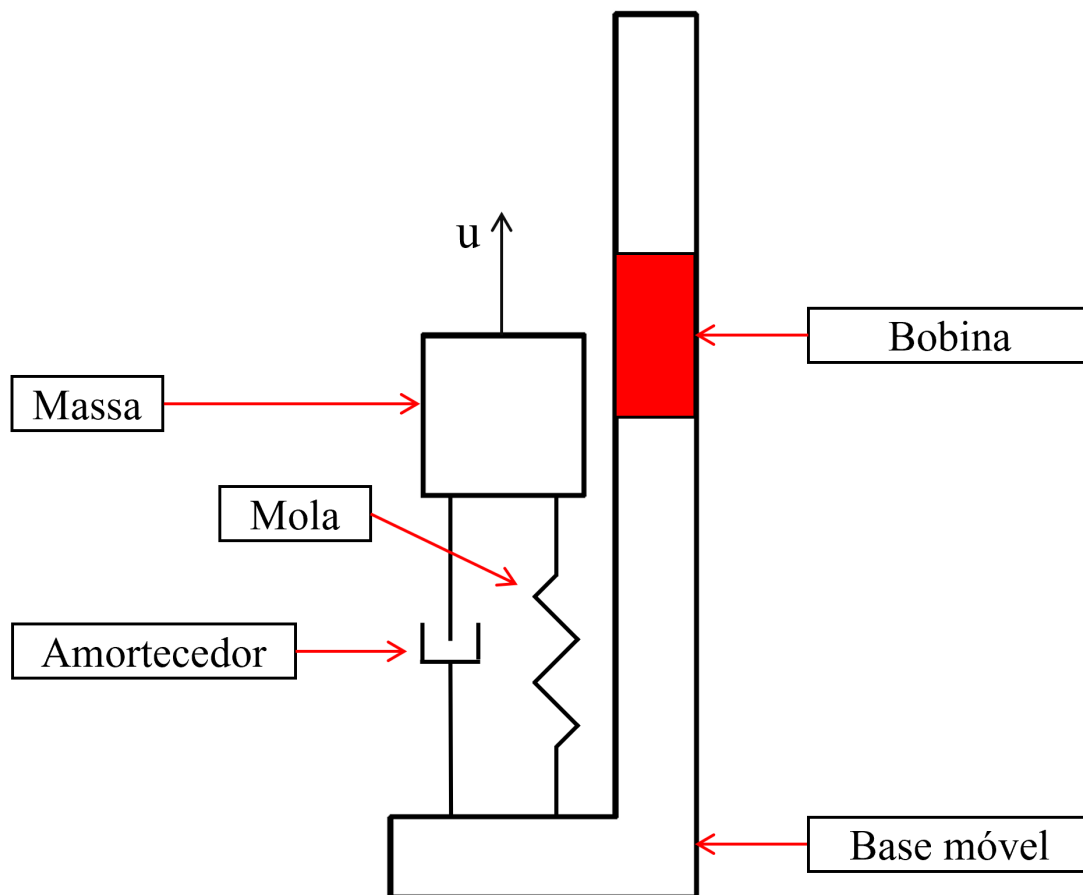
Nesse sentido, todos os princípios físicos, naturalmente, são acoplados e têm influência direta nos resultados obtidos no sistema. Como exemplo, a corrente induzida na bobina é devida às características magnéticas e dinâmicas (posição e velocidade relativa) do ímã. Porém, a posição e velocidade do ímã são influenciadas pelo acoplamento eletromagnético com a bobina, que atua exercendo uma força de amortecimento magnética, influenciando também na corrente induzida.

Dessa forma, é possível observar como a interação entre vários princípios físicos (mecânico, elétrico, magnético, térmico, entre outros) é importante para a maximização da produção energética de um regenerador de energia eletromagnético. Esses fatores são ainda mais importantes quando contextualizados às aplicações desses sistemas, em dispositivos de baixo volume, com limitações de consumo e autonomia.

2.3 Sistemas Dinâmicos de 1 Grau de Liberdade

Nessa seção serão abordados os conceitos dinâmicos que descrevem o movimento da estrutura e do ímã do conversor proposto quando sujeito às excitações externas. Um esquema ilustrativo do sistema está apresentado na figura 4.

Figura 4 – Diagrama de um sistema massa, mola e amortecedor de um grau de liberdade com excitação harmônica externa.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 4 é possível observar a massa, representando o ímã, que está acoplada a uma mola mecânica e a um amortecedor viscoso fixados na base móvel. A base móvel representa a carcaça do conversor eletromagnético que descreve um movimento harmônico, definido pela equação 2.3. O movimento da base é transferido através da mola e do amortecedor para o ímã, resultando na velocidade relativa entre estes. Por estar engastada na base móvel, a bobina descreve o mesmo movimento harmônico $z(t)$.

$$z(t) = A \sin \omega t \quad (2.3)$$

Na equação 2.3, $z(t)$ representa o movimento descrito pela base móvel em função do

tempo t , A representa a amplitude do movimento e ω a frequência do movimento em rad/s . A variável ω pode ser convertida em hertz (Hz), como apresentado abaixo na Equação 2.4:

$$f = \frac{1}{2\pi} \omega = \frac{1}{T} \quad (2.4)$$

na qual T representa o período de vibração, o tempo necessário para realizar um ciclo completo do movimento.

O sistema apresentado acima, Figura 4, trata-se de um sistema dinâmico de um grau de liberdade, ou seja, é necessária apenas uma coordenada cinemática independente para descrever seu movimento em qualquer instante de tempo. Nesse contexto, aplicam-se algumas ferramentas da mecânica analítica para sistemas de um grau de liberdade para determinar a equação que descreve o movimento do ímã em função do tempo.

Para isso são utilizadas as equações de Lagrange por intermédio do princípio de Hamilton Estendido. A modelagem Lagrangeana, quando comparada a outras modelagens, se mostra menos complexa por fazer a distinção entre forças conservativas e as forças não conservativas, que são as responsáveis por atuar efetivamente sobre a dinâmica do corpo (SANTOS, 2018).

Essas equações são formuladas em termos de coordenadas generalizadas, q_j , e de suas derivadas temporais $\dot{q}_j$. A quantidade de coordenadas generalizadas de um sistema é igual a quantidade de graus de liberdade do mesmo. A Equação de Lagrange é determinada conforme a equação 2.5:

$$L = T - v \quad (2.5)$$

na qual, T representa o somatório das energias cinéticas do sistema e v representa o somatório das energias potenciais, sendo consideradas apenas as energias conservativas para ambos os casos.

Dessa forma, faz-se necessário determinar as energias cinéticas e potências presentes no sistema. Vale ressaltar que a energia cinética referente ao amortecedor trata-se de uma energia não conservativa. Nesse modelo, a energia potência presente é devido unicamente à deformação da mola, conforme a equação 2.7, e a energia cinética conservativa é devida à velocidade do ímã, conforme a equação 2.6:

$$T = \frac{M\dot{u}^2}{2} \quad (2.6)$$

$$v = \frac{K}{2}(u-z)^2 = \frac{K}{2}u^2 - Kuz + \frac{K}{2}z^2 \quad (2.7)$$

nas quais, M representa a massa do ímã, $\dot{u}$ a derivada temporal do deslocamento do ímã (velocidade), K a constante de rigidez elástica da mola, u o deslocamento do ímã e z o deslocamento da base móvel do modelo, descrito pela equação 2.3.

Após determinadas, as equações 2.6 e 2.7 são substituídas na equação de Lagrange, 2.5, resultando na equação 2.8:

$$L = \frac{M}{2}\dot{u}^2 - \frac{K}{2}u^2 + Kuz - \frac{K}{2}z^2 \quad (2.8)$$

Em seguida, são calculados os esforços generalizados, aqueles provenientes de forças não conservativas, como as forças de amortecimento e as forças externas. Os esforços generalizados são definidos pela Equação 2.9:

$$\delta W_{nc} = Q_u \delta u = -c(\dot{u} - \dot{z})\delta u \quad (2.9)$$

na qual δW_{nc} representa o trabalho virtual das forças não conservativas, Q_u as forças não conservativas na coordenada generalizada q_u , c o coeficiente de amortecimento do amortecedor e $\dot{z}$ a velocidade de deslocamento da base móvel do sistema.

Utilizando a equação de Euler-Lagrange, 2.10, obtêm-se as equação de movimento do ímã. Em Santos (2018) são descritos os passos necessários para obter a equação de Euler-Lagrange utilizando deslocamentos virtuais e o princípio de D'Alembert.

$$\frac{\partial L}{\partial u} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{u}}\right) = Q_u \quad (2.10)$$

Ao substituir as equações 2.8 e 2.9 em 2.10 e solucionar as equações diferenciais ordinárias (EDO), obtêm-se a equação que descreve o movimento do ímã, como apresentado abaixo na equação 2.11:

$$u = z + \frac{c}{K}(\dot{z} - \dot{u}) - \frac{M}{K}\ddot{u} \quad (2.11)$$

Por fim, substitui-se a equação 2.3 em 2.11, obtendo a equação 2.12, que descreve o deslocamento, u , do ímã.

$$u = A \sin \omega t + \frac{c}{K}(A \cos \omega t - \dot{u}) - \frac{M}{K}\ddot{u} \quad (2.12)$$

Observa-se que na equação 2.12 o deslocamento do ímã está em função apenas do tempo t e de suas derivadas temporais, $\dot{u}$ e $\ddot{u}$.

2.4 Simulações Multifísicas

As simulações multifísicas são utilizadas na resolução de sistemas de equações diferenciais parciais (EDP) que representam problemas acoplados, envolvendo diferentes fenômenos físicos (KEYES *et al.*, 2013). Segundo Keyes *et al.* (2013), a resolução de problemas acoplados utilizando simulações multifísicas possui menos limitações quanto a estabilidade, precisão e robustez dos resultados, quando comparados às abordagens que não assumem o acoplamento entre os meios físicos.

Como apresentado na subseção 2.2.1 desse capítulo, o desempenho dos conversores de energia eletromagnéticos está diretamente associado ao acoplamento eletromecânico do regenerador (CHALLA; CHENG; ARNOLD, 2012). Nesse sistema nota-se a influência, predominantemente, dos princípios físicos mecânico, magnético e elétrico.

Nesse contexto, é possível observar como regeneradores de energia eletromagnéticos são sensíveis às mudanças dos seus parâmetros construtivos e como os princípios que regem seu funcionamento são acoplados e dependentes, tornando-os modelos ideais para aplicação de simulações multifísicas.

Além disso, a maior proximidade dos resultados obtidos em simulações multifísicas é um fator de grande importância para as aplicações dos *energy harvesters*, os quais são instalados em sistemas de volume reduzido, fazendo-se necessário maximizar a eficiência energética do sistema. Para isso, foi utilizado o software de simulação numérica COMSOL Multiphysics® para simular o regenerador eletromagnético proposto nesse trabalho.

METODOLOGIA

Para este estudo foi utilizado o software COMSOL Multiphysics®. Esse software trata-se de uma ferramenta de simulações numéricas multifísicas que permite acoplar de forma fácil e otimizada vários fenômenos físicos, conferindo maior precisão e acurácia às análises de sistemas complexos, como os *energy harvesters*. Essa plataforma contempla todas as etapas necessárias para a modelagem, desde a construção das geometrias ao pós-processamento dos resultados obtidos das simulações multifísicas. Nesse trabalho, a metodologia divide-se em duas etapas.

Primeiramente, foi feita a construção de um modelo multifísico simplificado, a fim de validar qualitativamente os resultados obtidos no software com resultados obtidos em um experimento feito no Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Em seguida, foi feita uma simulação mais completa, com geometria mais complexa e excitação pela base do sistema, de forma a comprovar o potencial dessa metodologia para a aplicação apresentada nesse trabalho.

3.1 Primeira Modelagem

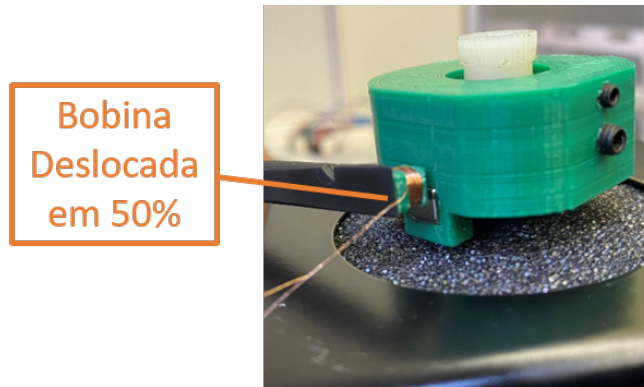
A primeira modelagem trata-se de um protótipo simplificado composto por uma bobina e um ímã. O experimento realizado no LMEst, apresentado na figura 5, foi feito com o auxílio de um excitador eletrodinâmico de bancada, o qual foi configurado para desenvolver um movimento harmônico axial de 2.5mm de amplitude com frequência de 60Hz , conforme a equação 3.1.

$$u(t) = 2.5 \sin(2\pi \times 60 \times t)[\text{mm}] \quad (3.1)$$

Em uma estrutura de polietileno tereftalato glicol (PetG), acoplada ao excitador, foi engastado um ímã cúbico de 5mm de lado. A bobina foi instalada com o auxílio de uma haste rígida feita de plástico, deslocada 2.5mm no sentido vertical do ímã e a 1mm de distância no sentido horizontal da face exposta do ímã. A bobina possui aproximadamente 800 espiras feitas

com um fio de cobre esmaltado de 0.002mm^2 de área de seção transversal e resistividade linear de $8.5\Omega/m$. O material do ímã utilizado é o NdFeB N50. A tabela 1 da subseção 3.1.2 apresenta as características desses materiais.

Figura 5 – Protótipo utilizado no experimento realizado no LMEst.



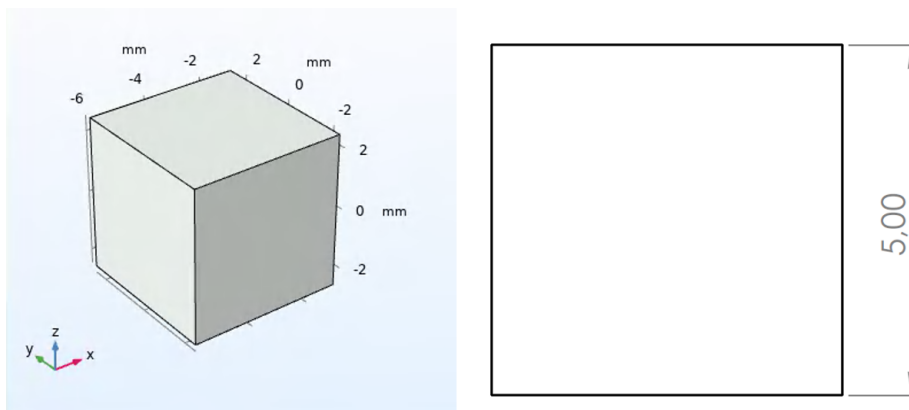
Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa forma, a modelagem construída no software COMSOL Multiphysics[®] apresentada a seguir tem o objetivo de reproduzir o experimento supracitado.

3.1.1 Geometria

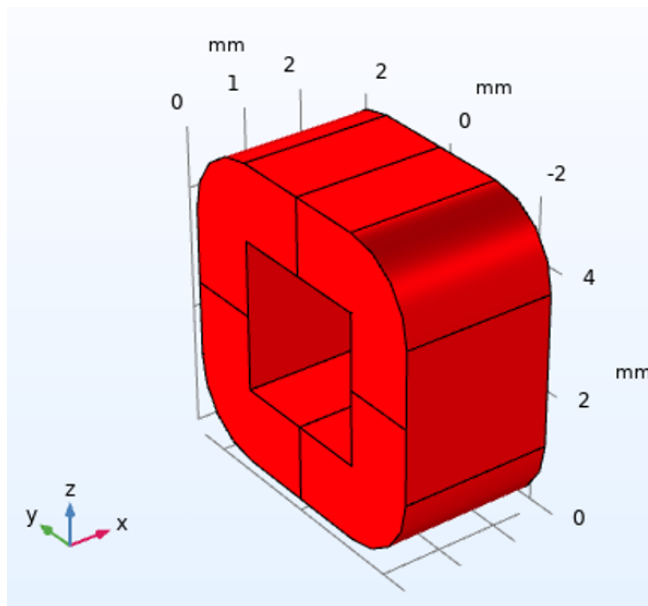
A geometria utilizada nessa modelagem foi desenvolvida dentro do software utilizando o módulo *geometry* (COMSOL, 2020). Nessa etapa, a geometria do experimento foi reproduzida de forma simplificada. Primeiramente, o ímã foi construído com formato cúbico de 5mm de lado, como mostrado na figura 6. A geometria da bobina foi construída visando possibilitar acomodar as 800 espiras e facilitar as análises dedicadas a construção do modelo da bobina, mencionadas na subseção 3.3.1. A geometria da bobina está apresentada abaixo na figura 7 e suas dimensões estão apresentadas na figura 8.

Figura 6 – Geometria do ímã construído no COMSOL Multiphysics[®].



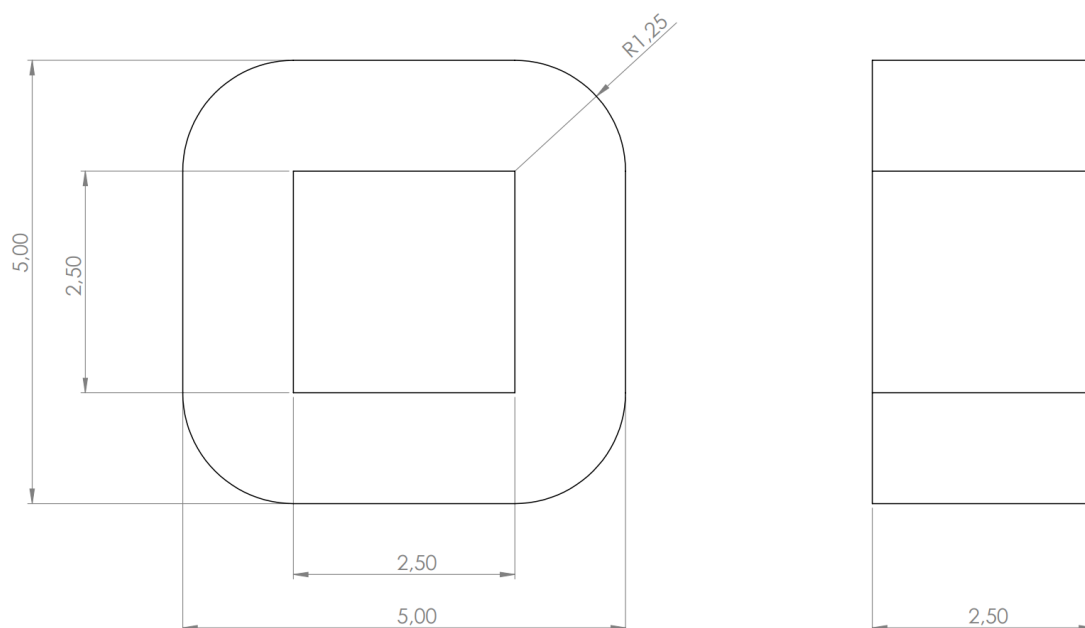
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 7 – Geometria da bobina construída no COMSOL Multiphysics®.



Fonte: Elaborada pelo autor.

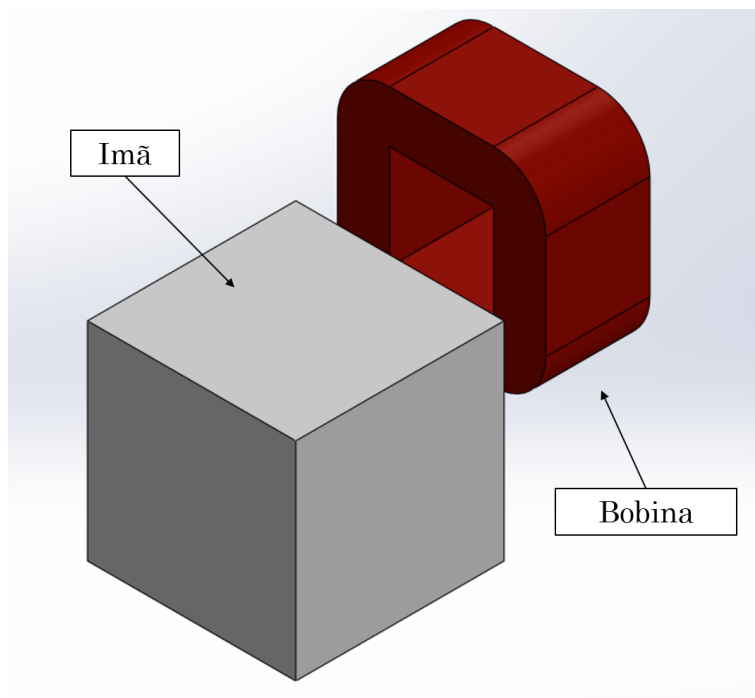
Figura 8 – Dimensões da bobina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A figura 9 apresenta a disposição dos dois componentes no espaço, na qual é possível observar que o ímã está deslocado da face da bobina no sentido vertical em 2.5mm e no sentido horizontal deslocado em 1mm . Vale ressaltar que esse posicionamento corresponde à posição inicial do ímã, sobre a qual ele oscilará segundo a equação 3.1.

Figura 9 – Disposição espacial dos elementos do modelo.

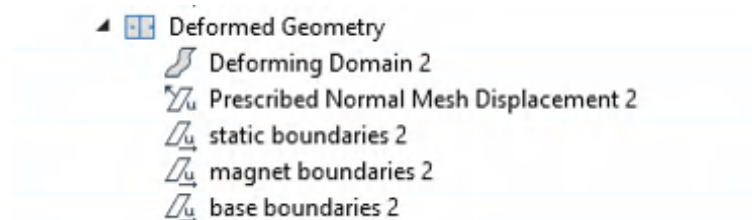


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para que as informações do campo magnético gerado pelo ímã se propagem para a bobina, é necessário adicionar à geometria um meio para propagação do campo tornado possível o acoplamento eletromagnético entre os componentes. Dessa forma, foram adicionados domínios de ar que envolvem o ímã e a bobina. Devido ao movimento de translação do ímã as geometrias que representam o fluido são alteradas e recalculadas em cada iteração da simulação. Nesse contexto, o software COMSOL Multiphysics® disponibiliza a ferramenta *deformed geometry*, apresentada abaixo.

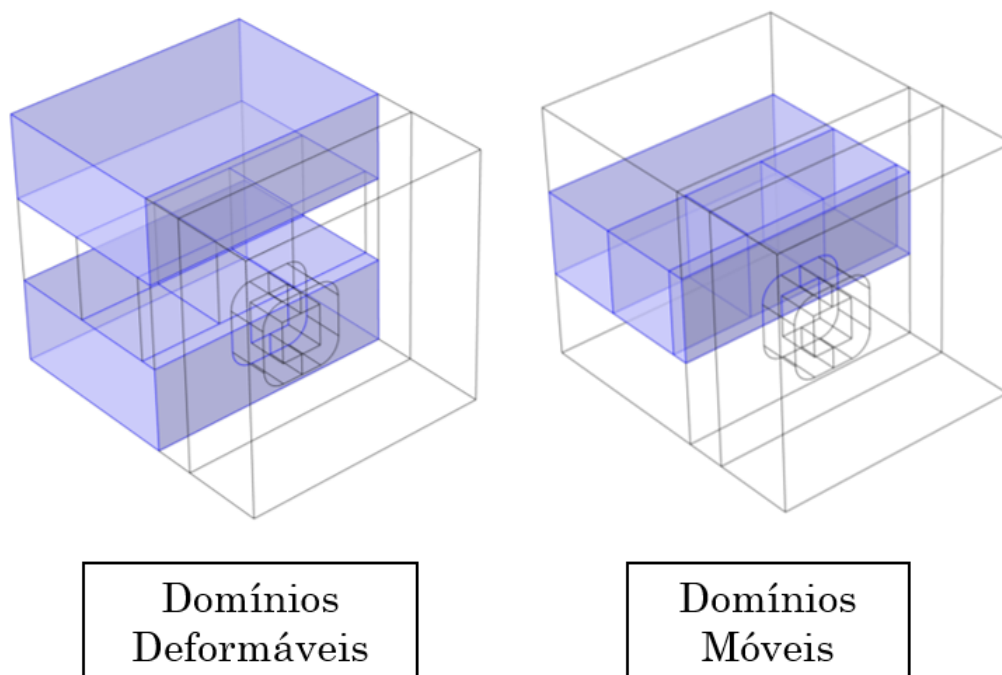
3.1.1.1 Geometria Deformável

A ferramenta *deformed geometry* (COMSOL, 2020) possibilita modelar domínios fluidos ou espaços livres que são alterados durante a simulação. O objetivo dessa abordagem é reduzir a deformação da malha considerando os movimentos dos demais corpos do modelo, reduzindo a complexidade numérica e minimizando o custo computacional do modelo. Na interface da ferramenta, apresentada na figura 10, é possível determinar quais são os domínios deformáveis e quais são os domínios móveis do modelo, e predeterminar o movimento das fronteiras que resultaram no movimento e deformação dos elementos. Na figura 11 é possível observar os domínios que são deformados pelo movimento dos domínios móveis, contemplados pelo ímã e pelos domínios de ar que o envolve.

Figura 10 – Interface da ferramenta *deformed geometry*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 11 – Domínios deformáveis e móveis da modelagem 1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.2 Materiais

Os materiais utilizados nesse modelo foram configurados na interface *materials* (COMSOL, 2020). Para o ímã foi utilizado o NdFeB N50, para a bobina foi utilizado cobre e para os demais elementos ar. As configurações dos materiais mantiveram-se conforme são disponibilizados no software, tendo como exceção algumas características do NdFeB N50, listadas abaixo na tabela 1.

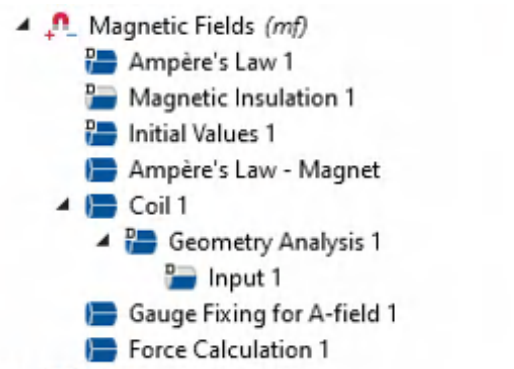
Tabela 1 – Propriedades configuradas do NdFeB N50.

Propriedades	Valor
Densidade	$7450 [Kg/m^3]$
Condutividade Térmica	$8.9491 [W/(m \times K)]$
Capacidade de Calor	$502.09 [J/(Kg \times K)]$
Densidade de Fluxo Remanescente	$1.41 [T]$

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.3 Fenômenos Eletromagnéticos

Os fenômenos eletromagnéticos associados à modelagem são configurados dentro da interface *magnetic fields* do software (COMSOL, 2020). Essa interface é responsável por determinar os parâmetros eletromagnéticos do modelo. Através dela é calculado o campo magnético gerado pelo ímã e a tensão induzida na bobina de cobre do sistema. Além disso, essa interface permite calcular também a força magnética de amortecimento exercida sobre o ímã devido ao acoplamento do modelo, que tem influência direta sobre seu movimento como citado anteriormente. Os nós configurados nessa ferramenta estão apresentados abaixo na figura 12.

Figura 12 – Interface *magnetic fields*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Abaixo serão abordados os objetivos e as configurações dos nós utilizados nessa ferramenta.

3.1.3.1 Ampère's Law 1

Essa ferramenta é dedicada à calcular o potencial vetor magnético nos elementos e estabelecer as relações eletromagnéticas que constituem o modelo, utilizando as informações de permeabilidade relativa, condutividade elétrica e a permissividade relativa de cada material utilizado. Esse nó é aplicado apenas aos domínios de ar, devido ao fato de ser sobrescrito pelos nós *Ampère's Law - Magnet* e *Coil 1*. Suas configurações são mantidas conforme *default* do software.

3.1.3.2 Magnetic Insulation 1

O objetivo desse nó é definir a condição de contorno do modelo para o campo magnético (COMSOL, 2020). A configuração desse campo foi mantida conforme predefinido pelo software. Nessa configuração, a ferramenta determina que a componente tangencial do potencial magnético tenha valor zero na fronteira da geometria.

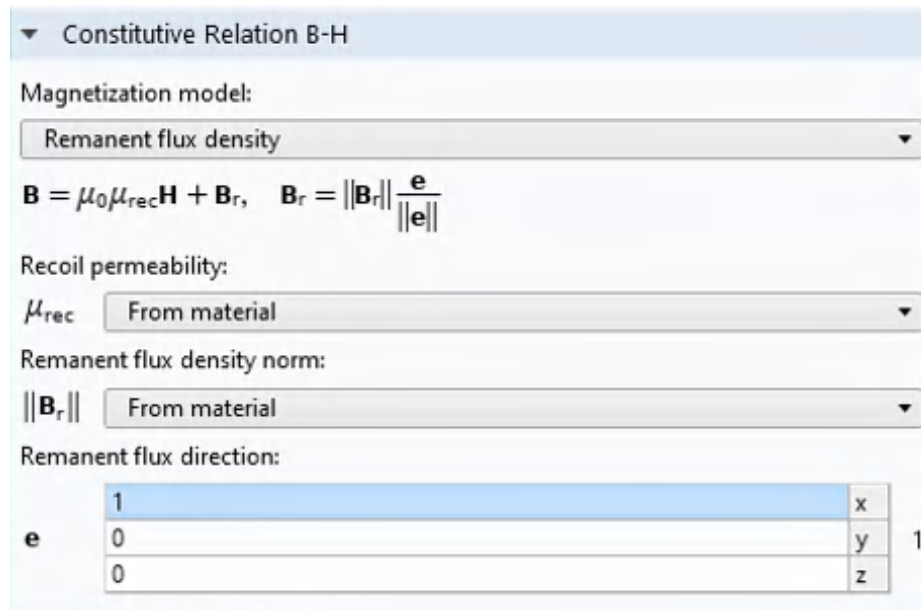
3.1.3.3 Initial Values 1

Esse nó é utilizado em simulações transientes, dependentes do tempo, para definir o valor inicial para o potencial vetor magnético do modelo. Conforme a configuração *default* da plataforma, o potencial vetor magnético têm suas componentes zeradas nos três eixos do sistema no começo do estudo.

3.1.3.4 Ampère's Law - Magnet

Esse nó é análogo ao *Ampère's Law 1* apresentado acima, mas dedicado à configurar o ímã no modelo. As configurações adotadas para determinar as características magnéticas do ímã podem ser observadas na figura 13.

Figura 13 – Configurações das características eletromagnéticas do ímã.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para determinar um ímã no COMSOL Multiphysics® é necessário primeiramente configurar o modelo de magnetização para "*Remanent flux density*" através do campo *magnetization model*. Os campos *recoil permeability* e *remanent flux density norm* são configurados utilizando as propriedades do material, apresentadas na subseção 3.1.2 desse capítulo.

Por fim, é configurado o *remanent flux direction*, que determina a direção do fluxo do campo magnético do ímã. O fluxo foi configurado para que ele aponte na direção positiva do eixo x do modelo, entrando na face exposta da bobina. Adotar essa direção aumenta a variação temporal do campo magnético do ímã, ϕ , sobre a bobina aumentando a tensão induzida, conforme a equação 2.2.

3.1.3.5 Coil 1

O nó *Coil 1* é utilizado para configurar os parâmetros da bobina. Um estudo dedicado para construção do modelo da bobina utiliza os parâmetros configurados nesse módulo para construir o modelo numérico desse elemento. Os parâmetros adotados são os mesmo do experimento realizado, em que a bobina possui 800 espiras feitas de um fio de cobre com 0.002mm^2 de área de seção transversal e resistividade linear de $8.5\Omega/m$. A figura 14 apresenta as configurações feitas nessa ferramenta.

Figura 14 – Configurações dos parâmetros da bobina.

Coil

Coil name:
1

Conductor model:
Homogenized multi-turn

Coil type:
Numeric

Coil excitation:
Circuit (voltage)

Connect to 'External U Vs. I' in the Electrical Circuit interface.

Homogenized Multi-Turn Conductor

Number of turns:
N n_turns

Coil wire conductivity:
 σ_{coil} coil_cnd S/m

Coil wire cross-section area:
User defined

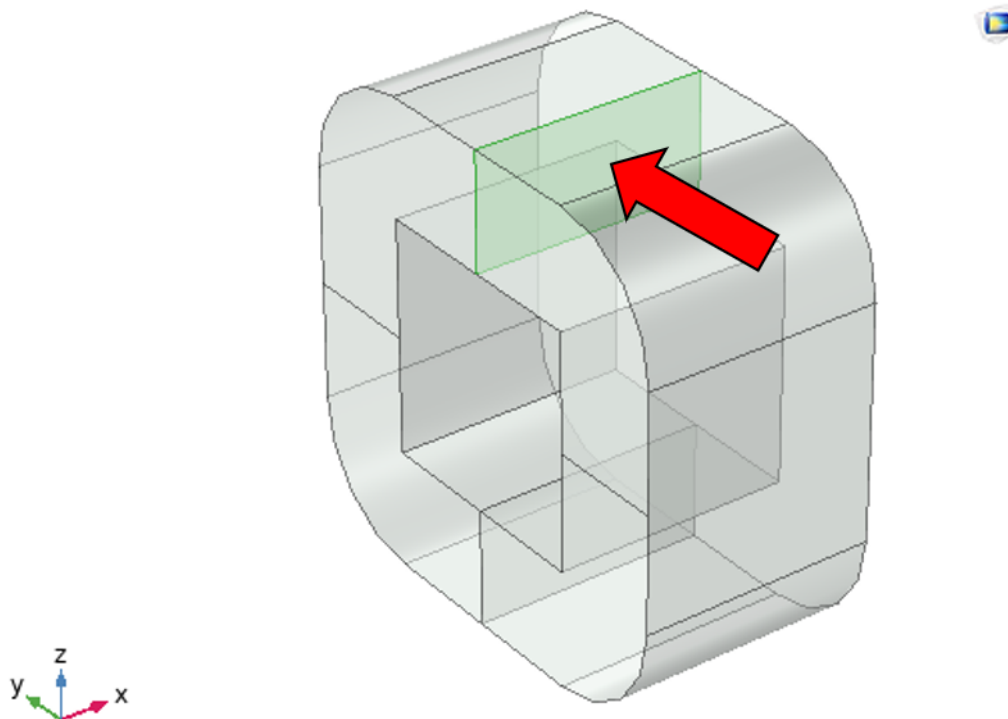
a_{coil} coil_area m^2

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao configurar o campo *conductor model* como *homogenized multi-turn* associado a configuração *numeric* do campo *coil type* o software, através de um estudo dedicado, constrói um modelo numérico da bobina com base nos parâmetros configurados na seção *homogenized*

multi-turn conductor da janela de configurações do nó. Esse estudo, *Coil Geometry Analysis*, determinar o fluxo de corrente na bobina e será abordado na subseção 3.3.1. Um sub-nó é usado para configurar algumas informações da geometria da bobina, como a entrada e o sentido da corrente, como apresentado abaixo na figura 15.

Figura 15 – Superfície configurada como entrada da bobina. A seta vermelha mostra o sentido adotado para a corrente na bobina.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A bobina foi configurada como uma fonte de tensão elétrica através do campo *coil excitation*, que determina como a energia induzida na bobina será disponibilizada para o circuito elétrico acoplado aos seus terminais, abordados na subseção 3.1.4.

3.1.3.6 Gauge Fixing for A-field 1

Esse nó é usado para obter uma solução única e numericamente estável para a solução das equações do potencial vetor magnético, *A*. Essa ferramenta é intrínseca à interface *magnetic fields* e foi utilizada com suas configurações *default*.

3.1.3.7 Force Calculation 1

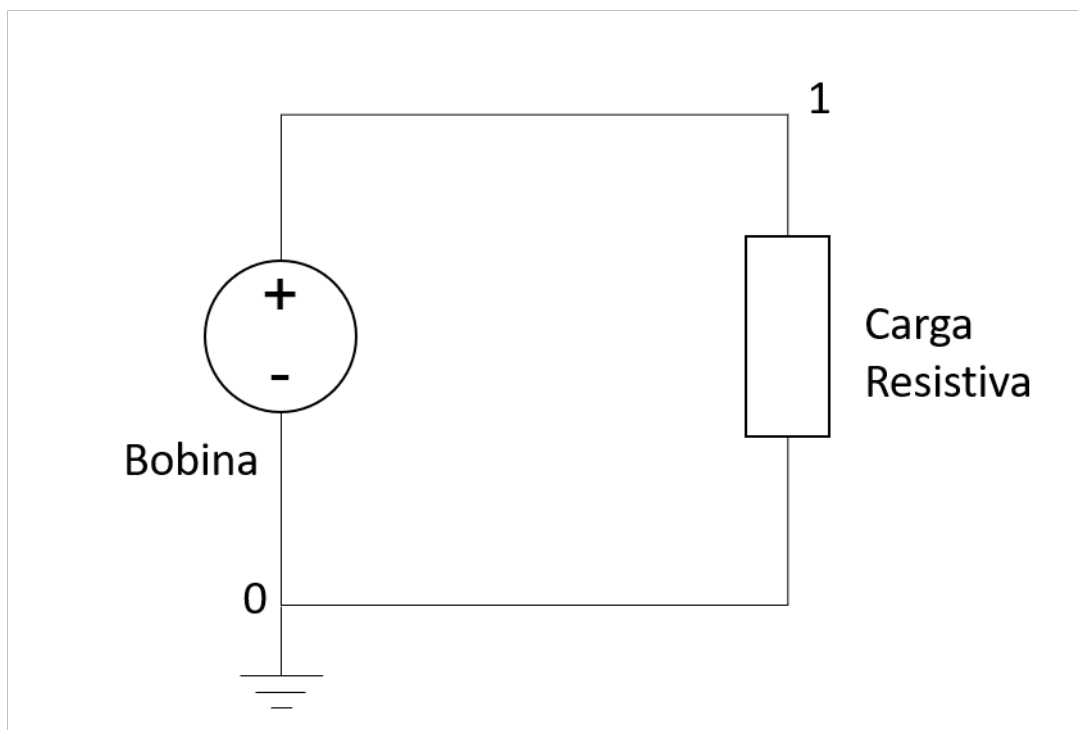
Force calculation é um modulo utilizado para determinar a força de amortecimento magnético que atua sobre o movimento do ímã. A energia elétrica gerada pela bobina para

alimentar a carga é drenada do movimento do ímã, atuando sobre este elemento como uma força de amortecimento magnético. Para isso, esse nó utiliza a integração do tensor de Maxwell sobre as superfícies externas do ímã para calcular a força e o torque exercido sobre esse elemento devido aos acoplamentos eletromagnéticos. As forças calculadas por essa ferramenta são disponibilizadas em variáveis globais que podem ser acessadas e utilizadas por outras interfaces do software.

3.1.4 Fenômenos Elétricos

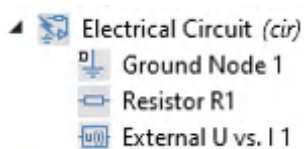
Para que seja possível o surgimento de uma corrente elétrica na bobina, faz-se necessária a adição de uma carga elétrica em seus terminais. Nesse contexto, a interface *electrical circuits* (COMSOL, 2020) permite criar circuitos elétricos com fontes de tensão, fontes de corrente, resistores, capacitores, indutores e dispositivos semicondutores. Essa modelagem utiliza um circuito elétrico, como o apresentado na figura 16, que contém a fonte de tensão, representando a bobina, uma carga resistiva e o referencial de aterramento.

Figura 16 – Diagrama do circuito elétrico.

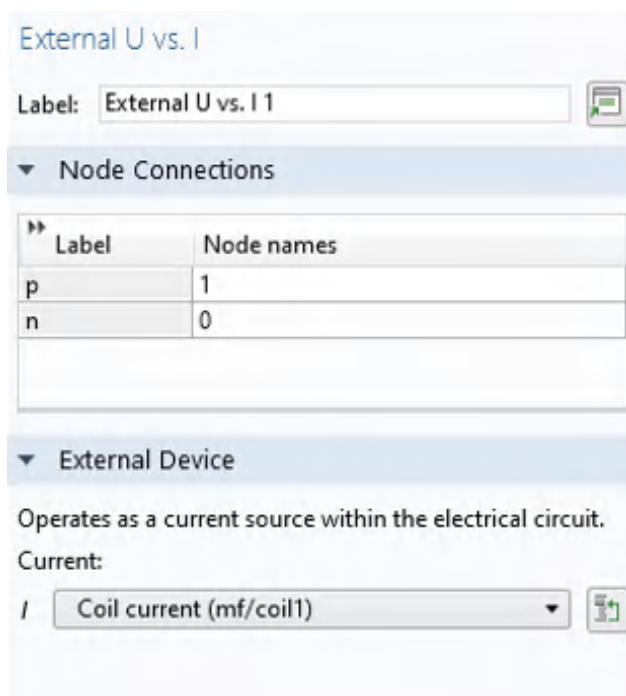


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 17 estão apresentados os nós utilizados para configurar o circuito elétrico desse modelo. O nó "External U vs. I 1" configura a fonte de tensão elétrica e possui um acoplamento com o nó "Coil I" da interface *magnetic fields*, apresentado na subseção 3.1.3.5. Através desse acoplamento, as propriedades da bobina e a tensão elétrica induzida nos seus terminais são aplicados no circuito elétrico, através das configurações apresentadas na figura 18.

Figura 17 – Interface *electrical circuits*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

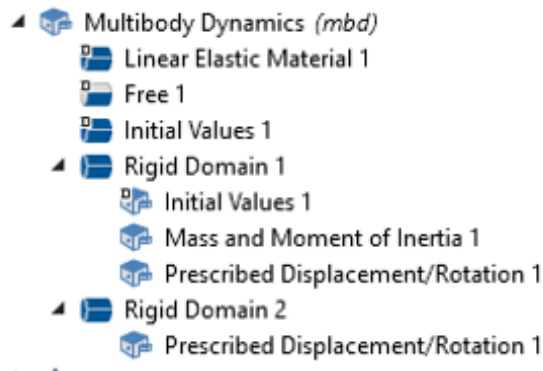
Figura 18 – Configurações do nó *External U vs. I 1*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.5 Fenômenos Dinâmicos

Os fenômenos dinâmicos associados à essa modelagem estão relacionados ao movimento do ímã e à restrição de movimento para a bobina. Para isso, a interface *multibody dynamics* (COMSOL, 2020) é utilizada para analisar montagens mecânicas e a dinâmica dos componentes do sistema. Os nós necessários para a configuração dessa modelagem são apresentados na figura 19. Dentre esses, os nós *linear elastic material 1*, *free 1* e *initial values 1* são intrínsecos à interface e suas configurações foram mantidas conforme a configuração padrão do software.

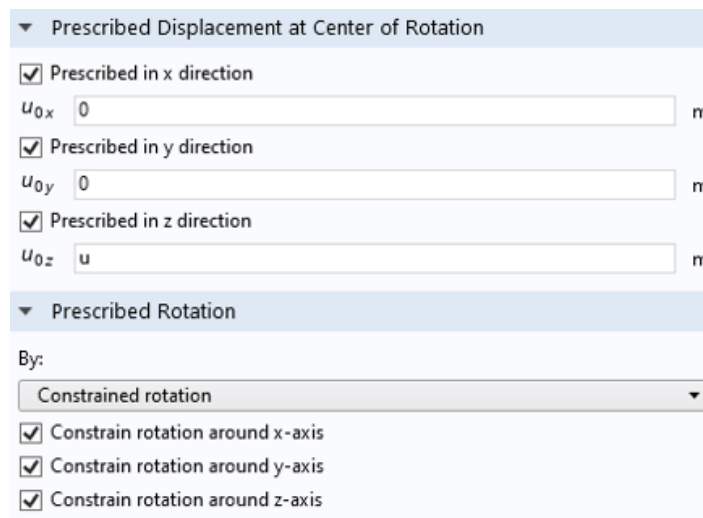
Os nós *rigid domain* constituem um conjunto de EDOs que regem o movimento desses corpos. Essas equações são usadas apenas para integrar propriedades como massa, centro de gravidade e momento de inércia. Por esse motivo as malhas utilizadas para os domínios rígidos podem ser mais grossas, reduzindo assim o custo computacional associado a esses elementos. A seguir serão abordadas as configurações dos nós *rigid domain 1* e 2.

Figura 19 – Interface *multibody dynamics*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.5.1 Rigid Domain 1

O nó *rigid domain 1* é utilizado para configura o movimento do ímã. Nessa modelagem o ímã irá desenvolver um movimento harmônico de translação de um grau de liberdade na direção z do sistema. Para isso, foi utilizado o sub-nó *prescribed displacement at center of rotation*, apresentado na figura 20. Foram configuradas nesse sub-nó a restrição dos movimentos de translação nos eixos x e y e a restrição dos movimentos de rotação nos três eixos do sistema. No campo *prescribed in z direction* foi configurado o movimento do ímã, u , descrito pela equação 3.1.

Figura 20 – Janela de configuração do sub-nó *prescribed displacement at center of rotation* para o ímã.

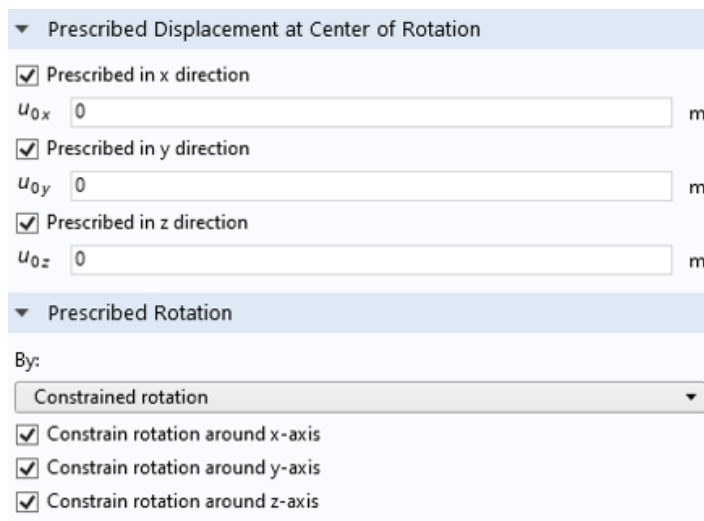
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.5.2 Rigid Domain 2

Esse nó foi utilizado para determinar as restrições de movimento da bobina. As restrições dos movimentos foram feitas no sub-nó *prescribed displacement at center of rotation*, como

apresentado na figura 21. Pode-se observar que foram restringidos os movimentos de translação e rotação nos três eixos do sistema.

Figura 21 – Janela de configuração do sub-nó *prescribed displacement at center of rotation* para a bobina.



▼ Prescribed Displacement at Center of Rotation

☒ Prescribed in x direction
 u_{0x} 0 m

☒ Prescribed in y direction
 u_{0y} 0 m

☒ Prescribed in z direction
 u_{0z} 0 m

▼ Prescribed Rotation

By:

Constrained rotation ▼

☒ Constrain rotation around x-axis

☒ Constrain rotation around y-axis

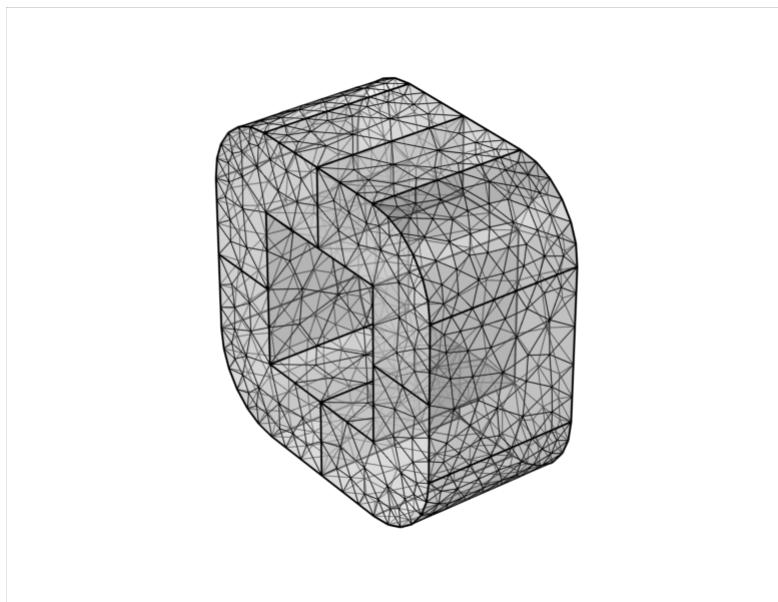
☒ Constrain rotation around z-axis

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.6 Malhas

Devido à simplicidade dessa primeira modelagem, foi utilizada uma malha gerada automaticamente através da interface *mesh* do software. A malha gerada é composta por elementos tetraédricos, como pode-se observar na malha gerada para a bobina, apresentada na figura 22.

Figura 22 – Malha da bobina gerada pela interface *mesh*.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Segunda Modelagem

A segunda modelagem trata-se de um modelo mais complexo que o abordado na primeira, criado com o objetivo de validar as possibilidades do software COMSOL Multiphysics®. Esse modelo é constituído por uma base móvel, um ímã e uma bobina, como o apresentado na figura 4 da seção 2.3. Nesse modelo, a base móvel descreve um movimento harmônico, com velocidade descrita conforme a equação 3.2, representando a entrada de excitação do sistema. A bobina está engastada na base móvel e descreve o mesmo movimento. O movimento da base é transferido através de uma mola mecânica e um amortecedor viscoso para o ímã, que também está sujeito a força de amortecimento magnético, citado na subseção 3.1.3.7 desse capítulo.

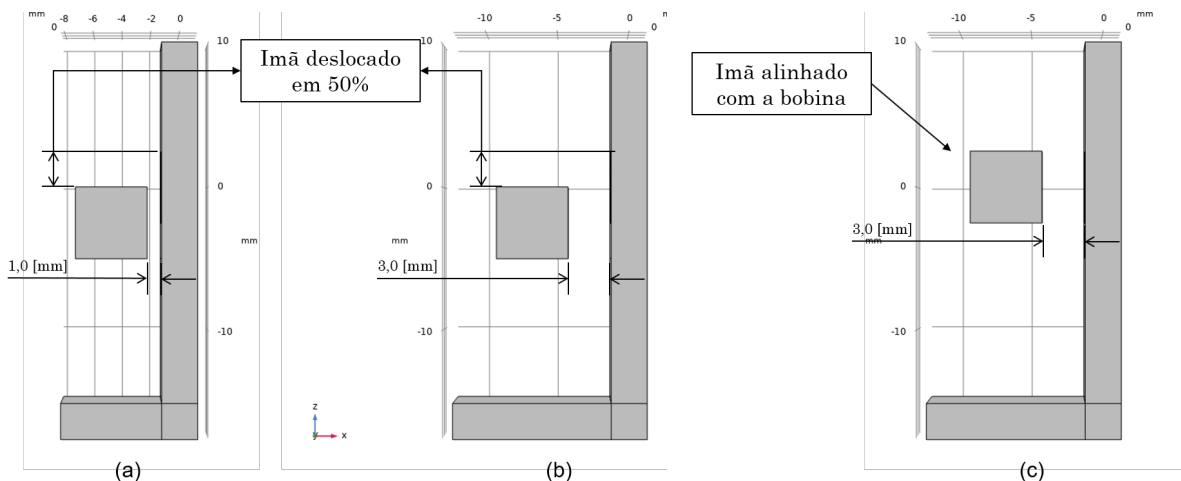
$$\dot{z}(t) = 0.5 \sin(2\pi \times 60 \times t) [mm/s] \quad (3.2)$$

Nessa seção serão apresentadas as configurações das interfaces do software COMSOL Multiphysics®, conforme foi feito na seção 3.1. Os materiais e as configurações adotadas para os fenômenos eletromagnéticos e elétricos são os mesmos adotados para a primeira modelagem, e não serão abordados nessa seção.

3.2.1 Geometrias

As geometrias adotadas para o ímã e para a bobina são as mesmas apresentadas na subseção 3.1.1. O modelo construído, contendo a base móvel, o ímã e a bobina está apresentado na figura 24. Nessa montagem o ímã está deslocado da face da bobina no sentido vertical em 2.5mm e deslocado no sentido horizontal em 1mm. Apesar disso, a geometria foi construída de forma parametrizada, possibilitando a alteração desses parâmetros como apresentado na figura 23.

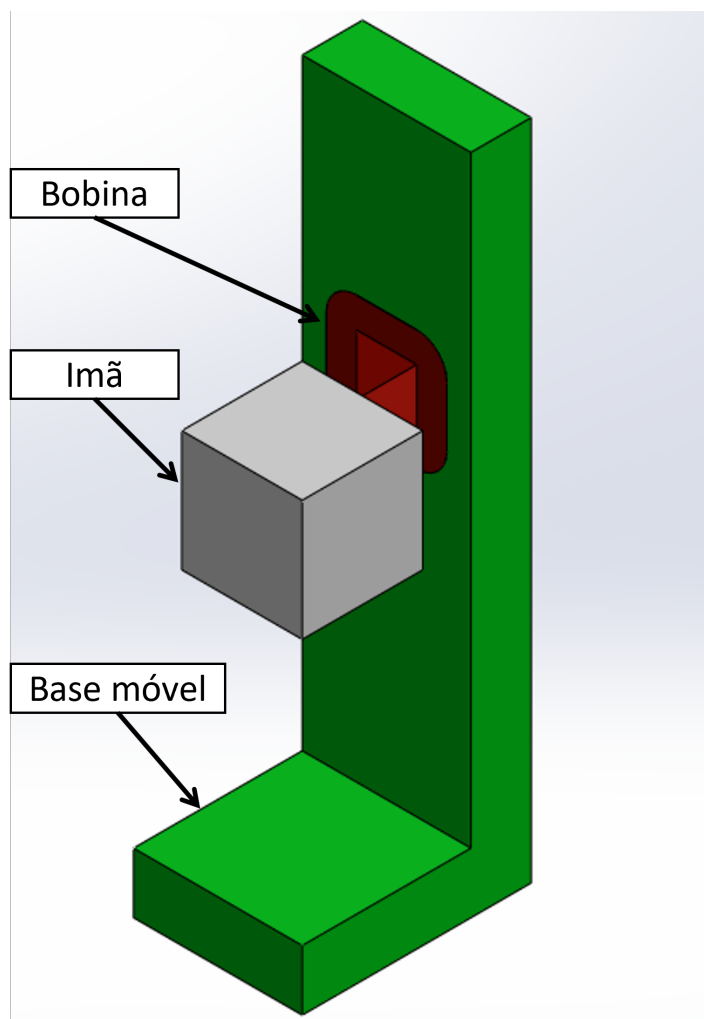
Figura 23 – Geometria parametrizada do modelo 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se que na primeira e na segunda geometria o ímã está deslocado da bobina em 50% no sentido vertical e na última ele está alinhado verticalmente com a bobina. Na segunda e na terceira geometria o ímã está distanciado em 3mm da face da bobina e na primeira geometria está distanciado em 1mm. Como apresentado na subseção 2.2.1 esses parâmetros têm influência direta sobre a capacidade de conversão de energia do energy harvester.

Figura 24 – Disposição dos componentes de modelo 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

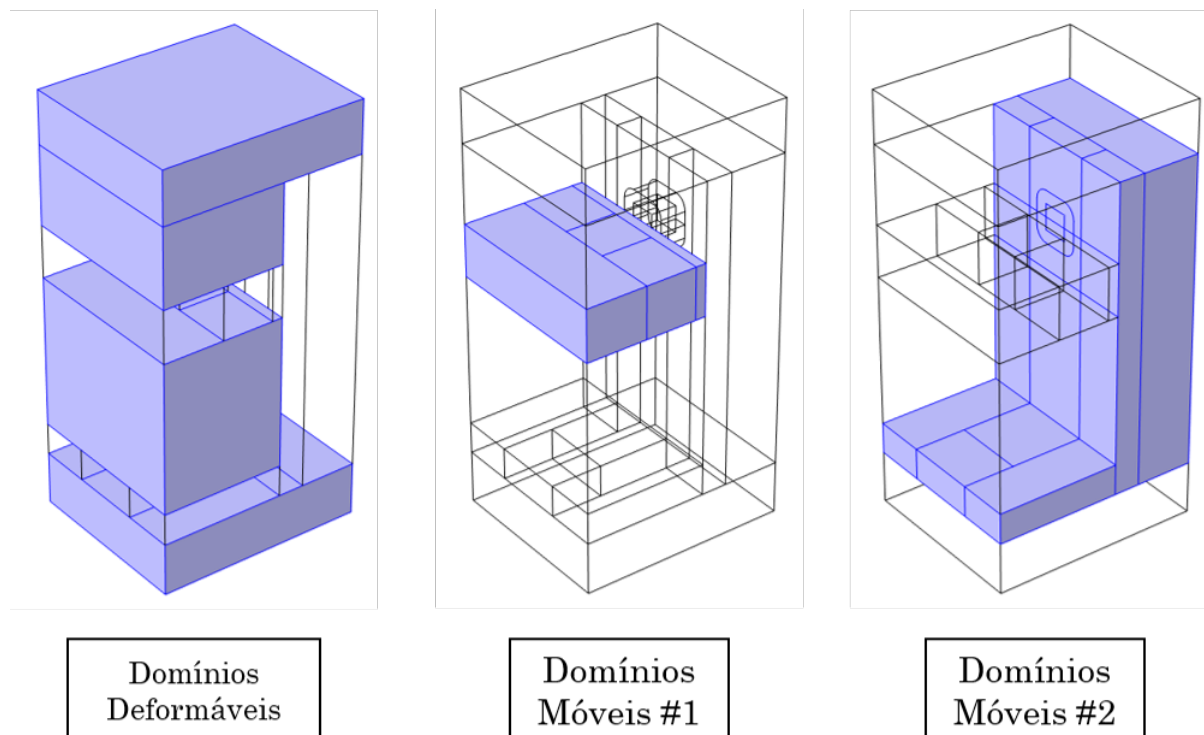
3.2.1.1 Geometrias Deformáveis

Nesse modelo também foram utilizados os domínios deformáveis para reduzir a deformação das malhas desses elementos, reduzindo a complexidade numérica e consequentemente o custo computacional. Os domínios deformáveis e os domínios móveis estão apresentados abaixo na 25.

Nessa imagem é possível observar que os domínios deformáveis contemplam a região de movimento do ímã e as regiões acima e abaixo da base móvel. Nota-se também que o modelo possui dois conjuntos de domínios móveis. O primeiro conjunto contempla os domínios que

realizam o mesmo movimento do ímã e o segundo conjunto é constituído pelos domínios que realizam o mesmo movimento da base.

Figura 25 – Domínios deformáveis e móveis da modelagem 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

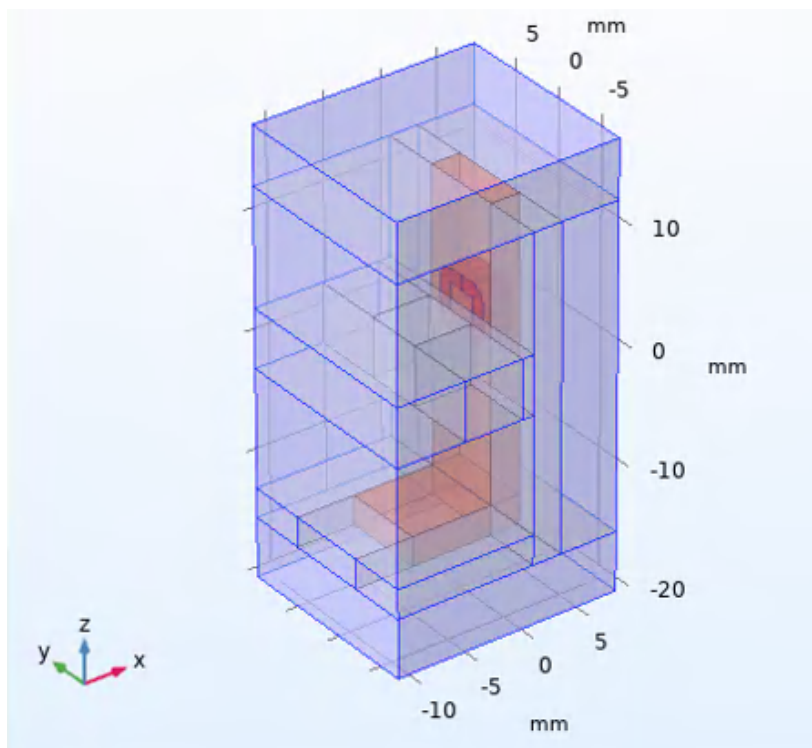
3.2.1.2 Domínios de Elementos Infinitos

O campo magnético gerado pelo ímã se estende além das fronteiras dos domínios que compõem a geometria do modelo. As condições impostas pela interface *magnetic fields* adota as superfícies mais externas da geometria como condição de contorno do meio eletromagnético, como apresentado abaixo na figura 26.

Essa abordagem distorce as linhas do campo magnético de forma a contê-las dentro dos limites da geometria, como mostrado na figura 27, podendo causar alterações nos resultados obtidos. Nesse contexto, a interface *infinite element* (COMSOL, 2020) possibilita a criação de domínios de elementos infinitos que são capazes de estender os limites da geometria utilizando estratégias para reduzir o modelo para um tamanho razoável, computacionalmente viável.

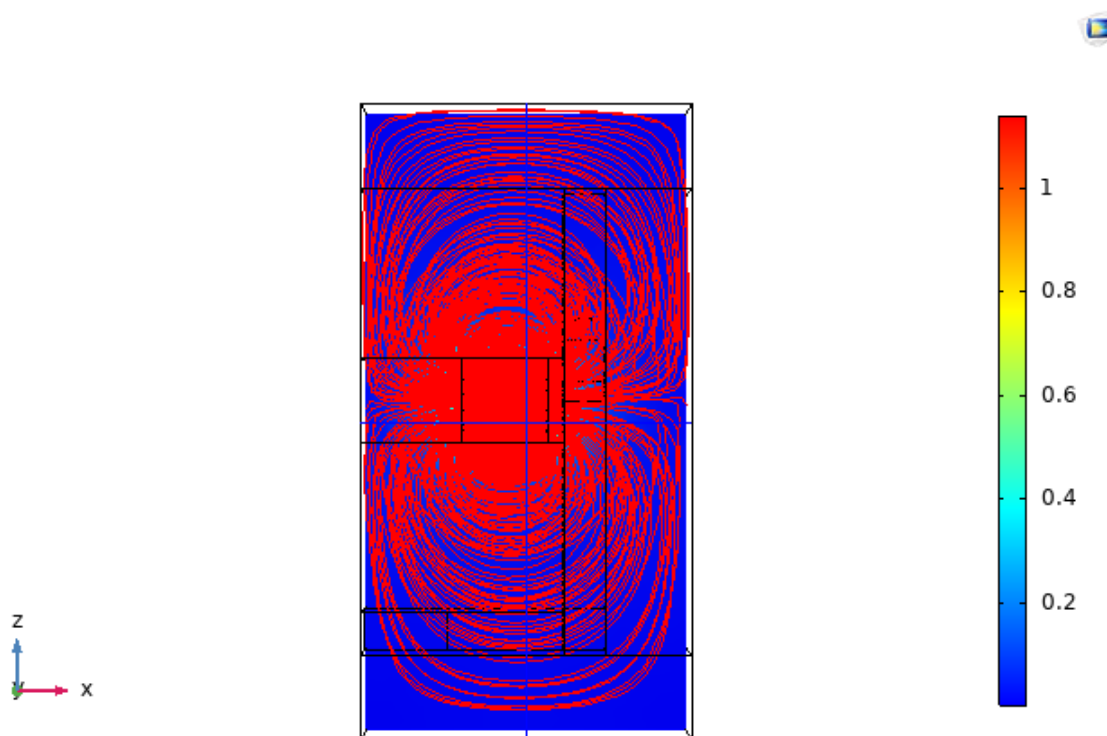
O resultado dessa abordagem pode ser observado na figura 28. Nessa figura é possível observar como as linhas de campo magnético se estendem além das fronteiras dos domínios que compõem a geometria. Na figura 29 é apresentada a geometria final dessa modelagem.

Figura 26 – Isolamento eletromagnético representado pelas superfícies azuis.



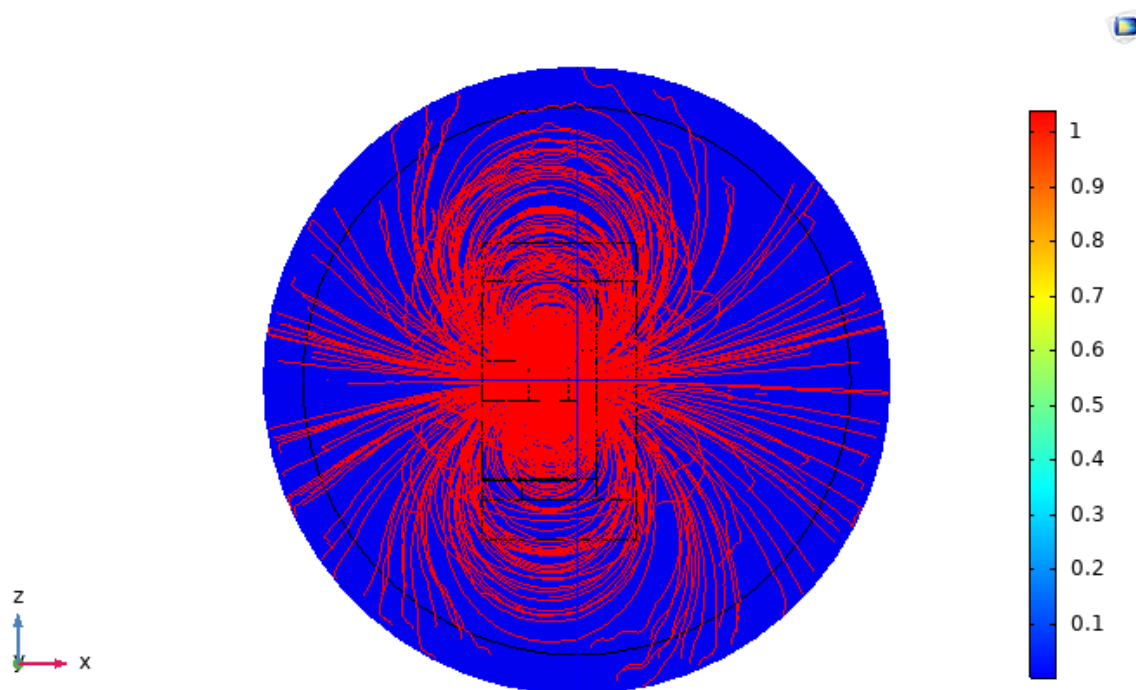
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 27 – Geometria convencional com linhas do campo magnético deformadas.



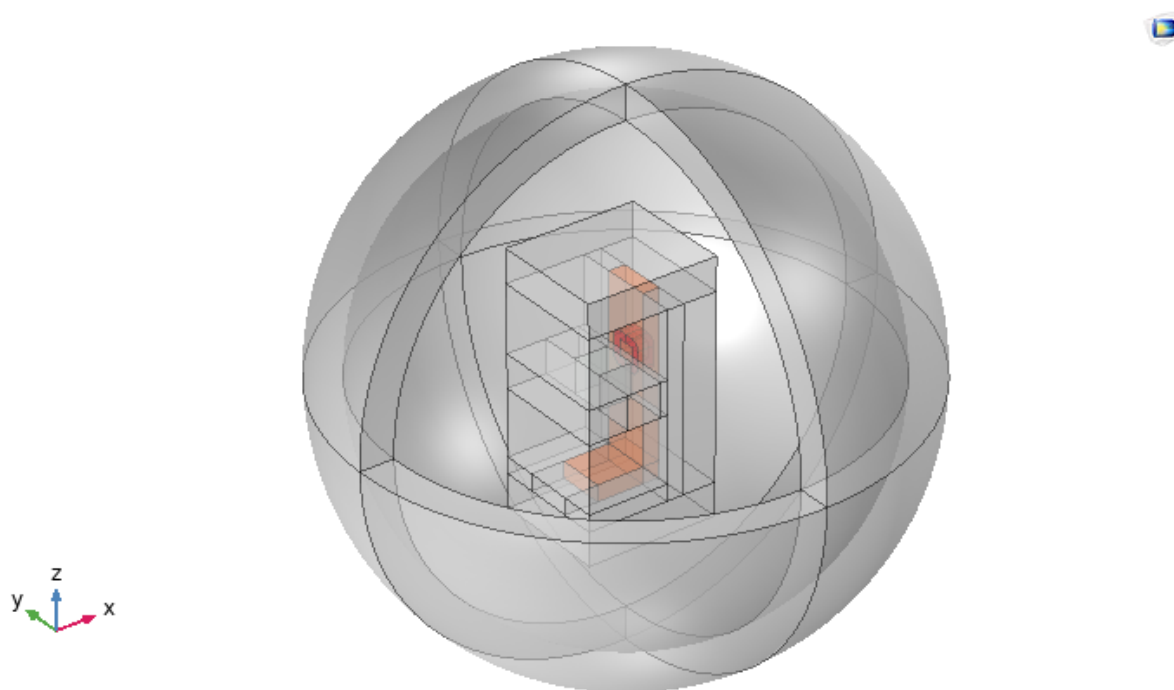
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Geometria com domínios de elementos infinitos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 29 – Geometria final da modelagem 2.

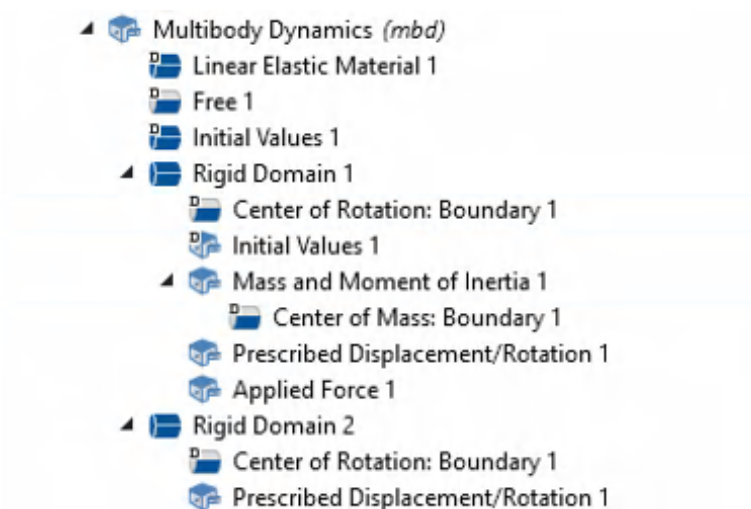


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2 Fenômenos Dinâmicos

Como na seção 3.1, os fenômenos dinâmicos foram configurados na interface *multibody dynamics*. Os nós adotados nessa modelagem são apresentados na figura 30. As configurações dos nós *linear elastic material 1*, *free 1* e *initial values 1* foram mantidas conforme as configuração padrão do software.

Figura 30 – Interface *multibody dynamics* da modelagem 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2.1 Rigid Domain 1

Esse nó é dedicado a construção do modelo dinâmico do ímã. Primeiramente, foi feita a restrição dos movimentos de translação nos eixos x e y e a restrição das rotações nos três eixos do sistema, como pode-se observar na figura 31. Nota-se que o campo *prescribed in z direaction* não foi configurado, permitindo que o movimento do ímã seja descrito pelo sub-nó *applied force 1*. Esse nó permite aplicar uma força sobre o ímã que será responsável pelo movimento descrito por este elemento.

Os elementos mecânicos, mola e amortecedor viscoso, serão inseridos no modelo algebricamente, de forma que o deslocamento do ímã, u , e suas primeira e segunda derivadas temporais, $\dot{u}$ e $\ddot{u}$, respectivamente, possam ser associados à constante de rigidez elástica da mola, K , e ao coeficiente de amortecimento do amortecedor, c .

Figura 31 – Janela de configuração do sub-nó *prescribed displacement at center of rotation* para o ímã do modelo 2.

▼ Prescribed Displacement at Center of Rotation

☒ Prescribed in x direction
 u_{0x} 0 m

☒ Prescribed in y direction
 u_{0y} 0 m

☐ Prescribed in z direction
 u_{0z} 0 m

▼ Prescribed Rotation

By:

Constrained rotation ▼

☒ Constrain rotation around x-axis
☒ Constrain rotation around y-axis
☒ Constrain rotation around z-axis

Fonte: Elaborada pelo autor.

Para determinar a força atuante sobre o ímã será utilizada a equação 2.12, que descreve o deslocamento do ímã, através de uma manipulação algébrica, conforme a equação 3.3:

$$F_{magnet} = c(\dot{u} - \dot{z}) + K(u - z) + F_{magnetic}[N] \quad (3.3)$$

na qual F_{magnet} é a força resultante sobre o ímã, $(\dot{u} - \dot{z})$ a velocidade relativa entre a base móvel e o ímã, $(u - z)$ o deslocamento relativo, que determina a deformação da mola e $F_{magnetic}$, a força de amortecimento magnético devido ao acoplamento entre os meios, citada na subseção 3.1.3.7. Nesse modelo foi adotado o valor de $132,35N/m$ para a constante de rigidez da mola e um valor nulo para o coeficiente de amortecimento.

3.2.2.2 Rigid Domain 2

A configuração do domínio rígido que contempla a bobina e a base móvel é feita nesse nó. Na figura 32 é possível observar que os movimentos de rotação nos três eixos e de translação nos eixos x e y foram restringidos. O movimento harmônico de translação performedo por esses elementos no eixo z do sistema é descrito através da equação 3.2. Essa equação foi inserida no campo *prescribed in z direction*.

Vale ressaltar que o deslocamento, a velocidade e a aceleração desses elementos são acessados pelo nó *rigid domain 1* através de variáveis globais, tornando possível determinar a

velocidade e o deslocamento relativo entre os dois domínios rígidos. Essas variáveis que são utilizadas para determinar a força atuante sobre o ímã.

Figura 32 – Janela de configuração do sub-nó *prescribed displacement at center of rotation* para o movimento da base móvel e da bobina do modelo 2.

Fonte: Elaborada pelo autor.

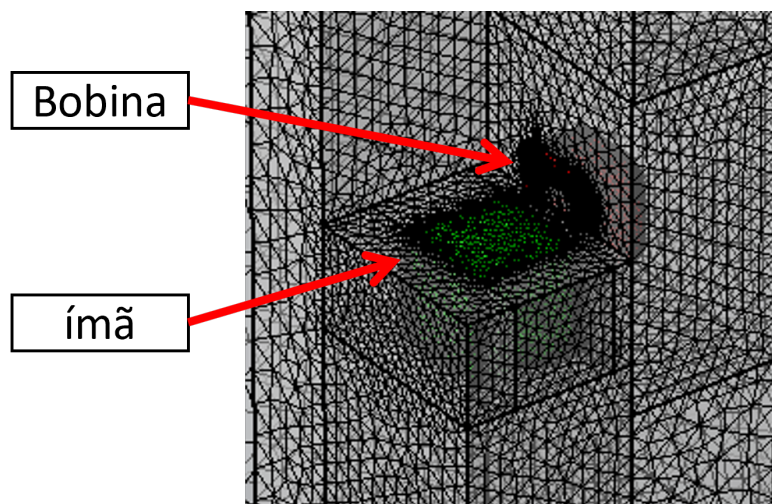
3.2.3 Malhas

As malhas utilizadas nessa modelagem foram configuradas de forma a obter estabilidade numérica e bom desempenho computacional. Como citado na subseção 3.1.5, os domínios rígidos não necessitam de malhas refinadas, devido às configurações atribuídas pelos nós *rigid domain* da interface *multibody dynamics*. Contudo, para os domínios nos quais foram aplicados fenômenos eletromagnéticos, ímã e bobina, e nos domínios entre esses elementos faz-se necessária uma malha mais refinada, para que as informações eletromagnéticas não sejam distorcidas.

Dessa forma, foi realizado um estudo de convergência de malha, obtendo como resultado a malha apresentada na figura 33. Nessa figura é possível observar que nas regiões próximas à bobina e ao ímã o refinamento da malha é maior quando comparado às regiões mais distantes.

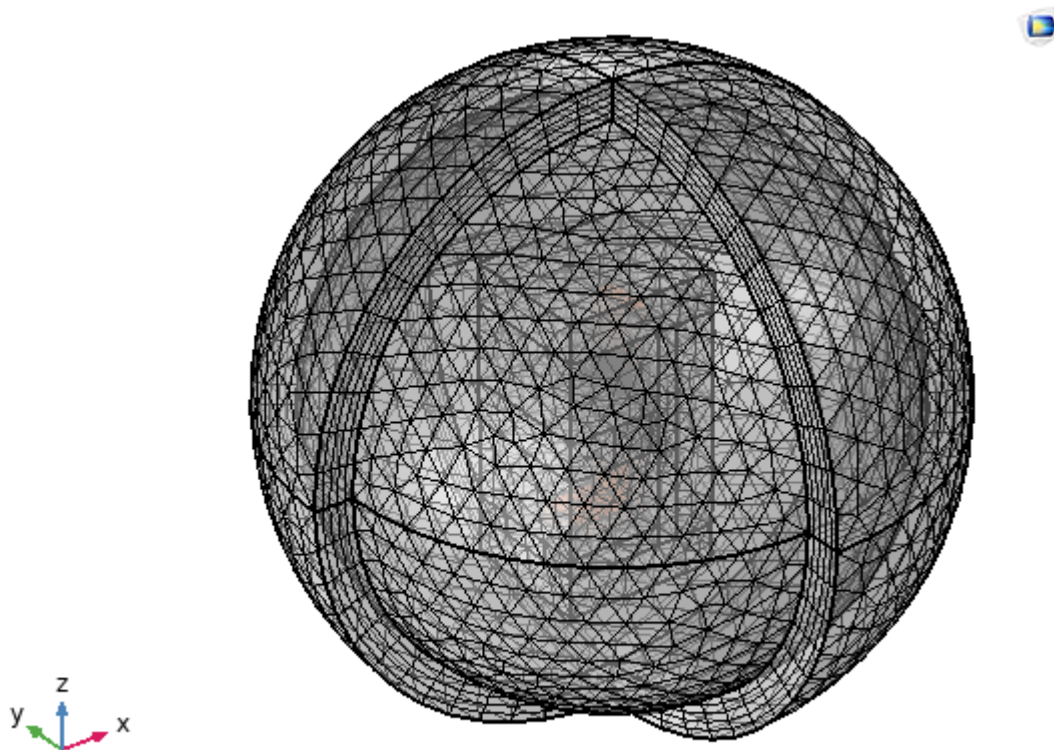
Nos domínios de elementos infinitos são usadas malhas compostas por elementos triangulares do tipo camada, como pode ser observado na figura 34. Nessa abordagem foi adotada a sugestão do software por se tratar de um formato mais adequado para representar esse tipo de domínio. Para os demais domínios internos da geometria são usadas malhas com formato tetraédrico.

Figura 33 – Refinamento da malha nas regiões próximas à bobina e ao ímã.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 34 – Malha final do modelo 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

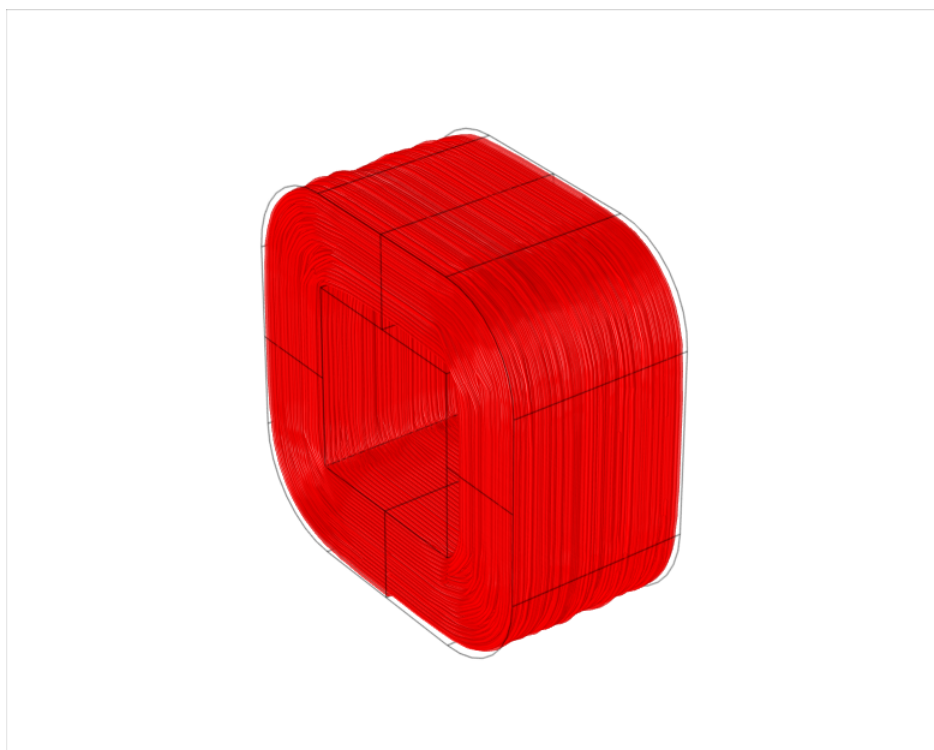
3.3 Configuração das Soluções

A seguir são apresentados os passos para configuração das simulações necessárias para essas modelagens. As configurações adotadas para as duas soluções são as mesmas para os dois modelos apresentados.

3.3.1 Análise da Geometria da Bobina

A análise da geometria da bobina é feita utilizando o módulo *Coil Geometry Analysis*. Esse estudo é utilizado como *input* da simulação principal e por esse motivo deve ser realizado antes. Esse passo é responsável por calcular a geometria da bobina e determinar o caminho que a corrente percorrerá nas espiras. O resultado obtido desse módulo é apresentado na figura 35, na qual pode-se observar as espiras da bobina. As configurações dessa modelagem são mantidas conforme as configurações preestabelecidas pelo software.

Figura 35 – Resultado do processamento da geometria da bobina.



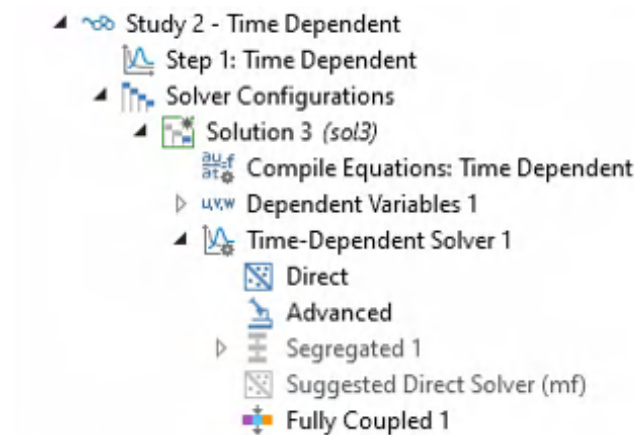
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.2 Simulação Dependente do Tempo

Para solucionar o modelo foi utilizado um estudo dependente do tempo. O solucionador numérico utilizado foi o *Pardiso*, por se tratar de um solucionador direto com características de desempenho superiores quando comparado a outros métodos. Além disso, esse solver utiliza a abordagem *Fully Coupled*, como mostrado na figura 36, capaz de formar um único sistema de

equações parciais, que agrupam todas as incógnitas e seus acoplamentos (devidos aos fenômenos multifísicos), solucionando-as em uma única interação.

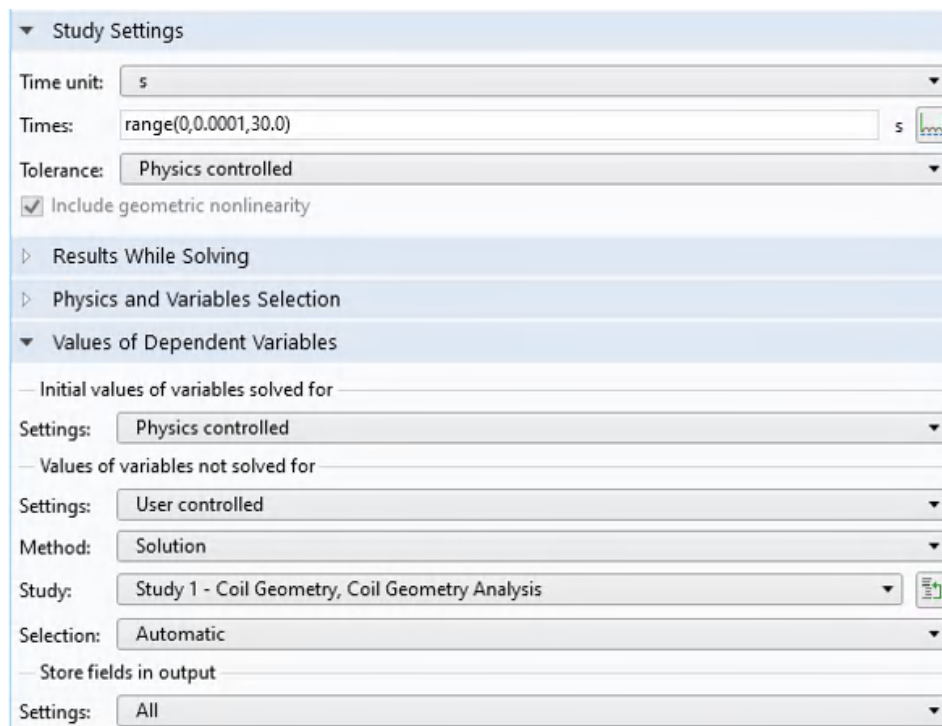
Figura 36 – Simulação dependente do tempo. Nós que compõem o solver.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Por fim, a configuração do step *time dependent* foi feita conforme apresentado na figura 37. Nesse step foi configurado o intervalo de tempo da simulação e o passo de tempo desejado, 0.0001s. Na seção *values of dependent variables* foi inserido como *input* do estudo a modelagem da geometria da bobina, discutida na subseção 3.3.1.

Figura 37 – Simulação dependente do tempo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

RESULTADOS

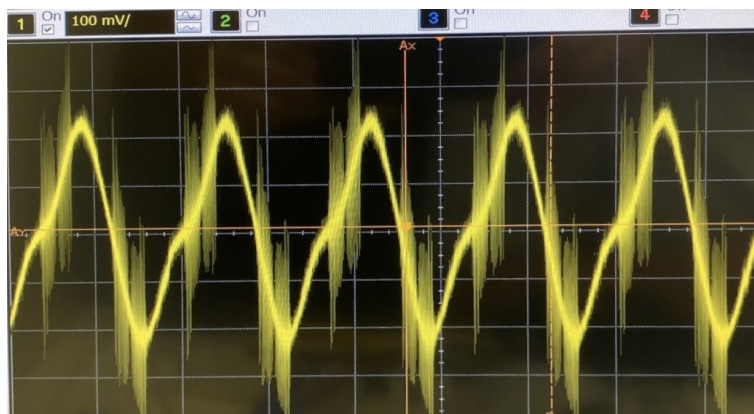
Concluindo a montagem dos dois modelos no software COMSOL Multiphysics® e executando as soluções apresentadas na seção 3.3 foi possível extrair os resultados obtidos. Nesse contexto, esse capítulo é dedicado à apresentação e análise dos resultados alcançados.

4.1 Primeira Modelagem

Os resultados obtidos das simulações multifísicas realizadas para essa modelagem serão comparadas de forma qualitativa com os resultados obtidos no experimento realizado no Laboratório de Mecânica de Estruturas (LMEst) da Universidade Federal de Uberlândia, descrito na seção 3.1.

A tensão gerada nos terminais da bobina utilizada no experimento foi multiplicada quatro vezes por um quadruplicador de tensão analógico. O sinal de saída desse dispositivo foi conectado a um osciloscópio digital, possibilitando a visualização da tensão gerada na bobina, como pode ser observado na figura 38.

Figura 38 – Tensão obtida no protótipo reproduzida no *display* do osciloscópio.

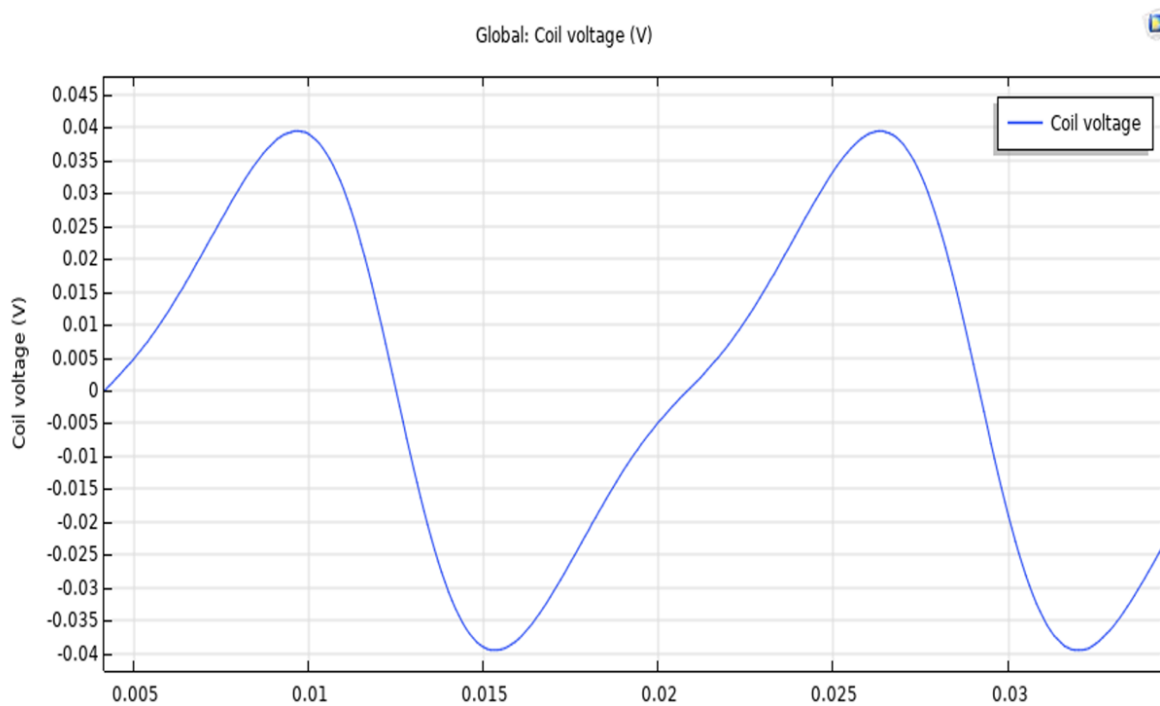


Fonte: Elaborada pelo autor.

No canto superior esquerdo dessa figura é possível observar que o osciloscópio foi configurado para que cada divisão da grade do *display* represente uma tensão de $100mV$. Dessa forma, constata-se que o sinal gerado, multiplicado quatro vezes, resultou em um pico de tensão de aproximadamente $250mV$. Desconsiderando o multiplicador de tensão, pode-se afirmar que a tensão obtida nos terminais da bobina para esse experimento foi em torno de $62.5mV$.

Para o modelo simulado foi obtido o resultado apresentado na figura 39. Nessa imagem é possível observar que o resultado de tensão obtido sobre os terminais da bobina apresentou um pico de aproximadamente $40mV$. O resultado obtido através da simulação representa 64% do valor obtido no experimento. Comparando as figuras 38 e 39 é possível observar que o formato das tensões obtidas em ambas as análises é parecido, provando que o modelo numérico montado no software COMSOL Multiphysics® foi capaz de reproduzir o comportamento físico do protótipo.

Figura 39 – Tensão obtida na bobina através da simulação realizada.



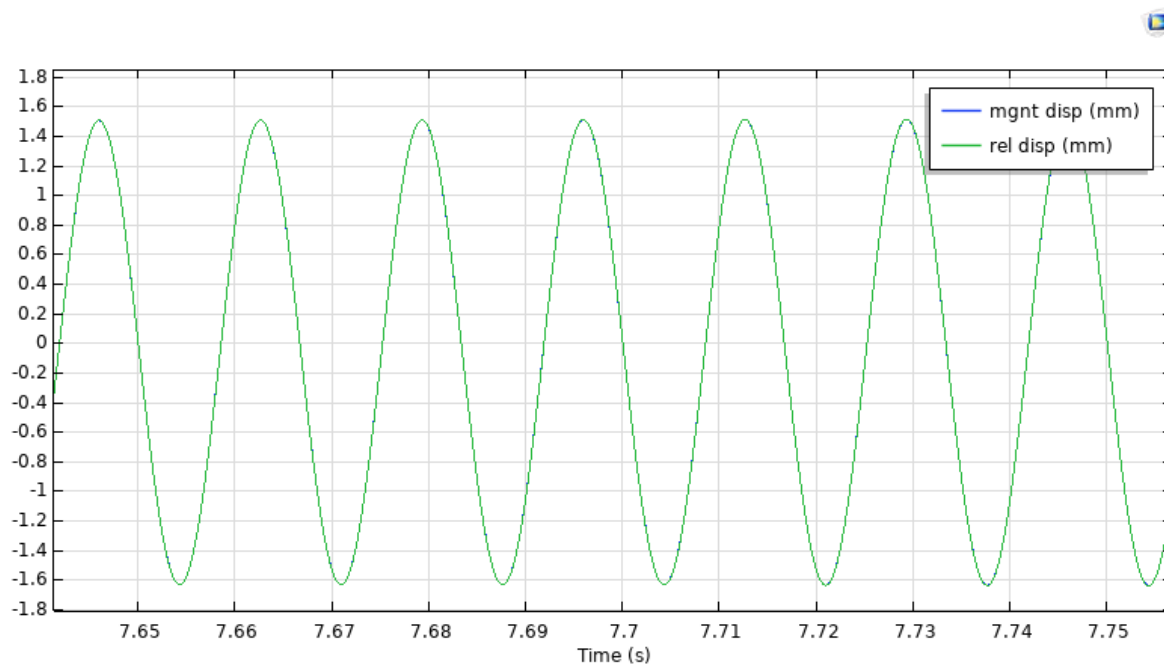
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Segunda Modelagem

A segunda modelagem foi desenvolvida com o objetivo de avaliar o comportamento do software em um modelo complexo, com várias considerações dinâmicas e físicas. Nessa modelagem foram acopladas os fenômenos físicos elétrico, magnético e mecânico. Devido à complexidade do modelo foram simulados 8 segundos, que resultaram nas curvas apresentadas nas figuras 40 e 41. É importante destacar que o modelo não chegou ao seu regime de operação

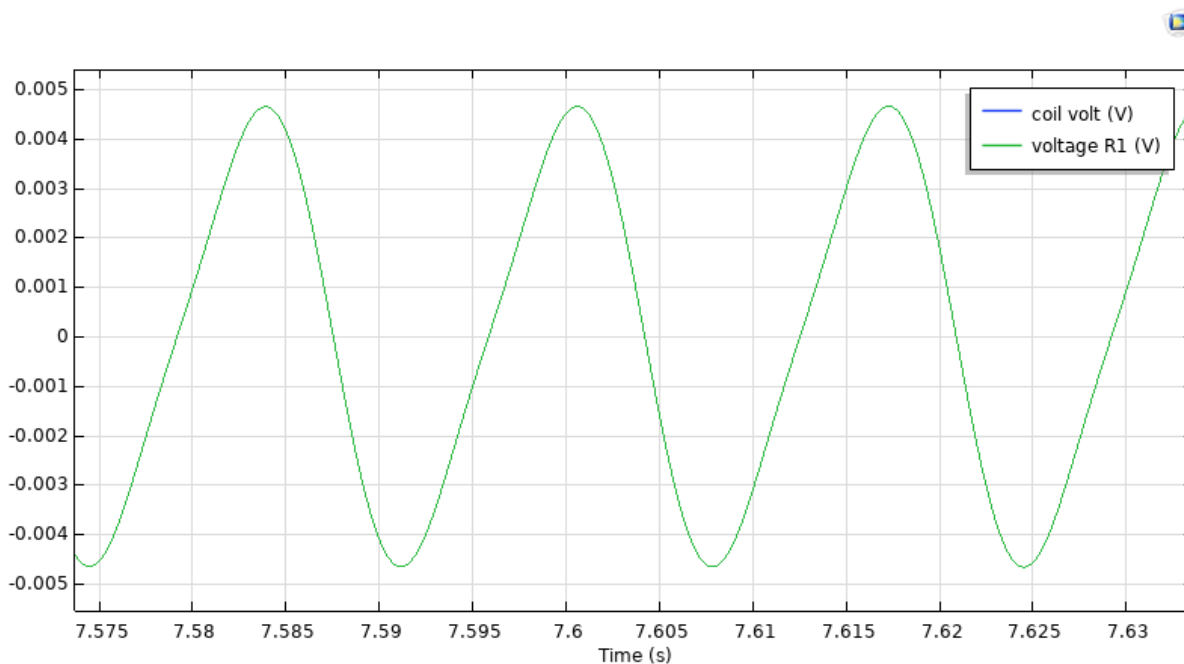
contínua e que foram necessárias aproximadamente duas semanas para obter os resultados apresentados em uma máquina com 16Gb de RAM e processador Intel Core i5[®] de 6 núcleos físicos.

Figura 40 – Deslocamento do ímã representado pela curva azul e deslocamento relativo entre o ímã e a bobina representado pela curva verde.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 41 – Tensão obtida na bobina e na carga resistiva.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura 40 é possível constatar que o deslocamento do ímã e o deslocamento relativo entre a base e o ímã atingiram aproximadamente $1.5mm$ em 7.6 segundos de simulação. Nota-se que a diferença entre o deslocamento do ímã e o deslocamento relativo entre a base móvel e o ímã possuem valores de amplitudes bem próximos. Isso se deve ao fato de que a amplitude do movimento harmônico performedo pela base é muito pequena, na ordem de $1,33\mu m$.

As curvas de tensão apresentadas na figura 41 atingiram picos de aproximadamente $4.8mV$. É possível notar que a componente de não linearidade, que é mais nítida na figura 39, ainda está presente nesse modelo. Dessa forma, pode-se afirmar que o COMSOL Multiphysics[®], apesar das limitações computacionais citadas acima, apresentou boa estabilidade e bons resultados para um modelo complexo com vários fenômenos físicos acoplados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações multifísicas possibilitam a construção de modelos mais fiéis aos modelos reais, quando comparadas às demais metodologias. Essa abordagem é capaz de entregar resultados que, associados à outras ferramentas, permitem a criação de sistemas mais eficientes e otimizados. No contexto abordado nesse trabalho, os regeneradores de energia eletromagnéticos são exemplos de sistemas que precisam entregar performance e maximização energética, devido a suas aplicações típicas, em sistemas nos quais o espaço para alocação desses dispositivos coletores de energia é reduzido.

Nesse sentido, as simulações realizadas no software COMSOL Multiphysics® para os dois exemplos de regeneradores de energia eletromagnético foram capazes de entregar bons resultados. Os acoplamentos entre os fenômenos físicos se mostraram consistentes e estáveis mesmo em modelos mais complexos, como o modelado no segundo exemplo. No primeiro modelo foi possível observar que os resultados obtidos da simulação foram quase iguais aos resultados obtidos experimentalmente, tanto para a amplitude da tensão como para o formato da curva de tensão obtida.

Contudo, é possível observar que a segunda modelagem apresentou limitações computacionais. A complexidade do modelo e as configurações adotadas são fatores que contribuem para essa limitação. Quando comparado ao modelo anterior, esse apresenta vários domínios móveis e domínios deformáveis que precisam ser recalculados em cada iteração do solver.

Portanto, para contornar os problemas computacionais relacionados à segunda modelagem e tornar essa metodologia mais viável, propõe-se para estudos futuros uma otimização da geometria do modelo, a fim de reduzir a complexidade numérica gerada pela deformação da malha e pelos domínios móveis. Associado à isso, um estudo para aprimoramento da malha, com objetivo de reduzir a quantidade de elementos que a compõe, pode trazer maior agilidade à solução do problema.

REFERÊNCIAS

BEKER, L.; ÖZGÜVEN, H. N.; KÜLAH, H. Optimization of an energy harvester coupled to a vibrating membrane. In: ALLEMANG, R.; CLERCK, J. D.; NIEZRECKI, C.; WICKS, A. (Ed.). **Special Topics in Structural Dynamics, Volume 6**. New York, NY: Springer New York, 2013. p. 577–583. ISBN 978-1-4614-6546-1. Citado na página 24.

BELLEVILLE, M.; CANTATORE, E.; FANET, H.; FIORINI, P.; NICOLE, P.; PELGROM, M.; FIGUET, C.; HAHN, R.; Van Hoof, C.; VULLERS, R.; TARTAGNI, M. **Energy autonomous systems : future trends in devices, technology, and systems**. [S.l.]: CATRENE, 2009. ISBN 978-88-904-399-0-2. Citado na página 25.

BOUENDEU, E. **Printed Circuit Board-based Electromagnetic Vibration Energy Harvesters**. Der Andere Verlag, 2010. (Microsystem simulation, design and manufacture). ISBN 9783862470518. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=BjY6YAAACAAJ>>. Citado na página 26.

CHALLA, V. R.; CHENG, S.; ARNOLD, D. P. The role of coupling strength in the performance of electrodynamic vibrational energy harvesters. **Smart Materials and Structures**, IOP Publishing, v. 22, n. 2, p. 025005, dec 2012. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/22/2/025005>>. Citado nas páginas 27, 28 e 32.

CHENG, S.; WANG, N.; ARNOLD, D. P. Modeling of magnetic vibrational energy harvesters using equivalent circuit representations. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 17, n. 11, p. 2328, oct 2007. Disponível em: <<https://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/17/11/021>>. Citado na página 27.

COMSOL. **COMSOL Multiphysics Reference Manual 5.5**. [S.l.], 2020. Disponível em: <https://doc.comsol.com/5.5/doc/com.comsol.help.comsol/COMSOL_ReferenceManual.pdf>. Citado nas páginas 34, 36, 37, 38, 39, 42, 43 e 48.

KEYES, D. E.; MCINNES, L. C.; WOODWARD, C.; GROPP, W.; MYRA, E.; PERNICE, M.; BELL, J.; BROWN, J.; CLO, A.; CONNORS, J.; CONSTANTINESCU, E.; ESTEP, D.; EVANS, K.; FARHAT, C.; HAKIM, A.; HAMMOND, G.; HANSEN, G.; HILL, J.; ISAAC, T.; JIAO, X.; JORDAN, K.; KAUSHIK, D.; KAXIRAS, E.; KONIGES, A.; LEE, K.; LOTT, A.; LU, Q.; MAGERLEIN, J.; MAXWELL, R.; MCCOURT, M.; MEHL, M.; PAWLOWSKI, R.; RANGLES, A. P.; REYNOLDS, D.; RIVIÈRE, B.; RÜDE, U.; SCHEIBE, T.; SHADID, J.; SHEEHAN, B.; SHEPHARD, M.; SIEGEL, A.; SMITH, B.; TANG, X.; WILSON, C.; WOHLMUTH, B. Multiphysics simulations: Challenges and opportunities. **The International Journal of High Performance Computing Applications**, v. 27, n. 1, p. 4–83, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/1094342012468181>>. Citado na página 32.

SANTOS, A. F. M. D. **Lagrangian modeling and simulations of mechanical systems constituted by spring-mass and pendulums**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018. Citado nas páginas 30 e 31.

SANTOS, M. P. dos. **Sistema eletrônico energeticamente autônomo com colheita de energia por indução magnética.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015. Citado na página [25](#).