

MESSIAS ALVES PEREIRA NETO

**OTIMIZAÇÃO DE UM REGENERADOR DE ENERGIA
ELETROMAGNÉTICA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

MESSIAS ALVES PEREIRA NETO

**OTIMIZAÇÃO DE UM REGENERADOR DE ENERGIA
ELETROMAGNÉTICA**

Projeto de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **BACHAREL EM ENGENHARIA AERONÁUTICA**.

Orientador: Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Junior

UBERLÂNDIA – MG

2019

MESSIAS ALVES PEREIRA NETO

**OTIMIZAÇÃO DE UM REGENERADOR DE ENERGIA
ELETROMAGNÉTICA**

Projeto de Conclusão de Curso **Aprovado** pelo
corpo docente do Curso de Graduação em Engenharia
Aeronáutica da Universidade Federal de Uberlândia.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Aldemir Aparecido Cavalini Junior – FEMEC/UFU - Orientador

Prof. Dr. Marcus Antonio Viana Duarte – FEMEC/UFU

Dra. Karina Mayumi Tsuruta – FEMEC/UFU

Uberlândia, 19 de dezembro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus por me conceder a vida, saúde, força e sabedoria para superar as dificuldades enfrentadas até chegar aqui.

Aos meus pais e família por todo carinho, amor, cuidado e incentivo nas horas difíceis, obrigado por sempre permanecerem comigo, posso dizer que sem vocês eu não conseguiria ter chegado até este momento.

Agradeço a todos meus professores por me proporcionarem conhecimento, dedicarem seu tempo ao ensino, não só a formação em âmbitos acadêmicos, mas também moral e de caráter. De modo especial ao meu orientador pela confiança, apoio e dedicação.

A Universidade por proporcionar a oportunidade de realizar o curso e toda estrutura para crescer em conhecimento nas diversas áreas do mesmo. Bem como ao Laboratório de Mecânica dos Fluidos (MFLab) que me colheu como aluno de iniciação científica em uma experiência incrível.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos, a 10ª turma de Engenharia Aeronáutica da UFU, Equipe de Propulsão e Tecnologia Aeroespacial (EPTA), Programa de Educação Tutorial (PETMEC), GOU Dominus, GOJ BETEL e tantos outros, por proporcionarem momentos inesquecíveis ao longo destes anos de graduação, cada um agregou um pouco no que sou hoje. Todo empenho e dedicação com certeza valerão apenas a cada um.

RESUMO

O avanço tecnológico traz consigo uma elevada demanda por energia elétrica, porém o uso desordenado deste recurso causa grandes implicações econômicas e ambientais. Economicamente, o elevado gasto de energia causa necessidade de maior investimento na geração da mesma, enquanto que ambientalmente, o impacto negativo pela construção de novas usinas geradoras de eletricidade é muito alto. Com isso, uma das grandes preocupações sociais da atualidade é o uso racional dos recursos energéticos, assim surge um ramo de pesquisa que visa tornar os sistemas eletricamente mais autônomos e uma das alternativas mais estudadas são os denominados *harvesters*, coletores de energia, que convertem a energia disponível no ambiente em energia elétrica útil. Baseado nos princípios tratados por Faraday, uma das técnicas de aplicação dos *harvesters* se dá pela conversão eletromagnética, podendo ser realizada por meio de um sistema de vibração, no qual um ímã permanente vibrando gera uma variação de campo magnético ao redor de uma bobina, produzindo uma corrente induzida e conseqüentemente gerando energia elétrica, este dispositivo é o objeto de estudo do presente trabalho. O projeto consiste em otimizar este sistema de vibração a fim de que sua operação cumpra pré-requisitos definidos pela implementação do dispositivo em um sensor de monitoramento remoto desenvolvido pela faculdade, para isso, a variável trabalhada é a rigidez do modelo. Assim, pode-se atingir uma rigidez ótima para o sistema de vibração, verificando-se um trabalho correto do otimizador e atingindo o comportamento desejado do sistema.

Palavras-chave: Coletores de Energia. Sistemas Autônomos. Conversão Eletromagnética. Sistema de vibração. Rigidez.

ABSTRACT

The technological improvement increases the demand for energetic sources, which can cause high economics and environments impacts when randomly used. A big economic investment is necessary due to the amount of energy needed, this also negatively impacts the environment, as new power plants will be built. Therefore, a main society worry is the rational use of energetic sources, so new researches outcome to automatize electric systems and harvesters, also known as energy collectors, are one of the most studied ones, they convert one of the unused energies of the systems in an electrical energy. Using the Faraday principles, one of the technics of harvesters applications is due to the conversion of a vibration system into electric-magnetic energy. A vibrating permanent magnet creates a differential in the magnetic field of a coil, which produces an induced current and consequently electric energy, this will be the object of study during this work. Willing to optimize this vibration system into a remote monitoring sensor produced by the university, therefore, the parameter to optimize the vibration will be the model stiffness. Finally, an optimum rigidity for the vibration system can be achieved, the optimizer to work correctly and observing the desired system behavior.

Keywords: Energy Collectors. Automate Systems. Electric-Magnetic Conversion. Vibration System. Stiffness.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Esquema de distribuição de energia.....	8
Figura 2.1 - Diagrama representativo de um SEEA.	11
Figura 2.2 - Diagrama representativo de um sistema de colheita de energia.	12
Figura 2.3 - Gráfico representativo da aplicação de uma força periódica harmônica.	14
Figura 2.4 - Gráfico representativo da aplicação de uma força aleatória.	15
Figura 2.5 - Sistema massa - mola de um grau de liberdade.....	16
Figura 2.6 - Algoritmo Genérico representativo do método da evolução diferencial.	21
Figura 3.1 - CAD da mola do sistema proposto.	23
Figura 3.2 - CAD da base do sistema proposto.	23
Figura 3.3 - CAD do frame do sistema proposto.	23
Figura 3.4 - CAD do ímã do sistema proposto.	23
Figura 3.5 - CAD da bobina do sistema proposto.	23
Figura 3.6 - CAD da base da bobina do sistema proposto.	23
Figura 3.7 - CAD do sistema proposto montado.....	24
Figura 3.8 - Desenho do sistema simplificado.	26
Figura 3.9 - Seleção da análise transiente no Workbench.	27
Figura 3.10 - Caixa de análise.	28
Figura 3.11 - Importação da geometria.	28
Figura 3.12 - Definição da geometria concluída.	29
Figura 3.13 - Representação da definição dos materiais.	29
Figura 3.14 - Inserção de novos materiais a biblioteca do Ansys.	30
Figura 3.15 - Conexão Body-Body do tipo fixação entre frame e ímãs.....	31
Figura 3.16 - Conexão Body-Ground do tipo translação para o frame.	32
Figura 3.17 - Conexão Body-Body do tipo mola entre base e frame.....	33
Figura 3.18 - Configuração da malha do sistema.....	35
Figura 3.19 - Modelo da análise concluído.....	36
Figura 3.20 - Configurações de análise.	36
Figura 3.21 - Aceleração aplicada como uma função harmônica.....	37
Figura 3.22 – Vetor aceleração aplicado a todos os corpos.	37
Figura 3.23 - Função harmônica aplicada.....	38
Figura 3.24 - Seleção da aplicação da fixação.	39
Figura 3.25 - Fixação da base (detalhe em azul).....	39
Figura 3.26 - Fixação das bases de bobinas.....	40
Figura 3.27 - Fixação das bobinas.	40
Figura 3.28 - Análise com as configurações aplicadas.	41
Figura 3.29 - Seleção da solução do problema.	41
Figura 3.30 - Análise concluída.	42
Figura 3.31 - Parte do arquivo exportado com as configurações de análise na linguagem APDL.....	42
Figura 3.32 - Parâmetros iniciais do código de otimização.	43
Figura 3.33 - Montagem do Arquivo de Input.	44
Figura 3.34 - Código de interface com o ®Ansys APDL para execução do arquivo de input.	44

Figura 3.35 - Arquivo de output gerado.	45
Figura 4.1 - Gráfico da variação da amplitude de vibração.	46
Figura 4.2 - Apresentação da amplitude de vibração ao longo de toda a estrutura.	47
Figura 4.3 - Amplitude de vibração para um ímã qualquer.	47
Figura 4.4 - Detalhes da deformação na Probe.	48

Lista de Símbolos

Fem	Força Eletromotriz (V)
$d\varphi$	Variação de fluxo magnético (Wb)
dt	Derivada temporal (s)
B	Campo Magnético (Tesla)
t	Tempo (s)
$F(t)$	Função de excitação harmônica qualquer
$P(t)$	Função de excitação harmônica aplicada
F	Amplitude de excitação (N)
ω	Frequência angular (rad)
f	Frequência (Hz)
T	Período de oscilação (s)
M	Massa (kg)
u	Deslocamento (m)
$\dot{u}$	Velocidade de vibração (m/s)
$\ddot{u}$	Aceleração de vibração (m/s ²)
K	Rigidez (N.m)
ω_n	Frequência angular natural (rad)
u_p	Solução particular para a vibração (m)
u_h	Solução homogênea para a vibração (m)
A	Amplitude de vibração (m)
A_1 e A_2	Condições iniciais do problema
v	Indivíduo da população do otimizador
v_{novo}	Indivíduo modificado da população do otimizador
v_{novaG}	Indivíduo da nova geração da população do otimizador
v_x e v_y	Indivíduos calculados aleatoriamente
S	Ponderação da mutação
CR	Taxa de recombinação
r	Valor aleatório
x	Indivíduo do cruzamento

SUMÁRIO

CAPITULO I.....	8
INTRODUÇÃO	8
1.1 OBJETIVOS	10
CAPITULO II	11
FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1 SISTEMAS ELÉTRICOS ENERGETICAMENTE AUTÔNOMOS.....	11
2.2 ENERGY HARVESTING.....	12
2.2.1 Colheita de energia por indução magnética (CEIM)	12
2.3 VIBRAÇÕES MECÂNICAS SISTEMA DE 1 GRAU DE LIBERDADE	13
2.3.1 Classificação das vibrações mecânicas.....	15
2.3.2 Vibrações harmônicas em sistema com 1 grau de liberdade.....	16
2.4 OTIMIZAÇÃO – MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL	19
2.4.1 População inicial de indivíduos	19
2.4.2 Mutação	20
2.4.3 Cruzamento ou crossover	20
2.4.4 Seleção	20
CAPITULO III	22
METODOLOGIA	22
3.1 PROBLEMA PROPOSTO.....	22
3.1.1 Geometria.....	22
3.1.2 Considerações avaliadas.....	25
3.1.3 Simplificação da estrutura.....	25
3.2 SIMULAÇÃO ®ANSYS	26
3.3 OTIMIZAÇÃO	43
3.3.1 Dados de Entrada.....	43
3.3.2 Interface ®Matlab-®Ansys	43
3.3.3 Otimizador.....	45
CAPITULO IV	46
RESULTADOS.....	46
CAPITULO V	49

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	49
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE I	51
APÊNDICE II	52

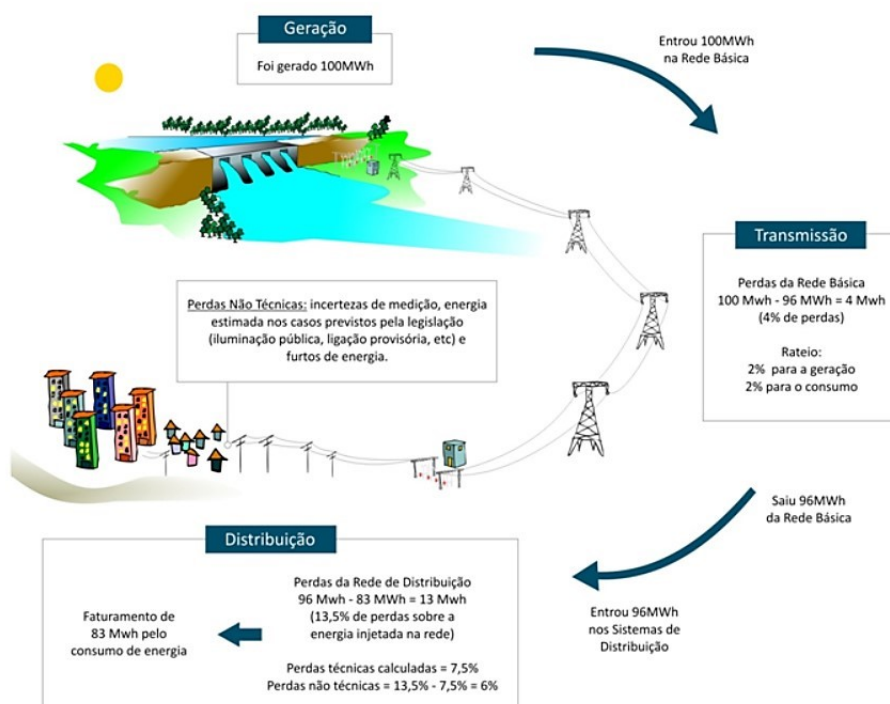
CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas pode-se observar um grande aumento da incorporação de novas tecnologias em todos os ramos da sociedade, serviços públicos e/ou privados têm adotado, cada vez mais, ferramentas tecnológicas em suas operações, e com isso, enquanto o avanço tecnológico segue acelerado, a demanda por energia elétrica se torna cada vez maior, sendo assim, a sua geração é mais requisitada. Porém, o uso desordenado dos recursos energéticos causa grandes implicações econômicas e ambientais.

Economicamente, o investimento na construção de novas usinas geradoras de energia e na logística de distribuição é muito elevado, devido principalmente as grandes estruturas necessárias e as constantes perdas de energia, seja na sua transformação ou distribuição. Um exemplo destas perdas pode ser observado na figura (1.1) tirada do site da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Figura 1.1 - Esquema de distribuição de energia.



Ambientalmente, para as principais fontes de energia vistas atualmente, como a hidrelétrica, termoeletrica, nuclear e combustíveis derivados do petróleo, o impacto ao meio ambiente é muito alto, alterando o ecossistema local, tendo impactos no efeito estufa, poluição do ar e outros.

A partir do exposto, uma das grandes preocupações sociais e empresariais da atualidade é o uso racional dos recursos energéticos, bem como a diminuição da necessidade dos mesmos. Neste contexto surge um ramo de pesquisa que visa tornar os sistemas eletricamente mais autônomos, conhecidos como Sistemas Elétricos Energeticamente Autônomos (SEEs).

Nos últimos anos uma das formas alternativas de fonte energética mais estudadas, para complementar ou até mesmo substituir os sistemas de duração finita, é a técnica conhecida como colheita de energia (dos SANTOS, 2015), a qual é a proposta de utilização no, chamado, regenerador de energia deste trabalho.

O conceito da colheita de energia (*harvesting energy* em inglês) se refere em utilizar a energia disponível no ambiente, convertendo-a em energia elétrica útil para alimentar pequenos dispositivos eletrônicos (BEEBY e WHITE, 2010). A conversão em energia elétrica pode partir de diversas fontes presentes no ambiente, sendo elas, térmica, eólica, mecânica, luminosa e eletromagnética.

A conversão de energia por indução magnética (CEIM), é a técnica na qual a geração de energia elétrica é baseada na Lei de Faraday, que diz que uma tensão induzida aparece em um condutor quando situado em um campo magnético variável. A técnica pode ser implementada, dentre outras formas, pelo chamado em inglês de *electromagnetic vibration harvester*, que consiste em um dispositivo formado por uma bobina e um ímã permanente, no qual uma destas partes é móvel e ao se movimentar gera um campo magnético variável e induz uma tensão, gerando a energia elétrica (BOUENDEU, GREINER, SMITH E KORVINK, 2009).

Esta técnica surgiu principalmente para aplicações em redes de sensores sem fio, pois uma das grandes preocupações na implementação destes sensores é sua vida útil limitada pela sua fonte de alimentação. A conversão de energia surge como alternativa para proporcionar autonomia e redução de custos, prolongando a vida útil destes componentes.

Portanto, com o exposto, vê-se com grande entusiasmo a aplicação dos métodos de regeneração de energia, e neste trabalho é proposto a análise e

otimização de um sistema de conversão de energia por indução magnética acoplado a um sensor remoto, tendo como base a vibração de um ímã permanente.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho deriva-se do projeto, realizado pela faculdade, de desenvolvimento de um sistema de monitoramento contínuo de condição de equipamentos dinâmicos full wireless (SMCCED-FW), e tem por objetivo geral, analisar a implementação do dispositivo de colheita de energia por indução magnética, proposto pela equipe do projeto, no sensor desenvolvido, a fim de torná-lo um sistema autônomo.

Tendo como objetivos específicos do trabalho, a otimização do sistema mecânico de vibração do ímã permanente, alterando principalmente a rigidez do equipamento com a finalidade de garantir que a vibração do sistema será suficiente para a geração de energia e irá operar de acordo com as limitações do projeto, amplitude máxima de $0,001\text{ m}$ e frequência de 60 Hz .

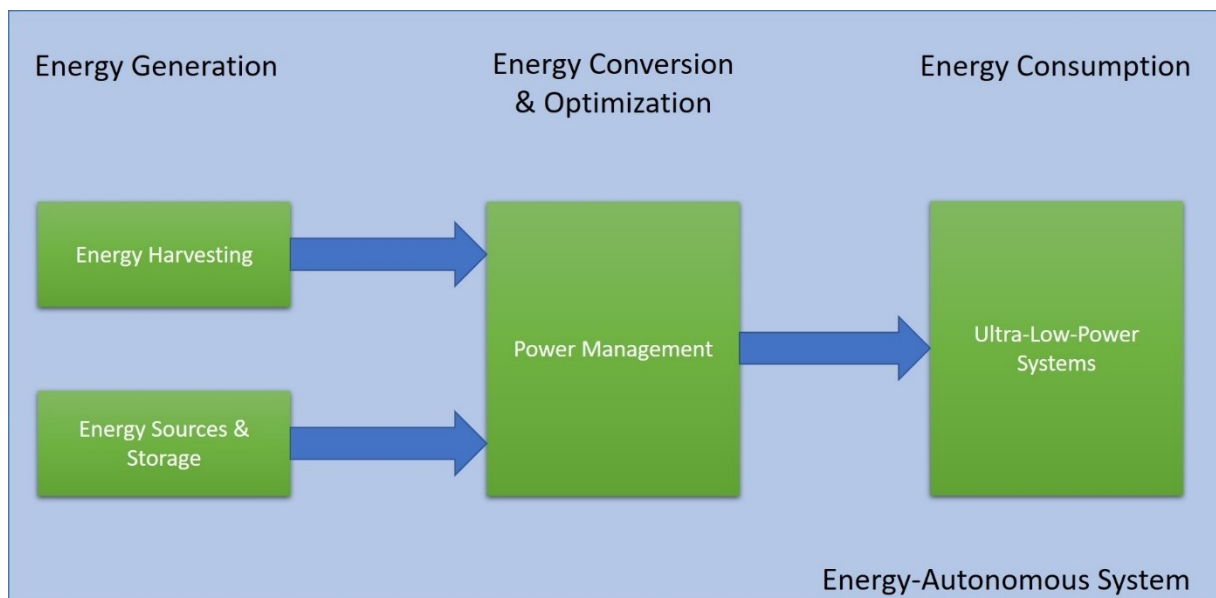
CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 SISTEMAS ELÉTRICOS ENERGETICAMENTE AUTÔNOMOS

Os sistemas elétricos energeticamente autônomos (SEEA) tratam-se de sistemas que operam sem conexão física a uma rede de energia, de acordo com Tartagni (2009) o sistema pode ser representado conforme a figura (2.1).

Figura 2.1 - Diagrama representativo de um SEEA.



Sendo assim, divide-se em 3 partes:

Geração de Energia: pode ser realizada por intermédio de uma fonte energética, como pilhas e baterias, são elementos de armazenamento e fornecimento de energia. Porém utilizar unicamente estas fontes portáteis de energia implica em limitar a vida útil do sistema, pois possuem uma energia finita e comumente precisarão ser trocadas ou recarregadas. Uma das formas de contornar esse limitante é a utilização de um *energy harvesting*, a qual terá a função de coletar energia a partir de fontes do ambiente e realimentar continuamente o sistema.

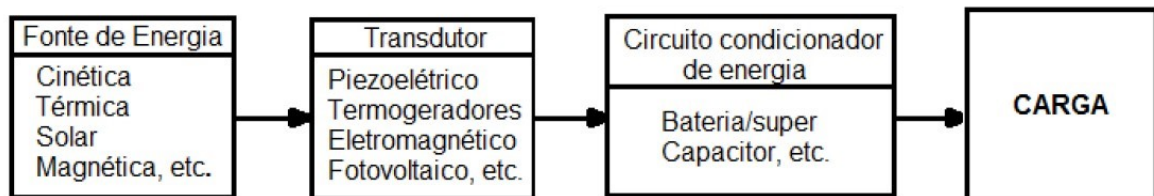
Conversão de energia e otimização: parte do sistema que possui a função de garantir que a energia disponível é admissível no sistema e capaz de suportá-lo.

Consumo de energia: etapa correspondente ao sistema em si, realizando suas funções de projeto, como o monitoramento e armazenamento de dados.

2.2 ENERGY HARVESTING

A colheita de energia utiliza-se das formas de energia presentes no ambiente, transformando-as em energia elétrica utilizável pelo sistema, sendo esta potencialmente infinita. Um sistema típico de colheita de energia é formado por 4 componentes: A fonte de energia; um transdutor; um circuito condicionador de energia, que garante que a energia gerada é capaz de alimentar o quarto componente o qual é o próprio sistema proposto (DOS SANTOS, 2015), estes componentes são ilustrados na figura (2.2).

Figura 2.2 - Diagrama representativo de um sistema de colheita de energia.



A energia elétrica gerada pode ser resultado da conversão de diversas outras formas de energia presentes na natureza, como a térmica, mecânica, magnética e outras. A fonte energética do conversor de energia influencia diretamente na montagem do sistema, seus componentes e seu desempenho em função da densidade de potência. Uma das fontes energéticas é a magnética, por meio da indução magnética, este tipo de colheita recebe o nome de CEIM (Colheita de Energia por Indução Magnética).

2.2.1 Colheita de energia por indução magnética (CEIM)

As CEIMs são baseadas no conceito de eletromagnetismo, essa teoria foi desenvolvida por Faraday, o qual motivado pelos estudos de Oersted, nos quais demonstraram a influência da passagem de corrente elétrica em um condutor com as direções do campo magnético produzido por um ímã, tendendo a se alinharem. Faraday desta forma se esforçou para comprovar que do mesmo modo que uma corrente elétrica geraria um campo magnético, o contrário também seria verdadeiro.

Após anos de estudo, Faraday comprovou que com a variação de um campo magnético ocorre o surgimento de uma tensão induzida, deduzindo assim a indução magnética, expressa pela Lei de Faraday exposta na equação (01).

$$Fem = -\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint_S B \cdot dS \quad (01)$$

A lei da indução de Faraday, mostra como a intensidade da força eletromotriz induzida é igual a variação do campo magnético em função do tempo. Sendo uma das 4 equações de Maxwell para o eletromagnetismo.

2.3 VIBRAÇÕES MECÂNICAS SISTEMA DE 1 GRAU DE LIBERDADE

A vibração mecânica é definida como o movimento de um corpo rígido em torno de uma posição de equilíbrio, sendo um movimento periódico provocado, por exemplo, pela atuação de forças externas em sua base ou de choques com outros corpos (CORREIA, 2007), as chamadas forças de excitação, que podem ser de diferentes tipos, os principais são:

Força Harmônica: É a forma mais simples e comum, sendo escrita pela equação (02).

$$F(t) = F \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (02)$$

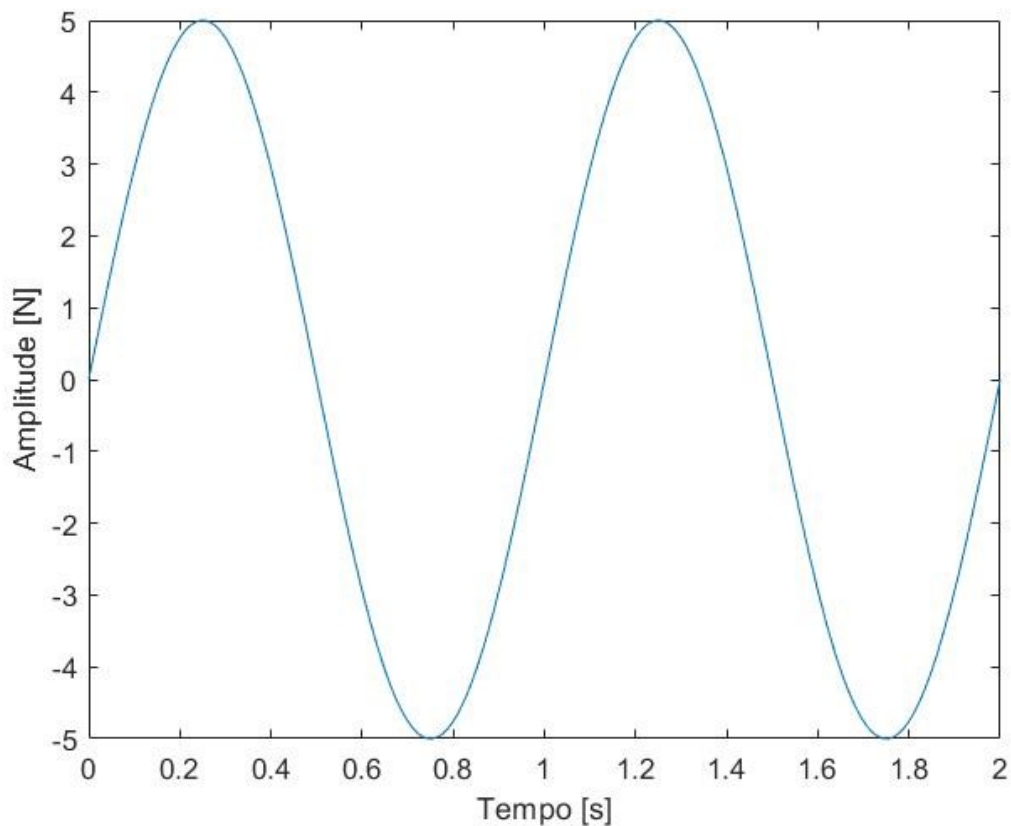
Sendo F a amplitude da excitação e ω a frequência de excitação em rad/s . A frequência também é comumente descrita em hertz (Hz), a qual recebe a denominação f e pode ser encontrada utilizando a equação (03).

$$f = \frac{1}{T} \quad (03)$$

Onde T é o período de vibração, ou seja, o tempo necessário para se completar um ciclo do movimento. A relação entre as frequências é dada pela equação (04). E a figura (2.3) mostra o comportamento gráfico de uma excitação harmônica.

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \omega \quad (04)$$

Figura 2.3 - Gráfico representativo da aplicação de uma força periódica harmônica.

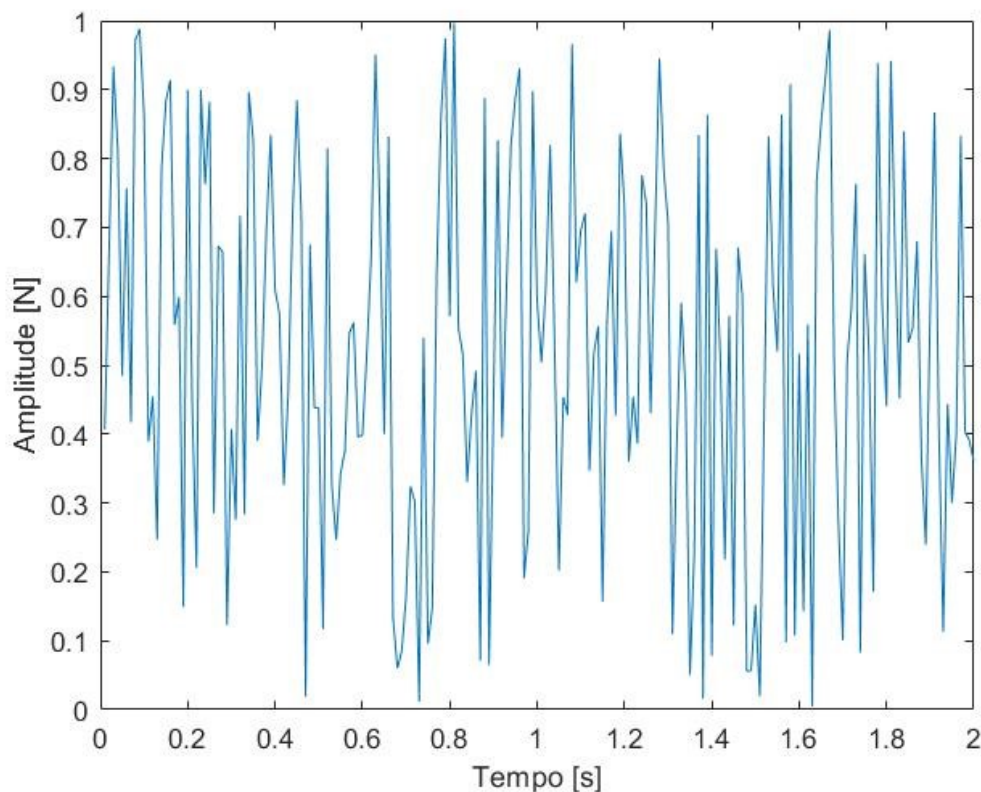


Força Periódica não harmônica: A força periódica é caracterizada por uma excitação que acontece repetidamente por intervalos de tempo e pode ser formulada por um somatório de funções harmônicas.

Força Impulsiva: Este tipo é o observado em explosões e impacto de corpos, nos quais ocorre uma grande excitação em um período curto de tempo, e posteriormente o sistema tende a se equilibrar novamente.

Força aleatória: São as forças de excitação que não possuem um comportamento definido, como expresso na figura (2.4).

Figura 2.4 - Gráfico representativo da aplicação de uma força aleatória.



2.3.1 Classificação das vibrações mecânicas

As vibrações podem ser classificadas de diferentes maneiras, variando de acordo com a excitação sofrida pelo sistema, o amortecimento e o deslocamento do mesmo.

1. Devido à excitação

- Vibrações livres: São aquelas cujo o movimento se mantém apenas devido as forças de restituição do sistema à condição de equilíbrio;
- Vibrações forçadas: São as que sofrem a aplicação de uma ação externa variável com o tempo.

2. Devido ao amortecimento

- Vibrações amortecidas: São aquelas em que os sistemas possuem efeitos amortecedores, como o atrito;
- Vibrações não amortecidas: São as vibrações em sistemas nos quais se despreza qualquer efeito retardatário, um exemplo deste efeito é o atrito.

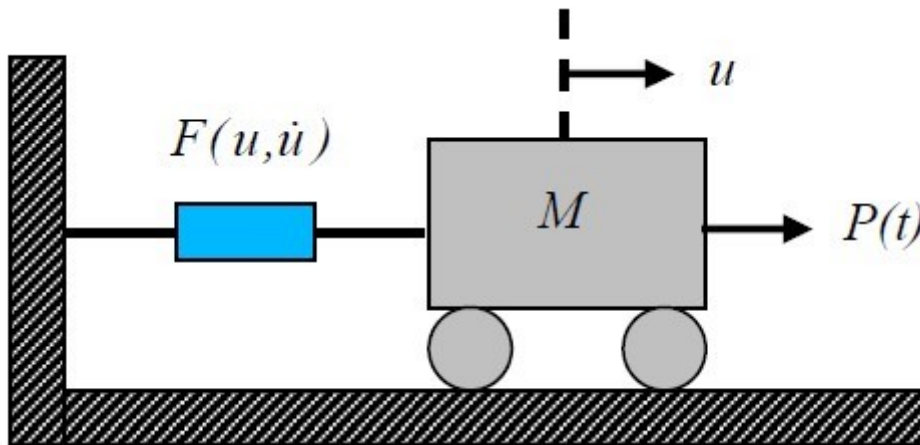
3. Devido ao deslocamento

- Vibrações retilíneas: Vibrações com movimentação apenas em linha reta, translação.
- Vibrações torcionais: São aquelas cujo existe um movimento de torsão em relação ao eixo de referência.
- Vibrações combinadas: Quando os movimentos retilíneos e torcionais são combinados.

2.3.2 Vibrações harmônicas em sistema com 1 grau de liberdade

Os graus de liberdade de um sistema é o número de coordenadas cinematicamente independentes que são necessárias para descrever o movimento do corpo em qualquer instante de tempo (da Silva, 2009). Assim no sistema de 1 grau de liberdade sua vibração se dá em uma única direção, podendo ser representado por um sistema massa-mola simples com movimento em uma única direção (figura (2.5)).

Figura 2.5 - Sistema massa - mola de um grau de liberdade.



A equação do movimento para o sistema massa-mola sem amortecedor com 1 grau de liberdade e ação de uma força de excitação é dada pela equação (05).

$$M\ddot{u} + ku = P(t) \quad (05)$$

Sendo M a massa do sistema, K a rigidez, u e $\ddot{u}$ o deslocamento e a aceleração, respectivamente. A equação (06) representa a excitação ($P(t)$) de uma carga harmônica com amplitude F e frequência angular ω .

$$P(t) = F \cos(\omega t) \quad (06)$$

Com isso, substituindo na equação (05) e manipulando-a encontra-se as equações (07) e (08).

$$M\ddot{u} + ku = F \cos(\omega t) \quad (07)$$

$$\ddot{u} + \frac{k}{M}u = \frac{F}{M} \cos(\omega t) \quad (08)$$

A equação (9) expressa a frequência natural do sistema ω_n .

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{M}} \quad (09)$$

Agora, substituindo a frequência natural na solução do problema tem-se,

$$\ddot{u} + \omega_n^2 u = \frac{F}{M} \cos(\omega t). \quad (10)$$

A equação (10) é uma equação diferencial ordinária não homogênea que pode ser resolvida utilizando o método dos coeficientes a determinar. O método consiste em dividir a solução em uma solução particular da equação não homogênea ($u_p(t)$) e uma geral da equação homogênea associada ($u_h(t)$), sendo o deslocamento descrito pela equação (11),

$$u(t) = u_p(t) + u_h(t). \quad (11)$$

A solução homogênea, $u_h(t)$, equivale a solução caso o sistema fosse livre, ou seja, quando $P(t)$ é igual a 0, sendo o termo transitório gerado pela resposta livre, equação (12). Ou seja, é a mesma para o caso de movimento livre não amortecido, onde A_1 e A_2 são constantes do sistema calculados em sua condição inicial.

$$u_h = A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t, \quad (12)$$

E u_p é uma resposta em regime permanente que fisicamente segue $P(t)$.

As equações (13), (14) e (15) representam um caso particular do sistema, a ser analisado.

$$u(t) = A \cos \omega t \quad (13)$$

$$\dot{u}(t) = -A * \omega * \sin \omega t \quad (14)$$

$$\ddot{u}(t) = -A * \omega^2 * \cos \omega t \quad (15)$$

A solução desse sistema é demonstrada pela equação (16).

$$m(-A\omega^2 \cos \omega t) + k(A \cos \omega t) = F \cos \omega t \quad (16)$$

Já a equação (17) apresenta a formulação para a amplitude de vibração A , quando isolada em (16).

$$A = \frac{F}{k - m\omega^2} . \quad (17)$$

Assim, utilizando o método para solução da EDO, sabe-se que u_h é a solução para a condição do sistema livre e u_p é formulado pela equação (18).

$$u_p = A * \cos(\omega t)$$

$$u_p = \frac{F}{k - m\omega^2} \cos(\omega t). \quad (18)$$

Aplicando a equação (11), o deslocamento do corpo pode ser descrito na equação (19).

$$u = A_1 \sin \omega_n t + A_2 \cos \omega_n t + \frac{F}{k - m\omega^2} \cos \omega t \quad (19)$$

Realizando a análise para as condições iniciais em $t = 0$, onde:

$$u(0) = u_0 \text{ e } \dot{u}(0) = \dot{u}_0$$

Os valores de A_1 e A_2 , são calculados pelas equações (21) e (22).

$$u_0 = A_2 + \frac{F}{k - m\omega^2} \rightarrow A_2 = u_0 - \frac{F}{k - m\omega^2} \quad (21)$$

$$\dot{u}_0 = \omega_n A_1 \rightarrow A_1 = \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \quad (22)$$

Assim, a equação do movimento final do sistema é dada pela equação (23).

$$u = \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \text{sen} \omega_n t + \left(u_0 - \frac{F}{k - m\omega^2} \right) \cos \omega_n t + \frac{F}{k - m\omega^2} \cos \omega t \quad (23)$$

Simplificando chega-se na equação (24).

$$u = \frac{\dot{u}_0}{\omega_n} \text{sen} \omega_n t + \left(u_0 - \frac{\frac{F}{m}}{\omega_n^2 - \omega^2} \right) \cos \omega_n t + \frac{\frac{F}{m}}{\omega_n^2 - \omega^2} \cos \omega t. \quad (24)$$

2.4 OTIMIZAÇÃO – MÉTODO DE EVOLUÇÃO DIFERENCIAL

A otimização matemática refere-se ao estudo de um problema no qual se pretende minimizar ou maximizar a função do sistema dinâmico em análise. Assim, aplica-se técnicas matemáticas para se encontrar uma “solução ótima”, ou seja, aquela em que se atinge o comportamento desejado do sistema.

O algoritmo de evolução diferencial (em inglês Diferencial Evolution – DE) foi proposto por Rainer Storn e Kenneth Price em 1995 (Storn e Price, 1995) e pode ser descrito como um método de manipulação de “indivíduos” que representam as soluções candidatas do problema (de Araujo, 2016), onde, inspirado em leis da natureza, estas soluções sofrem processos de mutação e cruzamento, gerando novas soluções candidatas, dentre as quais as melhores são selecionadas e o ciclo se repete, formando novas gerações até se obter o resultado “ótimo”.

2.4.1 População inicial de indivíduos

O conjunto inicial de indivíduos dentro do programa de evolução diferencial é escolhido aleatoriamente, buscando cobrir todo o espaço de busca do problema. Assim, é fornecido ao algoritmo o tamanho da população (NP) e uma função randômica seleciona NP valores candidatos a solução do problema, que estejam dentro do intervalo de busca.

2.4.2 Mutação

Na mutação cada indivíduo v é modificado formando um novo indivíduo v_{novo} , essa modificação se dá pela adição de uma diferença ponderada entre dois outros indivíduos aleatórios (v_x e v_y), representado pela equação (25).

$$v_{novo,i} = v + S(v_x - v_y) \quad (25)$$

O parâmetro S é a ponderação da mutação, o qual é um input do algoritmo.

2.4.3 Cruzamento ou crossover

Afim de aumentar a diversidade dos indivíduos da nova geração uma outra modificação é introduzida ao algoritmo, o cruzamento ou crossover. Nela os membros da população são avaliados através de uma constante pré-definida (CR) e o indivíduo da nova geração é escolhido (x é o indivíduo do cruzamento) pela equação (26).

$$x_i = \begin{cases} v_{novo,i} & \text{se } r \leq CR. \\ v_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (26)$$

Onde o sufixo i representa o número do indivíduo, que está sendo modificado e r , um valor aleatório.

2.4.4 Seleção

Este operador tem por função escolher os melhores indivíduos da população, ou seja, aqueles que se aproximam mais da solução. Para isso, compara-se os resultados da função objetivo aplicada aos indivíduos modificados (que sofreram cruzamento), $f(x_i)$, com a aplicada aos anteriores (da população corrente), $f(v_i)$, e o com melhor resultado é preservado para a próxima geração (v_{novaG}), conforme a equação (27).

$$v_{novaG,i} = \begin{cases} x_i & \text{se } f(x_i) \leq f(v_i) \\ v_i & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (27)$$

A figura (2.6) demonstra um algoritmo que representa de maneira geral o modelo de otimização pelo método da evolução diferencial.

Figura 2.6 - Algoritmo Genérico representativo do método da evolução diferencial.

```

1  % Algoritmo Genérico - Evolução Diferencial
2  % Entrada
3  NP %-> (tamanho da população)
4  F %-> (ponderação da mutação)
5  CR %-> (taxa de recombinação)
6
7  % Algoritmo
8  Random(NP) %-> (Cria a população inicial aleatória com NP valores)"
9  f(v_iG) %-> (Aplica para cada indivíduo a função objetivo, avaliando a população)
10
11  while %condição de parada
12
13      for i=1:NP
14
15          Random(y,x,z) %-> (Seleciona 3 valores aleatórios)
16          v_inovo = v_yG + F(v_xG-v_zG) %-> (Mutação)
17
18          if Random(r) <= CR %-> (Cruzamento)
19
20              u_i = v_inovo
21          else
22              u_i = v_iG
23          end
24
25          if f(u_i) <= f(v_iG) %-> (Seleção)
26
27              v_iG+1 = u_i
28          else
29              v_iG+1 = v_iG
30          end
31      end
32  end
33  %Retorna a solução ótima.

```

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento do estudo proposto foi necessário a utilização de ferramentas computacionais, dentre elas estão:

1. O software de simulação para engenharia, ®Ansys, pelo qual foi simulado o sistema de vibração afim de se obter as amplitudes de oscilação do corpo em função da excitação admitida e da rigidez imposta;
2. O software para cálculo numérico, ®MATLAB, utilizado para realizar a otimização do sistema, com o intuito de encontrar uma amplitude de vibração pré-definida, alterando a rigidez imposta ao problema.

Este capítulo tratará o problema proposto e bem como a metodologia de aplicação e seu desenvolvimento em cada uma das três ferramentas utilizadas.

3.1 PROBLEMA PROPOSTO

3.1.1 Geometria

O dispositivo de energia proposto no presente trabalho é composto por 6 componentes, mola (figura (3.1)), base (figura (3.2)), frame (figura (3.3)), imãs (figura (3.4)), bobinas (figura (3.5)) e base para bobinas (figura (3.6)).

Figura 3.1 - CAD da mola do sistema proposto.

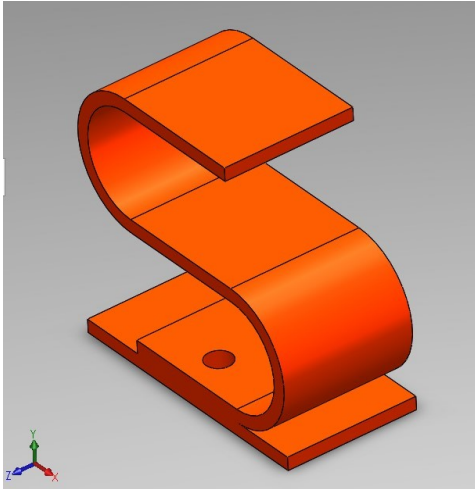


Figura 3.2 - CAD da base do sistema proposto.

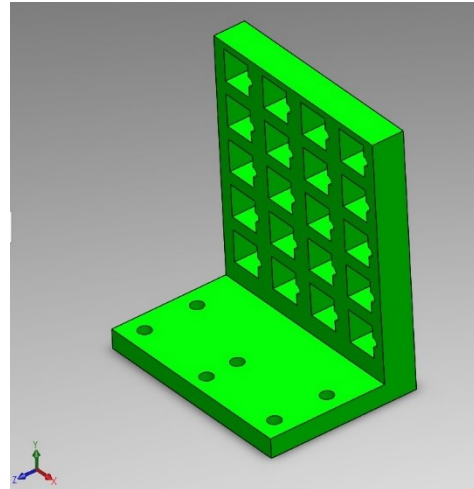


Figura 3.3 - CAD do frame do sistema proposto.

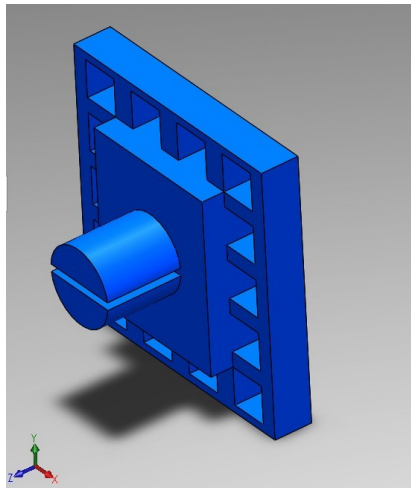


Figura 3.4 - CAD do ímã do sistema proposto.

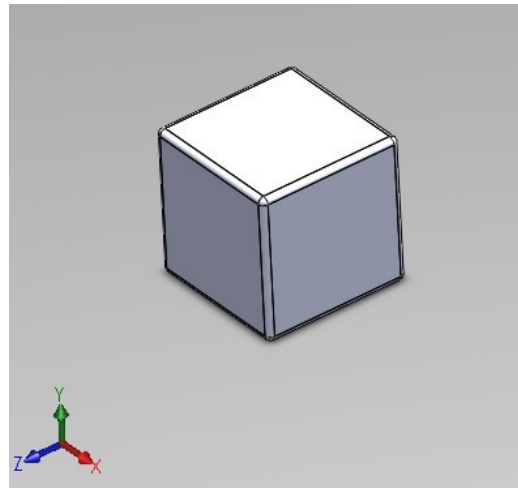


Figura 3.5 - CAD da bobina do sistema proposto.

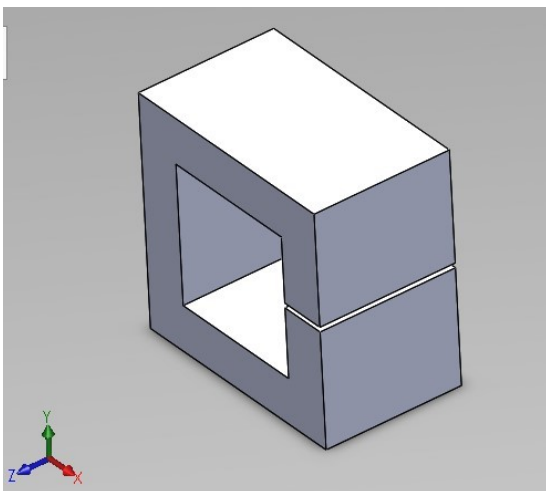
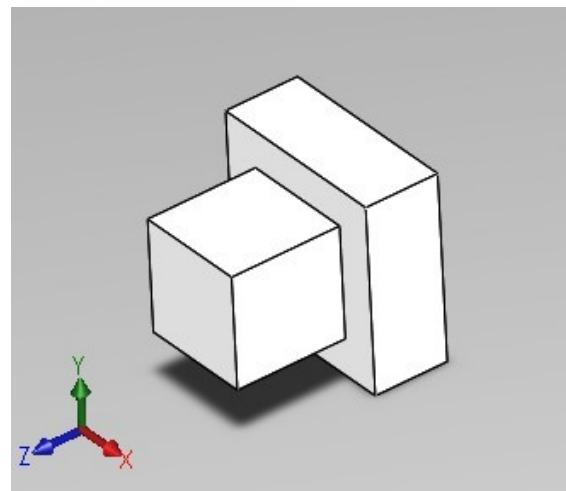
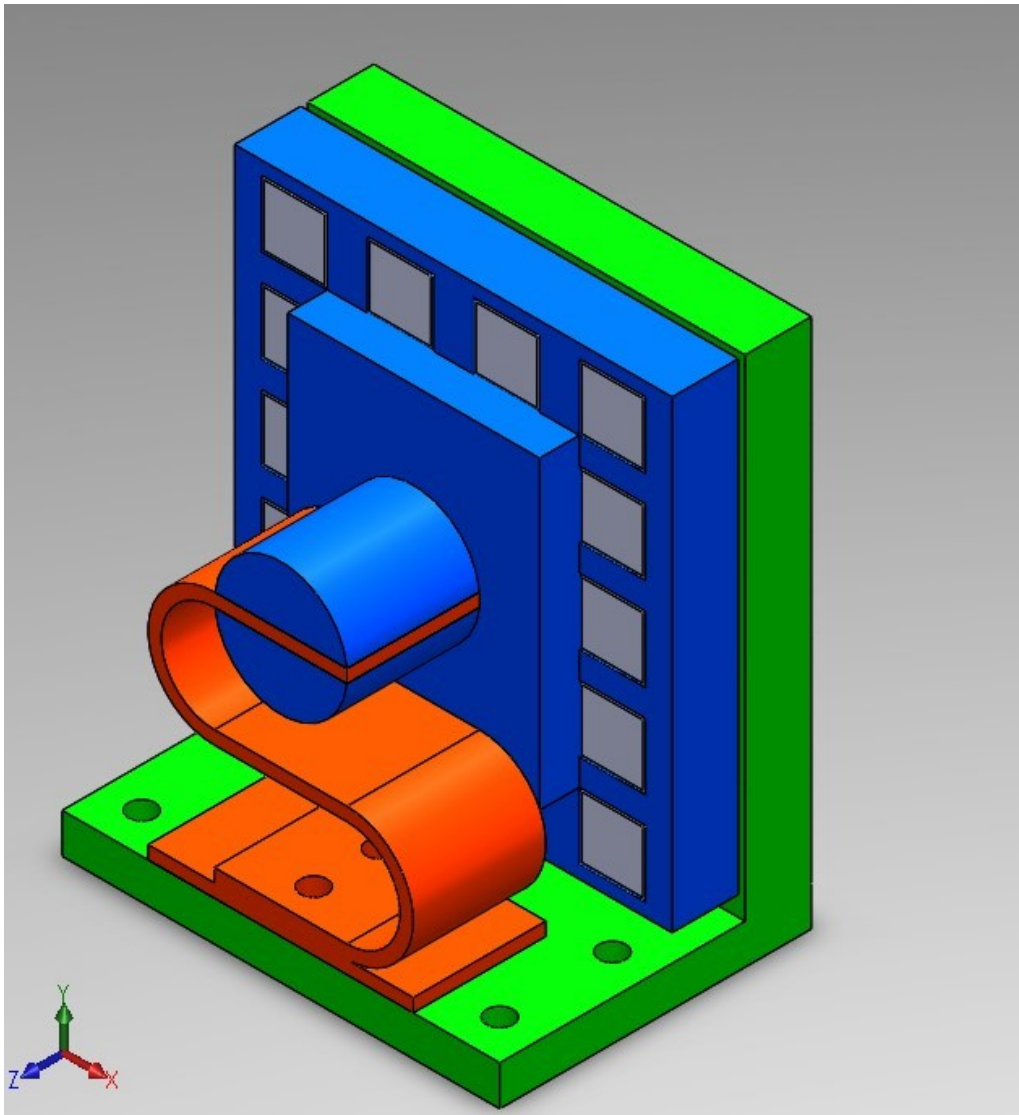


Figura 3.6 - CAD da base da bobina do sistema proposto.



A figura (3.7) mostra o sistema completo, com todas suas partes acopladas.

Figura 3.7 - CAD do sistema proposto montado.



O dispositivo apresenta um volume total de $1,6 \cdot 10^{-5} m^3$, 20 ímãs e 20 bobinas, bem como seus suportes. A mola é projetada para permitir apenas o movimento de translação no eixo y, do conjunto frame-ímãs, garantindo assim um sistema de vibração de 1 grau de liberdade.

3.1.2 Considerações avaliadas

O problema consiste em atingir uma amplitude máxima de vibração do sistema em $0,001\text{ m}$ e uma frequência de vibração de 60 Hz (ou $\omega = 2 * \pi * 60$). Com isso toma-se uma solução particular inicial as equações (27), (28) e (29).

$$u(t) = 0,001 \cos(60 * 2 * \pi * t) \quad (27)$$

$$\dot{u}(t) = -0,001 * (60 * 2 * \pi) * \text{sen}(60 * 2 * \pi * t) \quad (28)$$

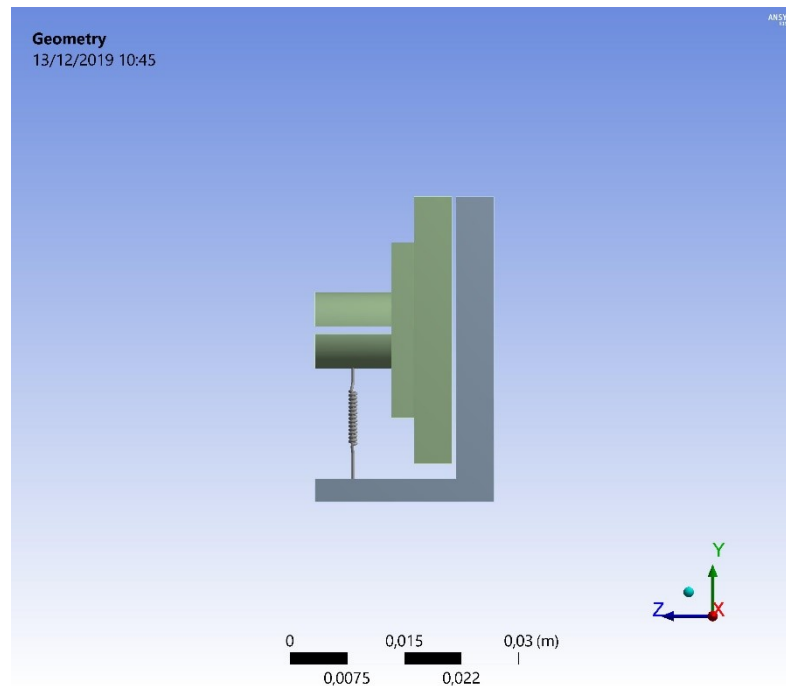
$$\ddot{u}(t) = -0,001 * (60 * 2 * \pi)^2 * \cos(60 * 2 * \pi * t) \quad (29)$$

Assim, a excitação harmônica considerada no sistema, para realização das simulações, será a aceleração $\ddot{u}(t)$ descrita acima.

3.1.3 Simplificação da estrutura

Como o parâmetro a ser otimizado pelo presente trabalho é a rigidez da mola do sistema, optou-se por substituir a mola desenhada em CAD, por uma pré-definida pelo software de simulação, como mostra a figura (3.8), o que facilitou a implementação de diversas simulações alterando a rigidez da mesma. Podendo chegar a uma rigidez ótima e posteriormente aplicar ela no projeto da mola a ser utilizada no sistema real.

Figura 3.8 - Desenho do sistema simplificado.

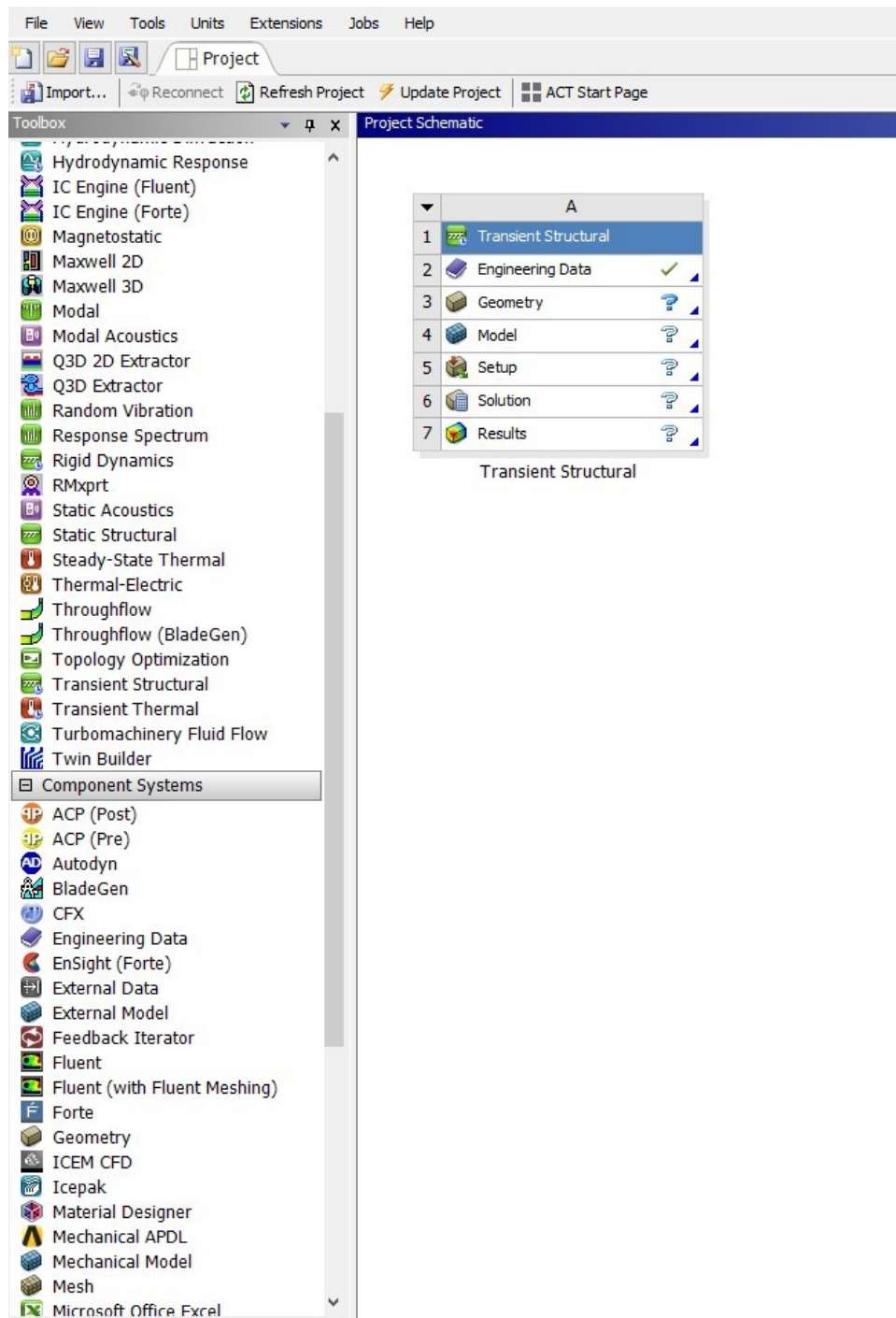


O desenho da mola realizado em CAD é uma representação que tem por finalidade garantir o movimento apenas de translação da estrutura, este movimento é garantido por condições impostas na simulação, por isso pode-se optar por esta simplificação da estrutura.

3.2 SIMULAÇÃO ®ANSYS

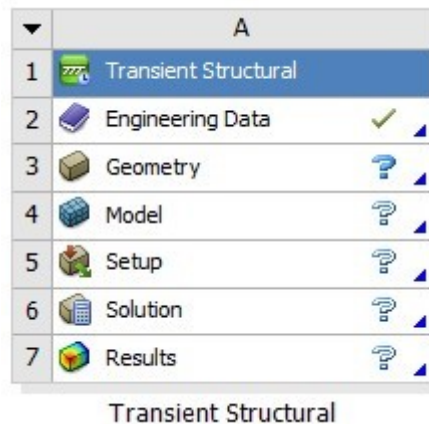
Na interface gráfica do software, ®Workbench, seleciona-se a física do problema, trata-se de um problema mecânico, dependente do tempo, por isso para sua resolução escolheu-se a análise transiente, vista na figura (3.9). Não foi possível escolher a análise harmônica por se tratar de uma excitação por meio de uma função temporal e o software não permite a inserção de uma função nas configurações da análise harmônica.

Figura 3.9 - Seleção da análise transiente no Workbench.



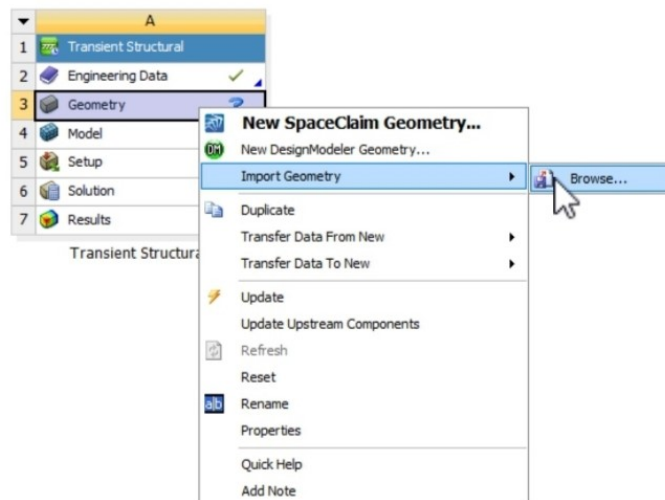
A seguir segue-se os passos demonstrados pela caixa da análise escolhida mostrada na figura (3.10).

Figura 3.10 - Caixa de análise.



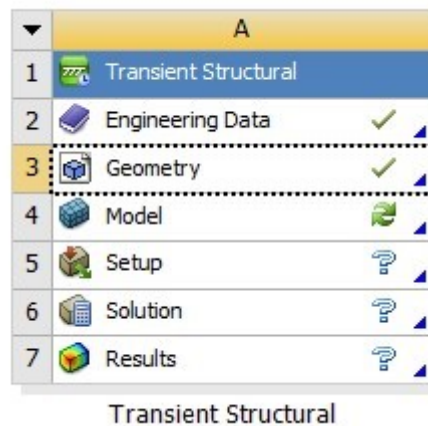
Os pontos de interrogação determinam que a etapa não foi concluída, enquanto o “ticket” verde, representa o cumprimento da mesma. Com isso, verifica-se que o próximo passo é a determinação da geometria a ser estudada, a mesma pode ser importada de outro arquivo ou desenhada no próprio ®Ansys, no presente trabalho a geometria foi desenhada no ®SolidWorks e importada para o ®Ansys como mostra a figura (3.11). É importante ressaltar que recomenda-se utilizar arquivos do tipo “.STEP” para a geometria importada.

Figura 3.11 - Importação da geometria.



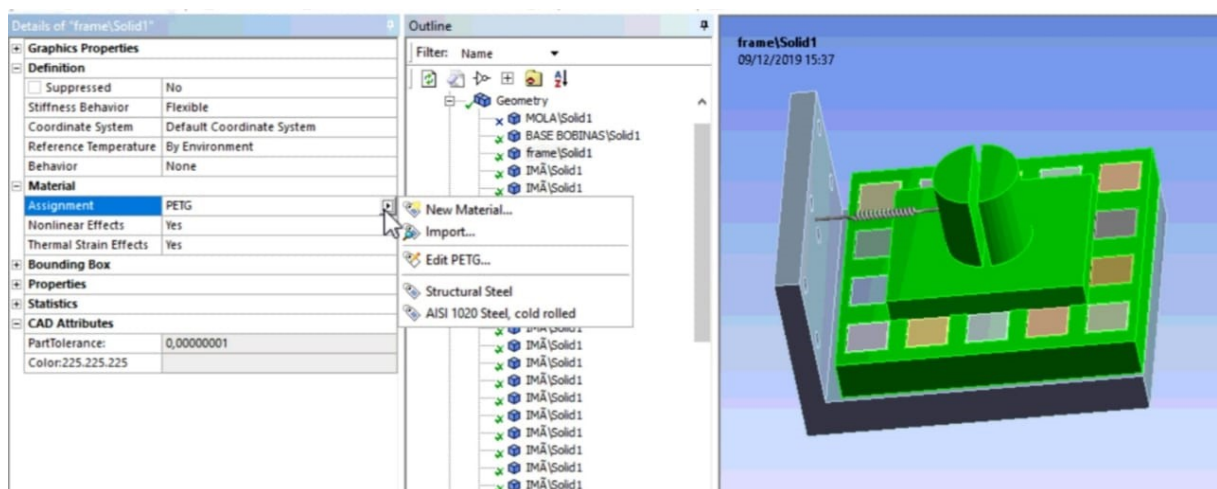
Com a geometria definida o software solicita a inserção do modelo do problema, vide figura (3.12), nesta etapa, define-se materiais, conexões entre corpos e malha.

Figura 3.12 - Definição da geometria concluída.



A definição dos materiais na interface gráfica é realizada pelo ®Ansys Mechanical selecionando o componente e alterando o material pré-definido em seus detalhes, a figura (3.13) mostra o detalhe dessa alocação.

Figura 3.13 - Representação da definição dos materiais.

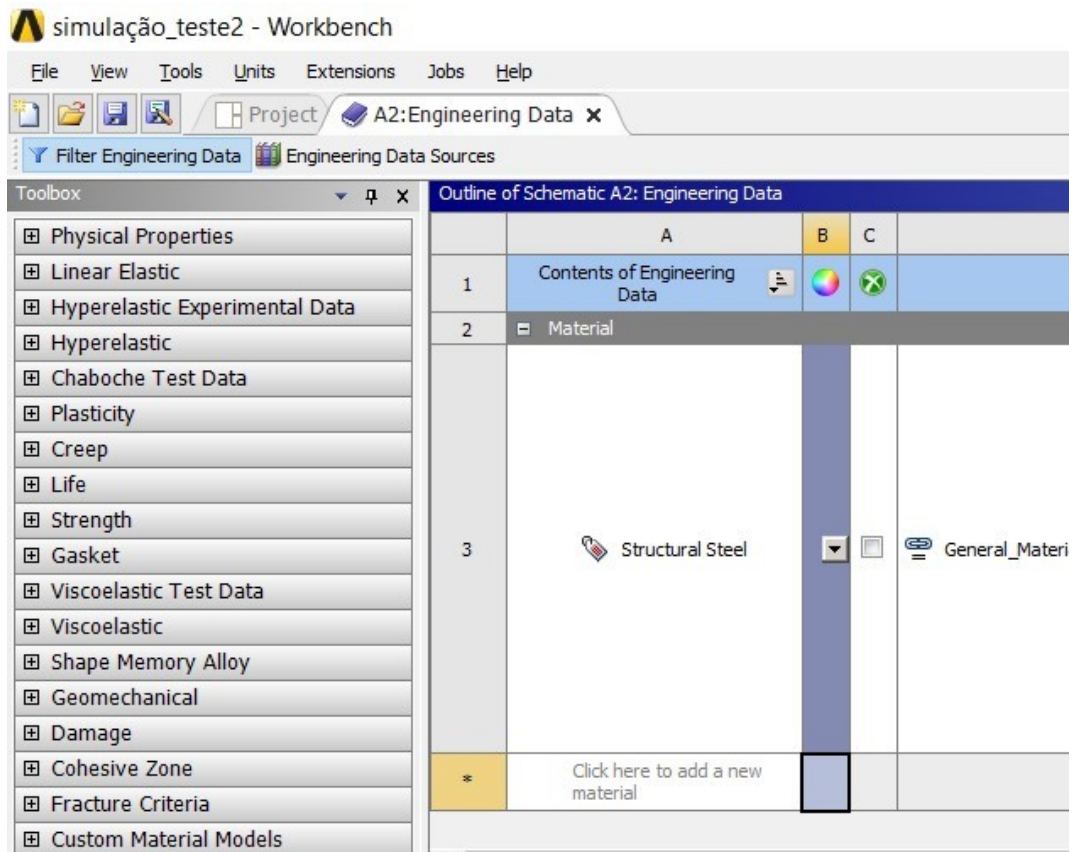


Os materiais definidos no problema foram:

- Frame/Base/Base das bobinas → PetG (material de impressão 3D);
- Imã → Aço estrutural (material simplificado para a análise de vibração);
- Bobina → Cobre.

Caso o material a ser atribuído não esteja presente na biblioteca do software, o mesmo pode ser adicionado a ela, pela tela demonstrada na figura (3.14), para isso é necessário conhecer suas propriedades mecânicas.

Figura 3.14 - Inserção de novos materiais a biblioteca do Ansys.



Após a alocação dos materiais, são definidas algumas condições da estrutura a ser analisada, como a união, graus de liberdade e conexões entre componentes. Três condições foram impostas para análise.

1. União fixa entre imãs e frame (figura (3.15));
2. Translação somente no eixo y (figura (3.16));
3. Conexão via mola entre a parede do frame e da base (figura (3.17)).

Figura 3.15 - Conexão Body-Body do tipo fixação entre frame e ímãs.

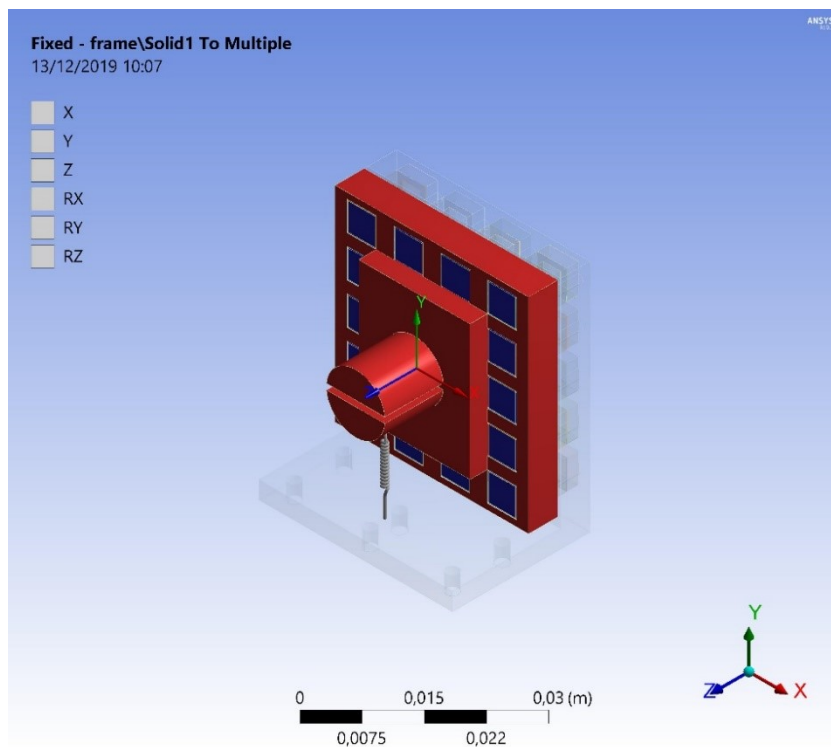
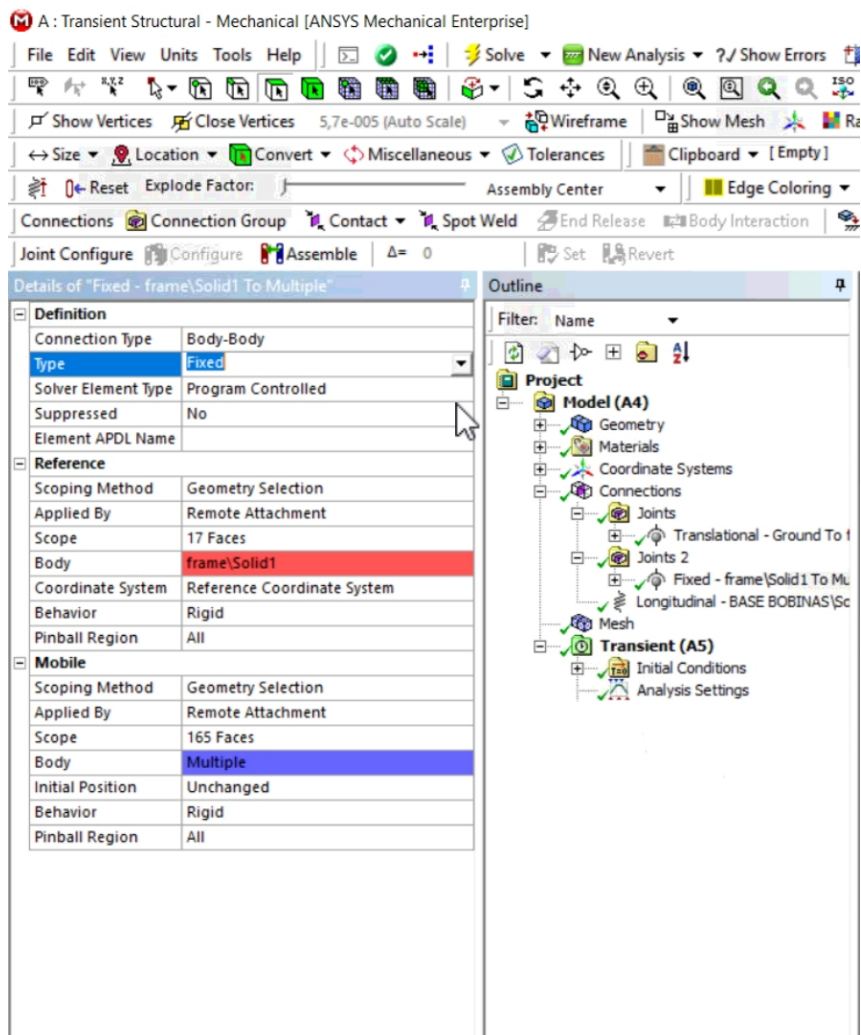


Figura 3.16 - Conexão Body-Ground do tipo translação para o frame.

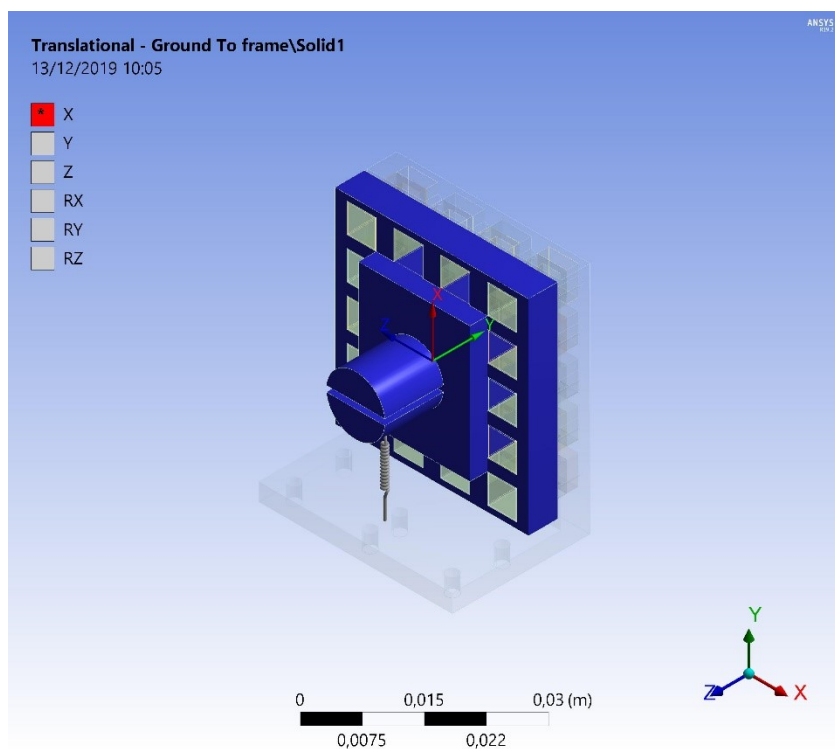
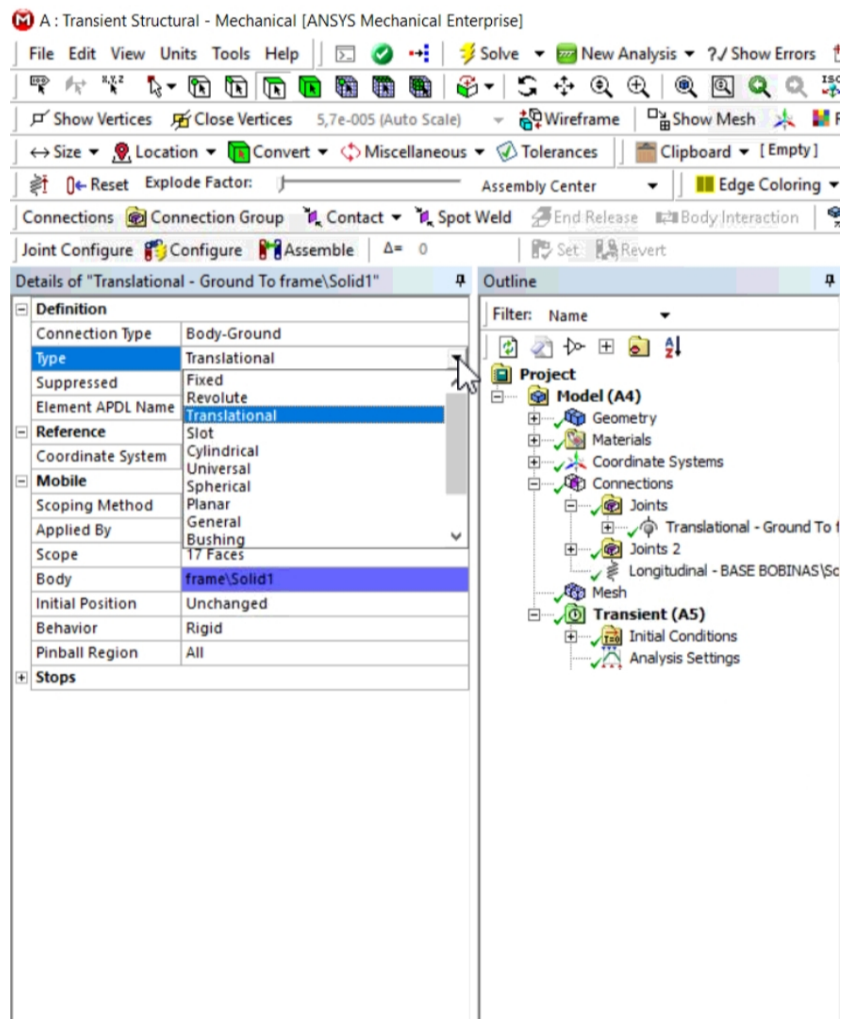
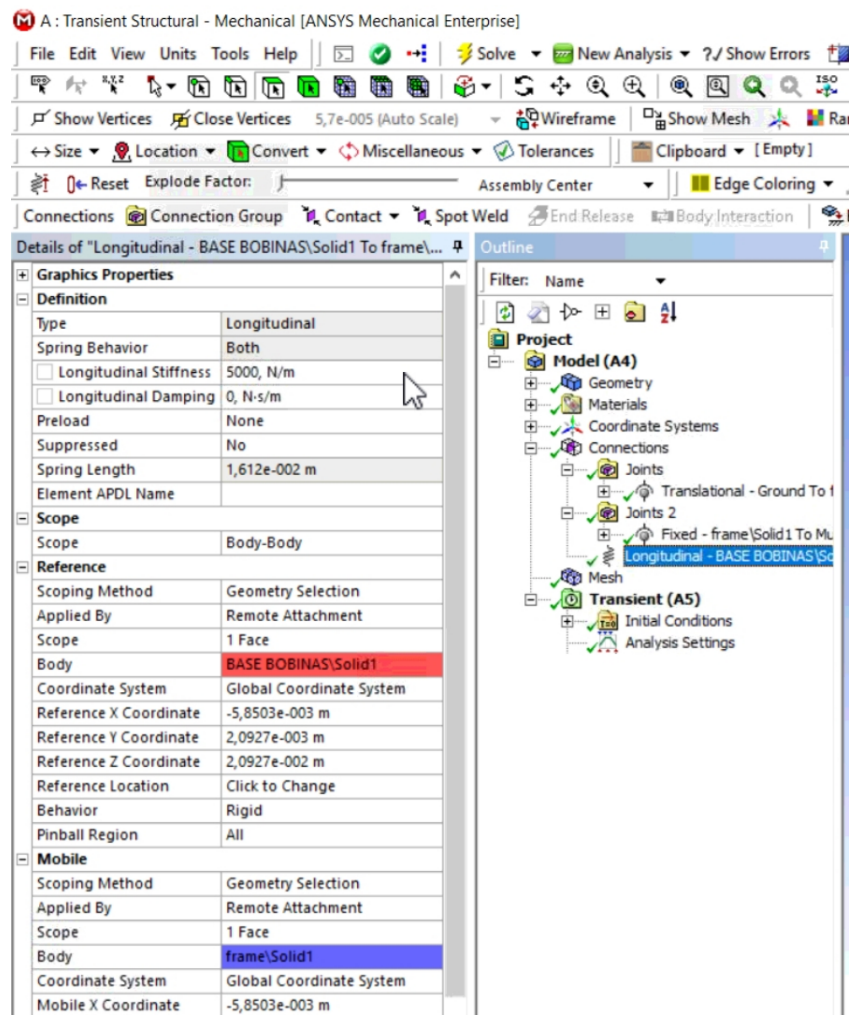
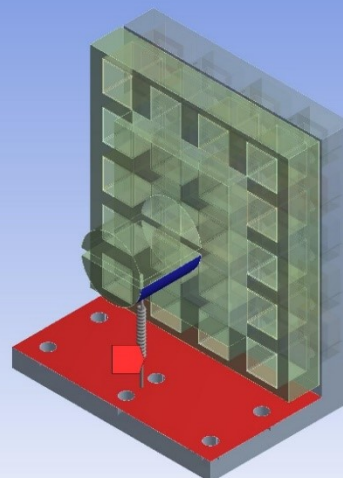


Figura 3.17 - Conexão Body-Body do tipo mola entre base e frame.

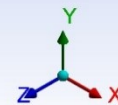


Longitudinal - BASE BOBINAS\Solid1 To frame\Solid1
13/12/2019 10:16

Longitudinal - BASE BOBINAS\Solid1 To frame\Solid1



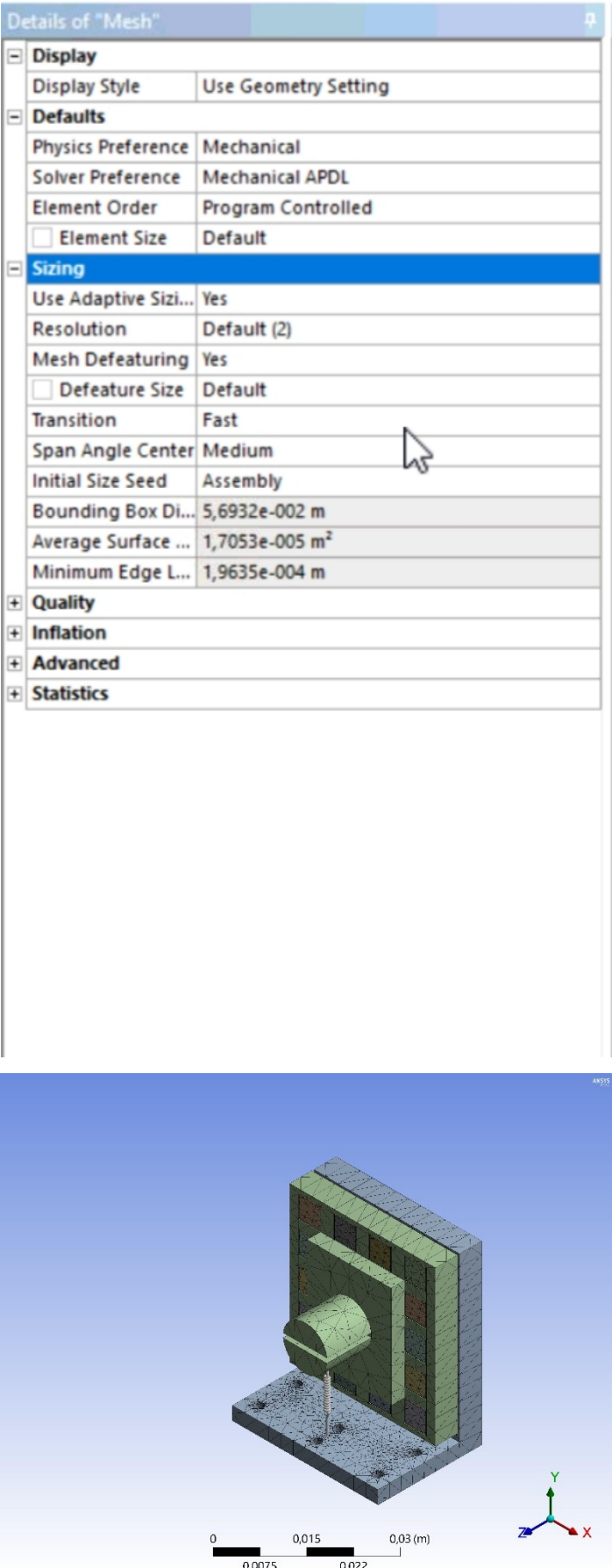
0 0,015 0,03 (m)
0,0075 0,022



A conexão do tipo mola entre as paredes refere-se à simplificação do sistema, descrita acima, este tipo de conexão é definido pela rigidez que se deseja aplicar ao sistema. Para a primeira simulação escolheu-se uma rigidez de 5 kN .

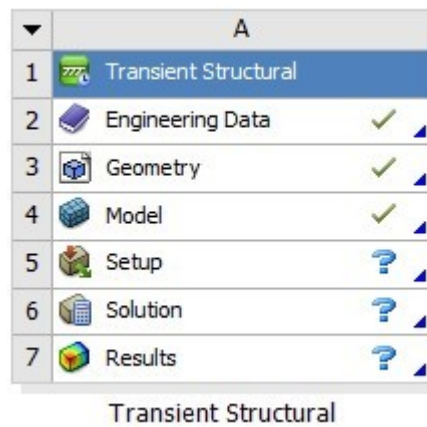
Por fim define-se a malha a ser utilizada, para esta análise selecionou-se uma malha com refinamento médio e rápida transição, como representado na figura (3.18), pois para a simulação requerida não se faz necessário um alto refinamento da malha, o que custaria um elevado tempo computacional.

Figura 3.18 - Configuração da malha do sistema.



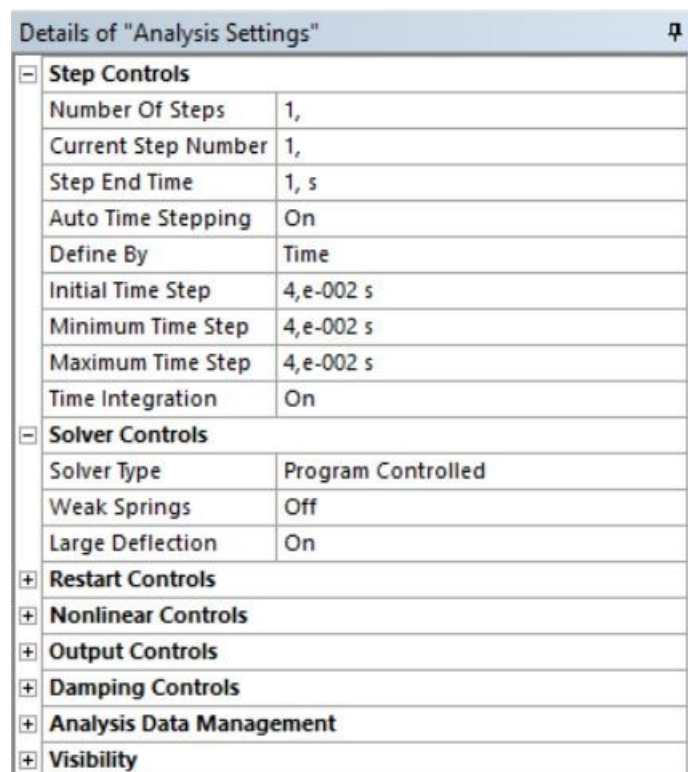
Assim, a caixa, demonstrada na figura (3.19), apresenta o modelo definido.

Figura 3.19 - Modelo da análise concluído.



Com a estrutura do sistema mecânico definida, parte-se para a alocação da física do problema, como já mencionado, optou-se por uma simulação transiente, no espaço de tempo de 1 s e intervalos de análise a cada 0,04 s, como visto na figura (3.20).

Figura 3.20 - Configurações de análise.



Como excitação do sistema, foi aplicada a aceleração $\ddot{u}(t)$, mencionada no tópico 3.1.2, para todos os corpos (figura (3.21) e (3.22)).

Figura 3.21 - Aceleração aplicada como uma função harmônica.

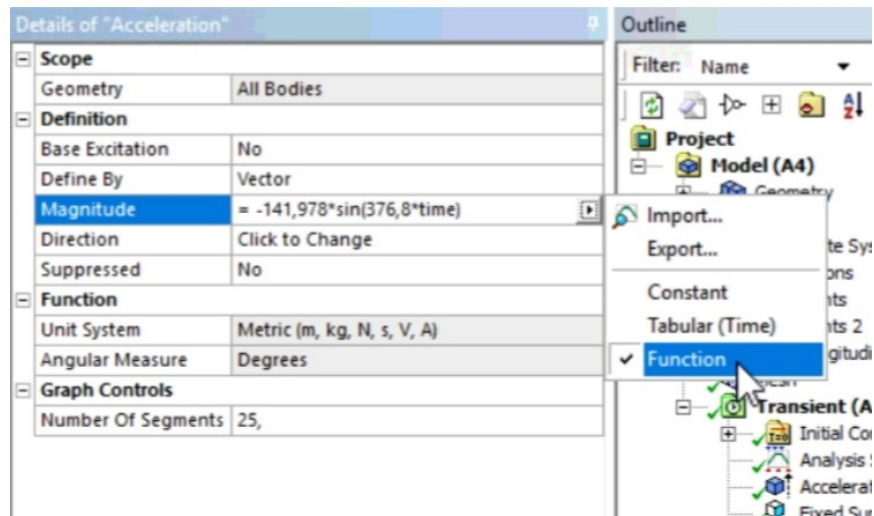
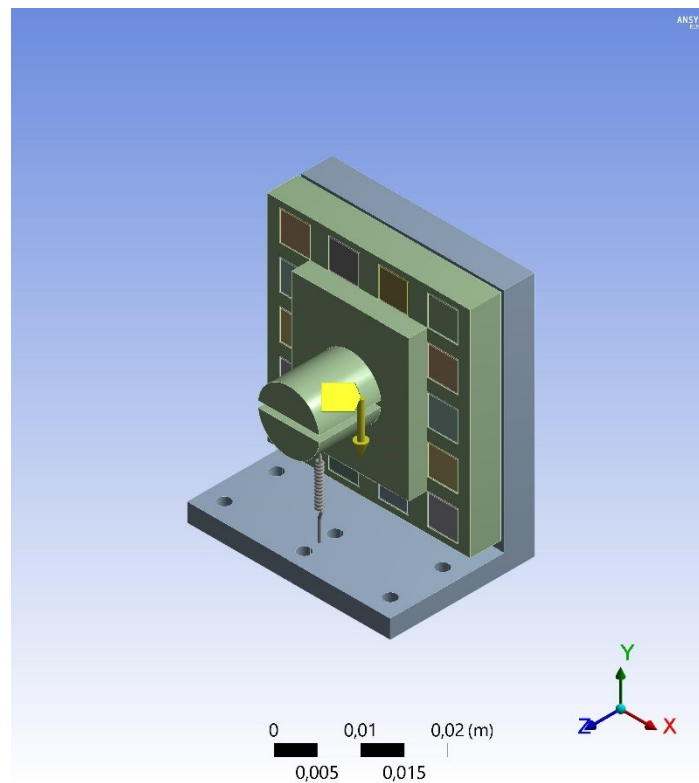
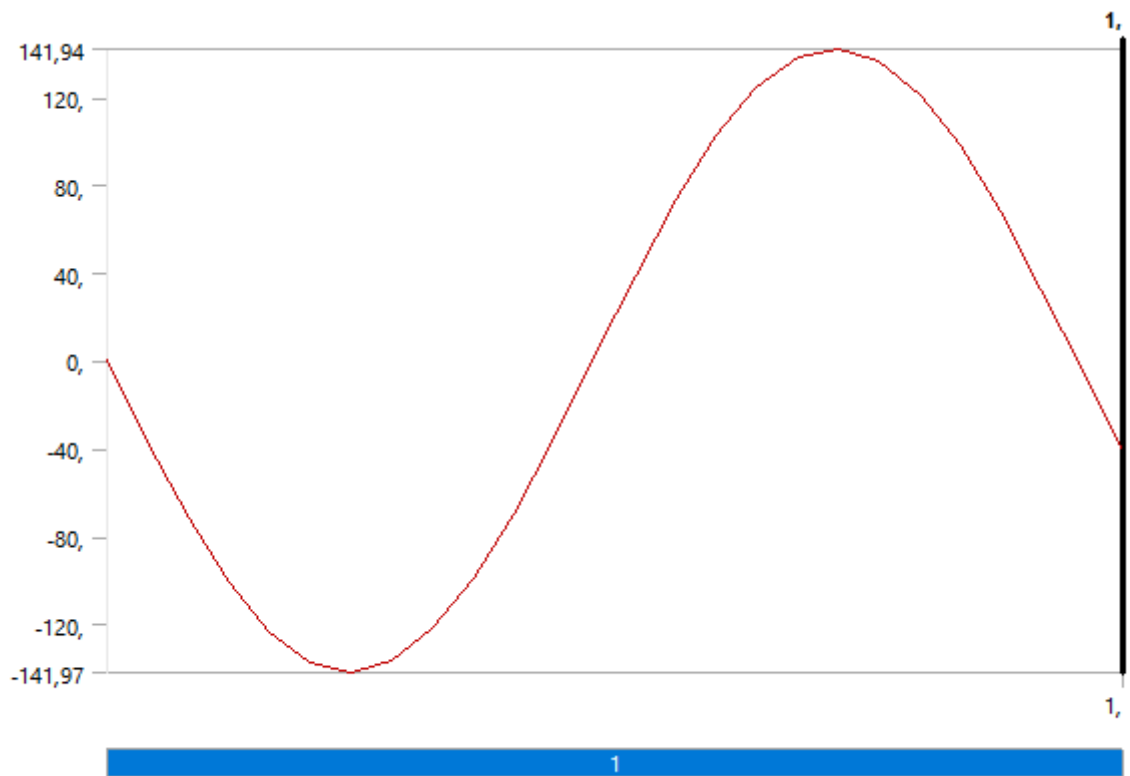


Figura 3.22 – Vetor aceleração aplicado a todos os corpos.



A seguir, a figura (3.23) mostra graficamente a função harmônica aplicada.

Figura 3.23 - Função harmônica aplicada.



E por fim é aplicada uma condição de contorno do tipo engaste fixo para a base, bobinas e bases de bobinas representadas pelas figuras (3.24), (3.25), (3.26) e (3.27).

Figura 3.24 - Seleção da aplicação da fixação.

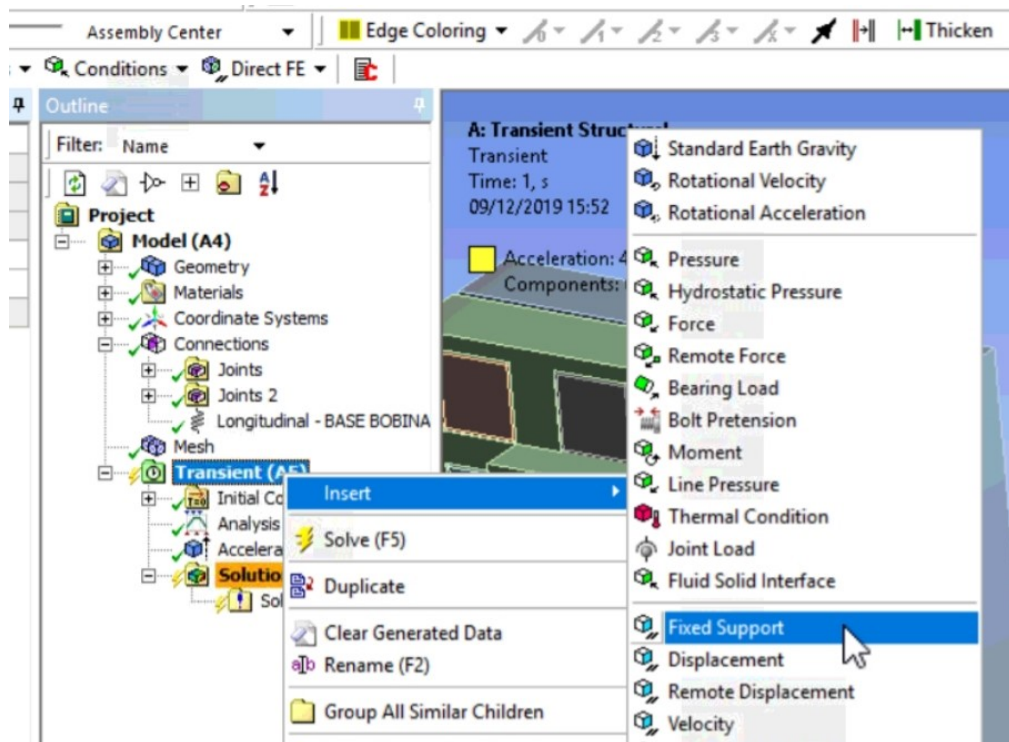


Figura 3.25 - Fixação da base (detalhe em azul).

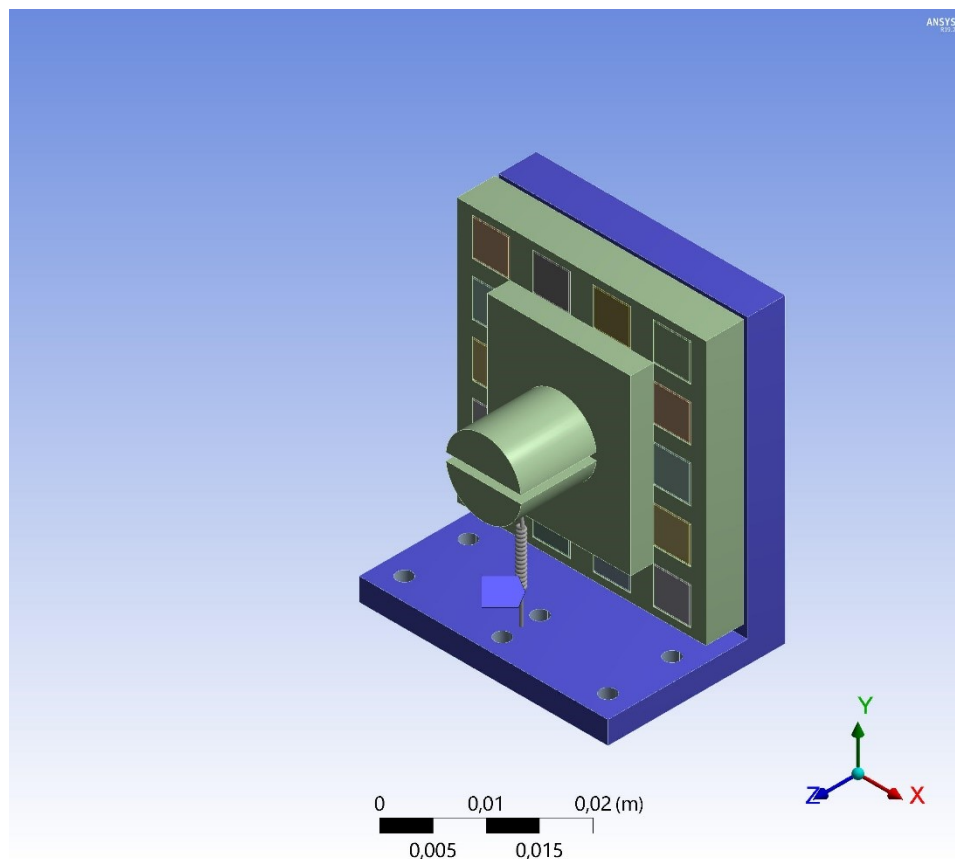


Figura 3.26 - Fixação das bases de bobinas.

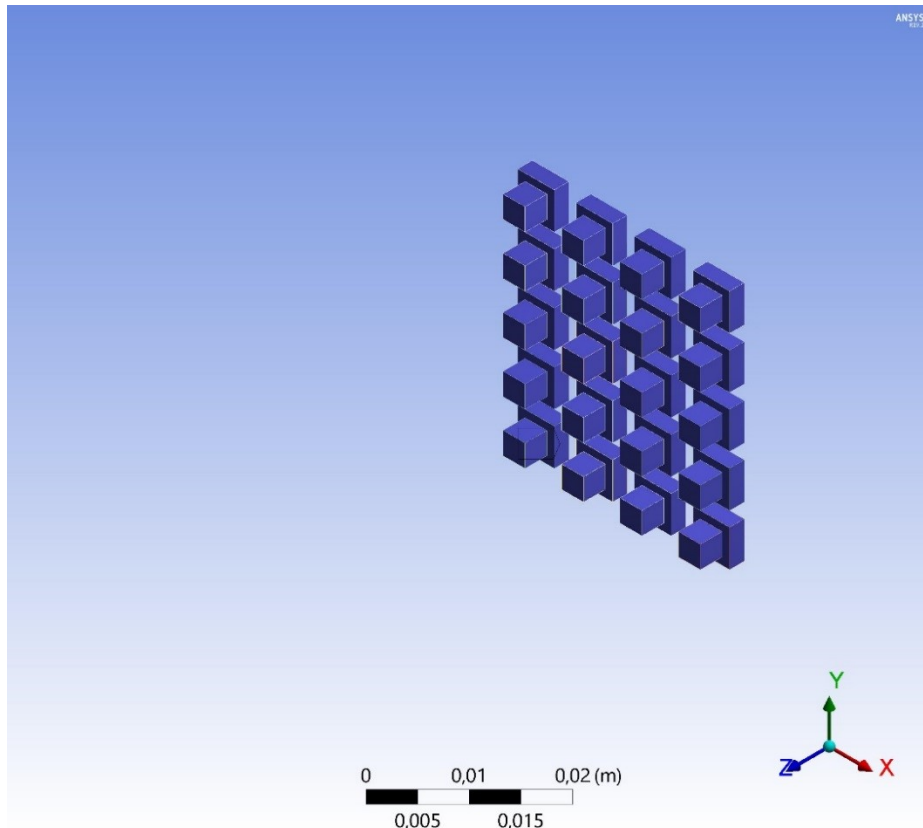
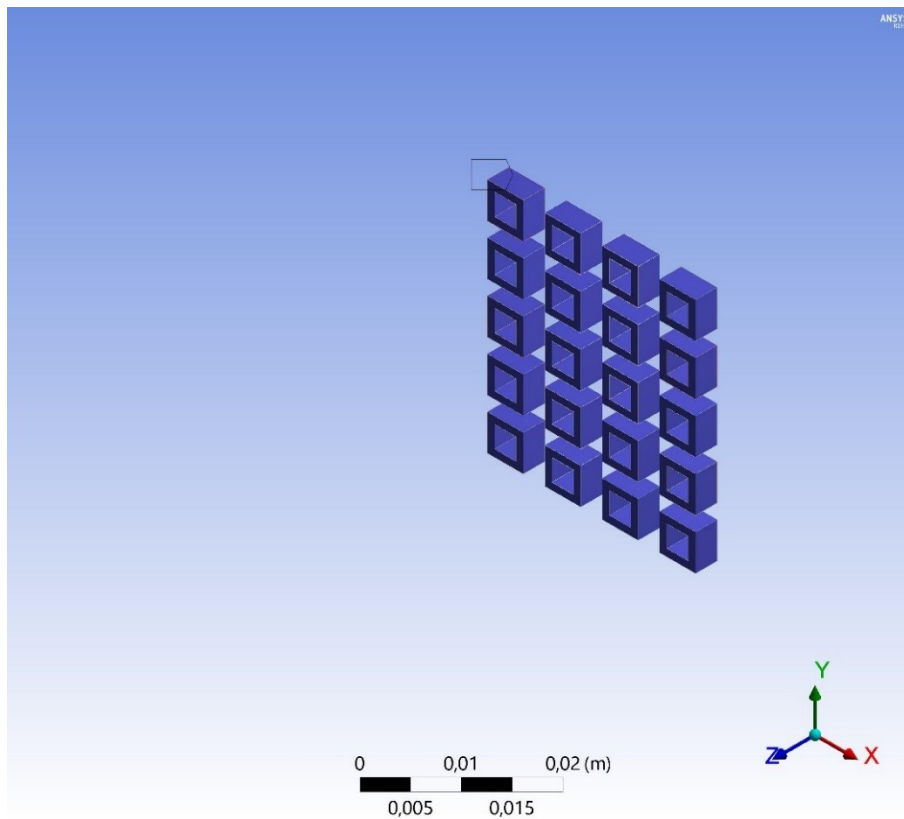
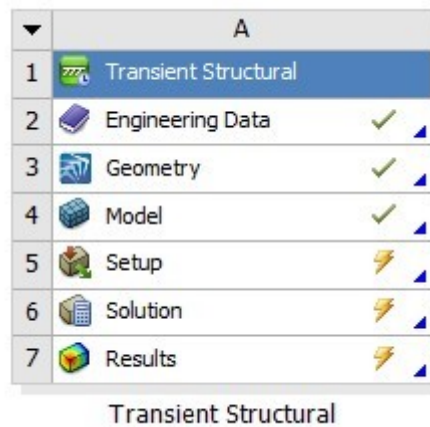


Figura 3.27 - Fixação das bobinas.



Conclui-se então, as configurações de análise e se aguarda a resolução do problema, vide figura (3.28).

Figura 3.28 - Análise com as configurações aplicadas.



Por fim, foi solicitado que o ®Ansys demonstrasse a deformação do sistema a cada instante de tempo, como mostrado na figura (3.29).

Figura 3.29 - Seleção da solução do problema.

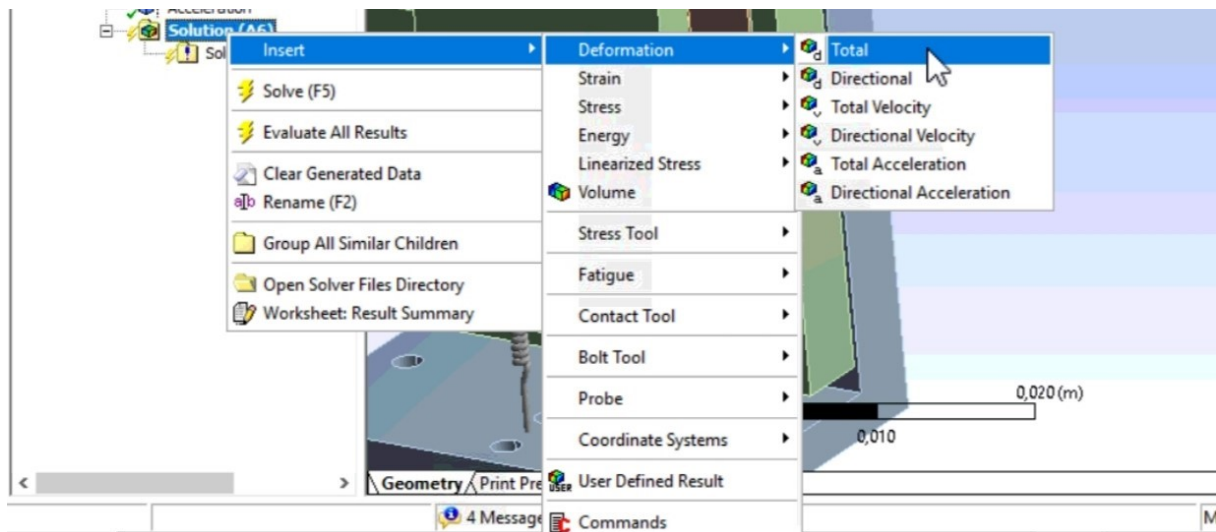
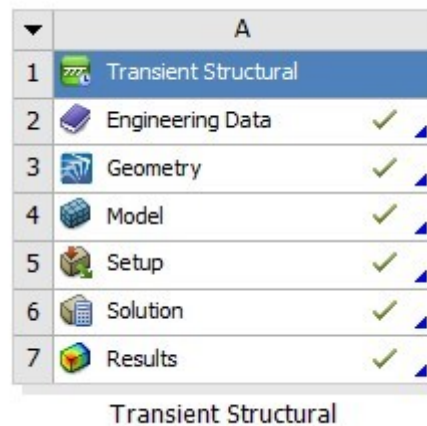


Figura 3.30 - Análise concluída.



Após realizar o “setup” de toda a simulação e a análise estar concluída (figura 3.30), um arquivo no formato “.txt” é exportado contendo todos os “inputs” da simulação em linguagem “APDL”, como figura (3.31), este será o arquivo utilizado pelo otimizador para rodar a simulação.

Figura 3.31 - Parte do arquivo exportado com as configurações de análise na linguagem APDL.

```
/batch
/config,noelddb,1      ! force off writing results to database
*get,_wallstrt,active,,time,wall
! ANSYS input file written by Workbench version 19.2 RELEASE
! File used for geometry attach: C:\Users\Messias Junior\Desktop\otimizacao\simulacao_teste2_files\dp0\SYS\DM\SYS.scdoc
/title,simula_o_teste2--Transient (A5)
*DIM,_wb_ProjectScratch_dir,string,248
_wb_ProjectScratch_dir(1) = 'C:\Users\Messias Junior\Desktop\otimizacao\simulacao_teste2_files\dp0\SYS-7\MECH\'
*DIM,_wb_SolverFiles_dir,string,248
_wb_SolverFiles_dir(1) = 'C:\Users\Messias Junior\Desktop\otimizacao\simulacao_teste2_files\dp0\SYS-7\MECH\'
*DIM,_wb_userfiles_dir,string,248
_wb_userfiles_dir(1) = 'C:\Users\Messias Junior\Desktop\otimizacao\simulacao_teste2_files\user_files\'
/com,--- Data in consistent MKS units. See Solving Units in the help system for more information.
/units,MKS
/nopr
/wb,file,start          ! signify a WB generated input file
/prep7
! Turn off shape checking because checks already performed inside WB mesher.
! See help system for more information.
SHPP,OFF,,NOWARN
/nolist
etcon,set              ! allow ANSYS to choose best KEYOP's for 180x elements
/com,***** Nodes for the whole assembly *****
nblock,3,,93415
(119,3e20.9e3)
      3236      -8.753639520E-04      2.109270639E-02      2.592699301E-02
      3237      -1.082523832E-02      2.109270639E-02      2.592699301E-02
      3238      -3.362832544E-03      2.109270639E-02      2.592699301E-02
```

3.3 OTIMIZAÇÃO

Para realização da simulação, foi desenvolvido um código numérico no ®Matlab, dividido em 3 etapas principais, dados de entrada, interface ®Matlab-®Ansys e otimizador.

3.3.1 Dados de Entrada

Esta é a etapa inicial do código, no qual são introduzidos os valores iniciais necessários à otimização. São mencionados, o tamanho da população, intervalo de busca, CR, número máximo de iterações, dentre outros mostrados na figura (3.32).

Figura 3.32 - Parâmetros iniciais do código de otimização.

```
% Limites de banda dos parâmetros de otimização:

limites = [3000 5000]; %Intervalo de Busca

XVmin = limites(:,1)'; %Limite inferior
XVmax = limites(:,2)'; %Limite superior

%% Parâmetros para a evolução diferencial:
D = length(XVmin); y=[]; NP = D*10; NPin = 10; itermax = 100; F = 0.8; CR = 0.8; strategy = 7; refresh = 1; VTR = 1.e-2;
```

3.3.2 Interface ®Matlab-®Ansys

Para realização da interface o código abre o arquivo “.txt” gerado pelo ®Ansys, e o manipula alterando a linha referente a rigidez da conexão do tipo mola, o qual é o parâmetro a ser otimizado, como a figura (3.33) demonstra. Assim, a cada iteração um novo valor de K é colocado no arquivo e uma outra linha de código, mostrada na figura (3.34), o executa por meio do “®Mechanical APDL”.

Figura 3.33 - Montagem do Arquivo de Input.

```
%% Geração do arquivo .txt de input

entrada = fopen('nome_do_arquivo.txt');
inicio = fscanf(entrada,'%c');
fclose(entrada);
saida = fopen('nome_do_arquivo2.txt');
fim = fscanf(saida,'%c');
fclose(saida);

rigidez = K;
meio = ["r,_sid," rigidez ",0."];      %Linha de código em APDL para se colocar a rigidez desejada

arquivo_i = fopen('Input.txt','w');
fprintf(arquivo_i,'%s\n',inicio);
fprintf(arquivo_i,'%s',meio);
fprintf(arquivo_i,'\n');
fprintf(arquivo_i,'%s',fim);
fclose(arquivo_i);
```

Figura 3.34 - Código de interface com o @Ansys APDL para execução do arquivo de input.

```
%% Execução do arquivo de input pelo Ansys

!SET KMP_STACKSIZE=15000M & "D:\Ansys 2019\ANSYS Inc\v192\ansys\bin\winx64\ANSYS192.exe" -b -i FEAin2.txt -o output.txt
```

Após a execução da simulação é gerado um arquivo output no formato “.txt”, figura (3.35), o qual é aberto pelo código em ®Matlab como um vetor e seleciona-se a célula em que se encontra o maior valor de deformação, este resultado é fornecido ao otimizador e ao ser tratado a otimização pode ser encerrada (valor ótimo encontrado), ou gera-se novos valores de K a serem simulados.

Figura 3.35 - Arquivo de output gerado.

```

| ANSYS Mechanical Enterprise

*-----*
| WELCOME TO THE ANSYS (R) PROGRAM |
*-----*

*****
*               ANSYS Release 19.2      LEGAL NOTICES      *
*****
*
* Copyright 1971-2018 ANSYS, Inc. All rights reserved.
* Unauthorized use, distribution or duplication is
* prohibited.
*
* Ansys is a registered trademark of ANSYS, Inc. or its
* subsidiaries in the United States or other countries.
* See the ANSYS, Inc. online documentation or the ANSYS, Inc.
* documentation CD or online help for the complete Legal
* Notice.
*
*****

```

3.3.3 Otimizador

O otimizador foi desenvolvido para trabalhar conforme o método da evolução diferencial, assim ele seleciona uma população inicial de possíveis candidatos a solução do problema, estes candidatos são simulados e sofrem processos de mutação e crossover de forma iterativa, formando novas populações até se encontrar o valor que satisfaça a condição imposta, ou seja, atinja uma deformação equivalente a 0,001 m.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

Após implementar todas as configurações no software ®Ansys e retirar o código em APDL, o mesmo foi inserido no otimizador e iniciou-se a análise.

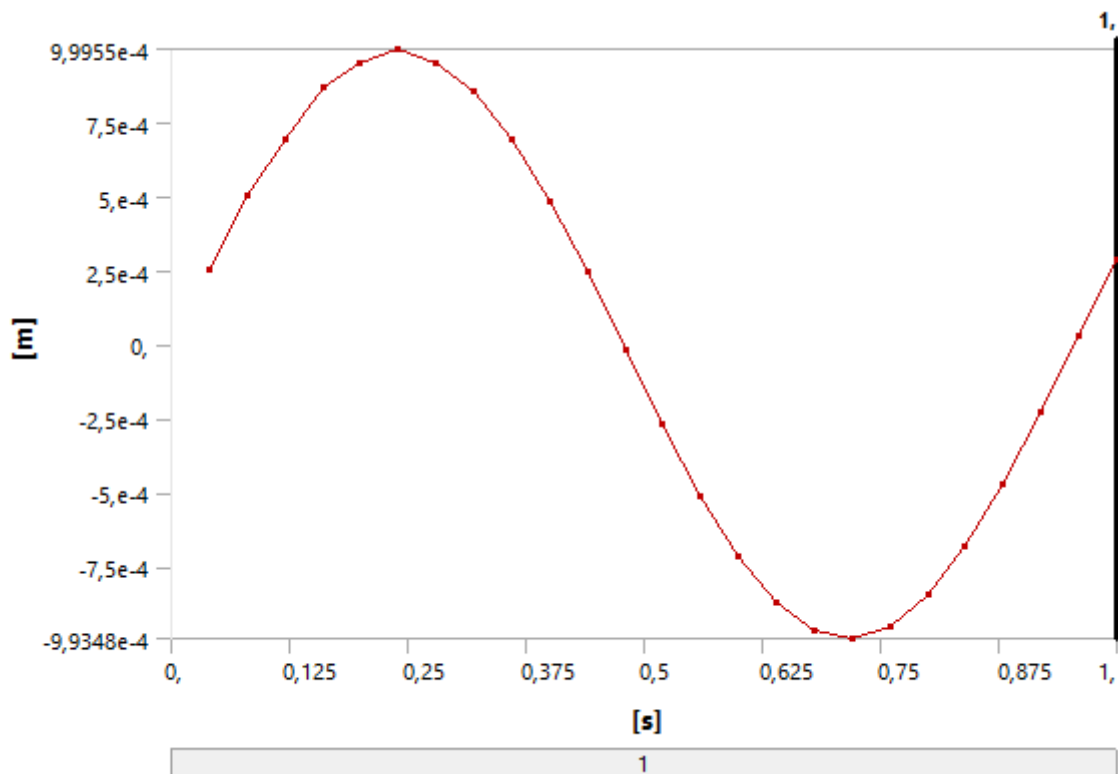
O resultado de rigidez “ótima” extraído do otimizador é equivalente a:

$$K_{ótimo} = 3751,4 \text{ N}$$

Atingindo uma amplitude de vibração harmônica em função do tempo como mostra a figura (4.1).

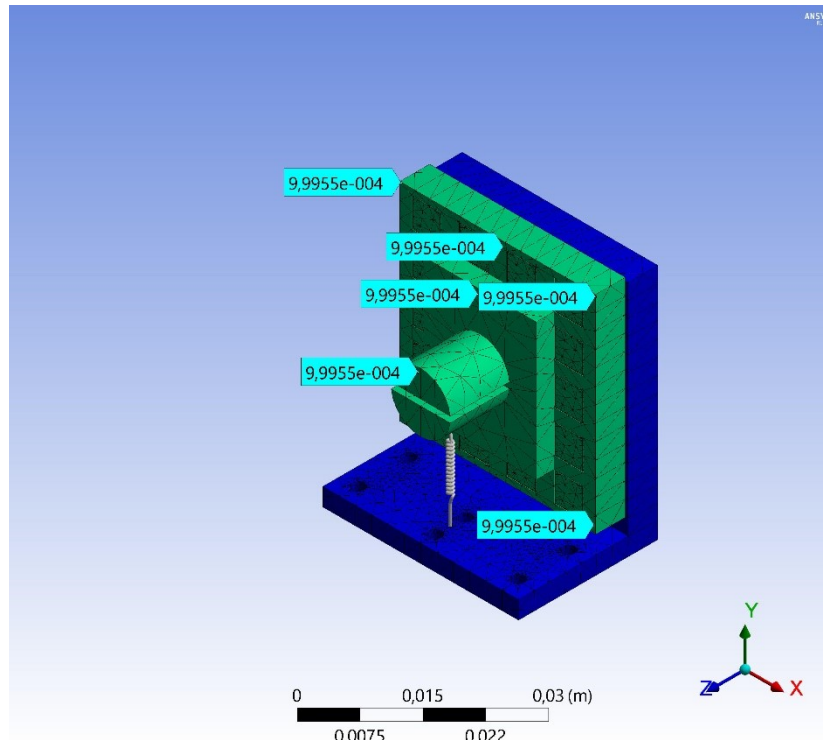
$$u(t) = 0,00099955 * \text{sen}(2 * \pi * 60 * t)$$

Figura 4.1 - Gráfico da variação da amplitude de vibração.



A figura (4.2) a seguir mostra com o auxílio de “probes” que o conjunto frame-ímãs apresenta a mesma amplitude de vibração em toda a sua estrutura.

Figura 4.2 - Apresentação da amplitude de vibração ao longo de toda a estrutura.



Tomando uma “probe” como sendo um ímã, encontra-se o mesmo resultado, mostrado na figura (4.3) e (4.4).

Figura 4.3 - Amplitude de vibração para um ímã qualquer.

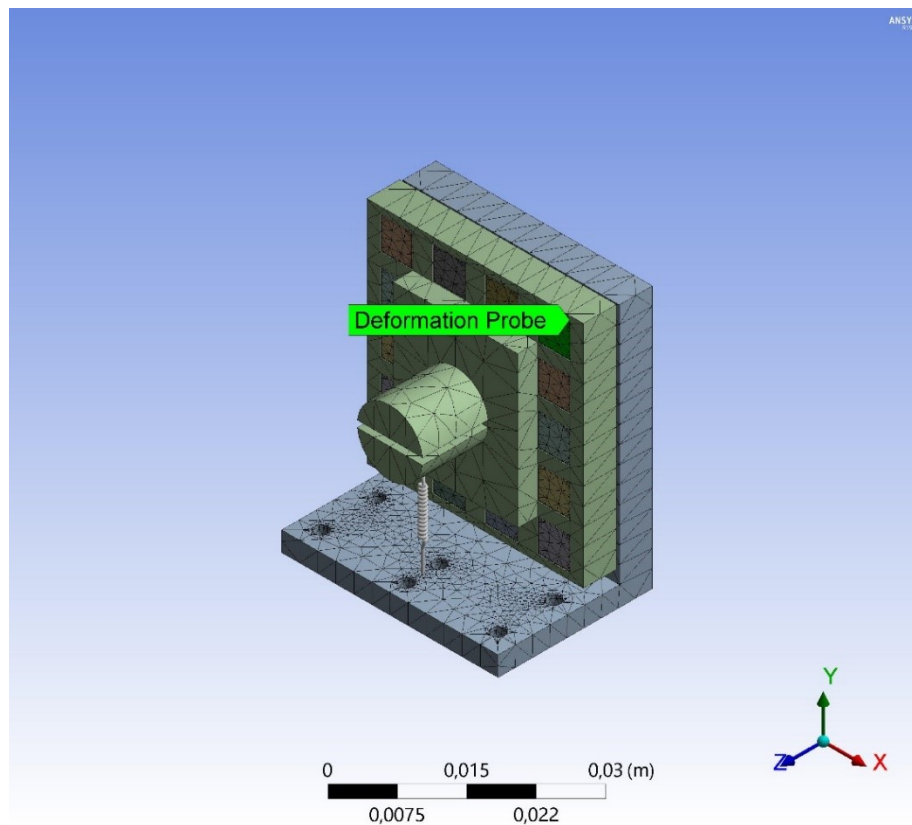


Figura 4.4 - Detalhes da deformação na Probe.

Details of "Deformation Probe"	
[-] Definition	
Type	Deformation
Location Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Orientation	Global Coordinate System
Suppressed	No
[-] Options	
Result Selection	Y Axis
☒ Display Time	End Time
Spatial Resolution	Use Maximum
[+] Results	
[-] Maximum Value Over Time	
☐ Y Axis	9,9955e-004 m
[-] Minimum Value Over Time	
☐ Y Axis	-9,9348e-004 m
[+] Information	

Calculando o erro em relação a amplitude de 0,001 m, têm-se:

$$erro(\%) = \frac{|u(t)_{calculado} - u(t)_{requerido}|}{u(t)_{requerido}} * 100 = \frac{|0,00099955 - 0,001|}{0,001} = 0,045\%$$

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Com os resultados obtidos pode-se concluir que o modelo de otimização cumpriu bem o seu papel, pois o código conseguiu realizar a interface com o software ®Ansys e determinar um valor de rigidez “ótimo” com um erro de 0,045%. Este valor determinado proporcionou ao sistema o cumprimento dos pré-requisitos de operação, atingindo uma amplitude máxima de 0,00099955 *m* na frequência de 60 *Hz*.

Além disso, pode-se verificar que o sistema simulado se comportou adequadamente a excitação, o qual apresentou uma deformação homogênea ao longo de toda a estrutura formada pelos ímãs e frame. Atingindo assim o resultado proposto pelo presente projeto.

Por fim, observa-se como uma continuação do trabalho o acoplamento das análises de simulação magnética, este acoplamento alterará, em parte, a física do problema, alterando seu input, porém o processo de otimização é equivalente ao já estudado e validado o que facilitaria este próximo trabalho. Com isso, será possível determinar qual a influência da indução magnética no sistema vibracional, além da quantidade de energia gerada pelo harvester, atuando sob estas condições.

REFERÊNCIAS

TARTAGNI, M. **Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems**. CATRENE Working Group on Energy Autonomous Systems. [S.l.], 2009.

BEEBY, S.; WHITE, N. **Energy harvesting for autonomous systems**. [S.l.]: Artech House, 2010.

BOUENDEU, E.; GREINER, A.; SMITH, P. J.; KORVINK, J. G. **An efficient low cost electromagnetic vibration harvester**. University of Freiburg, Germany, 2009.

DOS SANTOS, M. P. **Sistema eletrônico energeticamente autônomo com colheita de energia por indução magnética**. Universidade Federal da Paraíba, Brasil, 2015.

CORREIA, A. A. **Dinâmica: Vibrações de sistemas com 1 grau de liberdade**. Instituto Superior Técnico, 2007.

DA SILVA, S. **Vibrações Mecânicas**. Notas de Aula, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, CECE, 2009.

DE ARAUJO, R. L. **Evolução diferencial para problemas de otimização com restrições lineares**. Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil, 2016.

STORN, R.; PRICE, K. V. **Differential Evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization**. Journal of Global Optimization 11, 341-359, 1995.

APÊNDICE I

ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO EM MATLAB® PARA DADOS DE ENTRADA DO OTIMIZADOR

Este algoritmo refere-se a entrada dos dados iniciais dos parâmetros de otimização.

```
%% Entrada da otimização
```

```
%% Limpeza do workspace
```

```
clear all;
```

```
clc;
```

```
close all;
```

```
%% Limites de banda dos parâmetros de otimização:
```

```
limites = [3000 5000];
```

```
XVmin = limites(:,1)'; %Limite inferior
```

```
XVmax = limites(:,2)'; %Limite superior
```

```
%% Parâmetros para a evolução diferencial:
```

```
D = length(XVmin); y=[]; NP = D*10; NPin = 10; itermax = 100;F = 0.8; CR = 0.8;
```

```
strategy = 7; refresh = 1;VTR = 1.e-2;
```

```
%% Chamada da função diferencial:
```

```
[x,f,nf,Individuos_best]=differential_evolution('objective',VTR,D,XVmin,XVmax,y,NP,itermax,F,CR,strategy,refresh,1);
```



```
fprintf(arquivo_i, '%s', fim);
fclose(arquivo_i);
```

%% Execução do arquivo de input pelo Ansys

```
!SET KMP_STACKSIZE=15000M & "D:\Ansys 2019\ANSYS
Inc\v192\ansys\bin\winx64\ANSYS192.exe" -b -i FEain2.txt -o output.txt
```

%% Retirada do valor output dado pelo Ansys

```
arquivo_o = fopen('output.txt');
result2 = fscanf(arquivo_o, '%c');
fclose(arquivo_o);
```

```
resultado = strsplit(result2);
dof = resultado(152718);
dof2 = str2double(dof);
```

%% Determinação do resultado da função objetivo para o programa principal:

```
real = 0.001;
```

```
result = abs(dof2-real);
```

```
end
```