



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica

Lucas da Silva Rigobello

**Estudo Teórico e Computacional de um Gerador Elétrico
Ressonante**

Uberlândia
2017



Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica

Lucas da Silva Rigobello

**Estudo Teórico e Computacional de um Gerador Elétrico
Ressonante**

Projeto de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para graduação no Curso de Engenharia Mecânica.

Orientador: Dr. Marcelo Braga dos Santos

Assinatura do Orientador

Uberlândia

2017

Lucas da Silva Rigobello

**Estudo Teórico e Computacional de um Gerador Elétrico
Ressonante**

Projeto de Fim de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial para graduação no Curso de Engenharia Mecânica.

Uberlândia, __ de _____ de ____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Valério Luiz Borges
Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Braga dos Santos, primeiramente, pela sugestão do tema, pelo incentivo, motivação e orientação deste trabalho, sempre muito empenhado em me ajudar no assunto; buscando aprender as esse tópico da melhor forma possível, mesmo sendo uma novidade para ambas as partes.

Também gostaria de agradecer a disponibilidade da banca examinadora, Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho, Prof. Dr. Valério Luiz Borges e Prof. Dr. Marcelo Braga dos Santos pela disposição em avaliar o trabalho.

Ao Prof. Dr. Luciano Martins Neto, da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da UFU, pelo seu apoio e disposição em colaborar, desde o primeiro momento, com o desenvolvimento do projeto.

À minha família, pela colaboração através de incentivo e apoio ao longo de todo o processo de desenvolvimento do trabalho. Sempre sendo muito pacientes e compreensivos. E também, pelo apoio e amparo ao longo de todo o período da graduação que certamente tem sua importância para o resultado obtido nesse trabalho.

RESUMO

Neste trabalho é apresentado uma proposta para construção de um gerador linear construído com ímãs permanentes e que trabalha em ressonância. Através de algumas condições de contorno, como principalmente força de atuação no gerador, curso do movimento, tensão nominal, frequência de operação mecânica e frequência elétrica é apresentado um memorial de cálculos analíticos para a determinação das propriedades elétricas e dimensionais do protótipo. Assim como os procedimentos de cálculo para a determinação da constante de rigidez da mola, o amortecimento, de modo a caracterizar o regime de trabalho como sub amortecido, para o sistema mecânico.

Palavras-Chave – gerador elétrico, gerador linear, ressonância e ímãs permanentes.

ABSTRACT

In this work is shown a proposal for the construction of a linear generator made of with permanent magnets and that works in resonance. By means of some boundary conditions, such as, the force on the generator, stroke, nominal voltage, mechanical operation frequency and electric frequency, a memorial of analytical calculations, is presented for determining the electrical and dimensional properties of the prototype. As well as the calculation procedures for determining the spring stiffness constant, the damping, in order to characterize the working regime as sub-damped, for the mechanical system.

Keywords – electric generator; linear generator; resonance and permanent magnets.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Regra da mão direita.....	14
Figura 2 – Correntes de Foucault.....	15
Figura 3 – Lei de Lenz: a) Fluxo magnético crescente em um bobina; b) determinação da polaridade da tensão resultante.....	17
Figura 4 – Topologias clássicas para máquinas tubulares de ímãs permanente: a) magnetização radial interna, b) magnetização radial externa, c) magnetização axial interna e d) magnetização Halbach interna.....	18
Figura 5 – Magnetização radial.....	20
Figura 6 – Distribuição da magnetização.....	20
Figura 7 – Distribuição das bobinas.....	22
Figura 8 – Geometria e parâmetros considerados na análise do gerador.....	26
Figura 9 – Sistema vibratório amortecido.....	28
Figura 10 – Variação de ampliação em relação a razão de frequência.....	31
Figura 11 – Gerador linear com ímãs permanente de três fases.....	33
Figura 12 – Modelo simplificado do sistema de vibração do gerador.....	39
Figura 13 – Diagrama de corpo livre.....	41
Figura 14 – Montagem do protótipo proposto.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros da geometria inicial	27
Tabela 2: Parâmetros da geometria otimizada	27
Tabela 3: Parâmetros Geométricos	44
Tabela 4: Parâmetros mecânicos	44
Tabela 5: Parâmetros elétricos	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

B – campo eletromagnético
H – Intensidade de campo
 μ – Permeabilidade magnética
 ϕ – Fluxo magnético
FF ou K_{fill} – Fator de preenchimento
c – coeficiente de amortecimento
 ω – Frequência de operação
 ω_n – Frequência natural
 ω_d – Frequência de ressonância
 P_e – Potência elétrica
 ζ – Fator de amortecimento
 τ – Passo do polo
 l_{stroke} – Curso do movimento
 F_{xr} – Força de impulso eletromagnético
 V_{rph} – Tensão nominal de fase
 f_e – Frequência elétrica nominal
 f_m – Frequência mecânica
 η – Rendimento
 u – Velocidade instantânea
 S_n – Potência nominal
K – Coeficiente de rigidez de mola
N – Número de espiras
 h_s – Altura do slot
 D_{av} – Diâmetro médio das bobinas do estator
 D_{ext} – Diâmetro externo
 b_s – Largura do slot
m - Massa

SUMÁRIO

ABSTRACT	6
1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 TEORIA BÁSICA SOBRE MAGNETISMO	13
2.2 MODELAGEM ANALÍTICA	17
2.3 GERADORES LINEARES EXEMPLO DE APLICAÇÃO	24
2.4 GERADORES LINEARES E SISTEMAS VIBRATÓRIOS	28
3 DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO	33
3.1 MODELO MATEMÁTICO ELÉTRICO E DESIGN	33
3.2 MODELO SIMPLIFICADO DA VIBRAÇÃO PARA UM GERADOR	39
4 PROJETO DO GERADOR	44
4.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	44
4.2 PARÂMETROS MECÂNICOS	44
4.3 PARÂMETROS ELÉTRICOS	45
4.4 PROJETO E MODELO CAD	45
5 DISCUSSÃO	46
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
6.1 CONCLUSÕES	47
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS	50
APÊNDICE A	53
ANEXO A	54

1 INTRODUÇÃO

Produzir ou transformar energia elétrica pode ser um trabalho “sujo” que resultará em resíduos e muito provavelmente em danos ao meio ambiente, ao ecossistema e talvez a saúde das pessoas. Estes danos podem ser de grande monta e irreversíveis, ou de pequena monta que poderão ser reversíveis ou até negligenciados. Não obstante os resíduos gerados, existe o custo da energia obtida pelos métodos tradicionais que tende a crescer. As fontes não renováveis podem também escassear. Desta forma o desenvolvimento de novas tecnologias, através da sinergia entre a engenharia mecânica e a engenharia elétrica, se faz necessário para o bom aproveitamento de fontes de energia ainda inexploradas ou para o aumento do rendimento das máquinas atuais reduzindo, portanto, o consumo de combustíveis fósseis e reduzindo a pegada de carbono (Carbon Footprint) (ALVES, 2014).

As palavras: “Renovável” e “Sustentável”; são fortemente empregadas nos dias atuais e também corroboram o desenvolvimento de novas tecnologias para a transformação e o uso da energia. As fontes renováveis não são em princípios sustentáveis, no sentido que podem de alguma forma trazer algum grau de comprometimento do bem-estar e da saúde de gerações futuras, um exemplo é a queima de matéria vegetal que pode ser renovada, mas em geral produz gases de efeito estufa. Mais uma vez evidencia-se a importância do aumento da eficiência das máquinas atuais, que em condições ótimas devem produzir rejeitos mínimos para que não haja influência sobre o ecossistema.(ALVES, 2014).

A energia através de combustíveis fósseis ou combustíveis vegetais, os álcoois como metanol e etanol, apesar de produzirem grandes quantidades de gases poluentes ainda são a maneira mais eficiente de fornecer energia a veículos. No entanto, a eficiência global de veículos automotores está entre 18% e 30%, eficiência muito baixa que impulsiona o desenvolvimento de novas tecnologias para um melhor aproveitamento da energia gerada pela queima destes combustíveis, reduzindo, portanto, o consumo de combustíveis e a geração de gases poluentes.

Nesta linha de aumento da eficiência de veículos automotores, as indústrias têm investido grandes somas para o desenvolvimento de veículos híbridos que combinam o

uso de motores de combustão interna com motores elétricos. Nestes veículos o aumento da eficiência se dá principalmente pela recuperação da energia de frenagem pelo uso de freios de Foucault, e pouco se tem evoluído no aumento do rendimento dos motores de combustão interna que ainda possuem baixo rendimento, dentre outros motivos devido ao mecanismo de quatro barras (bloco, virabrequim, biela e pistão) que está sujeito a grandes perdas por atrito nos mancais, devido aos ângulos entre a biela e o eixo manivela.

Neste contexto, este projeto de fim de curso visa estudar e projetar um sistema de geração de energia elétrica baseado no fenômeno de ressonância mecânica com alto rendimento na conversão da energia mecânica em elétrica. O dispositivo projetado visa substituir o mecanismo de quatro barras por um sistema vibratório, de movimento linear, que acoplado a um gerador elétrico gere energia elétrica com maior eficiência. Este sistema que acopla o gerador ao sistema vibratório pode ser excitado, por exemplo, em sua frequência natural pelo uso de câmaras de combustão melhorando o aproveitamento da energia dos combustíveis.

Este projeto consistirá no estudo matemático computacional do sistema vibratório de geração de energia elétrica, da otimização do sistema de geração visando o máximo rendimento e definição de parâmetros de projeto para a construção de um protótipo.

1.1 OBJETIVO

Este trabalho apresenta como principais objetivos realizar o desenvolvimento de um modelo físico, matemático e numérico do sistema vibratório de geração de energia elétrica, visando o seu máximo rendimento através da característica de trabalho em ressonância mecânica. E também, através de definição de parâmetros realizar um projeto para um protótipo do sistema estudado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas pesquisas e estudos sobre os métodos utilizados para se projetar, prever o comportamento e o desempenho de um gerador linear. Dentre esses métodos, dois serão apresentados nesta revisão bibliográfica, sendo estes baseados em equações analíticas básicas e na modelagem de campo magnético. Um outro método, que é muito utilizado em trabalhos e estudos se consiste em modelos de elementos finitos, que não será o foco deste trabalho.

2.1 TEORIA BÁSICA SOBRE MAGNETISMO

A princípio, um esclarecimento do significado de alguns termos e teorias básicas sobre magnetização se tornam necessários para um melhor entendimento sobre máquinas elétricas, principalmente sobre geradores lineares. Portanto, a seguir são apresentados teorias e itens relevantes para esse assunto.

BACK-IRON

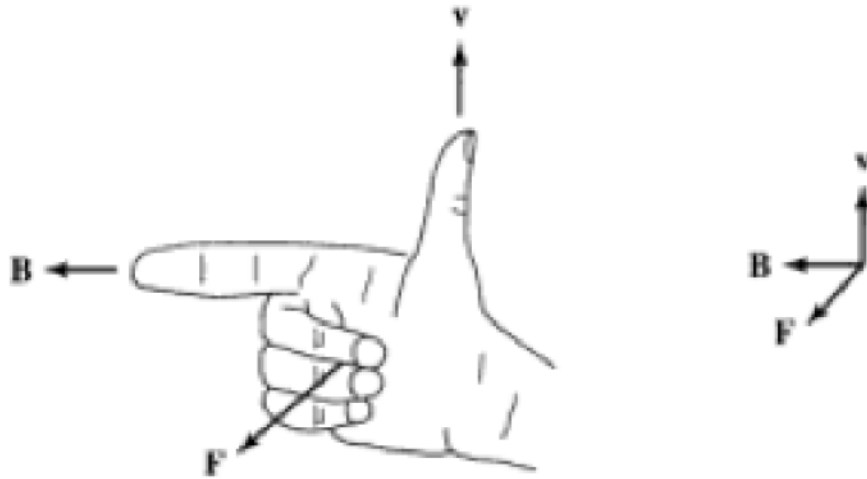
Back-iron tem sua importância para controlar o trajeto do campo magnético e minimizar a redução da força magnetomotriz em máquinas elétricas. Por isso, se consiste em ser um material condutor de campos magnéticos, ou seja, que apresente com alta permeabilidade magnética F_{mmf} (BOSTAD, 2011).

FORÇA DE LORENTZ

A força de Lorentz aparece sobre uma partícula de carga q na presença de um campo elétrico e magnético. Aparece em um fio elétrico de comprimento l que transporta uma corrente quando exposto a campo magnético com uma certa densidade, sendo essa força expressa por (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2006):

$$\vec{F}_L = \vec{B} \times \vec{I} \cdot l \quad (1)$$

Através da regra da mão direita como mostrado na Figura 1, é possível prever a direção da força, representando a multiplicação vetorial, sendo que na figura a velocidade é análoga ao fluxo de carga positiva no fio condutor.



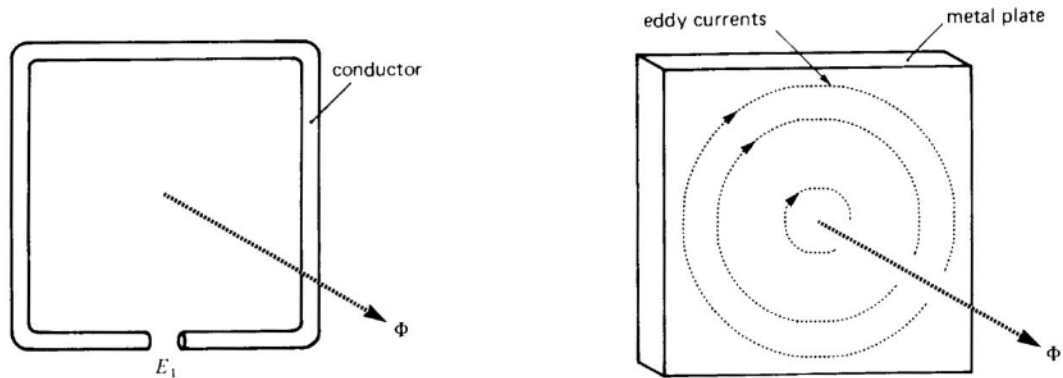
Fonte: FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2006

Figura 1 – Regra da mão direita.

CORRENTE DE FOUCAULT

As correntes de Foucault, assim com apresentado na lei de Faraday, em materiais condutores de eletricidade, ocorre uma indução de potenciais de tensão desiguais quando sujeitos a um fluxo magnético variável. No caso de se ter um material com baixa resistividade elétrica, surge então grandes correntes que fluem no plano perpendicular ao campo magnético variável, em direção oposta ao fluxo magnético, segundo a lei de Lenz, que será apresentada a baixo.

Em alguns casos, indesejáveis, as correntes de Foucault produzem calor com a perda de energia elétrica, através do efeito Joule, assim aumentando a temperatura do material. Um modo de evitar esse efeito é a construção com materiais em lâminas ou com placas finas isoladas umas das outras. (WILDI, 2006, TIPLER EMOSCA, 2008 apud BOSTAD, 2011).



Fonte: WILDI, 2006 apud BOSTAD, A, 2011.

Figura 2 – Correntes de Foucault.

EFEITO PELICULAR

O efeito da pele (skin effect), ou também conhecido como efeito de capilaridade, é devido a correntes de Foucault induzidas e opostas a um campo magnético variável resultante de uma corrente alternada no condutor. A corrente é mais densa na superfície do indutor, com valor de J_s ; e a densidade de corrente diminui exponencialmente com a profundidade d

$$J = J_s \cdot e^{-d/\delta} \quad (2)$$

sendo δ a profundidade abaixo da superfície do condutor.

Uma boa aproximação para δ através dos valores de resistência do condutor, da frequência angular e da constante magnética é

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}} \quad (3)$$

FLUXO MAGNÉTICO

O fluxo total de um campo magnético tem como base a densidade de fluxo magnético ($\vec{B}$), sendo quantidade de fluxo magnético que flui através do elemento de área dA na superfície S e $\hat{n}$ é o vetor normal para a superfície (TIPLER E MOSCA, 2008 apud BOSTAD, 2011):

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot \hat{n} dA \quad (4)$$

A intensidade de campo H [A/m] é a mudança de intensidade do fluxo de campo magnético $\vec{B}$ devido à interação com o material de permeabilidade magnética μ (HANSELMAN, 2006 apud BOSTAD, 2011).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

A permeabilidade relativa $\mu_r = \mu/\mu_0$ define a capacidade de um dado material de conduzir o fluxo magnético. A constante magnética $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$ é igual à permeabilidade μ do vácuo.

LEI DE OHMS PARA CIRCUITO MAGNÉTICOS

De uma forma análoga, circuito magnético pode ser vista como um circuito elétrico. Tanto o fluxo magnético ϕ , como a corrente podem ser definidos como fluxo em um caminho fechado. Em circuitos elétricos resistivos, a tensão é a força motriz da corrente, limitada pela resistência elétrica Ω do material eletricamente condutor. Da mesma maneira é expresso na lei de Ohm para circuitos magnéticos, que a força magnética motriz é a força motriz do fluxo magnético, limitada pela reticência magnética do material permeável magneticamente. (HANSELMAN, 2006 apud BOSTAD, 2011)

$$F_{mmf} = \phi R_m \quad (6)$$

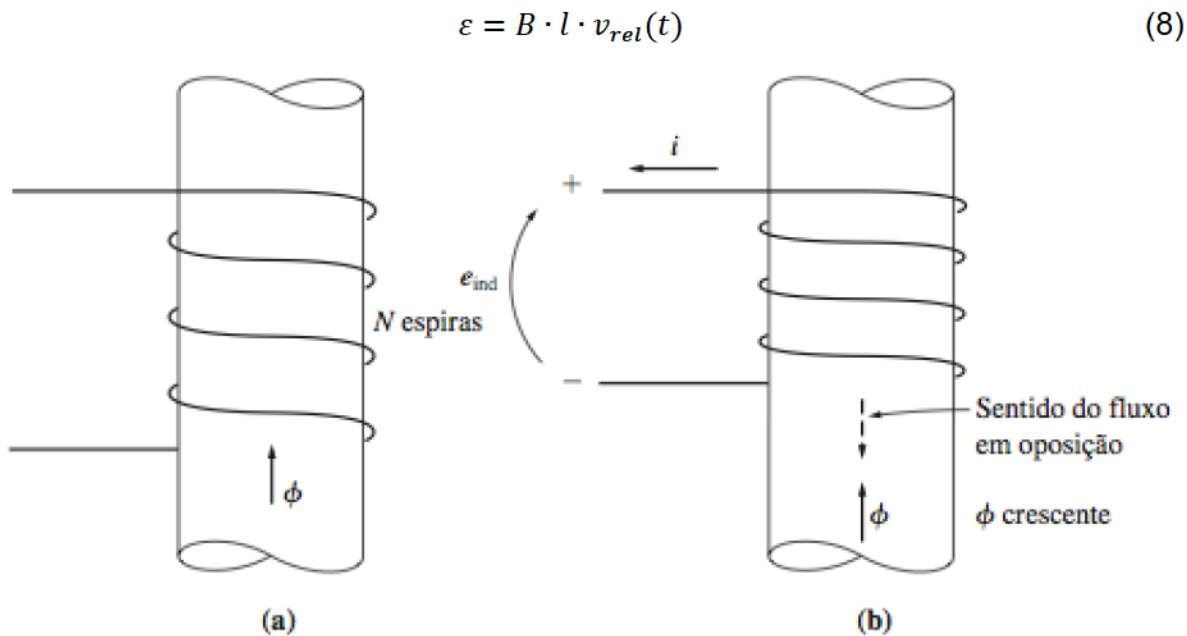
LEI DE FARADAY

Uma mudança no fluxo magnético $\frac{d\phi}{dt} \left[\frac{Wb}{s} \right]$ atravessado um enrolamento de N espiras de fio condutor elétrico causa uma tensão induzida entre os pontos extremos do fio, sendo essa força eletromotriz expressa como abaixo. (FITZGERALD; KINGSLEY e UMANS, 2006)

$$\varepsilon = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (7)$$

LEI DE LENZ

Essa lei define que o sentido da tensão produzida em uma bobina é tal que em condição de curto circuito, entre as pontas da bobina, a corrente flui ao oposto à variação do fluxo, assim como representado pela Figura 3 (CHAPMAN, 2013). Assim se explicando o surgimento do sinal negativo da lei de Faraday.



Fonte: CHAPMAN, 2013

Figura 3 – Lei de Lenz: a) Fluxo magnético crescente em um bobina; b) determinação da polaridade da tensão resultante.

FATOR DE PREENCHIMENTO

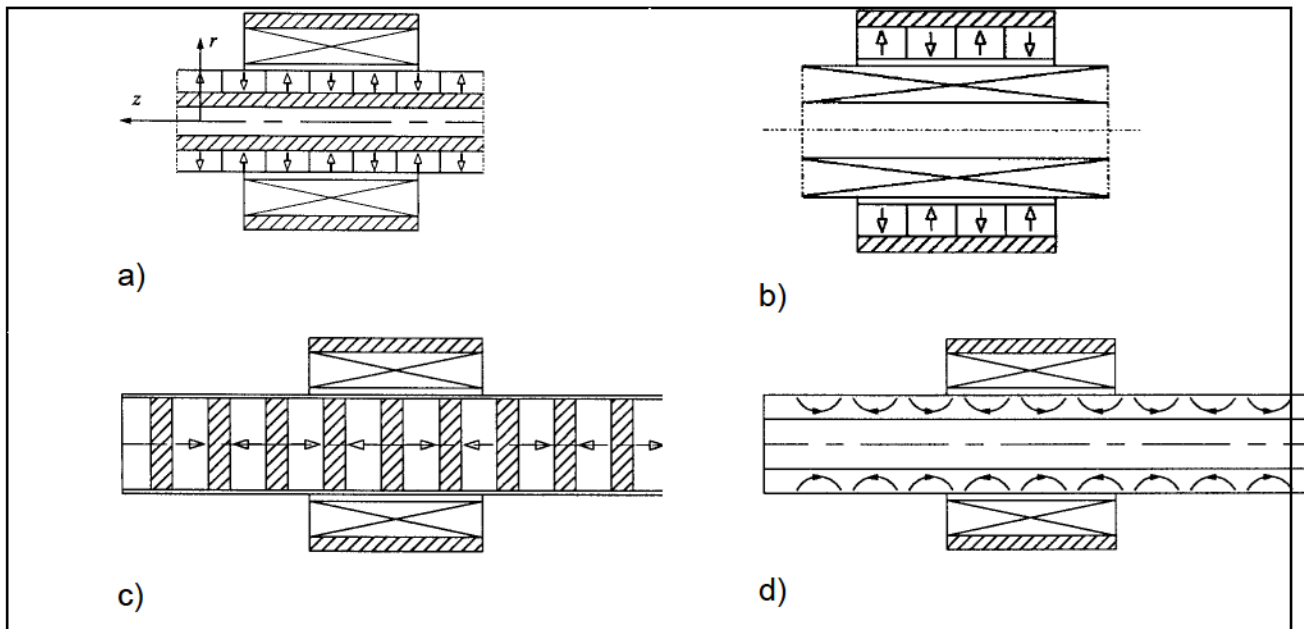
O fator de preenchimento FF ou K_{fill} é definido como a soma da área de seção de cobre dividida pela área de seção transversal total do espaço entre o rotor e o ferro traseiro, alternativamente a soma do volume de cobre dividido pelo volume do intervalo de ar (BOSTAD, 2011).

$$FF \text{ ou } K_{fill} = \frac{\sum A_c}{A_G} = \frac{\sum V_c}{V_G} \quad (9)$$

2.2 MODELAGEM ANALÍTICA

Existem muitas variantes de máquinas lineares e tubulares com ímãs permanentes. Como apresentado por Wang, Jewell e Howe (1999), na Figura 4a) e b) são mostradas topologias de ímãs internas e externas, respectivamente, com ímãs magnetizados radialmente, que podem ser ímã móvel ou armadura móvel. A Figura 4c) mostra uma topologia com ímãs magnetizados axialmente, enquanto a Figura 4d) emprega uma magnetização de Halbach multipolar. Podendo essas configurações

ainda variar quanto a armadura, ser de ar ou de ferro, podem ser SLOTLESS ou SLOTTED.



Fonte: WANG, J., JEWELL, G. W., HOWE, D., 1999.

Figura 4 – Topologias clássicas para máquinas tubulares de ímãs permanente: a) magnetização radial interna, b) magnetização radial externa, c) magnetização axial interna e d) magnetização Halbach interna.

Assim, cada topologia será mais adequada a um tipo de aplicação. Como exemplo as máquinas com ranhuras (slotted) de ferro que apresentam características de produzir maior densidade de força, produzir uma força de cogging desestabilizante indesejável, e perdas de corrente de Foucault. As armadura sem ranhura (slotless), reduzem o efeito de força de cogging, desse modo, assim apresentando um desempenho mecânico melhor.

Equações analíticas para a distribuição do campo magnético para essas topologias de máquinas citadas acima foram desenvolvidas e apresentadas na literatura. Mas para o desenvolvimento dessas soluções é preciso adotar algumas considerações, como (Wang, Jewell e Howe, 1999):

1) O comprimento axial infinito das máquinas de modo que a distribuição de campo é axialmente simétrica e periódica na direção z .

2) A armadura é sem ranhura e a permeabilidade do ferro é infinita. No entanto, se os efeitos de ranhura estiverem presentes, podem ser levados em consideração ao introduzir-se um coeficiente.

Assim, a análise do campo magnético é dividida em duas regiões principais, uma onde a permeabilidade magnética é a permeabilidade do ar (μ_0), região do enrolamento, e a região do ímã com permeabilidade ($\mu_0\mu_r$).

$$B = \begin{cases} \mu_0 H \\ \mu_0\mu_r H + \mu_0 M \end{cases} \quad (10)$$

Onde μ_r é a permeabilidade magnética e M é a magnetização remanescente.

Através de um vetor potencial A , a distribuição do campo ficará

$$B = \nabla \times A \quad (11)$$

As equações governantes de campo será

$$\begin{cases} \nabla^2 A_I = 0 \\ \nabla^2 A_{II} = -\mu_0 \nabla \times M \end{cases} \quad (12)$$

Assim consequentemente chega-se nas equações

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r A_{I\theta}) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_{I\theta}) \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} (r A_{II\theta}) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_{II\theta}) \right) = -\mu_0 \nabla \times M \end{cases} \quad (13)$$

para o qual a magnetização é definida como

$$M = M_r e_r + M_z e_z \quad (14)$$

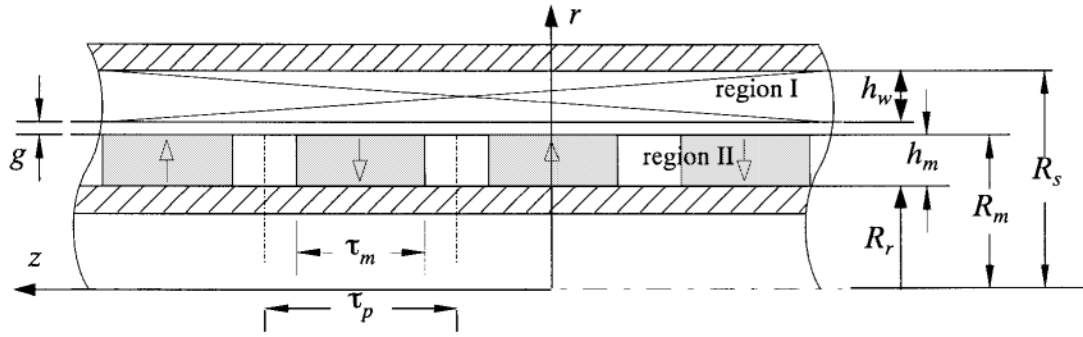
e o fluxo de densidade é entendido como sendo

$$B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) \quad (15)$$

$$B_r = -\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \quad (16)$$

Apresenta a formulação para os casos de magnetização radial, Halbach axial.

Como exemplo, para o caso de uma configuração de máquinas com magnetização radial, seguindo a exemplo da Figura 5.



Fonte: WANG; JEWELL; HOWE; 1999.

Figura 5 – Magnetização radial.

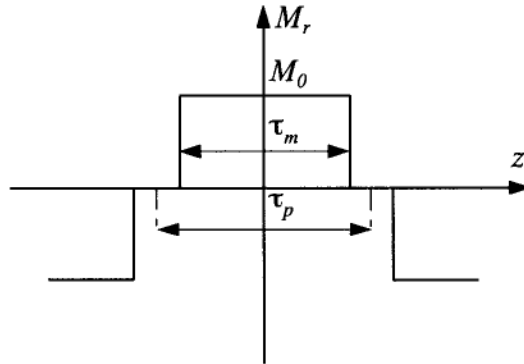
Para o qual, tem-se:

$$M_z = 0 \quad (17)$$

e

$$M_r = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} 4 \left(\frac{B_{rem}}{\mu_o} \right) \frac{\sin(2n-1)\frac{\pi}{2} \alpha_p}{(2n-1)\pi} \cos m_n z \quad (18)$$

que é representado pela distribuição da Figura 6.



Fonte: WANG; JEWELL; HOWE; 1999.

Figura 6 – Distribuição da magnetização.

Sendo

$$\alpha_p = \frac{\tau_m}{\tau_p} \quad (19)$$

$$m_n = (2n-1)\pi/\tau_p \quad (20)$$

aplicando as condições de contorno

$$\begin{aligned} B_{Iz}|_{r=R_s} &= 0; \\ B_{IIz}|_{r=R_s} &= 0; \end{aligned} \quad (21)$$

$$B_{Iz}|_{r=R_m} = B_{IIz}|_{r=R_m}$$

$$H_{Iz}|_{r=R_s} = H_{IIz}|_{r=R_m}$$

Seguindo a sequência de funções apresentada no Apêndice A, com os fatores calculados, encontra-se a distribuição do campo em cada região com as equações abaixo:

$$\begin{aligned}
 B_{Ir}(r, z) &= - \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} [a_{In}BI_1(m_nr) + b_{In}BK_1(m_nr)]\cos(m_nz) \\
 B_{Iz}(r, z) &= \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} [a_{In}BI_0(m_nr) + b_{In}BK_0(m_nr)]\sin(m_nz) \\
 B_{IIr}(r, z) &= - \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \{[F_{An}(m_nr) + a_{IIIn}]BI_1(m_nr) \\
 &\quad + [-F_{Bn}(m_nr) + b_{IIIn}]BK_1(m_nr)\}\cos(m_nz) \\
 B_{IIz}(r, z) &= - \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \{[F_{An}(m_nr) + a_{IIIn}]BI_0(m_nr) \\
 &\quad + [-F_{Bn}(m_nr) + b_{IIIn}]BK_0(m_nr)\}\cos(m_nz)
 \end{aligned} \tag{22}$$

Sendo BI_1, BI_0 funções modificadas de Bessel de primeiro tipo e BK_1 e BK_0 funções modificadas de Bessel de segundo tipo.

Através das equações de campo magnético, é possível a se encontrar equações para o cálculo de força de atuação e também de força eletromagnética (tensão) prevista para o modelo.

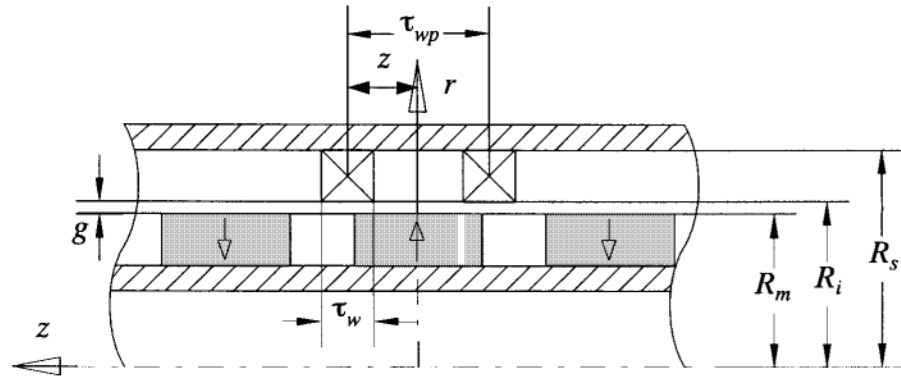
$$F_w = \int_V (J \times B) dV \tag{23}$$

A força total de impulso exercida na bobina pode ser obtida através da equação abaixo, segundo a Figura 7

$$F_w = - \int_{z-\tau_w/2}^{z+\tau_w/2} \int_{R_i}^{R_s} 2\pi r J B_{Ir}(r, z) dr dz \tag{24}$$

também podendo ser escrita da seguinte forma

$$F_w = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} F_n \cos m_n z \tag{25}$$



Fonte: WANG; JEWELL; HOWE; 1999.

Figura 7 – Distribuição das bobinas.

sendo:

$$F_n = 2\pi\tau_w JK_{dn} \int_{R_i}^{R_s} r[a_{In}BI_1(m_n r) + b_{In}BK_1(m_n r)]dr \quad (26)$$

e o fator de distribuição de enrolamento

$$K_{nd} = \frac{\sin\left(\frac{m_n\tau_w}{2}\right)}{\left(\frac{m_n\tau_w}{2}\right)}. \quad (27)$$

Assim, a força total F_{wp} exercida sobre um enrolamento de “fase” compreendendo um número de bobinas conectadas em série, cada uma deslocada por um passo de enrolamento τ_{wp} e carregando uma corrente i é obtida como

$$F_{wp} = \left(\sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} K_{Tn} \sin\left(z - \frac{\tau_{wp}}{2}\right) \right) i \quad (28)$$

sendo

$$K_{Tn} = -\frac{2\pi K_{dpn} N_{wp}}{(R_s - R_i)} \int_{R_i}^{R_s} r[a_{In}BI_1(m_n r) + b_{In}MK_1(m_n r)]dr \quad (29)$$

e o fator de enrolamento $K_{dpn} = K_{pn}K_{dn}$.

Para a força eletromagnética, tem-se que calcular o fluxo magnético, que é dado por

$$\psi_w = \int_{z-\tau_w/2}^{z+\tau_w/2} \int_{R_i}^{R_s} 2\pi r A_{I\theta}(r, z) dr dz = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \Phi_n \sin m_n z \quad (30)$$

onde

$$\Phi_n = \frac{2\pi\tau_w}{m_n} K_{dn} \int_{R_i}^{R_s} r [a_{In} B I_1(m_n r) + b_{In} B K_1(m_n r)] dr \quad (31)$$

O fluxo total da distribuição de enrolamentos de fase é

$$\psi_{wp} = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} \Phi_{np} \cos m_n \left(z - \frac{\tau_{wp}}{2} \right) \quad (32)$$

e

$$\Phi_{np} = \frac{2\pi K_{dpn} N_{wp}}{m_n (R_s - R_i)} \int_{R_i}^{R_s} r [a_{In} B I_1(m_n r) + b_{In} B K_1(m_n r)] dr. \quad (33)$$

Assim, a força eletromagnética induzida é dada por

$$e_{wp} = -\frac{d\psi_{wp}}{dt} = \left(- \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} K_{En} \sin m_n \left(z - \frac{\tau_{wp}}{2} \right) \right) v \quad (34)$$

sendo v a velocidade linear. E K_{en} é definido como

$$K_{En} = -\frac{2\pi K_{dpn} N_{wp}}{(R_s - R_i)} \int_{R_i}^{R_s} r [a_{In} B I_1(m_n r) + b_{In} B K_1(m_n r)] dr. \quad (35)$$

Seguindo essa linha de desenvolvimento outros autores também realizaram alguns estudos que se destacam e apresentam conclusões relevantes ao assunto.

Yan et al. (2012) apresenta uma proposta para analisar a influência do back-iron, em geradores com magnetização radial. Desenvolvendo através das equações analíticas e validando-os com cálculos de elementos finitos. Observou-se que com o uso do back-iron, principalmente quando interno, aumenta-se a densidade de fluxo radial B_r , sendo que B_r é contínuo nos limites e normal a superfície de fronteira com o back-iron. Além de que essa propriedade magnética também reduz vazamentos de fluxo na direção z e aumenta a componente de fluxo em r para a geração de força.

Wang, J., et al. (1998) apresenta uma proposta de um gerador linear pequeno com imã permanente destinado a geração on-board em transdutores de vibração. Foi realizado um modelo eletromecânico do sistema de geração de energia e desenvolvido uma metodologia para se determinar o máximo de potência para um frequência de ressonância. A modelagem analítica desenvolvida para resolução do problema é validade por elementos finitos. E os resultados são confirmados em protótipo na prática.

Wang, Howe and Jewell (2003a) em seu trabalho desenvolve as soluções analíticas para a distribuição do campo magnético. Chegando-se os resultados

conclusivos que a contribuição do comprimento do núcleo finito está relacionada com o aumento da ligação de fluxo e harmônicos, consequentemente levando a ondulações de força de impulso adicionais, quando sobre uma extinção na forma de onda senoidal.

Wang, Howe and Jewell (2003b) desenvolvem as expressões analíticas, a fim de se estudar a componente da força dentada devido ao comprimento finito da armadura. Foram verificadas para geradores com magnetização radial e Halbach. Chegando-se a conclusão que para máquinas magnetizadas com o padrão Halbach, é possível eliminar completamente a força de “cogging” escolhendo um comprimento de armadura apropriado. No entanto para magnetização radial já não é possível.

No início do desenvolvimento deste trabalho foram realizados cálculos analíticos seguindo a metodologia apresentada acima, reproduzindo-se os cálculos e resultados apresentados em alguns trabalhos estudados. No entanto, não se conseguiu manter uma consistência nos resultados de diferentes equações desse método com as alterações dimensionais da máquina simulada. De modo que verificou-se, ao variar as dimensões das máquinas elétricas utilizando diferentes formulações obtinha-se diferentes resultados. Assim, devido a impossibilidade de utilizar-se métodos experimentais para a validação dos resultados optou-se por não utilizar tal metodologia analítica. Este fato não é indicação de que as formulações são errôneas, simplesmente indica que não foi possível determinar os limites de validade destas formulações.

2.3 GERADORES LINEARES EXEMPLO DE APLICAÇÃO

A modelagem matemática de forma analítica apesar de complexa e, algumas vezes de difícil integração, são muito utilizadas uma vez que apresentam precisão adequada.

Desse modo, as equações apresentadas por Boldea e Nasar (1987b) foram utilizadas mais adiante neste trabalho, no capítulo 3, no desenvolvimento matemático, de modo a se produzir e calcular as dimensões geométricas e o desempenho do gerador linear proposto.

Em Boldea e Nasar (1987b) é apresentado o procedimento para se obter os parâmetros de um gerador de 25 kVA. Para esse caso, as condições de contorno, e as

condições iniciais necessárias à resolução das equações foram: potência elétrica (25 kVA); velocidade de operação, chamada de velocidade instantânea, 14,44 m/s, tensão de fase (120 V), frequência elétrica (60 Hz), sendo a frequência mecânica igual a elétrica.

Assim se obtendo como resultados, uma eficiência elétrica de 0,9708, operando com uma corrente de 58,49 A, força de atuação necessária, prevista, para movimentar o gerador de 1789.8 N; e como característica geométricas, um gerador com diâmetro de bobina (D_{av}) de 150 mm, com um passo de polo (τ) de 120 mm.

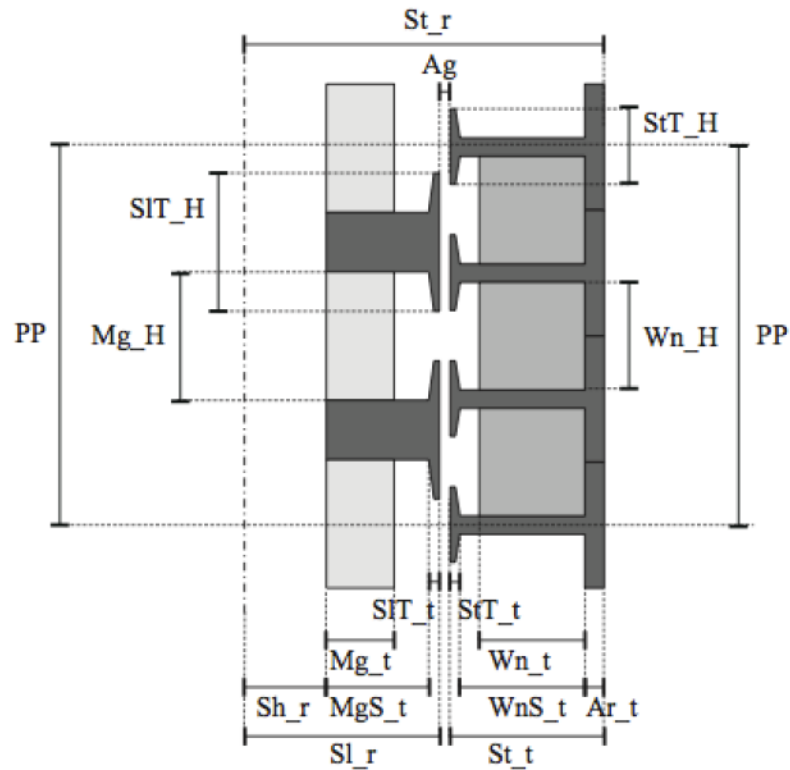
Também é observado que “a tensão superior à nominal com potência máxima para carga resistiva fornece condições para a regulação da tensão sob carga parcialmente indutiva até a potência ativa (25 kW)”.

Ainda com relação a geradores lineares eletromecânicos é comentado por Pirisi, A. e et. al. (2010) a capacidade que apresentam em converter o movimento linear, que acaba sendo o característico de ondas marítimas, em energia elétrica sem que haja uma caixa de câmbio mecânica intermediária para essa conversão, justificando assim a sua utilização nesse meio. No entanto, é constatado que existe uma dificuldade com relação a variação da maré e tipos de ondas, onde sugere-se a utilização de conversores AC-DC.

Também justificado pela outra característica de superar a limitação da vida útil de baterias, os geradores lineares acabam sendo ótima opção para aplicação em pequenos dispositivos eletrônicos para o ambiente marítimo, como sensores sem fio (BAKER, 2004 apud PIRISI, A. et al., 2010), que podem ser aplicados, por exemplo em “bóias para observação em tempo real de eventos extremos naturais” (Kato et al., 2000 apud Pirisi, A. et al., 2010) ou “preservação do meio marinho” (JACOBSON, 1993 apud PIRISI, A. et al., 2010).

Ainda nesse mesmo trabalho é apresentado o design de um gerador através de um método numérico de otimização. Sendo os dois principais métodos, algoritmo genérico (GA) e otimização por enxame de partículas (PSO); e uma técnica híbrida chamada de Otimização por enxames genéticos (GSO), utilizada no trabalho, que é uma técnica baseada nos dois outros métodos, desenvolvida para buscar uma convergência mais rápida e um menor custo computacional.

O design desse gerador é apresentado na Figura 8, sendo os parâmetros iniciais apresentados na Tabela 1, e os parâmetros após o procedimento de otimização apresentados na Tabela 2.



Fonte: Pirisi, A. et al., 2010.

Figura 8 – Geometria e parâmetros considerados na análise do gerador.

Tabela 1: Parâmetros da geometria inicial

Variable	Name	Value [mm]
Axial Parameters		
Pole pitch	PP	21.00
Magnet height	Mg_H	$[0.60, 0.96] \cdot PP/2$
Slider tooth height	SlT_H	$[0.10, 0.80] \cdot PP/2$
Winding Height	Wn_H	$[0.30, 0.90] \cdot PP/3$
Stator tooth height	StT_H	$[0.20, 0.80] \cdot PP/3$
Radial Parameters		
Stator outer radius	St_r	$[20, 40]$
Air gap	Ag	1
Stator Thickness	St_T	$[0.30, 0.70] \cdot (St_r - Ag/2)$
Winding thickness	Wn_t	$[0.70, 0.90] \cdot St_t$
Stator armour thickness	Ar_t	$[0.05, 0.10] \cdot St_r$
Shaft outer radius	Sh_r	$[0.40, 0.80] \cdot Sl_r$
Magnet Thickness	Mg_t	$[0.70, 0.95] \cdot Sl_r$

Fonte: Pirisi, A. et al., 2010

Tabela 2: Parâmetros da geometria otimizada

Variable	Name	Value [mm]
Axial Parameters		
Number of phases	No_{Ph}	3
No. of Poles per phase (stator)	$Poles_{St}$	2
Pole pitch	PP	19.2
Magnet height	Mg_H	5.0
Slider tooth height	SlT_H	6.6
Winding Height	StC_H	5.9
Stator tooth height	StT_H	5.3
Radial Parameters		
Stator outer radius	St_r	43.0
Air gap	Ag	1.0
Stator Thickness	St_T	14.9
Winding thickness	Wn_t	7.8
Stator armour thickness	Ar_t	1.3
Shaft outer radius	Sh_r	8.0
Magnet Thickness	Mg_t	5.4

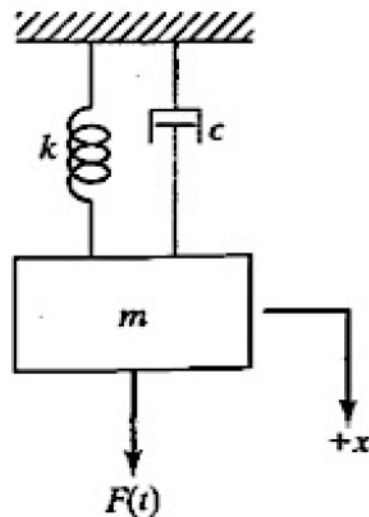
Fonte: Pirisi, A. et al., 2010

Nesse caso o gerador foi projetado para movimentos com velocidades de 0,5 m/s de pico para onda quadrada. Assim obtendo-se um gerador projetado para 24 V (rms), força de atuação de 100 N, da boia, efeitos da força dentada entre -4 a 4 N.

Alguns dos parâmetros dimensionais (Tabela 1), mecânicos e elétricos mostrados por Pirisi e et. al. (2010), foram utilizados como base para o desenvolvimento desse projeto, de forma a se ter valores para dados de entrada nos cálculos matemáticos, parâmetros pré-definidos, que serão apresentados no capítulo 3.

2.4 GERADORES LINEARES E SISTEMAS VIBRATÓRIOS

Considerando que o gerador linear pode ser perfeitamente representado por um sistema com um grau de liberdade, com amortecimento viscoso e excitado por uma força harmônica, como apresentado no modelo abaixo:



Fonte: RAO, 2009.

Figura 9 – Sistema vibratório amortecido.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin(\omega \times t) \quad (36)$$

sendo,

- m – massa;
- c – coeficiente de amortecimento;
- k – constante de rigidez;

$x = x(t)$ – deslocamento da massa na direção do movimento;

$\dot{x} = \dot{x}(t) = \frac{dx}{dt}$ – velocidade da massa na direção do movimento;

$\ddot{x} = \ddot{x}(t) = \frac{d^2x}{dt^2}$ – aceleração da massa na direção do movimento;

$f = F_0 \sin(\omega \times t)$ – força externa aplicada na massa na direção do movimento.

Antes, deve-se notar uma importante consideração, com o que foi apresentado no capítulo 2.1. Sendo a força de Lorentz diretamente relacionada com a corrente que passa pelo fio, também sendo que essa corrente que estará presente no fio é dependente da tensão a ser imposta, a qual, segundo a lei de Faraday, ou então mais explícito na lei de Lenz, é diretamente relacionada com a taxa de mudança de fluxo, a qual se deve a velocidade de deslocamento do gerador.

Portanto, pode-se assumir que essa força tem uma característica de amortecimento no sistema mecânico do gerador linear, sendo essa relacionada com a velocidade. Segundo a equação diferencial que representa o movimento do sistema mecânica amortecido, essa força será então representada por c_e .

Assim, sendo

$$c = c_e + c_m \quad (37)$$

onde c_m é o amortecimento mecânico.

Pode-se então desenvolver e verificar em qual condição de amortecimento se torna mais viável para a operação de um gerador linear, onde se busca que o sistema trabalhe em ressonância.

Segundo o desenvolvimento apresentado por Thomson (1978), é definido o conceito de amortecimento inicialmente a partir de um sistema livre

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (38)$$

tendo como solução da forma

$$x(t) = Ae^{st} \quad (39)$$

assim,

$$s = \frac{-c \pm \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \quad (40)$$

O coeficiente de amortecimento crítico é definido como o caso em que a solução da equação seja única, ou seja:

$$\left(\frac{c_c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m} = 0 \rightarrow c_c = 2m\sqrt{\frac{k}{m}} \quad (41)$$

$$c_c = \sqrt{4mk} = 2m\omega_n \quad (42)$$

O fator de amortecimento é definido como a razão entre a constante de amortecimento e a constante de amortecimento crítico:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} \quad (43)$$

Para um sistema em sub amortecimento $\zeta < 1$, tem-se que:

$$c < \sqrt{4mk} \quad (44)$$

E um sistema super amortecido $\zeta > 1$ tem-se que:

$$c > \sqrt{4mk} \quad (45)$$

Para um sistema sub amortecido, tem-se que o movimento descrito será um movimento harmônico amortecido de frequência de vibração amortecida dada por:

$$\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2} \omega_n \quad (46)$$

O caso sub amortecido se torna importante de ser estudado pois é o único que resulta em um movimento oscilatório (Singiresu, 2009).

Agora, analisando a resposta do mesmo sistema amortecido com relação a uma força harmônica aplicada se tem um caso mais representativo da realidade para um gerador linear.

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (47)$$

para esse sistema a solução particular será

$$x(t) = X \cos(\omega t - \phi) \quad (48)$$

sendo

X a amplitude da resposta;

ϕ o ângulo de fase da resposta.

Chegando se a seguinte solução

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + c^2\omega^2}} \quad (49)$$

e

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2} \right) \quad (50)$$

E chegando-se a equação da quantidade $M = Xk/F_0$, que é conhecida como o fator de ampliação.

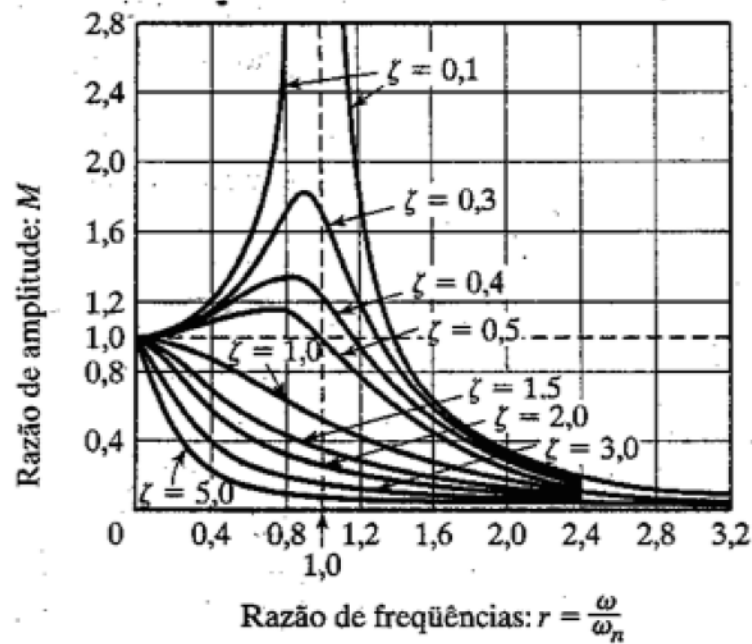
$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right]^2}} \quad (51)$$

sendo

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (52)$$

$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (53)$$

o qual é representado pela Figura 10



Fonte: RAO, 2009.

Figura 10 – Variação de ampliação em relação a razão de frequência.

O valor máximo de M ocorre quando, para $0 < \zeta < 1/\sqrt{2}$

$$r = \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (54)$$

assim, tem-se

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (55)$$

ω_d conhecida como frequência natural amortecida (ou frequência de ressonância) é mais baixa que a frequência natural do sistema.

Dessa forma, pode-se entender que para um gerador linear o seu estado de trabalho deve ser caracterizado como um sistema sub amortecido com uma frequência de trabalho próximo a frequência natural amortecida, assim para se obter um maior valor de amplitude de deslocamento. Consequentemente, esse será um gerador que se movimenta em uma amplitude maior com uma força de excitação menor. Resultando em uma melhor eficiência para o gerador.

Geradores lineares podem produzir maior potência elétrica útil quando a frequência de vibração de excitação corresponde com a frequência de ressonância do gerador como é mostrado por Gherca e Olaru (2012), através do desenvolvimento até a equação:

$$P_{e\omega_r} = \frac{P_{e\omega_n}}{(1 - \zeta^2) \times (1 - 2\zeta^2)} \quad (56)$$

sendo $0 \leq \zeta < 0.7$

$$P_{e\omega_r} \geq P_{e\omega_n} \quad (57)$$

Ainda também é apresentado um fator importante para o desenvolvimento do gerador linear, em que para a maximização da potência elétrica gerada deve-se ter o amortecimento elétrico igual ao amortecimento mecânico presente. No capítulo 3, é apresentado o desenvolvimento similar para se chegar uma relação correspondente.

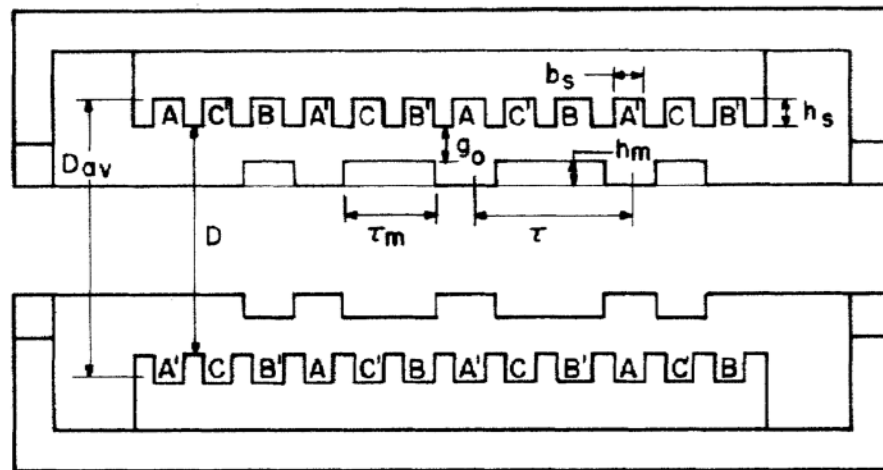
$$\zeta_e = \zeta_m \quad (58)$$

Ainda Gherca e Olaru (2012) destaca que os geradores são estritamente projetados para os seu melhor desempenho em uma frequência de ressonância, sendo isso o grande fator limitante e prejudicial para as aplicações dos geradores lineares. Assim são apresentados algumas configurações que podem promover melhoras na faixa de máximo aproveitamento da potência gerada.

3 DESENVOLVIMENTO DE MODELO MATEMÁTICO

Através deste capítulo será exposto os valores dos principais parâmetros para um gerador de energia elétrica linear, os quais serão definidos a partir de equações e modelos matemáticos encontrados na literatura e também desenvolvidos neste trabalho. Esses parâmetros se dividem principalmente em um modelo da parte elétrica do gerador e um modelo mecânico do sistema de vibração.

Esse desenvolvimento é visando o projeto de um gerador elétrico tubular com ímãs permanente, seguindo a seguinte geometria apresentada na Figura 11.



Fonte: Boldea, I.; Nasar, S. A.; 1987a.

Figura 11 – Gerador linear com ímãs permanente de três fases.

3.1 MODELO MATEMÁTICO ELÉTRICO E DESIGN

O modelo matemático apresentado a seguir é baseado inteiramente em Boldea, I.; Nasar, S. A.; 1987b. Assim, de início tem-se que pré-determinar os valores de entrada do modelo matemático, sendo que alguns desse dados de entrada são baseados no projeto e modelo apresentado por Piris, A. et al; 2010, mesmo que não copiados igualmente, mas para referência de valor de grandeza a ser utilizado aqui, sendo que alguns desse valores estão explícitos e citados em tabelas, já outros estão implícitos em gráfico de tensão x tempo, por exemplo, a frequência elétrica e tensão elétrica.

Como dados de entrada serão utilizados:

- Passo do polo: $\tau = 10,5 \text{ mm} = 0.0105 \text{ m}$; (Piris, A.; et al; 2010).
- Curso de movimento: $l_{stroke} = \tau = 0.0105 \text{ m}$;
- Força de impulso eletromagnético: $F_{xr} = 100 \text{ N}$; (Piris, A.; et al; 2010).
- Tensão nominal de fase: $V_{rph} = 30 \text{ V(rms)}$;
- Frequência elétrica nominal: $f_e = 23,8095 \text{ Hz}$; (Piris, A.; et al; 2010.)
- Frequência mecânica: $f_m = f_e$;
- Rendimento elétrico: $\eta = 0,685$;

Abordagem para desenvolvimento do Design

Considere um rotor de estrutura tubular com dois polos e dois polos de meia extremidade como apresentado na Figura 11, o que implica um comprimento de três polos completo para o rotor. Uma vez que as frequências elétricas e mecânicas são iguais entre si, o passo do polo τ é igual ao comprimento do curso l_{stroke} que é dado por

$$l_{stroke} = \frac{u}{2 \times f_e} \quad (59)$$

Assim, a velocidade instantânea (u) pode ser calculada

$$u = 2 \times f_e \times l_{stroke} = 2 \times 23,8095 \times 0.0105 = 0,5 \text{ m/s} \quad (60)$$

O a força eletromagnética F_{xr} é definida pela potência nominal, considerada como ativa, a velocidade de deslocamento do gerador e uma eficiência prevista $\eta = 0,685$

$$F_{xr} = \frac{S_n}{u \times \eta_r} \quad (61)$$

Assim, pode-se calcular a potência nominal (S_n) esperada

$$S_n = F_{xr} \times u \times \eta_r = 100 \times 0,5 \times 0,6852 = 34,25 \text{ W} \quad (62)$$

Já a força eletromagnética específica é dada por

$$f_{xr} = \frac{F}{\pi \times D \times m_r \times \tau} \quad (63)$$

A força eletromagnética específica em geral varia entre 1 a $1,5 \text{ N/cm}^2$. Considerando, portanto, $f_{xr} = 1,32 \text{ N/cm}^2$ como apresentado em Boldea, I.; Nasar, S. A.; 1987a.

$$D = \frac{F_{xr}}{\pi \times m_r \times \tau \times f_{xr}} = \frac{100}{\pi \times 6 \times 0,0105 \times 1,32 \times 10^4} = 0.0383 \text{ m} \quad (64)$$

Para a tensão em carga zero pode ser considerada em geral como $V0 = (1,2 \text{ a } 1,4) \times V_r$. E a sua formulação dada por

$$V0 = \frac{\omega_1}{\sqrt{2}} \times W_1 \times \frac{2}{\pi} \times B_{gr} \times \pi \times D \quad (65)$$

sendo,

$$\omega_1 = 2 \times \pi \times f_e \quad (66)$$

A densidade de fluxo magnético, para o ar, é $B_{gr} = (0,6 \text{ a } 0,7) \text{ T}$ para um ímã permanente de Terra-rara com $B = (0,8 \text{ a } 0,9) \text{ T}$.

$$W_1 = \frac{\pi \times \sqrt{2} \times V0}{2 \times \omega_1 \times B_{gr} \times \tau \times \pi \times D} \quad (67)$$

A seguir, a densidade do fluxo no ar e a distribuição do enrolamento do estator são consideradas sinusoidais. Considerando

$$V0 = 1,25 \times V_{rph} = 1,25 \times 30 = 37,50 \text{ V (rms)} \quad (68)$$

da equação de tensão para carga zero apresentada acima, obtém-se o número de voltas W_1 por fase do estator:

$$W_1 = \frac{\pi \times \sqrt{2} \times V0}{2 \times \omega_1 \times B_{gr} \times \tau \times \pi \times D} \quad (69)$$

$$W_1 = \frac{\pi \times \sqrt{2} \times 37,50}{4 \times \pi \times 23,8095 \times 0,65 \times 0,0105 \times \pi \times 0,0383} = 678,4962 \text{ voltas/fase} \quad (70)$$

O enrolamento do estator é feito de bobinas circulares. Em termos de bobinas convencionais de armadura rotativa de bobina de fase, uma bobina circular corresponde apenas a metade de uma convencional.

Como apenas os polos m_r estão ativos, o número de voltas circulares por slot n_s ($q = 1 \text{ slot / pole / phase}$) é

$$n_s = \frac{W_1}{q \times m_r} \times 2 = \frac{678,4962}{1 \times 6} \times 2 = 226,1654 \text{ voltas/slot} \quad (71)$$

como o comprimento do curso $l_{stroke} = \tau$, para fazer pleno uso dos polos dos ímãs permanente do rotor, o enrolamento do estator deve superar o comprimento ativo do rotor em um polo de comprimento. Nesse caso, o estator terá 4 polos, enquanto apenas 3 serão considerados ativos, ou seja, considerado em W_1 .

Geometria do Slot do Estator

A área do slot é:

$$A_{slot} = \frac{n_s \times I_r}{K_{fill} \times J_{co}} \quad (72)$$

onde I_r é a corrente nominal de fase, K_{fill} é o fator de filamento ou de preenchimento do slot e J_{co} é a densidade de corrente nominal do cobre. Assim a corrente nominal é:

$$I_r = \frac{S_n}{3 \times V_r} = \frac{34,15}{3 \times 30} = 0,3806 \text{ A} \quad (73)$$

Assim, a área do slot é:

$$A_{slot} = \frac{226,1654 \times 0,3806}{0,6 \times 4,17} = 34,3999 \text{ mm}^2 \quad (74)$$

Como o fluxo de densidade do ar na folga $B_{gr} = 0,65 \text{ T}$, com um passo de ranhuras de $\tau_s = \tau/3 = 3,5 \text{ mm}$ e a largura da ranhura igual a $b_s = 2,8 \text{ mm}$. Assim, a profundidade da ranhura será:

$$h_s = \frac{A_{slot}}{b_s} = \frac{34,3999}{2,8} = 12,2857 \text{ mm} \quad (75)$$

Parâmetros do circuito equivalente

Os polos de rotor de ímã permanente da Terra raras levam a uma máquina com polos não salientes e um entreferro equivalente. Uma vez que a permeabilidade ao retrocesso do SmCo5 é de cerca de $1,02 \times \mu_0$, o espaço entre o estator e o eixo do rotor pode ser considerado magneticamente como preenchido e aproximado como um espaço vazio semi-infinito excitado do estator se h_m (altura do ímã) for muito maior do que o entreferro mecânico e da ordem de r/l . Neste caso, a indutância magnetizadora da fase do estator é:

$$M' \sim \frac{6 \times \mu_0}{\pi^2} \times (K_{w1} \times W_1)^2 \times \frac{\tau \times \pi \times D}{P \times \tau / \pi} = \frac{6 \times \mu_0 \times (K_{w1} \times W_1)^2 \times D}{P} \quad (76)$$

$$M' = 6 \times 1,256 \times 10^{-6} \times (1 \times 678,4962)^2 \times \frac{0,0383}{1,5} = 0,0443 \text{ mH} \quad (77)$$

A resistência da fase é

$$R_{1t} = \rho_{co} \times \frac{\pi \times D_{av} \times W_{1t}}{\frac{I_r}{j_{co}}} \quad (78)$$

$$R_{1t} = \frac{2,3 \times 10^{-8} \times \pi \times 0,05058 \times 4,17 \times 10^6 \times 678,4962}{0,3806} = 36,2168 \, \Omega \quad (79)$$

O estator tem quatro polos ($2P = 4$), mas apenas três ($2P = 3$) estão ativos. A indutância de vazamento L , compreende o vazamento do slot dos quatro polos e a indutância de magnetização do quarto polo. Assim sendo,

$$L_{\sigma t} = \frac{M'}{2 \times P} + \mu_0 \times \pi \times D_{av} \lambda_s \times (2 \times P_t) \times q \times n_s^2 \quad (80)$$

$$\begin{aligned} L_{\sigma t} &= \frac{0,0443}{3} \times 10^{-3} + 1,256 \times 10^{-6} \times \pi \times 0,05058 \times 2,1769 \times 4 \times 1 \times (226,1654)^2 \\ &= 0,0962 \, mH \end{aligned} \quad (81)$$

com a permeabilidade específica do slot igual a:

$$\lambda_s = \frac{2mm}{b_s} + \frac{h_s}{3 \times b_s} = \frac{2}{2,8} + \frac{12,2857}{3 \times 2,8} = 2,1769 \quad (82)$$

Parâmetros de modelo ortogonal

De acordo com a teoria unificada das máquinas elétricas os parâmetros do modelo de quadrante direto são

$$L_{\sigma} = L_{\sigma t} \quad (83)$$

$$M = M' \times \sqrt{\frac{3}{2}} = 0,0542 \, mH \quad (84)$$

a tensão induzida sem carga por fase é:

$$V_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \times V_{qo} = -\sqrt{\frac{2}{3}} \times \omega_e \times M \times I_{F0} \quad (85)$$

Portanto a corrente equivalente do permanente I_{F0} é:

$$I_{F0} = \frac{-V_{0pico}}{\omega_e \times M} \times \sqrt{\frac{3}{2}} = \frac{37,5}{2 \times \pi \times 23,8095 \times 0,0542 \times 10^{-3}} \times \sqrt{\frac{3}{2}} = -8,0088 \, A \quad (86)$$

Desempenho avaliado

Considerando uma carga resistiva pura na corrente nominal $I_r = 0,3806 \, A$. Já a perda total pela resistência do cobre é dada por:

$$P_{co} = 3 \times R_{1t} \times I_r^2 = 3 \times 36,2168 \times 0,3806^2 = 15,7350 \, W \quad (87)$$

Portanto a potência eletromagnética desenvolvida pelo alternador em fator de potência é:

$$P_e = S_n + P_{co} = 34,25 + 15,7350 = 49,9850 \text{ W} \quad (88)$$

com a eficiência elétrica dada por:

$$\eta_e = \frac{S_n}{P_e} = \frac{34,25}{49,9850} = 0,6852. \quad (89)$$

A força eletromagnética é

$$F_{xe} = \frac{P_e}{u} = \frac{49,9850}{0,5} = 99,9701 \text{ N}. \quad (90)$$

Mas a força também pode ser apresentada pela equação:

$$F_{xe} = -\frac{\pi}{\tau} \times M \times I_{F0} \times i_{qe} \quad (91)$$

assim temos,

$$i_{qe} = -\frac{F_{xe} \times \tau}{\pi \times M \times I_{F0}} = -\frac{99,9701}{\pi \times 0,0542 \times (-8,0088)} = 0,7696 \text{ A} \quad (92)$$

O sinal de (+) representa o modo de operação de gerador. Agora das seguintes equações

$$i_{de} \times (R_{1t} + R_L) = u \times \frac{\pi}{\tau} \times (L_{sigma} + M) \times i_{qe} \quad (93)$$

$$i_{qe} \times (R_{1t} + R_L) = -\frac{\pi}{\tau} \times u \times [(L_{sigma} + M) \times i_{de} + M + I_{F0}] \quad (94)$$

sendo i_{de} expresso em função de i_{qe} , pode-se encontrar R_L (carga de resistência) como

$$(R_{1t} + R_L)^2 + \frac{\pi}{\tau} \times \frac{u}{i_{qe}} \times M \times I_{F0} \times (R_{1t} + R_L) + \left[\frac{\pi}{\tau} \times u \times (L_{sigma} + M) \right]^2 = 0 \quad (95)$$

sendo $u = 0,5 \text{ m/s}$, $\tau = 0,0105 \text{ m}$, $i_{qe} = 0,7696 \text{ A}$, $I_{F0} = -8,0088 \text{ A}$, $L_{sigma} + M = 0,1504 \text{ mH}$. Tem-se:

$$R_{1t} + R_L = 77,8971 \Omega \quad (96)$$

$$R_L = 41,6803 \Omega \quad (97)$$

Sendo $i_{qe} = 0,7696 \text{ A}$,

$$i_{de} = \frac{\pi}{\tau} \times \frac{L_{sigma} + M}{R_{1t} + R_L} \times i_{qer} = \frac{\pi \times 0,5 \times 0,1504 \times 10^{-3} \times 0,7696}{0,0105 \times 77,8971} \quad (98)$$

$$i_{de} = 0,2224 \text{ A} \quad (99)$$

portanto,

$$\begin{aligned} V_d &= i_{de} \times R_L = 0,2224 \times 41,6803 = 9,2679 \text{ V} \\ V_q &= i_{qe} \times R_L = 0,7696 \times 41,6803 = 32,0759 \text{ V} \end{aligned} \quad (100)$$

Aplicando a transformação seguinte, a tensão de fase será

$$V_a = \sqrt{\frac{2}{3}} \times [V_d \times \cos(\omega_e \times t) - V_d \times \sin(\omega_e \times t)] \quad (101)$$

$$V_a = + \sqrt{\frac{2}{3}} \times [9,26769 \times \cos(\omega_e \times t) - 32,0759 \times \sin(\omega_e \times t)]$$

a amplitude da tensão da fase será:

$$V_{arms} = 19,1937 \text{ V} \quad (102)$$

E finalmente a corrente na primeira fase será:

$$I_a = \frac{V_a(rms)}{R_L} = \frac{19,1937}{41,6803} = 0,4605 \text{ A} \quad (103)$$

E a potência entregue é na realidade:

$$P_1 = 3 \times I_a \times V_a = 3 \times 0,4605 \times 19,1937 = 26,5161 \text{ W} \quad (104)$$

O valor está próximo do alvo inicial. O pequeno erro pode ser reduzido a zero após algumas iterações nos cálculos começando com (19) onde I_a de (30) deve ser usado em vez de I_r

3.2 MODELO SIMPLIFICADO DA VIBRAÇÃO PARA UM GERADOR

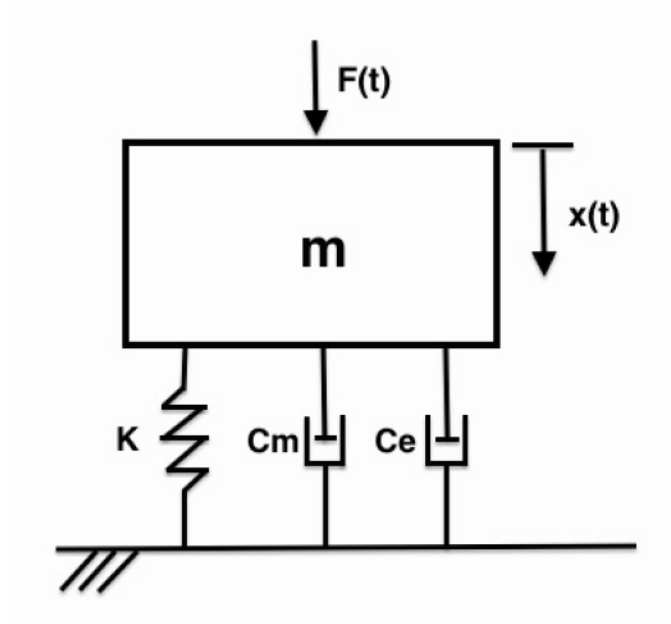


Figura 12 – Modelo simplificado do sistema de vibração do gerador.

- K – suspensão elástica linear [N/m];
- C_m – amortecimento viscoso linear [Ns/m] ;
- C_e – amortecimento elétrico linear [Ns/m];

Antes de se iniciar o desenvolvimento do sistema de vibração se torna essencial conhecer a massa movida e projetar a mola a ser utilizada.

Para a determinação, ou previsão da massa movida, pode-se usar da equação apresentada por Boldea, I. (2013), dada por:

$$G_{irons} = 2 \times p \times (l_{PM} + l_{stroke}) \times \pi \times (D_{iPM} - 2 \times (g + h_{coil}) - h_{cm}) \times h_{cm} \times \gamma_{iron} \quad (105)$$

que resumidamente se consiste no volume da parte movida considerando ela como um todo como sendo de aço (densidade utilizada é a do aço, mesmo para os imãs). Assim, convertendo no projeto desenvolvido aqui, pode-se prever que a massa da parte movida de maneira simplificada será:

$$m = \frac{\pi \times D^2 \times N_{imãs} \times \tau \times \gamma_{aço}}{4} \quad (106)$$

$$m = \frac{\pi \times 0,0383^2 \times 5 \times 0,0105 \times 7200}{4} = 11,3705 \text{ kg}$$

Para o projeto da mola, utiliza-se das equações apresentadas por Budynas e Nisbett (2008) em seu livro, as equações para projeto de uma mola é dado por:

$$k = \frac{d^4 \times G}{8 \times D^3 \times N} \quad (107)$$

- d – diâmetro do fio;
- D – diâmetro da espira;
- G – o módulo de elasticidade transversal ou módulo de cisalhamento;
- N – número de espiras;

sendo k o coeficiente da mola, que segue a relação

$$k = \frac{F}{y} \quad (108)$$

onde F é a força e y o deslocamento.

Sendo w_n , frequência natural do sistema e w_e , frequência elétrica. Sabendo-se que:

$$f_n = f \quad (109)$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (110)$$

assim,

$$k = \left(\frac{\omega_n}{2 \times \pi}\right)^2 \times m = 23,809^2 \times 11,3705 = 6.445,59 \text{ N/m} \quad (111)$$

Portanto, assumindo como parâmetros iniciais da mola como sendo uma mola de diâmetro externo de 30 mm, número de espira de 2,5 e assumindo que seja feito de um material de fio de cromo-vanádio, onde $G = 77,2 \text{ GPa}$.

$$d = \left(\frac{8 \times D^3 \times N \times k}{G}\right)^{1/4} = \left(\frac{8 \times 0,03^3 \times 2,5 \times 6.445,59}{77,2 \times 10^9}\right)^{1/4} = 0,0026 \text{ m} = 2.6 \text{ mm} \quad (112)$$

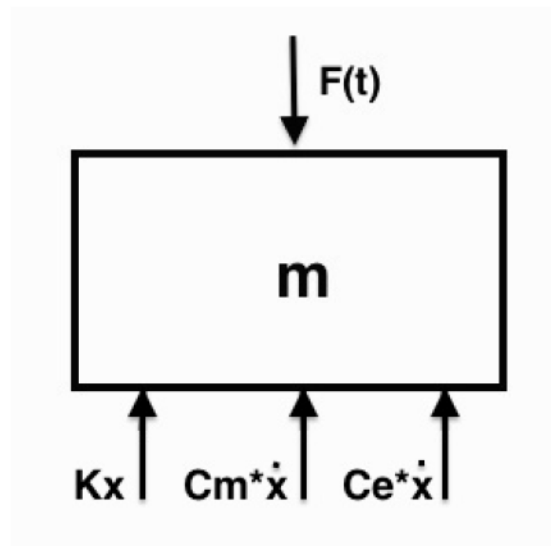


Figura 13 – Diagrama de corpo livre.

$$\begin{aligned} m\ddot{x} &= -kx - c_m\dot{x} - c_e\dot{x} + F \\ m\ddot{x} + c_m\dot{x} + c_e\dot{x} + kx &= F \\ m\ddot{x} + (c_m + c_e)\dot{x} + kx &= F \end{aligned} \quad (113)$$

A solução da equação diferencial ordinária para $F(t) = F_0 e^{-i\omega t}$ é $x(t) = X_0 e^{-i\omega t}$, substituindo-se na equação

$$(-m\omega^2 + i(c_m + c_e)\omega + K)X_0 e^{-i\omega t} = F_0 e^{-i\omega t} \quad (114)$$

$$X_0 = \frac{F_0}{(-m\omega^2 + i(c_m + c_e)\omega + k)} \quad (115)$$

A energia dissipada por ciclo de oscilação é:

$$P_1 = F_a \frac{dx}{dt} = (c_m + c_e) \dot{x} * \dot{x} \quad (116)$$

Sendo $x = X_0 \sin(\omega t + \phi)$; e $\dot{x} = X_0 \omega \cos(\omega t + \phi)$

$$P = (X_0 \omega)^2 (c_m + c_e) \cos^2(\omega t + \phi) \quad (117)$$

$$W_{1-2} = \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} (X_0 \omega)^2 (c_m + c_e) \cos^2(\omega t + \phi) \quad (118)$$

$$W_{1-2} = (X_0 \omega)^2 (c_m + c_e) \frac{\pi}{\omega} = \pi X_0^2 \omega (c_m + c_e) = W_m + W_e \quad (119)$$

$$W_m = \omega \pi X_0^2 c_m \quad (120)$$

$$W_e = \omega \pi X_0^2 c_e$$

Trabalho realizado pela força de excitação no sistema é equivalente ao trabalho das forças dissipativas. A máxima energia do sistema corresponde à máxima energia cinética como se segue:

$$\sigma = \frac{m \dot{x}_m^2}{2} = \frac{m \omega X_0^2}{2} \quad (121)$$

Portanto se a força de excitação é tal que sustente uma amplitude de vibração X_0 temos:

$$\eta = \frac{\pi X_0^2 \omega (c_m + c_e) 2}{m \omega^2 X_0^2} = \frac{2\pi}{m\omega} (c_m + c_e) \quad (122)$$

Na ressonância $\omega = \omega_n$

$$\eta = 4\pi \left(\frac{c}{2m\omega_n} \right) \quad (123)$$

sendo $\zeta = \frac{c}{c_0}$ e $c_0 = 2m\omega_n$

$$\eta = 4\pi\zeta \rightarrow \text{constante} \quad (124)$$

O máximo de ξ para que haja oscilação é:

$$\zeta \sim 1 \text{ ou } c_m + c_e = c_0 \quad (125)$$

Portanto

$$c_m + c_e = 2m\omega_n \quad (126)$$

Desta equação caso não haja amortecimento mecânico no sistema obtém-se:

$$c_e = 2m\omega_n \quad (127)$$

Assim

$$c_e = 2 \times 11,3705 \times 2 \times \pi \times 23,8095 = 3.402 \text{ N.s/m} \quad (128)$$

como o maior coeficiente de amortecimento equivalente que o sistema elétrico pode introduzir mantendo a vibração do sistema.

Dessa forma, analisando a força elétrica gerada e imposta no sistema relacionada com a velocidade de movimentação do sistema mecânico, tem-se um coeficiente de amortecimento elétrico real dado por:

$$c_r = \frac{F_{xr}}{v} = \frac{100}{0,5} = 200 \text{ N.s/m} \quad (129)$$

Sendo que esse amortecimento é menor que o amortecimento crítico encontrado anteriormente, de forma que:

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{200}{3.402} = 0,05879 \quad (130)$$

Assim sendo esse valor menor que 0.707 e $r = 1$, indica que o sistema está operando em regime sub amortecido.

E sendo a frequência amortecida

$$f_d = f_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} = 23,8095 \sqrt{1 - 2 \times (0,05879)^2} = 23,72707 \text{ Hz.} \quad (131)$$

4 PROJETO DO GERADOR

4.1 PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Os principais parâmetros geométricos para o desenvolvimento do projeto a ser apresentado a seguir, com base nas contas já realizadas acima, está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros Geométricos

D	38,3 mm
h_s	12.2857 mm
D_{av}	50.58 mm
D_{ext}	62.87 mm
τ	10.5 mm
bs	2.8 mm

4.2 PARÂMETROS MECÂNICOS

Para os parâmetros mecânicos se torna necessário o cálculo para descobrir a massa e também o projeto da mola a ser utilizada.

Tabela 4: Parâmetros mecânicos

Massa	11,3705 kg
m	
Coeficiente de amortecimento mecânico	0N.s/m
c_m	
Coeficiente de amortecimento elétrico	200 N.s/m
c_e	
Coeficiente de rigidez da mola	6.445,59 N/m
k	

4.3 PARÂMETROS ELÉTRICOS

E os dados elétricos esperados para esse projeto de gerador linear está apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros elétricos

Potência P	26,516 W
Tensão de saída V	19,194 V
Frequência elétrica f_e	23,809 Hz

4.4 PROJETO E MODELO CAD

A seguir na Figura 14 é apresentado o desenho em 3D representativo do protótipo de gerador linear proposto neste trabalho, segundo todos os cálculos desenvolvidos. Também os desenhos específicos de cada peça e da montagem é apresentado no Anexo A.

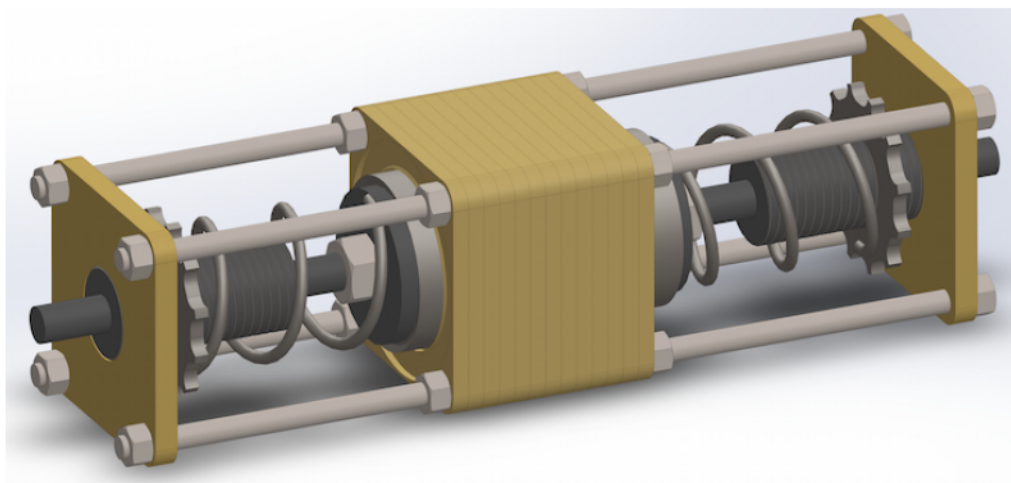


Figura 14 – Montagem do protótipo proposto.

Sendo, que esse gerador é composto principalmente por 7 elementos de aço formando o estator, com mais 6 bobinas entre eles, formando a armadura; e 6 elementos de aço, entre eles mais 5 ímãs magnéticos de terra rara, formando o eixo deslizante.

5 DISCUSSÃO

Verifica-se que com o variar do amortecimento elétrico, por consequência da carga elétrica variável associada, o sistema não trabalhará exatamente na frequência de ressonância, mas em sua vizinhança. Este fato somente pode ser contornado com um controle ativo da excitação e da carga elétrica associada.

No entanto, mesmo que esse sistema não esteja perfeitamente sintonizado na frequência de ressonância, ele apresentará um elevado valor para a Razão de Amplitude/Força, como apresentado na Figura 10 e pela equação abaixo, pois o fator de amortecimento possui um valor muito baixo.

$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1-1^2)^2 + (2 \times 0,05879 \times 1)^2}} = 12.02767 \quad (132)$$

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Ao fim desse projeto, pode-se considerar que foi bem-sucedido pois pode se alcançar os objetivos de calcular e projetar um gerador linear. Foi apresentado todas as equações e cálculos necessários para esse procedimento. Sendo que, o ponto de partida foi um gerador já existente em outro trabalho e adaptado para cálculos com equações analíticas encontradas na literatura.

Estudos do sistema de vibração mecânico também foi desenvolvido, mesmo que o atual mecanismo não se encontre exatamente operando na ressonância, no entanto muito próximo desse ponto como apresentado na discussão. Mas ainda sim, se conhece as causas e os meios necessários para se alcançar esse objetivo. Adicionalmente, que ao longo do desenvolvimento desse projeto, descobriu-se que para um desenvolvimento mais refinado seria necessário, outros métodos além do analítico. O qual foge do escopo desse trabalho.

O desenvolvimento de uma geometria otimizada pode agora ser estudada com melhor facilidade e amparo de toda a teoria apresentada nesse trabalho. Tendo esse trabalho como um ponto inicial.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que esse ainda não é um projeto que apresenta uma eficiência elevada, comparada com máquinas elétricas convencionais, ainda sim é possível se conseguir valores de eficiência maiores para geradores lineares de energia, como no caso apresentado por Boldea, I.; Nasar, S. A.; 1987b, onde a eficiência elétrica calculada é de 0,97. Isso se torna possível através do casamento de vários parâmetros, importantes em um gerador, quando esses estão otimizados, em seus valores ótimos para a aplicação e valores desejados.

Esse ponto de otimização é uma ótima sugestão para futuros trabalhos, sendo que em muitas das referencias já são apresentadas comparações entre diferentes

condições para alguns parâmetros. E sendo que para esse tipo de estudo se torne necessário o desenvolvimento de um modelo de elementos finitos, a fim de se obter resultados que represente o modelo adequadamente, ao invés de um modelo analítico como apresentado nesse trabalho.

APLICAÇÃO EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

As aplicações de um gerador linear em um motor de combustão interna são inúmeras, sendo esse um assunto interessante para futuros estudos, e aplicações da tecnologia de geradores lineares. Algumas delas são citadas por Cawthorne (1999) como utilização para diversas aplicações de abastecimento de energia em áreas remotas, aplicações militares, fornecimento de energia em situações adversas, onde operações essenciais devem ser mantidas.

Um exemplo apresentado está relacionado com a mentalidade da busca de fontes ecologicamente corretas, onde busca-se alta eficiências, como o estudo de veículos elétricos, que atualmente apresentam tecnologias baseadas em baterias, desenvolvimento limitado; e tecnologias híbridas que são sistemas alimentados por baterias e um sistema de geração de energia, gerador e motor de combustão interna.

Ainda, Cawthorne (1999), com base nas aplicações citadas, é defendido que um alternador alternativo com ímãs permanente se torna vantajoso quando combinado com um motor de combustão interna pois apresenta algumas particularidades em sua configuração quando comparado com os geradores rotativos convencionais. Como exemplos:

- As forças lineares geradas pelos pistões podem ser diretamente transferidas, sem a necessidade de componentes mecânicos intermediários que transformam a energia linear em rotativas;
- Consequentemente, o sistema se torna mais compacto e simples, devido a ausência desse intermediário mecânico e apresentar apenas um componente móvel;
- As perdas por fricção devem ser menores, uma vez que não há presença de partes associados ao rolamento. O sistema linear deve ser mais eficiente à

medida que as perdas de fricção associadas aos rolamentos da manivela e da haste são eliminadas.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. E. D. **Energia Renovável com Baixa Emissão de Carbono**. *Cadernos Adenauer XV. Rio de Janeiro* 3, p. 11-28, 2014.

BAKER, N. J.; SPOONER, E.; MUELLER, M. A. **Permanent Magnet Air-Cored Tubular Linear Generator for Marine Energy Converters**. *IEE CONFERENCE PUBLICATION*. Vol. 2. London; Institution of Electrical Engineers, 2004.

BOLDEA, I. **Linear Electric Machines, Drives, And Maglevs Handbook**, CRC Press, New York, p. 451-510, 2013.

BOLDEA, I. **Variable Speed Generators**, 2nd Edition, New York, CRC Press, New York, 2016.

BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **Permanent-Magnet Linear Alternators Part 1: Fundamental Equations**. *IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems* 1, p. 73-78, 1987a.

BOLDEA, I.; NASAR, S. A. **Permanent-Magnet Linear Alternators Part II: Design Guidelines**; *IEEE Transactions on Aerospace and electronic systems* 1, 79-82, 1987b.

BOSTAD, A. **Description and Analysis of a Resonating Free-piston Tubular Permanent Magnet Linear machine, Suitable for Exploring the Effects of Increasing Frequency in Hammer Drilling**. MS thesis. Norwegian University of Life Sciences, Ås, 2011.

BUDYNAS, R.G.; NISBETT; J. K. **Shigley's Mechanical Engineering Design**. 9ed. New York: McGraw-Hill, p. 517-568, 2008.

CAWTHORNE, W. R. **Optimization of a Brushless Permanent Magnet Linear Alternator for Use With a Linear Internal Combustion Engine**. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). West Virginia University Libraries, 1999.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos De Máquinas Elétricas**; tradução: Anatólio Laschuk, 5. ed., Porto Alegre : AMGH, 2013.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: Com introdução à Eletrônica de Potência**. Tradução de Anatólio Laschuk., p. 186, 2006.

GHERCA, R.; OLARU, R. **Power Analysis for an Electromagnetic Generator with Magnets Destined to Vibration Energy Harvesting**. *Electrical and Power Engineering (EPE), 2012 International Conference and Exposition*, IEEE, 2012.

HANSELMAN, D. C. **Brushless Permanent Magnet Motor Design**. The Writers' Collective, 2006.

JACOBSON, A. **Automatic Detection System of Oil Spillage into Sea Waters**. U.S. Patent No. 5,208,465. 4 May, 1993.

KATO, T., et al. **Real-Time Observation Of Tsunami By RTK-GPS**. *Earth, planets and space* 52.10, p. 841-845. 2000.

PIRISI, A.; ET AL. **An Optimized Three Phase TPM-LiG for Marine Applications**. *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2010 International Symposium, IEEE, 2010.

RAO, S. S. **Vibrações Mecânicas**. 4ed. Printece Hall Brasil, 2009.

THOMSON, W. T. **Teoria da Vibração com Aplicações**. 1 ed., RJ, Ed. Interciências Ltda., 1978.

TIPLER, P. A. & MOSCA, G. **Physics for Scientists and Engineers**. W.H. Freeman and company, New York, 2008.

WANG, J., et al. **Design and Experimental Characterisation of a Linear Reciprocating Generator**. *IEE Proceedings-Electric Power Applications* 145.6, p. 509-518, 1998.

WANG, J., HOWE, D. AND JEWELL, G. W. **Fringing in Tubular Permanent-Magnet Machines: Part I. Magnetic Field Distribution, Flux Linkage, and Thrust Force**. *IEEE Transactions on Magnetics* 39.6,p.3507-3516, 2003a.

WANG, J., HOWE, D. AND JEWELL, G. W. **Fringing in Tubular Permanent-Magnet Machines: Part II. Cogging Force and Its Minimization**. *IEEE Transactions on Magnetics* 39.6, p. 3517-3522, 2003b.

WANG, J.; JEWELL, G. W.; HOWE, D. **A General Framework for the Analysis and Design of Tubular Linear Permanent Magnet Machines**. *IEEE Transactions on Magnetics* 35.3,p. 1986-2000, 1999.

WILDI, T. **Electrical Machines, Drives and Power Systems**. Pearson Prentice Hall, USA, 2006.

YAN, L., et al. **Flux Field Formulation and Back-Iron Analysis of Tubular Linear Machines**. *IEEE Transactions on Magnetics* 48.10, p. 2617-2626, 2012.

APÊNDICE A

Definições de F_{An} , F_{Bn} , a_{In} , b_{In} , a_{IIn} e b_{IIn} . Sendo:

$$c_{1n} = BI_0(m_n R_s);$$

$$c_{2n} = BK_0(m_n R_s);$$

$$c_{3n} = BI_0(m_n R_r);$$

$$c_{4n} = BK_0(m_n R_s);$$

$$c_{5n} = BI_0(m_n R_s);$$

$$c_{6n} = BK_0(m_n R_m);$$

$$c_{7n} = BI_1(m_n R_m);$$

$$c_{8n} = BK_1(m_n R_s);$$

$$F_{An}(m_n r) = \frac{P_n}{m_n} \int_{m_n R_r}^{m_n r} \frac{BK_1(x) dx}{BI_1(x)BK_0(x) + BK_1(x)BI_0(x)}$$

$$F_{Bn}(m_n r) = \frac{P_n}{m_n} \int_{m_n R_r}^{m_n r} \frac{BI_1(x) dx}{BI_1(x)BK_0(x) + BK_1(x)BI_0(x)}$$

tendo a_{In} e a_{IIn} como soluções para as seguintes equações lineares:

$$\begin{bmatrix} \mu_r \left(\frac{c_{5n}}{c_{6n}} - \frac{c_{1n}}{c_{2n}} \right) - \left(\frac{c_{5n}}{c_{6n}} - \frac{c_{3n}}{c_{4n}} \right) \\ \left(\frac{c_{7n}}{c_{8n}} - \frac{c_{1n}}{c_{2n}} \right) - \left(\frac{c_{7n}}{c_{8n}} + \frac{c_{3n}}{c_{4n}} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{In} \\ a_{IIn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{An}(m_n R_m) \frac{c_{5n}}{c_{6n}} + F_{Bn}(m_n R_m) \\ F_{An}(m_n R_m) \frac{c_{7n}}{c_{8n}} - F_{Bn}(m_n R_m) \end{bmatrix}$$

e

$$b_{In} = \frac{c_{1n}}{c_{2n}} a_{In}$$

$$b_{IIn} = \frac{c_{3n}}{c_{4n}} a_{IIn}.$$

ANEXO A

Desenhos 2D do conjunto montado do gerador e de cada peça individual.

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

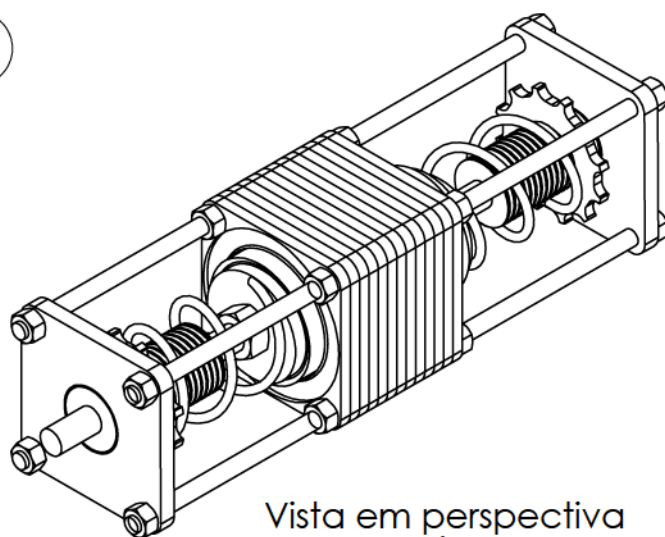
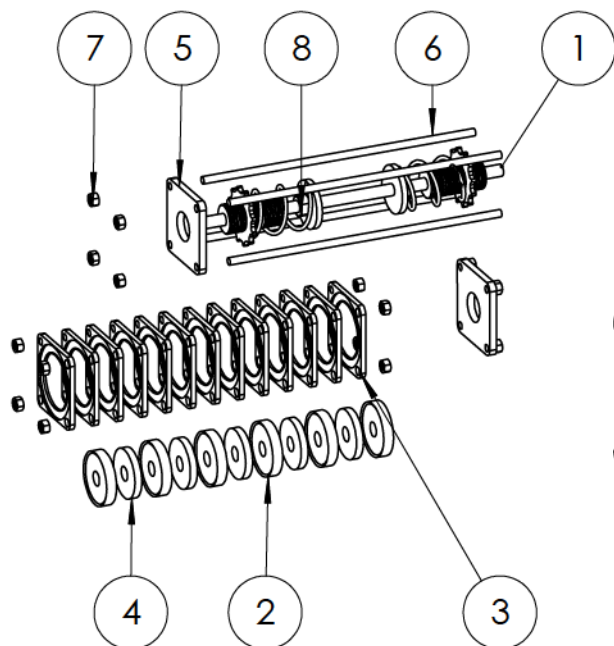
C

B

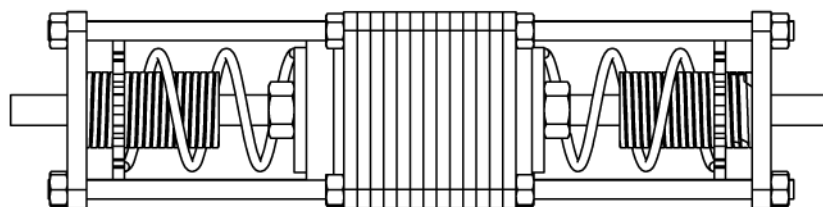
B

A

A



Vista em perspectiva
Escala 1:2



Vista frontal
Escala 1:2

ITEM NO.	NOME DA PARTE	DESCRIÇÃO	MATERIAL	QT.
1	Sistema eixo, molas, buchas	Sistema com mola e bucha do eixo	N/A	1
2	Separador do ímã	Separador do ímã	N/A	6
3	Separador da bobina	Separa as bobinas	N/A	13
4	Ímã permanente	Ímã magnetico permanente	N/A	5
5	Apoio da bucha	Suporte de fixação da bucha	N/A	2
6	Barra de fixação	Barras para o surporte de fixação	N/A	4
7	Porca M5	N/A	N/A	16
8	Porca M8	N/A	N/A	2

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO TEÓRICO E COMPUTACIONAL DE UM GERADOR ELÉTRICO RESSONANTE

NOME DO DESENHO

Montagem

OBSERVAÇÕES:

A4

PROJETISTA: LUCA DA SILVA RIGOBELLO

ESCALA: 1:5

FOLHA 1 OF 7

4

3

2

1

4

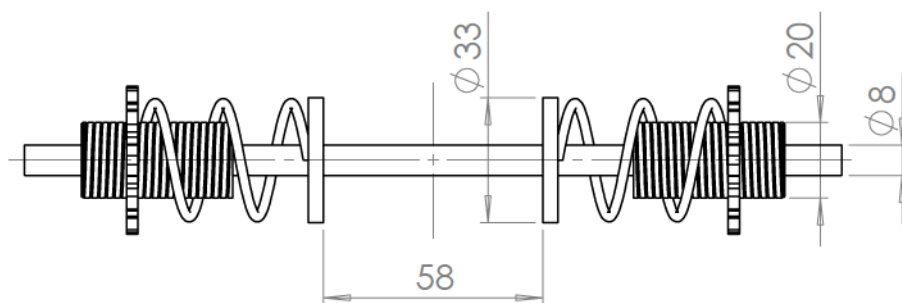
3

2

1

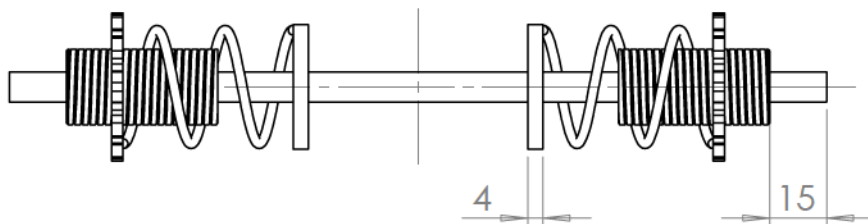
F

F



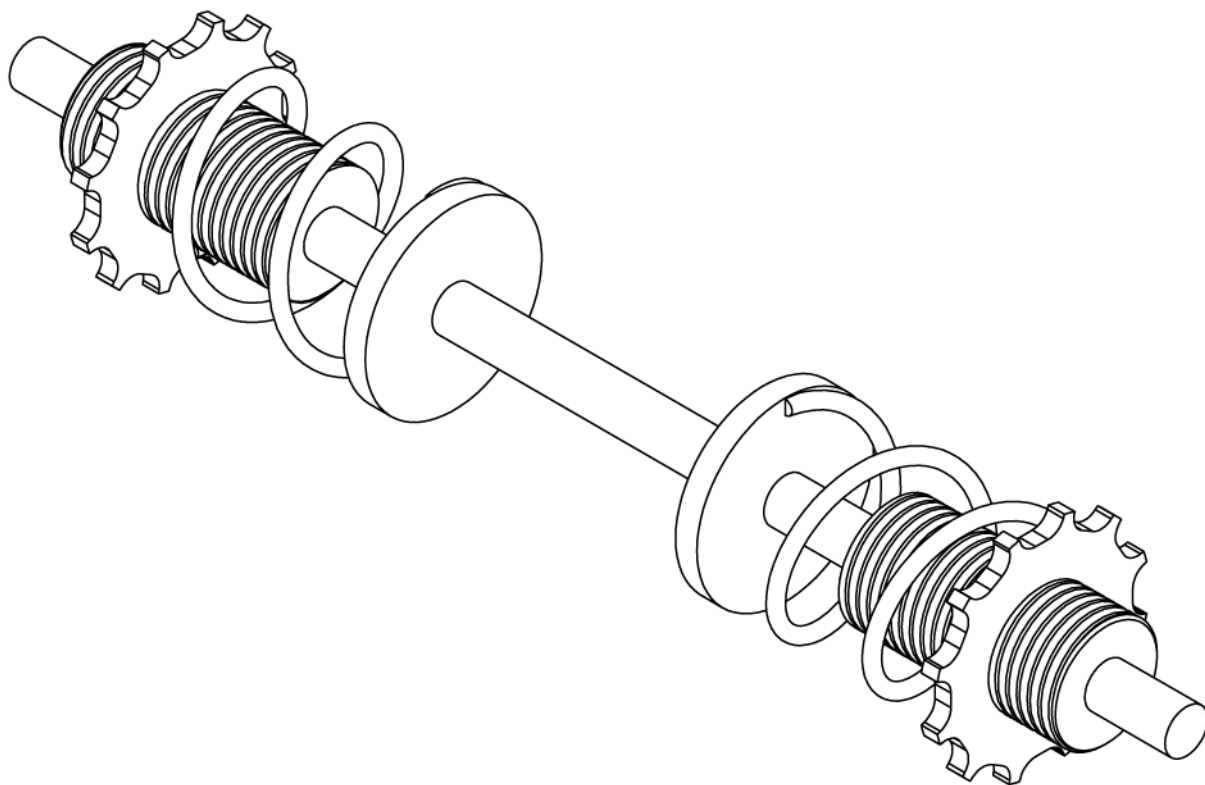
E

E



D

D



C

C

B

B

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO:

ESTUDO TEÓRICO E COMPUTACIONAL DE UM GERADOR ELÉTRICO
RESSONANTE

A

A

NOME DO DESENHO:

Montagem eixo/molas/buchas

OBSERVAÇÕES:

Sistema montado de eixo,
molos e buchas

A4

PROJETISTA: LUCA DA SILVA RIGOBELLO

ESCALA 2:1

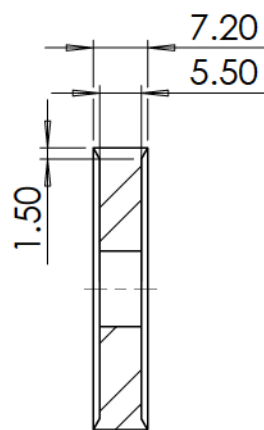
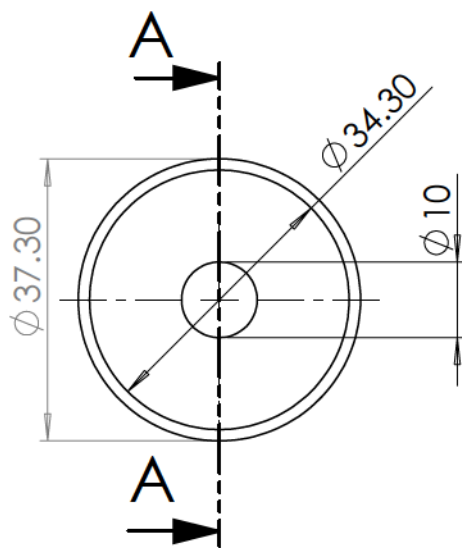
FOLHA 2 DE 7

4

3

2

1



CORTE A-A

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO:

ESTUDO TEÓRICO E COMPUTACIONAL DE UM GERADOR ELÉTRICO
RESSONANTE

NOME DO DESENHO

Separador do imã

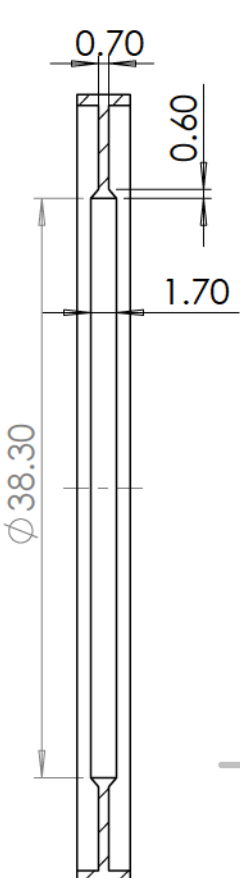
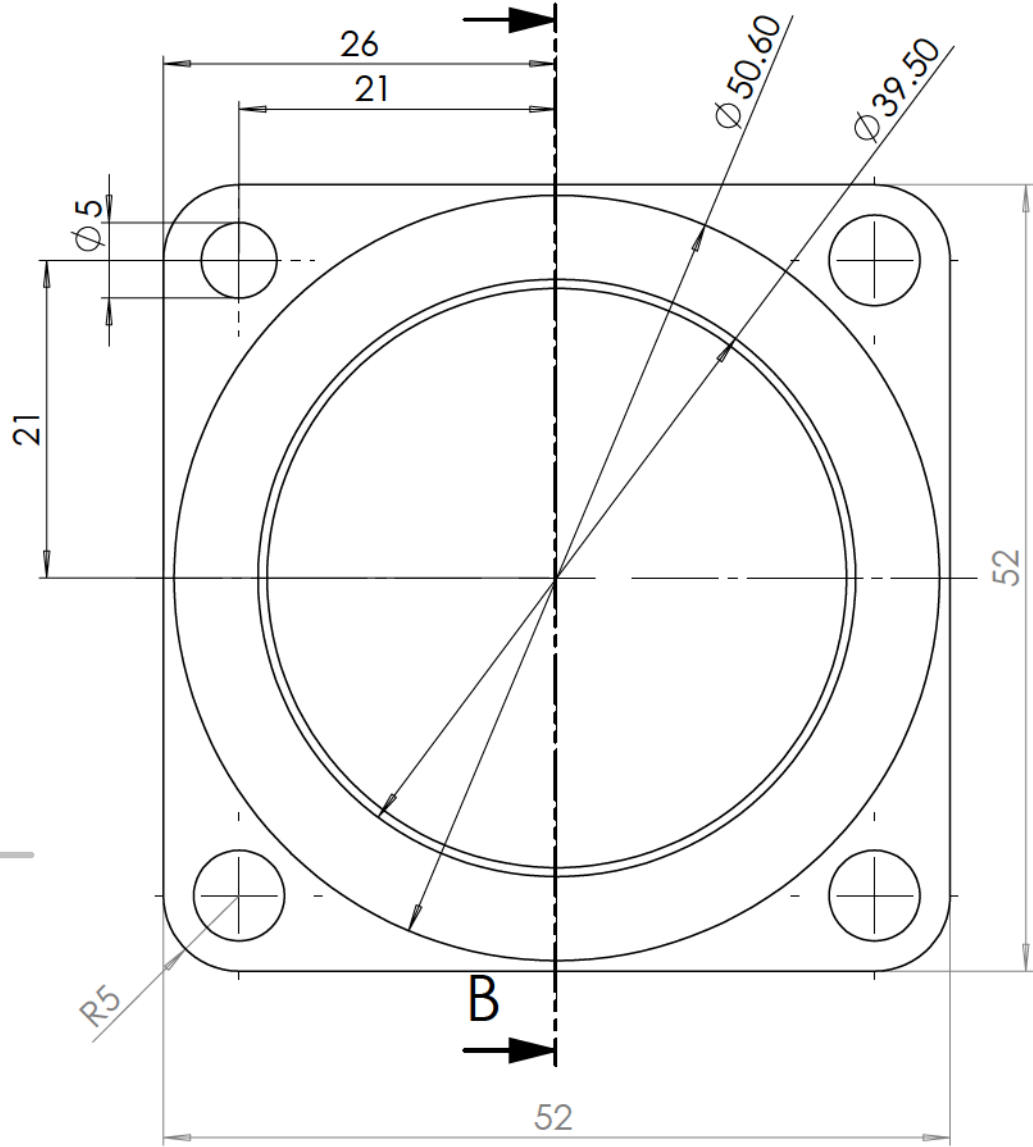
OBSERVAÇÕES:

A4

PROJETISTA: LUCA DA SILVA RIGOBELLO

ESCALA 2:1

FOLHA 3 DE 7



CORTE B-B

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO:
ESTUDO TEÓRICO E COMPUTACIONAL DE UM GERADOR ELÉTRICO
RESSONANTE

NOME DO DESENHO:
Separador da bobina

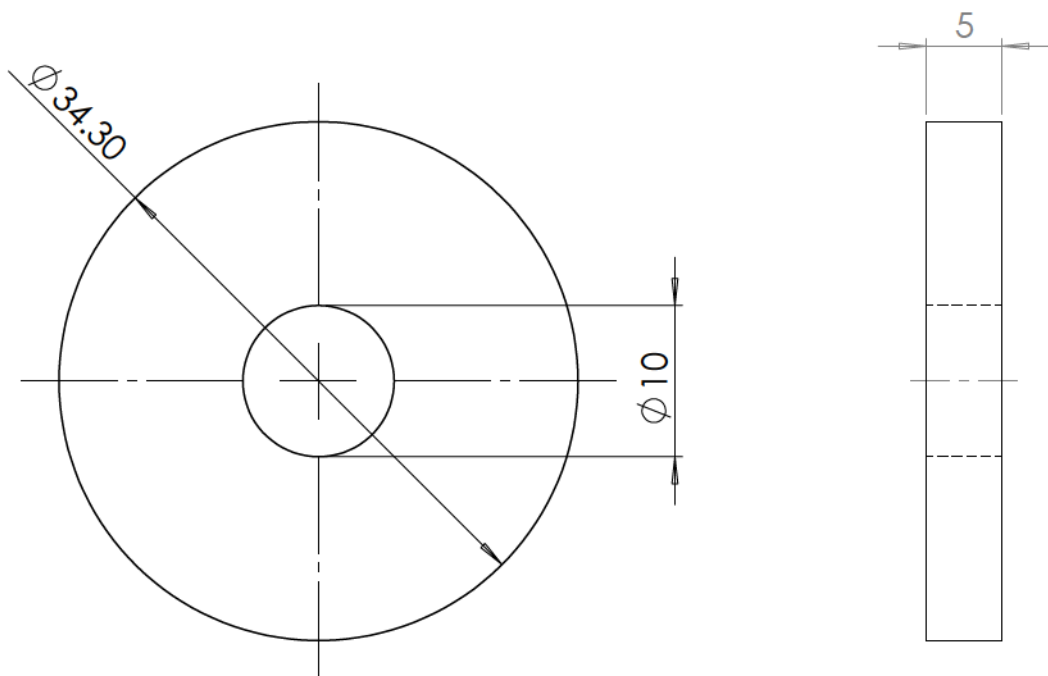
OBSERVAÇÕES:

A4

PROJETISTA: LUCAS DA SILVA RIGOBELLO

ESCALA 2:1

FOLHA 4 DE 7



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO:

ESTUDO TEÓRICO E COMPUTACIONAL DE UM GERADOR ELÉTRICO
RESSONANTE

NOME DO DESENHO:

Imã

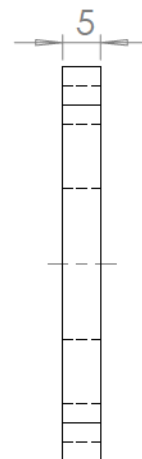
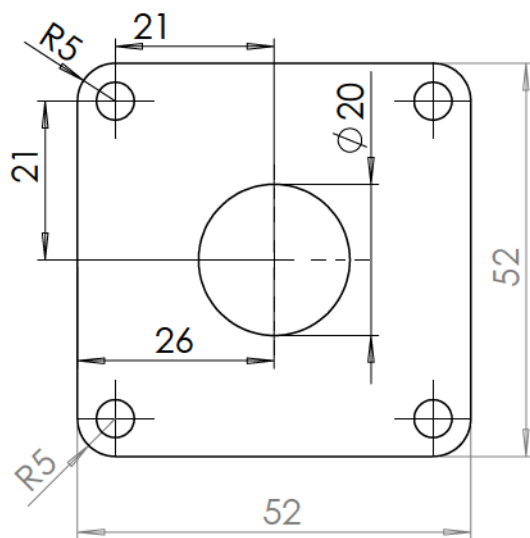
OBSERVAÇÕES:

A4

PROJETISTA: LUCAS DA SILVA RIGOBELLO

ESCALA 2:1

FOLHA 5 DE 7



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO:

ESTUDO TEÓRICO E COMPUTACIONAL DE UM GERADOR ELÉTRICO
RESSONANTE

NOME DO DESENHO:

Apoio da bucha

OBSERVAÇÕES:

A4

PROJETISTA: LUCAS DA SILVA RIGOBELLO

ESCALA 2:1

FOLHA 6 DE 7

