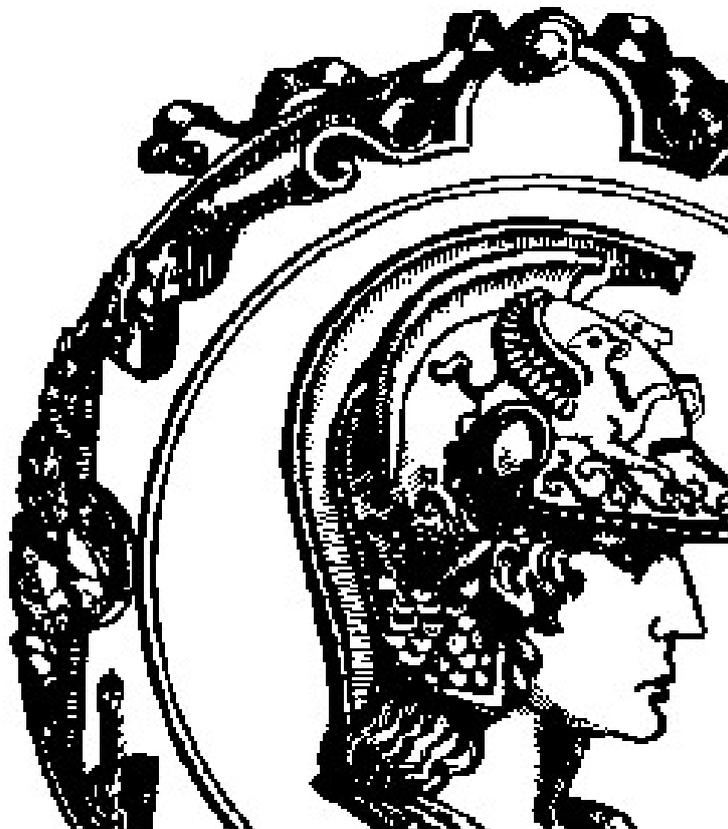


**ESCOLA POLITÉCNICA - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**



**PEA2507 – Projeto de Formatura II**

**Projeto de um Protótipo de Gerador de Energia Elétrica utilizando  
Ondas Marítimas**

**NOME DO ALUNO:** Anderson Hitoshi Uyekita

Claudio Shisei Yada

**No USP**

5175471

225571

**ORIENTADOR:** Prof. José Aquiles Baesso Grimoni e Prof. Ivan Eduardo Chabu

**COORDENADOR:** Prof. Lourenço Matakas Jr.

# ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	2
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
5. ONDAS MARÍTIMAS .....	4
5.1 Origens das ondas marítimas .....	4
5.2 Análise das ondas marítimas.....	6
6. ENERGIA CONTIDA NAS ONDAS DO MAR.....	8
7. TOPOLOGIAS DOS DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO .....	10
7.1 Conversor Ativado por coluna Oscilante.....	11
7.2 Transbordamento (Overtopping device) .....	12
7.3 Conversor acionado por Pressão de coluna de água e ar.....	13
7.4 Topologia Adotada .....	13
8. DIMENSIONAMENTO DO FLUTUADOR .....	14
9. PROJETO DO GERADOR LINEAR.....	17
9.1 Determinação da Geometria do Gerador Linear.....	19
9.2 Corte transversal do Gerador Linear.....	20
9.3 Circuito Magnético.....	21
9.3.1 Campo magnético de referência .....	22
9.3.2 FLUXO POR PÓLO .....	22
9.3.3 Distribuição de indução nas várias partes do circuito magnético:.....	23
Parte I: Campos Magnéticos no estator (induzido).....	23
Parte II: Campos Magnéticos no “Transladador” (indutor).....	24
9.3.4 FORÇAS MAGNETO-MOTRIZ REFERIDAS.....	25
-Força Magneto-motriz no entreferro.....	25
-Força Magneto-motriz no estator.....	26
-Força Magneto-motriz na sapata polar.....	26
9.3.5 Coordenação da característica do ímã com a curva de carga do circuito magnético. ....	27
9.4-Análise da tensão induzida.....	28
9.5- Características elétricas do gerador linear .....	31
9.6- Especificação do Gerador.....	34
10. ESTRUTURA MECÂNICA .....	36

<i>10.1 Sapata Polar</i> .....	36
<i>10.2 Ímã</i> .....	37
<i>10.3 Dente</i> .....	37
<i>10.4 Bobina</i> .....	38
<i>10.5 Porca fim de curso</i> .....	38
<i>10.6 Parafuso Haste</i> .....	39
<i>10.7 Porca Sextavada</i> .....	39
<i>10.8 Borracha fim de curso</i> .....	40
<i>10.9 Parafuso de Fixação</i> .....	40
<i>10.10 Parafuso da carcaça</i> .....	41
<i>10.11 Bucha</i> .....	41
<i>10.12 Tampa da Carcaça</i> .....	42
<i>10.13 Carcaça Parte 1</i> .....	42
<i>10.14 Carcaça Parte 2</i> .....	43
<i>10.15 Carcaça Parte 3</i> .....	44
<i>10.16 “Transladador”</i> .....	44
<i>10.17 Eixo</i> .....	45
<i>10.18 Corte do Gerador Linear</i> .....	45
<i>11. Sistema de Armazenamento de Energia</i> .....	47
<i>11.1. Ponte de diodos com Filtro Capacitivo</i> .....	47
<i>11.2 Conversor Boost</i> .....	48
<i>12-RESULTADOS E CONCLUSÕES</i> .....	49
<i>13. CRONOGRAMA</i> .....	51
<i>14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	53
<i>ANEXO 1</i> .....	54
<i>ANEXO 2</i> .....	60
<i>Paper</i> .....	77

## **DEDICATÓRIA**

*“Dedicamos este trabalho como gratidão aos nossos familiares, professores e à sociedade brasileira que direta ou indiretamente ajudaram na nossa conquista dia a dia”*

# 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho de formatura tem por objetivos: pesquisar as diversas tecnologias de geração de energia elétrica através de ondas marítimas e desenvolver um projeto completo para a montagem de um gerador por meio de ondas marítimas. Para a sua elaboração foram realizadas pesquisas dos atuais métodos, tecnologias e materiais empregados no uso desses equipamentos.

Através da análise das opções será projetado um protótipo em escala reduzida para avaliação do experimento e validação da metodologia de pesquisa. O protótipo é um gerador linear de eletricidade a imãs permanentes de neodímio.

O potencial energético das ondas do mar é imenso, aproximadamente 70% da superfície do nosso planeta é coberto pelo mar, porém este recurso até agora foi pouco aproveitado, devido ao pouco interesse político e econômico.

No cenário mundial a tecnologia de geração de energia elétrica através de ondas marítimas é desenvolvida pela Holanda, o qual possui um potencial instalado de 2MW administrado pela AWS, Reino Unido (Pelamis, potencial instalado de 750 kW), Escócia (LIMPET-Waven a Voith Hydro, potencial instalado de 500 kW) e Portugal (potencial instalado de 400 kW).

Com a diminuição das reservas de petróleo e o aquecimento global causado pela queima de combustíveis fósseis como o carvão e o petróleo, a procura de geração de energia por fontes renováveis tem se intensificado cada vez mais e esta alternativa de energia é livre de emissões, com grande potencial energético não aproveitado.

A escolha do tema é multidisciplinar aumentando o desafio para obter resultados satisfatórios, porém limitaremos a alguns aspectos relevantes através de premissas simplificadoras e aproximações levando em conta os conceitos de mecânica, física, mecânica dos fluidos, conversão eletromecânica de energia, eletrônica, máquinas elétricas e sistemas de potência.

## 2. OBJETIVOS

- Pesquisar técnicas de geração de energia elétrica através de ondas marítimas;
- Desenvolver o protótipo de um gerador de energia elétrica por ondas marítimas;
- Dimensionar o protótipo de gerador baseado em cálculos efetuados em planilha automática com a formulação do circuito magnético e tensão induzida;
- Escolher as alternativas de materiais disponíveis e especificar o protótipo, configurar o conjunto mecânico do conversor e do gerador elétrico linear a imãs permanentes;
- Realizar revisões de cálculos e análises dos resultados obtidos e corrigir eventuais defeitos;

- Realizar o desenho em CAD com os dados da planilha de cálculo de dimensionamento;
- Obter o modelo elétrico para efetuar simulações em programa PSIM para verificar as características elétricas do gerador linear;
- Pesquisar opções de interface de suprimento de tensão e corrente;
- Pesquisar técnicas de armazenamento e estabilização de tensão, corrente e fator de potência com uso de conversores.

### **3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO**

O projeto de formatura segue a metodologia de pesquisa, análise e síntese.

- Pesquisa de campo sobre as teorias e modelos através da Web, periódicos do IEEE, enciclopédias, teses de pesquisas, livros, revistas e jornais;
- Filtragem das informações para elaboração de documento de conteúdo e linguagem técnico científico;
- Análise e formulação das diversas tecnologias desenvolvidas para o aproveitamento energético das ondas do mar;
- Escopo para escolha do modelo para projeto do protótipo;
- Cálculo em planilha Excel da formulação e correção das deficiências do protótipo;
- Definições das especificações do protótipo do gerador linear, baseado nos resultados das especificações da planilha;
- Desenvolvimento do modelo elétrico para simulação em PSIM [1];
- Desenho em CAD das vistas de acordo com os dados das especificações do protótipo.

### **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A energia útil contida no mar tanto em forma de marés, térmica, correntes marinhas e de coluna oscilante (ondas) são conhecidas desde a antiguidade, porém as primeiras propostas de aproveitamento energético das ondas iniciaram-se no século XVIII ([2] [3] [4]) e durante muito tempo o desenvolvimento ficou a encargo de inventores da década de 60, com o primeiro experimento para fins comerciais o comandante Yoshio Masuda, iniciou no Japão o desenvolvimento de bóias de sinalização marítima alimentadas por energia das ondas.

Na década de 70 com a crise do petróleo a conversão de energia de ondas do mar tomou relevância e em muitos centros de pesquisas de engenharia marinha e naval desenvolveram-se protótipos e patentes de WEC's (Wave Energy Converter), porém com o final da crise estes dispositivos se tornaram inviáveis economicamente e consideradas de baixo rendimento, não somente esta tecnologia, como também a eólica e a solar foi descartada da matriz energética. Somente no final da década 90 com o problema do aquecimento global, as emissões de gases e dados alarmantes da demanda de energia de

fontes não renováveis, obrigaram os pesquisadores a viabilizar tecnicamente e economicamente essas tecnologias.

Através dessas pesquisas pode-se estimar a energia contida nos oceanos (na forma de ondas) de 2TW, sendo que pelas estimativas 10 a 15% aproveitáveis para a conversão em energia elétrica. O que justifica a pesquisa de um conversor de energia, ajudando a equalizar a demanda de combustíveis fósseis e a emissão dos gases do efeito estufa. Sabe-se que as ondas do mar possuem uma altura média mensal constante, o que reflete numa garantia de fornecimento contínuo da energia, tendo um fator de sazonalidade baixo (Figura 1).

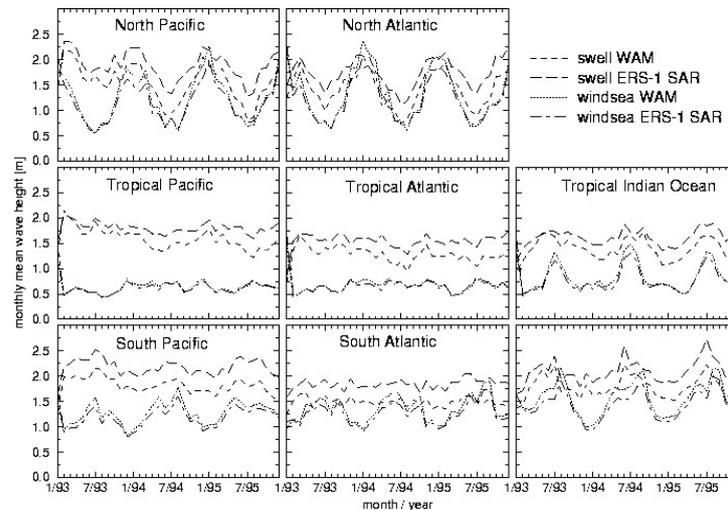
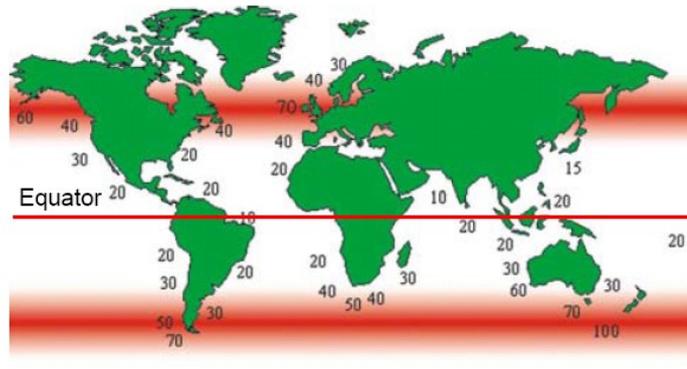


Figura 1: Dado mundial das alturas médias mensais.

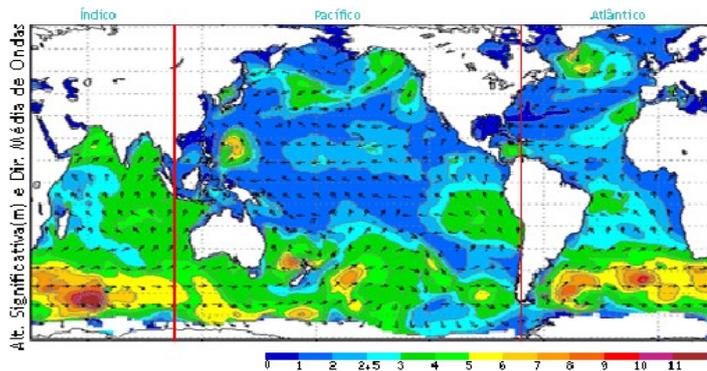
No Brasil o mapeamento do potencial das ondas marítimas da Figura 2, foi obtido pela COPPE-UFRJ, pela ELETROBRÁS e pelo governo do Ceará. Para a aferição dos dados foi utilizado um conversor energia de modelagem de onda com propagação hiperbólica.



a)



b)



c)

Figura 2: a) Distribuição Global da energia contida nas ondas do mar em kW; b) Distribuição da energia contida nas ondas do mar em kW nas costas brasileiras; c) Mapa das alturas significativas e direções de Ondas Marítimas Global.

## 5. ONDAS MARÍTIMAS

### 5.1 Origens das ondas marítimas

A energia contida nas ondas marítimas é oriunda da energia solar incidente sobre os oceanos o qual é responsável pela evaporação da água dos mares, pelos gradientes de temperatura e pelos deslocamentos de massa de ar. A Figura 3 ilustra essa teoria.

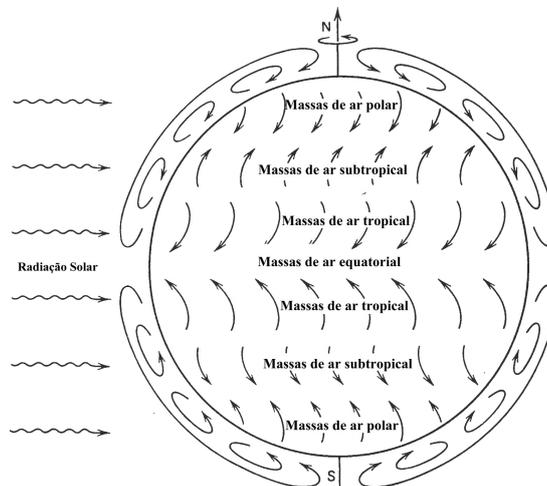


Figura 3: Movimento das Massas de ar.

Os principais fatores de origem das ondas do mar são: combinação de forças gravitacionais (lunar e solar), tensão superficial e a intensidade dos ventos (massa de ar). A Figura 4 mostra a formação de ondas após uma tempestade, o tamanho da onda é determinado pela velocidade e pressão do vento que incide sobre a água e também a

profundidade e a topologia do solo marinho, responsável pela dissipação da energia da onda. Para locais longe da costa onde a profundidade é bem maior que a amplitude, a onda tem período regular e amplitude denominada de onda oscilante (swell).



Figura 4: Formação de ondas causadas pela ação do vento e tempestade.

As partículas de água são excitadas pela ação do vento em vários pontos do oceano deformando trajetórias circulares de grande diâmetro na superfície e profundidade reduzida à medida que se afasta do ponto de excitação, a soma destes movimentos circulares é responsável pela formação do perfil e a propagação da onda no mar. As ondas de maior frequência de ocorrência são as ondas do tipo swell, Figura 5 a), b) ou modeladas como ondas de perfil senoidal e de propagação linear e que possuem energia relativa grande, e pode ser modelada como perfil senoidal Figura 6.

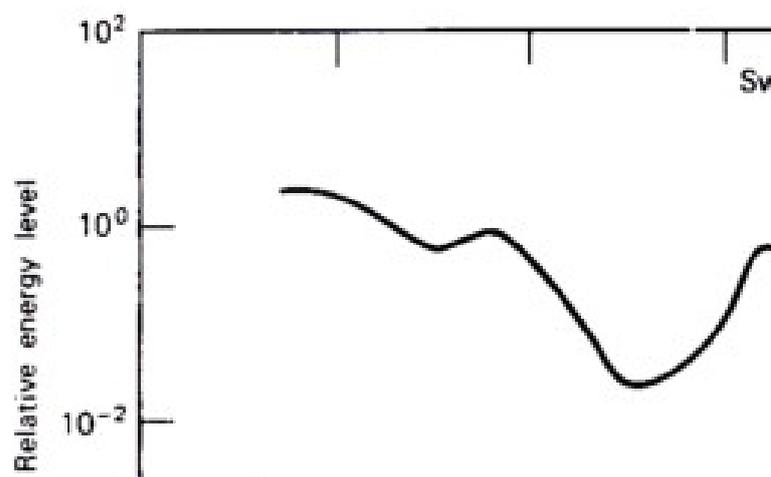


Figura 5: a) Energia relativa por tipo de onda (McCormick US Naval Academy Anápolis, Maryland);

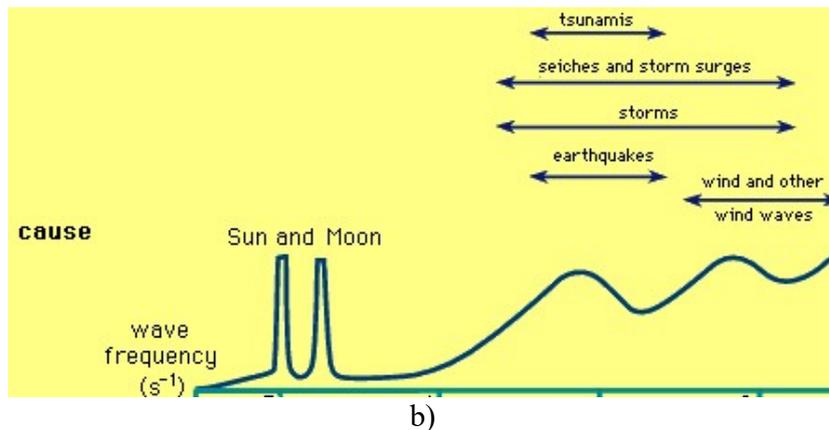


Figura 5: b) Influência de fatores da natureza.

## 5.2 Análise das ondas marítimas

Quando uma onda se propaga, as partículas de água se movimentam para cima e para baixo, descrevendo círculos verticais que por sua vez tornam-se linearmente menores conforme aumenta a profundidade.

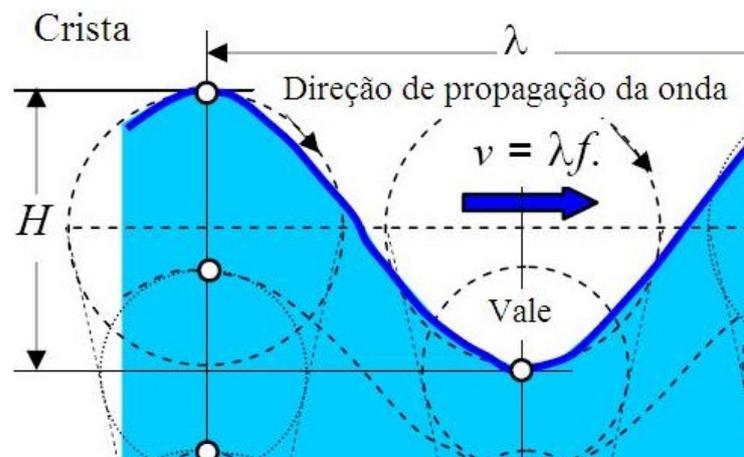


Figura 6: Propagação da onda do mar modelo linear com perfil senoidal.

Os perfis de onda dependem também da profundidade, quanto menor a profundidade maior a deformação do perfil e a perda da energia contida (perda de carga hidrodinâmica), essa perda de energia está ilustrada na Figura 7. Para cada altura de onda pode-se estabelecer uma classificação: águas profundas=  $\lambda/2h$  , profundidade de transição=  $\lambda/25 \leq h \leq \lambda/4$  e água rasa=  $\lambda/25$  .

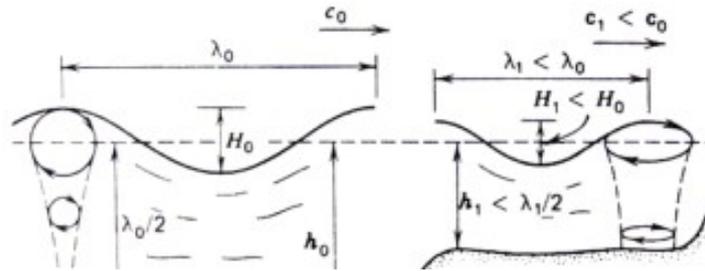


Figura 7: a) o escoamento é laminar (águas profundas), b) há o efeito de escoamento turbulento (profundidade de transição), e no caso c) a turbulência torna-se mais acentuada (água rasa).

Adotando a onda marítima como senoidal tem-se que a distância entre duas cristas consecutivas obtém-se o comprimento de onda  $\lambda$ , a cota da crista até o vale obtém-se a amplitude  $H$ , que é proporcional à intensidade do vento e sua duração. O período  $T$  da onda em segundos é proporcional à profundidade do local, logo, a frequência é dada por:

$$f_{onda} = 1/T \text{ [Hz]} \quad (5.1)$$

Portanto, tem-se que a velocidade é dada por:

$$v = \lambda / T = \lambda / f_{onda} \text{ [m/s]} \quad (5.2)$$

De acordo com [2], pode-se definir águas profundas ondas das quais a relação  $\lambda / 2h$  ou  $kh \geq \pi$  é atendida (essa suposição é satisfatória para o nosso projeto), a Figura 8 ilustra algumas grandezas em função da declividade ( $h / \lambda$ ) de uma onda linear. Esse gráfico foi obtido experimentalmente através de estudos de mecânica dos fluidos aplicadas às ondas do mar [5].

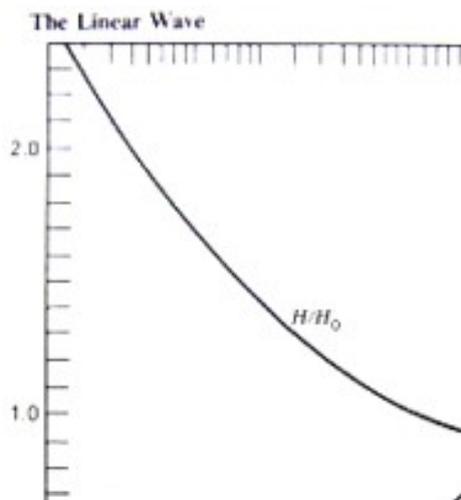


Figura 8: Propriedade adimensional da onda em função da altura da onda pelo comprimento de onda.

A energia contida nas ondas é dependente do comprimento, da amplitude e da velocidade, portanto as ondas grandes geralmente carregam grande energia, a seguir será deduzida a fórmula para cálculo da energia contida na onda:

$$v = \lambda / T = \lambda \cdot f_{onda} \text{ [m/s]}$$

Dado que  $\eta$  é o deslocamento da superfície livre da onda, tem-se que:

$$\eta = \frac{H}{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot x}{\lambda} - \frac{2\pi \cdot t}{T}\right) \text{ [m]} \quad (5.3)$$

Sabe-se que a declividade é definida como a relação entre altura  $h$  da onda e comprimento de onda  $\lambda$ , vide Figura 8, o qual é calculada pela equação (5.4):

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h}{\lambda}\right) \text{ [m]} \quad (5.4)$$

Substituindo (5.4) em (5.2), pode-se relacionar a declividade com a velocidade pela equação (5.5):

$$v = \lambda / T = \lambda / f_{onda} = \frac{g \cdot T}{2\pi} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi \cdot h}{\lambda}\right) \text{ [m/s]} \quad (5.5)$$

Pode-se aproximar a equação (5.5), substituindo (5.6) em (5.5), portanto obtém-se a equação (5.7) o qual é independente da declividade.

$$\left(\frac{2\pi \cdot h}{\lambda}\right) \geq \pi \quad (5.6)$$

$$v = \frac{g \cdot T}{2\pi} \text{ [m/s]} \quad (5.7)$$

Substituindo a equação (5.2) em (5.5) obtemos a equação (5.8), o qual é quadraticamente proporcional ao período.

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \text{ [m]} \quad (5.8)$$

## 6. ENERGIA CONTIDA NAS ONDAS DO MAR

A onda do mar transporta energia mecânica, sendo função do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e a amplitude (H) e largura da frente de onda (b), utilizando o modelo linear de onda, temos a energia mecânica total dada pela equação (6.1):

$$E_m = E_p + E_c \text{ [J]} \quad (6.1)$$

No semiciclo positivo da crista da onda, considera-se que toda energia mecânica é potencial, a equação (6.3) relaciona a energia potencial em relação à massa de água, gravidade e altura da coluna de água (no caso tem-se  $H/2$ ).

$$\begin{aligned} E_m &= E_p \text{ [J]} \\ E_p &= m_{H_2O} \cdot g \cdot h \text{ [J]} \end{aligned} \quad (6.3)$$

Sabe-se que a massa de água ser equacionado pela sua densidade e volume.

$$m_{H_2O} = \rho_{H_2O} \cdot V_{liquido} = \rho_{H_2O} \cdot b \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{H}{2} \text{ [m]} \quad (6.4)$$

Para um volume de líquido com perfil senoidal (Figura 9) de frente de onda linear (de comprimento  $b$ ), comprimento de onda  $\lambda$  e amplitude  $h$ , pode-se estimar a energia infinitesimalmente pela substituição da equação (6.4) em (6.3).

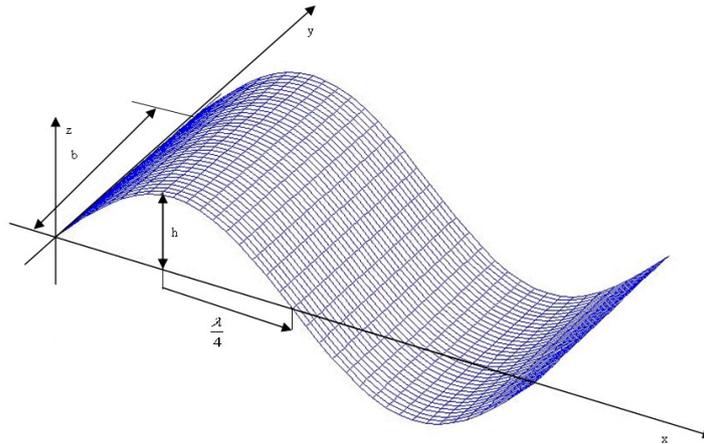


Figura 9: Modelo de onda senoidal linear com frente de onda  $b$

$$dE_p = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot b \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{H}{2} \cdot H \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta \text{ [J]} \quad (6.5)$$

Integrando a equação (6.5) com os limites  $\pi/2$  e  $\pi$ , tem-se que a energia mecânica é dada pela equação (6.6).

$$\int_{\pi/2}^{\pi} dE_m = \int_{\pi/2}^{\pi} \rho_{H_2O} \cdot g \cdot b \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{H}{2} \cdot H \cdot \text{sen}\theta \cdot d\theta = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot b \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{H}{2} \cdot H \cdot \cos\theta \Big|_{\pi/2}^{\pi} =$$

$$E_m = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot b \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{H}{2} \cdot H \cdot \left[ \cos \frac{\pi}{2} - \cos \pi \right] = \rho_{H_2O} \cdot g \cdot b \cdot \frac{\lambda}{4} \cdot \frac{H}{2} \cdot H$$

$$E_m = E_p + E_c = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda \cdot b}{8} \text{ [J]} \quad (6.6)$$

Assim, a potência contida em uma onda de perfil senoidal e propagação linear é dado pela equação (6.7):

$$P = \frac{E}{T} = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda \cdot b}{8T} = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot v \cdot b}{8} \text{ [W]} \quad (6.7)$$

onde:

$\rho$  = densidade da água [ $1000 \text{ kg} / \text{m}^3$ ]  
 $g$  = aceleração da gravidade [ $\text{m} / \text{s}^2$ ]  
 $H$  = amplitude pico a pico da onda [m]  
 $v$  = velocidade da onda [m/s]  
 $\lambda$  = comprimento de onda [m]  
 $b$  = frente de onda [m]

## 7. TOPOLOGIAS DOS DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO

Atualmente com as novas tecnologias a construção de mecanismos de conversão de energias das ondas marítimas tornou-se mais diversificada, porém podemos classificá-las em algumas famílias genéricas de conversores, a Figura 10 ilustra as três configurações básicas.

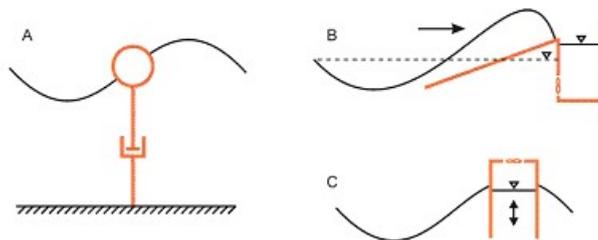


Figura 10: Tipos de conversores de energia de ondas do mar; a) Conversores por coluna oscilante; b) conversor por transbordamento (Overtopping device); c) Dispositivo por pressão de coluna de água e ar.

Analisaremos a seguir as famílias de conversores observando as vantagens e desvantagens de cada tipo e suas aplicações com o local e seus limites e algumas alternativas de conversão elétrica que podem ser acopladas com inversores, motores,

servoválvulas, acionamentos hidráulicos e pneumáticos. Posteriormente será feito um aprofundamento do modelo adotado pelo grupo.

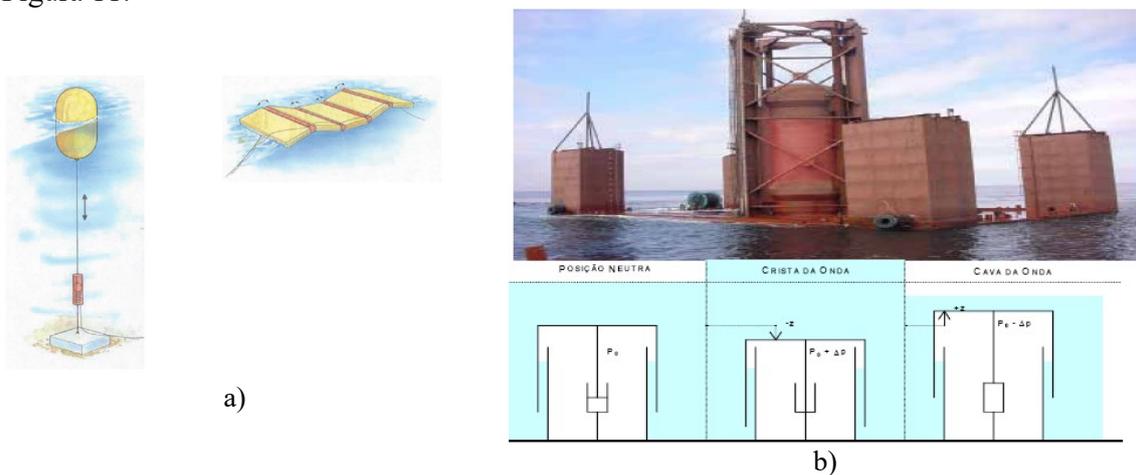
## 7.1 Conversor Ativado por coluna Oscilante

Este tipo de conversor é baseado na conversão da energia potencial contida na onda do mar em energia cinética, utilizando como dispositivo capturador de energia uma bóia ou flutuador. Esse capturador de energia transmitirá a energia através de um eixo ou um dispositivo mecânico que converterá o movimento vertical em movimento rotacional, o qual ativará um eixo de um gerador de eletricidade.

As aplicações do conversor por coluna oscilante servem para geradores próximos à costa litorânea (on-shore) ou em mar aberto com profundidades médias ou grandes longe da costa (off-shore).

Com a evolução dos materiais e inversores, esta configuração se tornou mais atrativa para muitos grupos de pesquisa, pelo fato de se aplicar a um tipo de máquina elétrica em particular, o gerador linear, o qual retira a necessidade de estruturas, engrenagens, correias e dispositivos pneumáticos que causavam perdas por atrito, inércia e mecânicos.

A grande desvantagem é não poder converter outros tipos de movimentos (apenas o vertical) em energia como a altura de marés e fluxo de ar causado pelo deslocamento de massa de água. Alguns exemplos de conversores de coluna oscilante estão ilustrados na Figura 11.





c)

Figura 11: Alguns exemplos de conversores por coluna oscilante; a) desenho ilustrativo de conversor de coluna oscilante ;b) AWS; c) Pelamis.

## 7.2 Transbordamento (Overtopping device)

Esses tipos de conversores são baseados no princípio de acúmulo de água em um reservatório, o armazenamento de água pode ser proveniente de marés e/ou ondas de grandes amplitudes. A ideia básica desse método é semelhante à hidroelétrica, acumula-se a água em um reservatório e posteriormente aciona-se um gerador elétrico. A Figura 12 é um exemplo desse tipo de conversor.

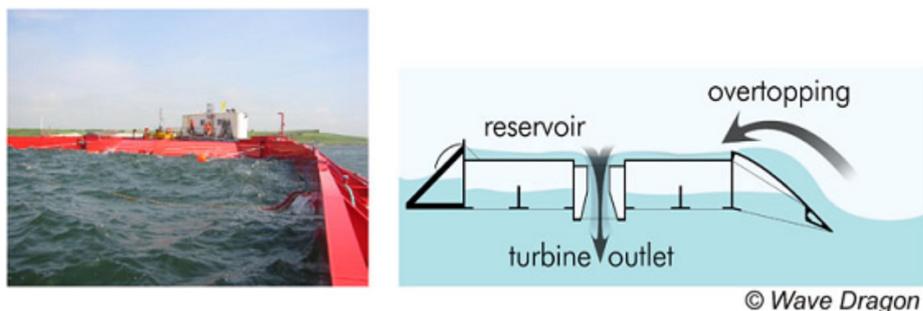


Figura 12: Exemplo de conversor por transbordamento.

Observa-se que nesta configuração é possível aproveitar bastante a energia potencial e cinética contida no mar somando a energia da maré, altura de ondas e circulação. As grandes dificuldades de implementação deste tipo de conversor são:

- grande área ocupada pela barragem, causando um grande impacto ambiental e econômico na indústria pesqueira e de navegação;
- locais apropriados para unir as condições são poucos ou difíceis de encontrar ou longe dos centros de consumo.

Há centrais pilotos móveis, porém com baixo rendimento e com custo elevado de operação.

### 7.3 Conversor acionado por Pressão de coluna de água e ar

Este sistema de conversor consiste em uma chaminé ou tubo instalado em local onde a variação da altura da onda é elevado, isso causa o efeito de compressão e descompressão do ar dentro do tubo (a Figura 13a mostra alguns exemplos), assim causando um circulação de ar o qual movimentará uma turbina que gire sempre no mesmo sentido independente se a mesma está comprimindo ou descomprimindo o ar (Turbina Wells, Figura 13b)

A grande vantagem deste sistema é a simplicidade da estrutura e do turbo gerador, porém a dificuldade é encontrar um local adequado para a montagem do sistema que possua a característica de ter uma grande variação de altura de coluna de água. Sendo este sistema predominantemente de montagem na costa on-shore devido às dimensões do turbo gerador e da estrutura.

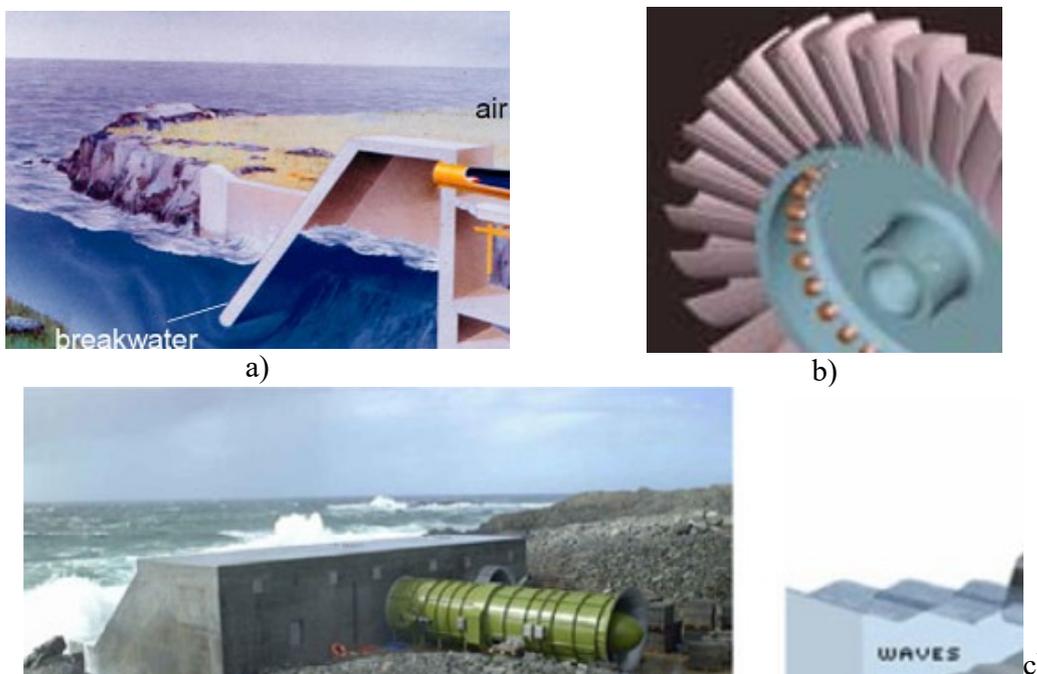


Figura 13: a) Exemplo de conversor acionado por coluna de água e ar; b) Turbina Wells; c) LIMPET conversor instalado na ilha Isle, Escócia.

### 7.4 Topologia Adotada

De acordo com os estudos dos capítulos 7.1, 7.2 e 7.3 observa-se para fins de pesquisa e desenvolvimento um dispositivo que atenda alguns critérios como capacidade de adequação em condições físicas diversas como, por exemplo, a operação próxima à costa ou alto mar, facilidade de montagem, manutenção e transporte. Além da robustez e confiabilidade garantidas pelo estudo de materiais e alternativas de configuração do gerador,

adequando para as adversidades do ambiente marinho e não se esquecendo da necessidade de optar por tecnologia que não agrida o meio ambiente.

O conversor ativado por coluna de líquido oscilante obedece aos critérios descritos, acima, e, portanto optamos por este sistema para o projeto de desenvolvimento do protótipo de gerador de eletricidade através das ondas do mar.

A configuração do sistema conversor é composta por um flutuador semi-submerso (esse tipo de flutuador possui líquido no seu interior) para garantir a variação de translação vertical seja igual a da onda, o eixo que liga o gerador pode ser uma barra flexível ou barra rígida, essa será conectada ao gerador linear, a Figura 14 é uma ilustração do protótipo escolhido.

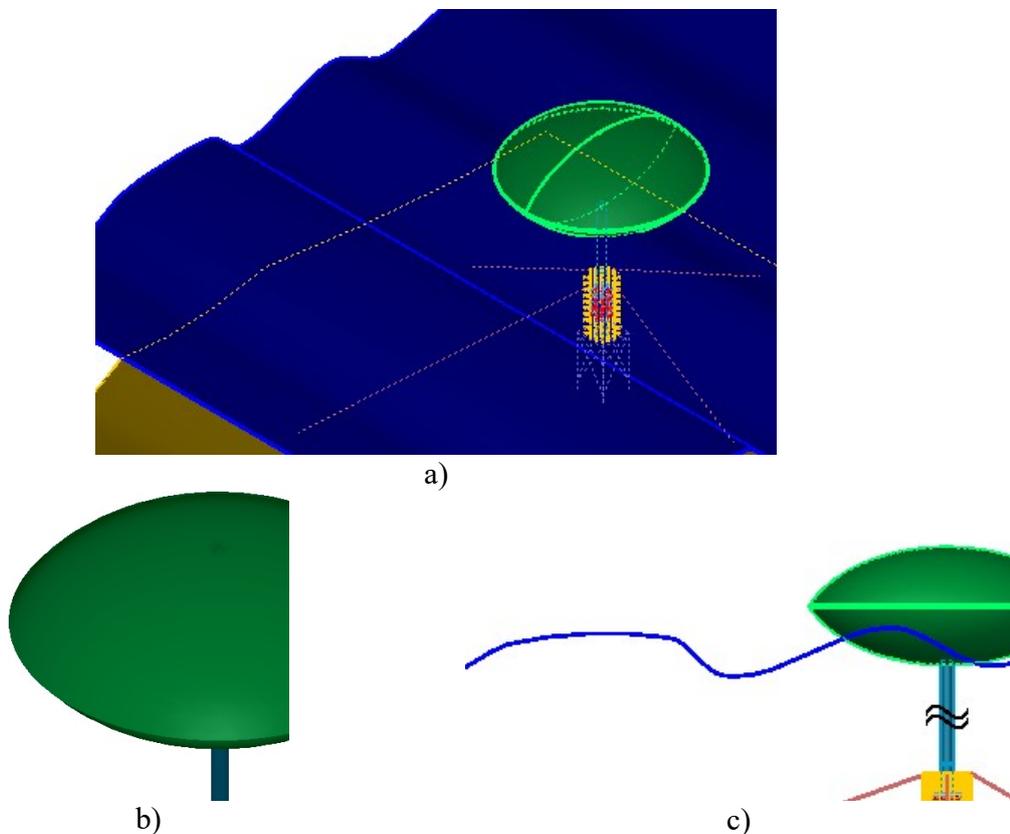


Figura 14: a) Vista do flutuador e do gerador em perspectiva no mar; b) Vista do flutuador e gerador em perspectiva; c) Perfil da instalação do Flutuador e gerador.

## 8. DIMENSIONAMENTO DO FLUTUADOR

É o responsável pela captura da energia contida na onda do mar, existem diversos tipos de flutuador. A maioria deles depende da área superficial de contato com a água, na Figura 15 têm-se alguns exemplos de flutuadores.

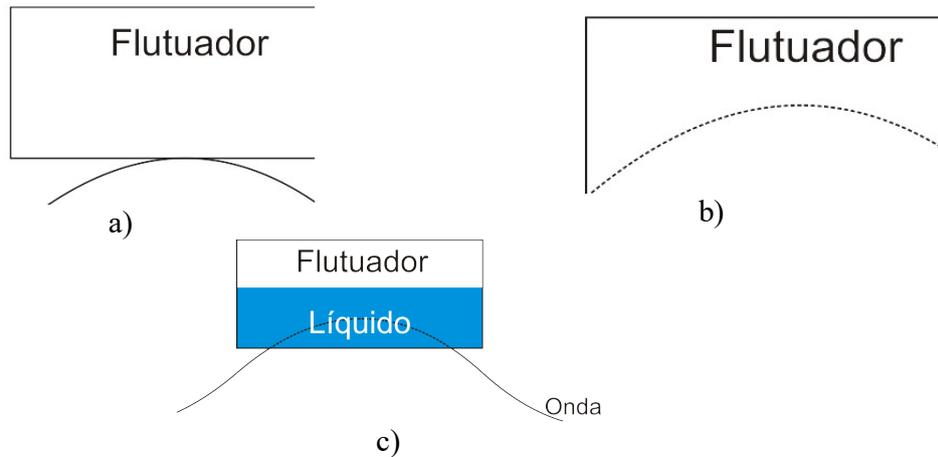


Figura 15: a) Flutuador não submerso; b) flutuador semi-submerso; c) flutuador com líquido.

As frequências harmônicas e o comprimento de onda estão relacionados à transferência de energia mecânica para o flutuador de acordo com as resultantes da onda no flutuador, a Figura 16 exemplificará algumas situações.

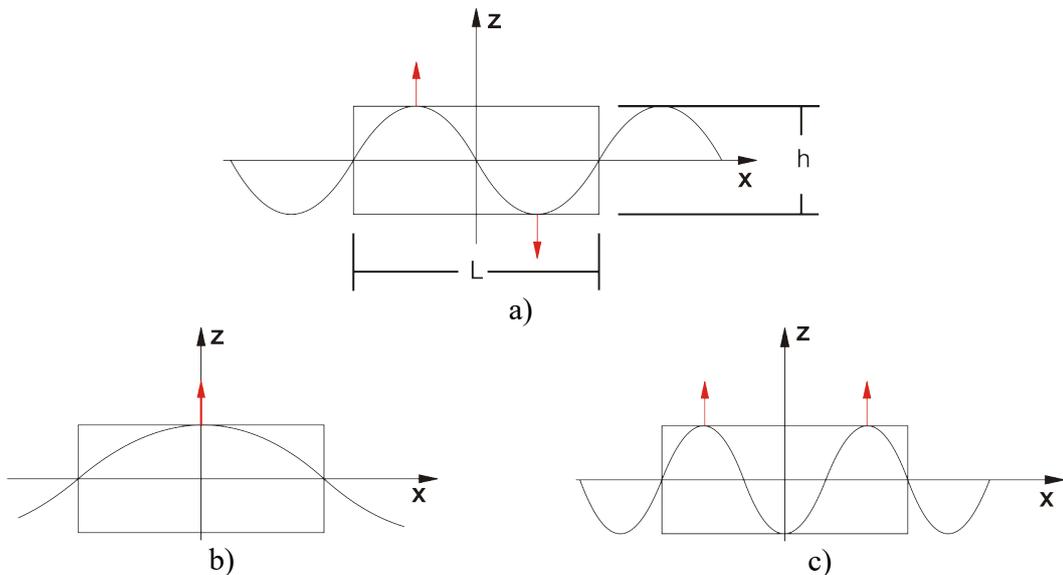


Figura 16: a) Comprimento de onda exatamente do tamanho do Flutuador; b) Flutuador com metade do valor de comprimento de onda, caso ideal; c) flutuador com  $1,5\lambda$ .

Quando a resultante ao longo do flutuador for nula, não haverá transferência de energia, isso acontece para a fundamental e para as harmônicas múltiplos de do comprimento do flutuador, equação (8.1):

$$L = N \cdot \lambda [m] , \text{ para } N=1, 2, 3... \quad (8.1)$$

Observa-se que há transferência de energia mecânica para o flutuador quando há uma resultante de força vertical das cristas para o flutuador, tal condição acontece nos casos de harmônicos ímpares de acordo com a equação (8.2).

$$L = \frac{N \cdot \lambda}{2} [m] , \text{ para } N=1, 3, 5, 7... \quad (8.2)$$

Logo, para o dado problema de conversão de energia utilizaremos a equação (8.2) para o dimensionamento do flutuador do problema proposto.

A geometria do perfil hidrodinâmico de contato do flutuador com a crista da onda também aumenta o rendimento da transferência de energia mecânica, pois um perfil rugoso com geometria irregular causa um escoamento do fluido turbulento e assim perda de carga hidrodinâmico que representa perdas na transferência de energia mecânica.

A energia mecânica é transferida para o flutuador pela força peso da coluna de água oscilante da onda em contato com o flutuador, peso do flutuador e o peso total no eixo.

$$F_{H20} = m_{H20} \cdot g [N] \quad (8.3)$$

$$F_{H20} = \rho_{H20} \cdot H \cdot A_{flutuador} \cdot g [N] \quad (8.4)$$

$$P_{flutuador} = F_{H20} \cdot \frac{2L_{flutuador}}{T} [N] \quad (8.5)$$

onde:

$F_{H20}$	$\equiv$ força da massa de água no flutuador [N];
$A_{flutuador}$	$\equiv$ área do flutuador [m <sup>2</sup> ];
$P_{flutuador}$	$\equiv$ potencia transferida ao flutuador [W];
$L_{flutuador}$	$\equiv$ comprimento do flutuador [m].

A área de contato do flutuador é feita através do enchimento de água igualando-se as equações (8.3) e (8.4). [1] [2]

$$A_{flut} = \frac{Volume_{H20}}{H} [m^2] \quad (8.6)$$

## 9. PROJETO DO GERADOR LINEAR

O conversor de ondas com coluna oscilante utiliza um gerador linear para converter o movimento harmônico vertical em energia elétrica. Existem vários arranjos os quais podem ser mecânicos, pneumáticos (compressores), engrenagens e redutores.

Tecnicamente é impossível capturar toda a energia contida nas cristas das ondas, pois, o comprimento ideal do flutuador é de acordo com a fundamental das ondas (a equação (8.2) fornece o comprimento ideal do flutuador para  $N=1$ ), ou seja, quanto maior o comprimento do flutuador menor será a sua sensibilidade para com as harmônicas de alta frequência, portanto, não existe o flutuador com área de contato ideal, conseqüentemente haverá uma parcela não aproveitada na conversão de energia.

A princípio basta acoplar um gerador elétrico através de um dispositivo (eixo rígido, eixo flexível, mancal e etc.) que converta movimento de translação em rotação, porém este tipo de solução aumenta a complexidade e as perdas mecânicas e conseqüentemente o rendimento, portanto foi adotada para o projeto a utilização de um gerador linear, este transforma o movimento linear em tensão induzida utilizando ímãs permanentes. A Figura 17 apresenta o ímã adotado, nota-se que o ímã possui polarização axial.

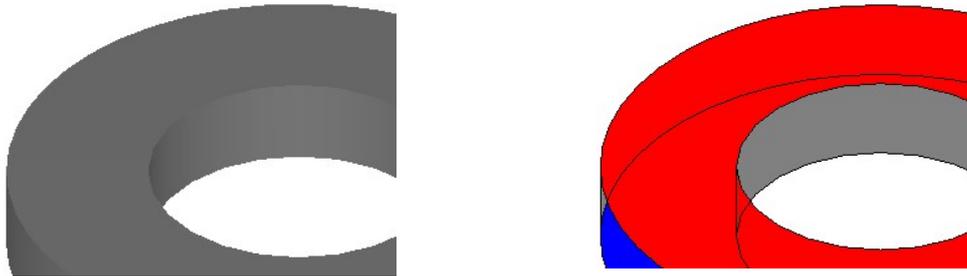


Figura 17: Ímã permanente axial utilizado para a construção do “transladador”.

Note que é necessário a utilização das sapatas para o direcionamento axial do fluxo magnético, a Figura 18 ilustra tal procedimento.

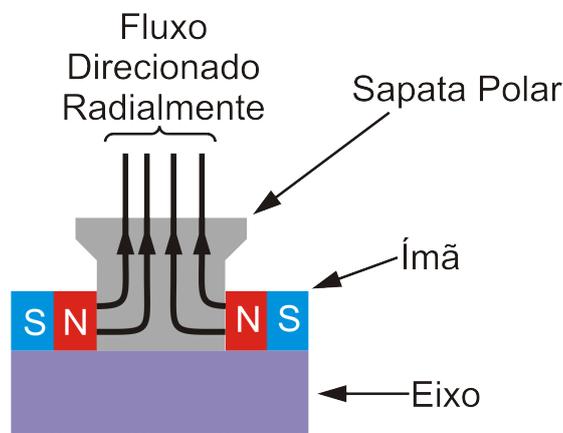


Figura 18: Direcionamento radial do fluxo utilizando as sapatas polares.

Sabe-se que a máquina rotativa para conversão de movimentos com baixa frequência e pequena amplitude torna-se de baixo rendimento, pelo fato de adicionar mais componentes (engrenagens), além de restringir ainda mais as ondas em amplitude e frequência, uma vez adicionando perdas por atrito e inércia.

Atualmente, muitos centros de pesquisa e companhias que geram energia através de fontes renováveis, experimentam protótipos de geradores de máquinas elétricas lineares (trifásico ou monofásico), sendo a configuração monofásica a mais utilizada.

A configuração para o gerador pode ser internamente trifásico nos enrolamentos estatóricos, porém para a transmissão o uso de um sistema monofásico é mais viável economicamente para a transmissão, pois utiliza um par de cabos para transmitir a tensão em Corrente Contínua até a costa, para isso é necessário um sistema de inversores para conversão CC/CA.

A grande vantagem deste tipo de máquina para esta aplicação é a redução da complexidade nos dispositivos mecânicos de transferência de energia, resume-se ao flutuador e ao eixo de translação o qual é ligado ao gerador. Outro fator decisivo para a viabilização desse projeto é a utilização de ímãs de neodímio os quais possuem um poder de magnetização muito superior em relação ao de ferrite e, além disso, é muito diminuto, ou seja, para um ímã de ferrite ter o mesmo poder de magnetização de um ímã de neodímio é necessário um ímã muito grande, isso inviabilizaria o projeto devido à inércia imposta pelo ímã de ferrite no “transladador”. A Figura 19 é um esboço do protótipo.

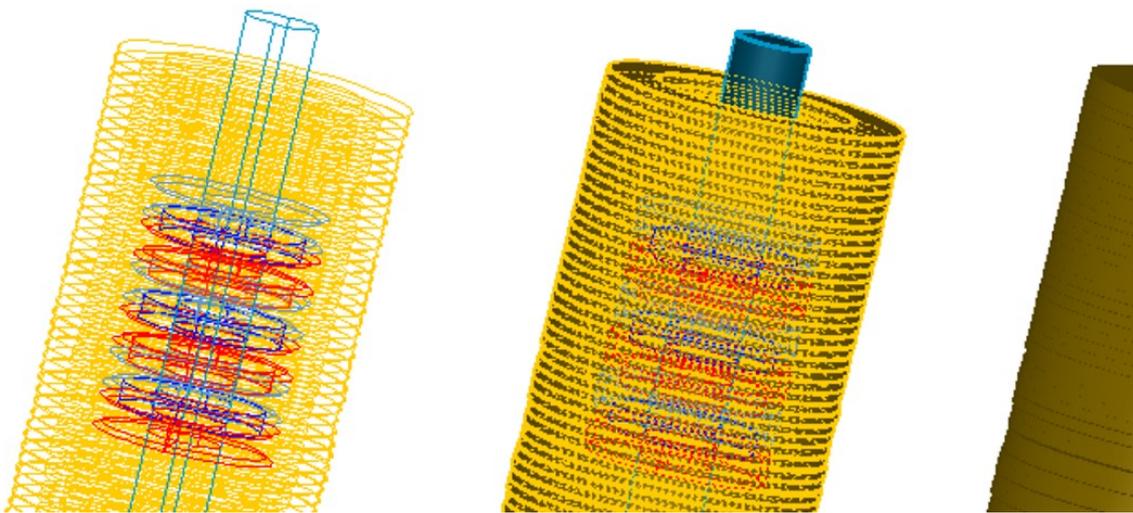


Figura 19: a) Visão interna do gerador detalhada; b) Visão renderizada do “transladador”; c) Visão isométrica do Gerador; d) Visão do “transladador” em perspectiva.

A confiabilidade e a robustez são garantidas pelo fato da máquina linear ter apenas uma parte móvel e utilizar ímãs permanentes, eliminando a necessidade de uma fonte de tensão ou corrente de excitação no rotor para máquinas rotativas síncronas e alguns geradores de corrente contínua.

O estator desta máquina é similar a qualquer outra máquina rotativa do ponto de vista construtivo e de circulação magnética, é análogo ao modelo planificado de máquina rotativa, assim utiliza-se de uma metodologia de projeto através do levantamento do circuito magnético, obtendo o valor do fluxo passante, resultando nas tensões e correntes nos terminais do estator do gerador.

A máquina linear é caracterizada como qualquer outra máquina elétrica pelas Leis elementares de eletricidade e eletromagnetismo que relaciona grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas [6].

A seguir dimensionaremos a máquina do ponto de vista magnético. Note que para uma melhor explanação esse capítulo será dividido em vários subcapítulos.

### 9.1 Determinação da Geometria do Gerador Linear

O estator do gerador linear é cilíndrico com corpo de aço carbono magnético, composto de anéis de material laminado disposto axialmente formando os dentes, as ranhuras entre os dentes alojam as bobinas. Note que há uma carcaça cilíndrica que envolve as ranhuras e os dentes.

A parte móvel do gerador linear é composta por anéis de ímãs permanentes de Neodímio com direção de magnetização axial devido às sapatas polares, para uma melhor explicação a Figura 20 ilustra o nosso protótipo expondo o transladador e estator.

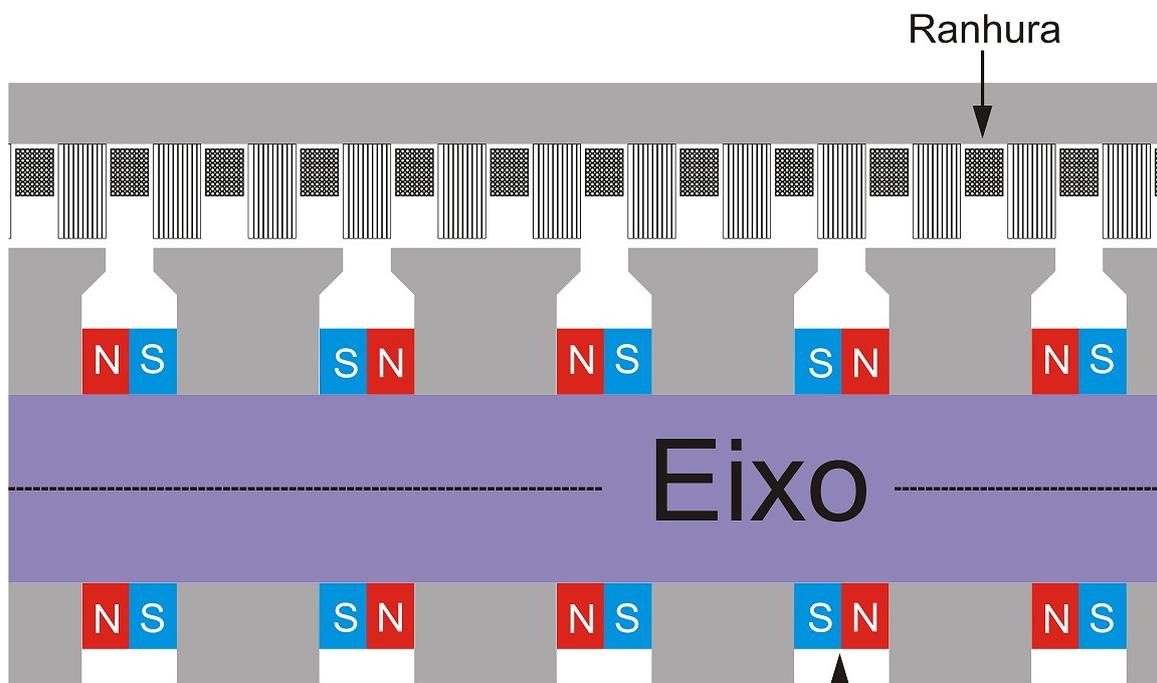


Figura 20: Corte transversal do estator (Ranhuras, dentes e a carcaça cilíndrica) e do “transladador” (ímãs, sapatas polares e eixo).

## 9.2 Corte transversal do Gerador Linear

A análise do circuito magnético é feita no corte transversal (Figura 21), onde podemos definir a circuitação do contorno do fechamento do fluxo magnético.

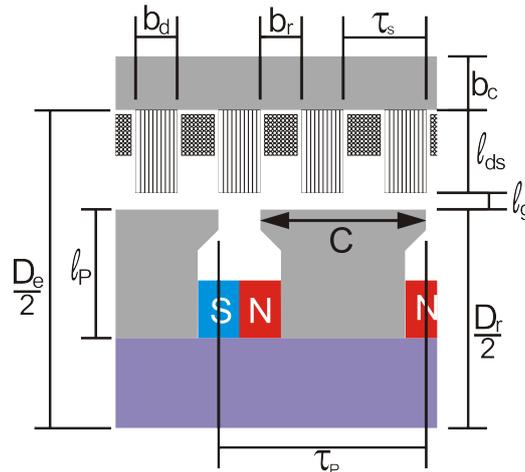


Figura 21: Corte transversal com as definições dos parâmetros do gerador linear.

Calcula-se o Fator de forma ( $k_F$ ), pois a sapata polar não é ideal, de acordo com a equação (9.1).

$$k_F = \frac{C}{\tau_p} \quad (9.1)$$

onde:

$C$  = largura da sapata polar [m]  
 $\tau_p$  = passo polar [m]

Para uma aproximação boa do projeto utiliza-se o Fator de forma ( $k_F$ ) entre os valores 0,7 e 0,8.

O entreferro equivalente levando em conta o Fator de Carter que considera o aumento de relutância devido à presença de abertura da ranhura pode ser calculado pela equação (9.2).

$$l_{g_{eq}} = l_g \cdot k_c \quad (9.2)$$

onde:

$l_{g_{eq}}$  = entreferro equivalente [m]  
 $l_g$  = entreferro [m]  
 $k_c$  = Fator de Carter

Devemos respeitar a seguinte condição para o Fator de Carter do projeto para o estator em função de  $\gamma$ .

$$k_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma \cdot l_g} > 1 \quad (9.3)$$

onde  $\gamma$  pode ser calculado pela equação (9.4).

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_r}{l_g}\right)^2}{5 + \frac{b_r}{l_g}} \quad (9.4)$$

onde:

$\tau_s$  - passo do estator [m]

$b_r$  - espaçamento entre ranhuras do estator [m]

### 9.3 Circuito Magnético

Inicialmente impõe-se uma indução de referência no entreferro para fins de levantar a curva do circuito magnético e determinar o cruzamento com a curva de desmagnetização do ímã definindo assim o ponto de operação do ímã, a Figura 22 ilustra o procedimento.

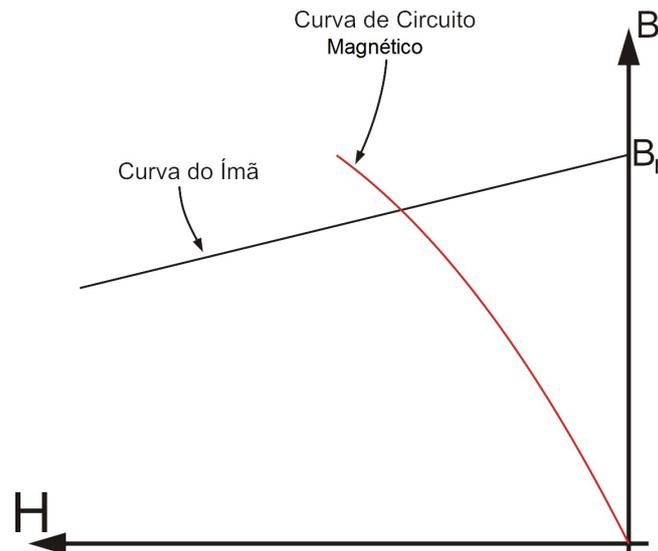


Figura 22: Note que para cada indução de campo imposta tem-se um valor na Curva de circuito magnético (em vermelho), logo para um melhor dimensionamento dever-se-á calcular para vários a fim de levantar uma regressão linear.

### 9.3.1 Campo magnético de referência

Impõem-se uma indução de referência no entreferro de [7]:

$$B_{gref} = 0,6 [T]$$

De acordo com o Fator de forma (9.1), tem-se que o Campo magnético médio pode ser equacionado por (9.5).

$$B_{gm} = k_F \cdot B_{gref} [T] \quad (9.5)$$

onde:

$B_{gref}$  = Campo magnético de referência [T]

$B_{gm}$  = Campo magnético médio [T]

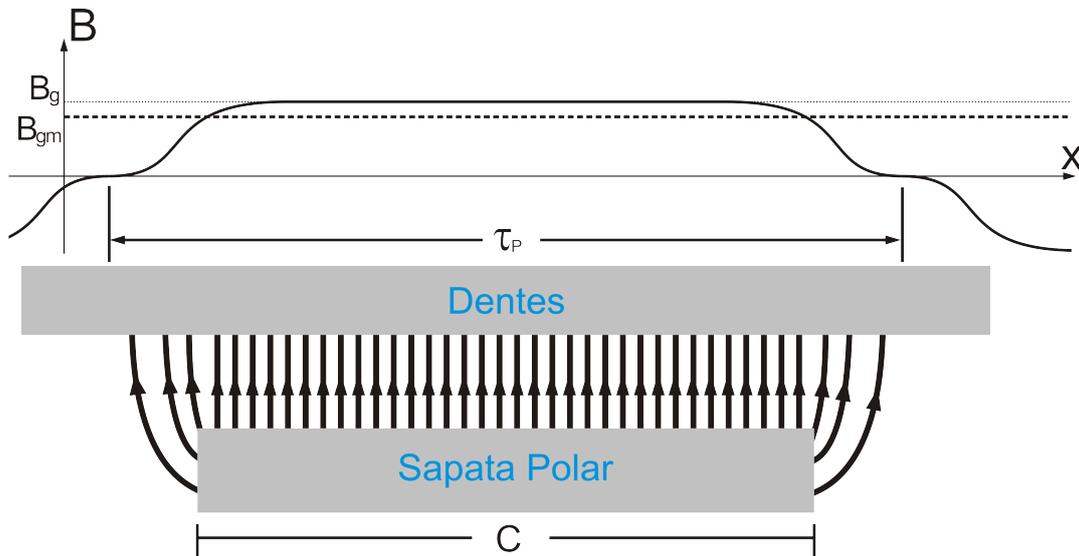


Figura 23: Campo magnético médio para  $B_{gref} = 0,6 [T]$ , observe que o Fator de forma implica em uma superfície de dentes contínua sem ranhuras.

### 9.3.2 FLUXO POR PÓLO

O fluxo por pólo de referência é determinado pela equação (9.6). Através do produto do campo magnético médio multiplicado pela superfície polar.

$$\phi_{Pref} = B_{gm} \cdot S_p = B_{gref} \cdot k_F \cdot S_p [Wb] \quad (9.6)$$

Sabe-se que a superfície polar é calculada por:

$$S_p = \pi \cdot D_R \cdot \tau_p \text{ [m}^2\text{]} \quad (9.7)$$

Substituindo a equação (9.7) em (9.6), tem-se:

$$\phi_{ref} = \pi \cdot D_R \cdot \tau_p \cdot k_F \cdot B_{gref} \text{ [Wb]}, \quad (9.8)$$

onde:

$\phi_{P_{ref}}$  = Fluxo por pólo do Campo magnético de referência [Wb]

$S_p$  = Superfície polar [m<sup>2</sup>]

$D_R$  = Diâmetro da sapata polar [m]

### 9.3.3 Distribuição de indução nas várias partes do circuito magnético:

Para um melhor entendimento do processo de cálculo do campo no induzido e no indutor, dividiremos essa análise em duas partes.

#### Parte I: Campos Magnéticos no estator (induzido)

A Figura 24 ilustra o dente do estator em detalhes, para o cálculo do campo magnético dentes ( $B_{ds}$ ), o qual tem a função de ser o induzido, é necessário fazer correções tais como: O dente do estator não é maciço, logo, adota-se o fator de empilhamento de 0,95, devido ao espraramento deve-se corrigir a superfície do dente essa correção se faz a 1/3 do comprimento do dente.

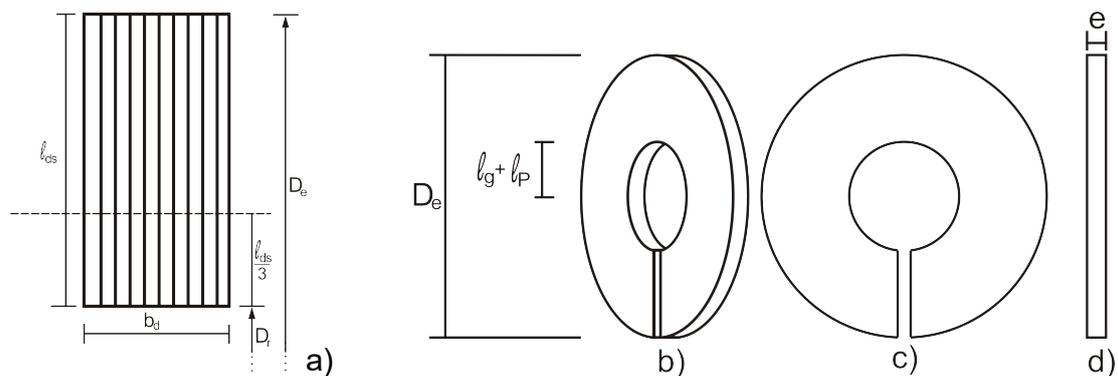


Figura 24: Dente do estator em detalhes note que o dente é composto por lâminas (deve-se atentar que essas lâminas não se fechem formando um anel, isso provocaria um campo induzido o qual causaria perdas por Foucault).

Para calcular o  $B_{ds}$ , onde se devem considerar o números de dentes por pólo, a equação (9.8) demonstra matematicamente esse cálculo.

$$B_{ds} = \frac{\phi_{pref}}{Sd_{s1/3} \cdot (n^{\circ}_{dentesporpolo})} [T], \quad (9.9)$$

onde  $Sd_{1/3}$  é calculado de acordo dimensão magneticamente equivalente. [6]

$$Sd_{s1/3} = \pi \cdot (D_R + \frac{1}{3} \cdot lds \cdot 2) \cdot b_d \cdot k_e [m^2], \quad (9.10)$$

onde:

$k_e$  = Fator de empacotamento

$b_d$  = espessura do dente

$lds$  = altura do dente

Portanto, substituindo (9.10) em (9.9), obtém-se (9.11).

$$B_{cs} = \frac{\frac{\phi_{pref}}{2}}{\pi \cdot D_e \cdot b_{cs}} [T], \quad (9.11)$$

onde:

$$D_e = D_R + \frac{1}{3} \cdot lds \cdot 2$$

$$b_{cs} = b_d \cdot k_e$$

## Parte II: Campos Magnéticos no “Transladador” (indutor)

Analogamente ao cálculo do campo magnético dentes deve-se corrigir a superfície da sapata polar, essa correção pode ser visualizada na Figura 25.

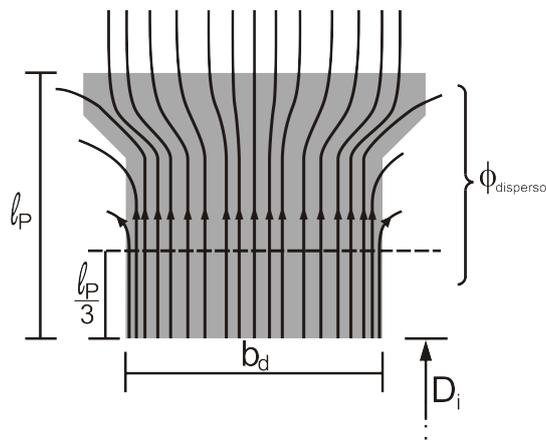


Figura 25: Sapata Polar em detalhes, note que há dispersão de fluxo.

De acordo com a Figura 25, aproximamos a trajetória do fluxo ao comprimento, essa simplificação resultará na equação (9.12). Note que há dispersão de fluxo logo se deve impor um Fator de dispersão de 1,2 aproximadamente [10]. .

$$B_p \cong \frac{\phi_{pref} \cdot k_d}{S_p} [T] \quad (9.12)$$

onde:

$k_d$  = fator de dispersão

$S_p$  = Superfície Corpo do Polo [m<sup>2</sup>]

O cálculo da superfície polar deverá ser corrigido devido ao efeito de espraiamento, logo, deve-se considerar 1/3 da altura do pólo.

$$S_p = \pi \cdot \left( D_i + \frac{2}{3} \cdot l_p \right) \cdot b_p \text{ [m}^2\text{]} \quad (9.13)$$

Substituindo (9.12) em (9.13), obtém-se o campo do ímã.

$$B_{imã} \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot \phi_{pref} \cdot k_d}{S_{imã}} [T] \quad (9.14)$$

onde:

$S_{imã} \cong S_{CP}$

### 9.3.4 FORÇAS MAGNETO-MOTRIZES REFERIDAS

Nesse item estimaremos os valores da força magneto motriz.

#### -Força Magneto-motriz no entreferro

Estima-se a força magneto-motriz no entreferro de acordo com a equação (9.15).

$$F_g = \frac{B_{gref}}{\mu_o} \cdot l_g \cdot k_c [A.espira] \quad (9.15)$$

onde:

$\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [H / m]$

### -Força Magneto-motriz no estator

Após os cálculos dos Campos Magnéticos  $B_{ds}$  e  $B_{cs}$  pelas equações (9.9) e (9.11) obtém-se os valores de intensidade de campo  $H$  através das curvas de magnetização (Figura 26) dos materiais que compõe o circuito magnético do estator resultando na, assim temos a força magneto-motriz requerida no estator. Portanto,  $F_{ds}$  e  $F_{cs}$  podem ser equacionadas de acordo com (9.16) e (9.17) respectivamente.

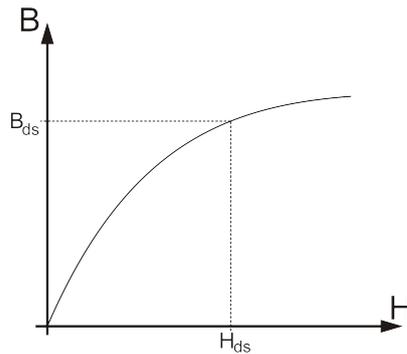


Figura 26: Curva de magnetização  $B \times H$

$$F_{ds} = H_{ds} \cdot l_{ds} \text{ [A. espira]} \quad (9.16)$$

$$F_{cs} = H_{cs} \cdot l_{cs} \text{ [A. espira]} \quad (9.17)$$

### -Força Magneto-motriz na sapata polar

Analogamente ao item anterior, utilizando a curva de magnetização do material da sapata polar, tem-se que a força magneto-motriz é igual a:

$$F_p = H_p \cdot l_p \text{ [A. espira]} \quad (9.17)$$

Logo, o Potencial Magnetostático ou F.M.M. total requerida pelo circuito magnético a ser suprida pelo ímã permanente está ilustrada na Figura 27.

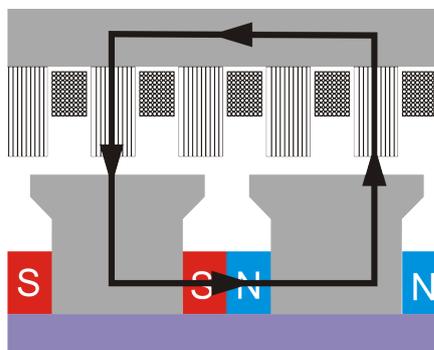


Figura 27: Fluxo magnético entre as sapatas polares

$$F_{TOTAL} = 2 \cdot F_g + 2 \cdot F_{ds} + F_{cs} + 2 \cdot F_p \quad [A \cdot espira] \quad (9.18)$$

Referindo ao ímã permanente:

$$H_{ímã} = \frac{F_{TOTAL}}{l_{ímã}} \quad [A/m] \quad (9.19)$$

### 9.3.5 Coordenação da característica do ímã com a curva de carga do circuito magnético.

A coordenação é efetuada através da intensidade do campo magnético  $H_{ímã}$  referido ao ímã que representa a intensidade de campo a ser suprida pelo ímã ao circuito magnético. A partir do fluxo magnético total, determina-se o respectivo  $B_{ímã}$  (a Figura 28 exemplifica esse procedimento), fazendo-se este processo com valores diferentes de  $B_{gref}$  e recalculando todo o procedimento, obtemos uma curva do circuito magnético que intercepta a curva de desmagnetização do ímã permanente no ponto de operação do circuito magnético ( $B_{op}, H_{op}$ ).

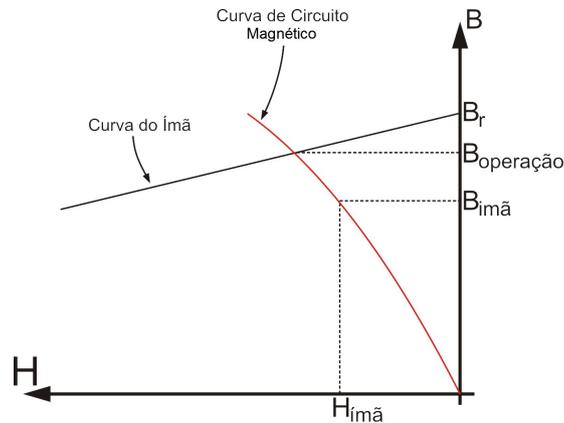


Figura 28: Note que para  $B_{gref}$  de 0,6T o ponto na curva de circuito magnético do ímã ( $B_{ímã}$ ) fica aquém do ponto de operação.

Para uma adequação ao projeto será necessário corrigir a indução no entreferro ( $l_g$ ), conseqüentemente será necessário corrigir o campo magnético segundo a equação (9.20).

$$B_{gop} = B_{gref} \cdot \frac{B_{op}}{B_{ímã}} \quad [T] \quad (9.20)$$

O cálculo do fluxo de operação por pólo é de acordo com a equação (9.21).

$$\phi_{Pop} = B_{gop} \cdot k_F \cdot S_p \quad [Wb] \quad (9.21)$$

Logo, a tensão eficaz induzida no pólo estator: [7], [8], [9], [10].

$$E = 4,44 \cdot f_{gerador} \cdot N \cdot \phi_{p\acute{o}l} [V] \quad (9.22)$$

onde:

$f_{gerador}$  = frequência elétrica do gerador [Hz]

N= número de espiras por pólo

#### 9.4-Análise da tensão induzida.

A tensão induzida relaciona-se com a velocidade de deslocamento vertical da onda, o qual é capturado pelo flutuador e transmitido para o “transladador”. A posição  $x(t)$  do transladador levando em conta as hipóteses desenvolvidas no Capítulo 5 é equacionada de acordo com (9.23), a Figura 29 ilustra o movimento vertical da onda em relação ao movimento linear do “transladador”.

$$x(t) = \frac{H}{2} \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t + \alpha) [m], \quad (9.23)$$

onde:

$x(t)$  = posição vertical do transladador [m]

$H/2$  = amplitude da onda [m]

$\Omega$  = velocidade angular do transladador [rad/s]

$\alpha$  = ângulo de defasagem [rad]

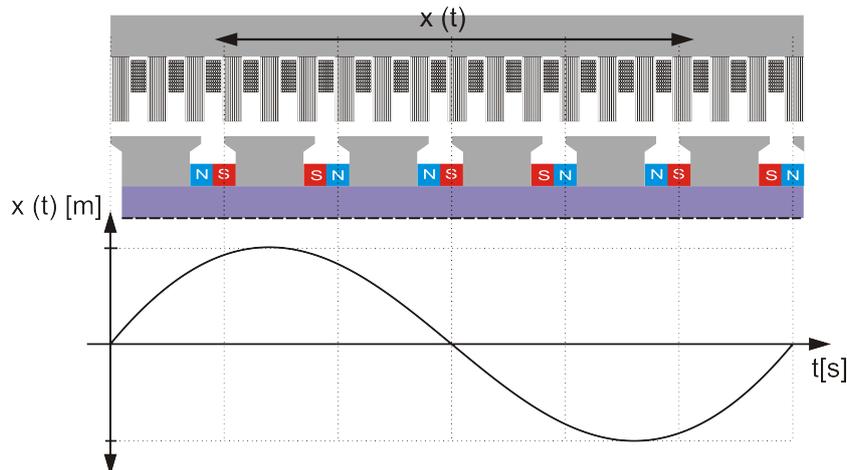


Figura 29: Observe que o “transladador” apenas converte o movimento vertical da onda.

A velocidade angular do “transladador” é dada pela frequência da onda, equação (5.1), logo, tem-se que:

$$\Omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{onda} \text{ [rad/s]}, \quad (9.24)$$

onde:

$$f_{onda} = \text{freqüência da onda do mar [Hz]}$$

Derivando a equação (9.23) no tempo, obtém-se a velocidade do “transladador”.

$$v_{transladador} = \dot{x}(t) = \Omega \cdot \frac{H}{2} \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t + \alpha) \text{ [m]} \quad (9.25)$$

Sabe-se que o ângulo polar relaciona a posição do “transladador” em um dado ângulo, equação (9.26).

$$\theta_{pólo}(t) = \frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t + \alpha) \text{ [m]} \quad (9.26)$$

onde:

$$\theta_{pólo}(t) = \text{ângulo polar [rad]}$$

$$\tau_p = \text{Passo polar [m]}$$

O fluxo do campo magnético do imã permanente no induzido (estator) é em função do ângulo polar quando o “transladador” está em movimento, a equação (9.27) descreve o fluxo por pólo em função do tempo.

$$\phi_{pólo}(t) = \phi_{Pop} \cdot \cos(\theta_{pólo} \cdot t + \gamma) \text{ [Wb]} \quad (9.27)$$

onde:

$$\Omega = \text{velocidade angular do “transladador” [rad/s]}$$

Substituindo a equação (9.26) em (9.27), tem-se:

$$\phi_{pólo}(t) = \phi_{Pop} \cdot \cos\left(\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t + \alpha)\right) \cdot t + \gamma\right) \text{ [m]} \quad (9.28)$$

onde:

$$\gamma = \text{ângulo de defasagem [rad]}$$

Note que os ângulos de defasagens  $\alpha$  e  $\gamma$  são arbitrários e serão adotados como zero.

A tensão induzida ou força eletromotriz induzida no pólo é obtida através da Lei de Faraday.

$$e(t) = -N \frac{d\phi_{polo}(t)}{dt} [V] \quad (9.29)$$

Portanto, a tensão induzida em função do tempo nos terminais do gerador linear é dada através da equação (9.30), substituição de (9.28) em (9.29).

$$e(t) = -N \frac{d\phi_{polo}(t)}{dt} = - \frac{N \cdot d[\phi_{pop} \cdot \cos(\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t + \alpha) \cdot t + \gamma)]}{dt} [V]$$

$$e(t) = -N \cdot [\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \phi_{pop} \cdot \cos(\Omega \cdot t + \alpha) \cdot \text{sen}(\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t + \alpha) \cdot t + \gamma)] \quad (9.30)$$

Observe que a tensão induzida (9.30) possui a seguinte característica:

$$A \cdot \text{sen}(B \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t + \alpha) \cdot t + \gamma) \quad (9.31)$$

onde a tensão induzida varia a frequência, esta parcela causará o aparecimento de harmônicas de frequências.

A tensão nos terminais do gerador variará em frequência, para uma dada frequência de onda fixa, observa-se pela equação (9.30) a parcela moduladora em frequência da tensão induzida ( $\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \phi_{pop} \cdot \cos(\Omega \cdot t + \alpha)$ )

Para analisarmos as amplitudes e frequências harmônicas significativas temos as seguintes alternativas a considerar: Série de Fourier e Simulação computacional (Capítulo 11)

#### -Série de Fourier

A análise pela Série de Fourier [7] da tensão induzida é uma solução boa, porém dispendiosa, pois necessita que para cada alteração de parâmetro seja necessário um novo cálculo de todos os coeficientes de Fourier. Para uma solução pontual (parâmetros do gerador fixos) é muito adequado.

Forma exponencial complexa da Série de Fourier:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{j \cdot k \cdot \omega_0 \cdot t}, \omega_0 = \frac{2 \cdot \pi}{T_0} \left. \vphantom{\sum} \right\} \text{Fórmula síntese do sinal}$$

$$\left. \begin{aligned} c_k &= \frac{1}{T_0} \int_{T_0} s(t) \cdot e^{-j \cdot k \cdot \omega_0 \cdot t} dt \\ c_{-k} &= c_k \end{aligned} \right\} \text{Fórmula de análise}$$

A tensão induzida  $e(t)$  possui as parcelas  $\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \phi_{Pop} \cdot \cos(\Omega \cdot t + \alpha)$   
 $\text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \text{sen}(\Omega \cdot t + \alpha) \cdot t + \gamma\right)$  devem ser convertidas pela fórmula de Euler na forma exponencial complexa[7].

$$\left. \begin{aligned} \cos(x) &= \frac{e^{j \cdot x} + e^{-j \cdot x}}{2} \\ \text{sen}(x) &= \frac{e^{j \cdot x} - e^{-j \cdot x}}{2 \cdot j} \end{aligned} \right\} \text{Fórmulas de Euler}$$

Efetuada os cálculos e determinado os coeficientes, obtém-se as amplitudes das harmônicas e analisa-se o espectro com suas componentes em uma dada frequência fundamental. Variamos esta fundamental gerando outro espectro, assim iterativamente.

## 9.5- Características elétricas do gerador linear

O modelo elétrico do gerador linear é semelhante ao modelo de uma máquina elétrica rotativa planificada. Fig.30, um modelo simplificado onde é apresentado a reatância série e resistência série.



Figura 30: Modelo elétrico do gerador.

O valor da tensão induzida nos terminais do gerador foi obtido, ligando se em série três bobinas, onde a primeira bobina possui fase  $0^\circ$  elétricos, a segunda bobina possui fase  $60^\circ$  elétricos e a terceira bobina fase  $120^\circ$  elétricos. A quarta bobina possui  $180^\circ$  elétricos, ou seja, necessita-se a inversão dos terminais de três bobinas intercaladamente, garantindo que as resultantes fasoriais de tensão não se anulem.

A tensão induzida no terminal no gerador é definida pela soma fasorial das tensões em cada bobina (Fig 31), que possui uma defasagem ou ângulo elétrico (9.32).

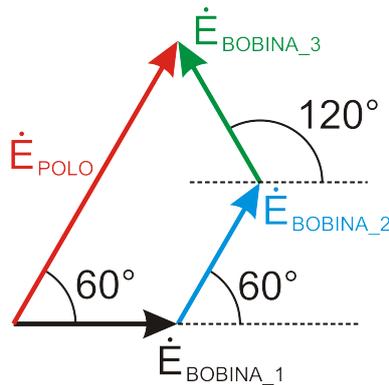


Figura 31: Soma fasorial das tensões nas bobinas do polo.

$$\phi_i = \frac{180}{n} \cdot i \text{ [graus]} \quad (9.32)$$

Onde  $i$  é o índice relativo ao dente tomado no centro da primeira sapata polar, no caso  $i$  varia de 0 a 2 .O valor de  $n$  é o número de dentes contido no intervalo de um passo polar.

A tensão induzida no gerador é definida pela equação (9.33).

$$\dot{E}_{gerador} = p \cdot \sum_{i=0}^2 E_{bobina\_i} \angle \phi_i \text{ [V]} \quad (9.33)$$

onde:

$p$  = número de par de polos [rad];

$\dot{E}_{gerador}$  = Tensão induzida nos terminais do gerador linear [m];

$E_{bobina\_i} \angle \phi_i$  = Tensão induzida na bobina e sua defasagem [m].

A frequência elétrica é obtida através da relação da amplitude com o passo polar da (9.34):

$$f_{gerador} = \frac{2 \cdot H}{\tau_p} \cdot f_{onda} \text{ [rad/s]} \quad (9.34)$$

onde:

$f_{gerador}$  = frequência elétrica do gerador linear [Hz];

$f_{onda}$  = frequência da onda do mar [Hz].

Através da tensão do gerador e do modelo elétrico pode-se estimar a corrente de carga e outros aspectos elétricos. Para uma frequência elétrica de 2,77 [Hz] gerada por uma onda do mar com frequência média de 0,5[Hz] (critério técnico de projeto) (9.35).

$$\dot{E}_{gerador} = p \cdot \sum_{i=0}^2 E_{bobina\_i} \angle \phi_i \quad [\text{V}] \quad (9.35)$$

A reatância do gerador  $X_{gerador}$  é determinada através da relutância eletromagnética do circuito magnético que é calculado através da geometria do entreferro, equação (9.36) [8, (9.37) [8], [9].

$$\mathfrak{R}_{gerador} = \frac{\mathfrak{R}_{imã}}{2} + \mathfrak{R}_{entreferro} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (9.36)$$

$$\mathfrak{R}_{gerador} = \frac{6 \cdot l_{imã}}{1,05 \cdot \mu_o \cdot S_{imã}} + \frac{6 \cdot l_{entreferro}}{\mu_o \cdot S_p} \quad [\text{H}^{-1}] \quad (9.37)$$

onde:

$\mathfrak{R}_{gerador}$  = Relutância do Gerador Linear [ $\text{H}^{-1}$ ];  
 $S_p$  = Superfície polar [ $\text{m}^2$ ];  
 $S_{imã}$  = Superfície ímã [ $\text{m}^2$ ];  
 $l_{entreferro}$  = Comprimento do entreferro [m];  
 $l_{imã}$  = Comprimento do ímã no circuito magnético [m].

Logo, a indutância do gerador pode ser calculada a partir da equação (9.38) [8], [9], [10].

$$L_{gerador} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{gerador}} \quad [\text{H}] \quad (9.38)$$

Portanto, a reatância série do gerador por (9.39): [7], [8], [9].

$$X_{gerador} = 2\pi \cdot f_{elétrica} \cdot L_{gerador} \quad [\Omega] \quad (9.39)$$

onde:

$X_{gerador}$  = Reatância do Gerador Linear [ $\Omega$ ];  
 $f_{elétrica}$  = frequência elétrica do gerador [Hz];  
 $L_{gerador}$  = Indutância do Gerador [H];  
 $N$  = Número de espiras [m].

Finalmente tem-se, que a resistência ôhmica interna do gerador linear é dada pela seguinte equação (9.40) [10].

$$R_{gerador} = \frac{\rho_{Cobre} \cdot l_{cobre}}{A_{cobre}} \quad [\Omega] \quad (9.40)$$

onde:

$R_{gerador}$  = Resistência interna do Gerador Linear

$\rho_{Cobre}$  = Resistividade do fio de cobre.

$l_{Cobre}$  = comprimento do fio da bobina de cobre [m].

$A_{Cobre}$  = área da secção transversal do fio de cobre [m<sup>2</sup>].

$$l_{cobre} = 2 \cdot \pi \cdot r_{medio\_estator} \quad [m] \quad (9.41)$$

A impedância do gerador linear é dada por (9.42) [10].

$$Z_{gerador} = \sqrt{R_{gerador}^2 + X_{gerador}^2} \quad [\Omega] \quad (9.42)$$

## 9.6- Especificação do Gerador

Utilizaram-se os seguintes dados como referência de projeto, o valor de frequência de onda senoidal de 0,5[Hz] e amplitude média de 10 cm. O fator de escala do projeto é de 1 para 10, dados tomados em referência da onda tipo swell.[1], [11].

As especificações elétricas e geométricas do gerador linear foram obtidas utilizando uma planilha Excel (ANEXO 1), que contém a formulação do circuito magnético assim como o cálculo da curva BxH. Através da planilha efetua-se um processo iterativo em que variando os valores das características geométricas, observando-se os valores campo magnético de operação, tomando o cuidado de evitar a região de saturação. Em posse dos dados obtidos da planilha Excel foi levantado uma curva semelhante à figura 28, a Figura 32 é a curva BxH do gerador linear projetado.

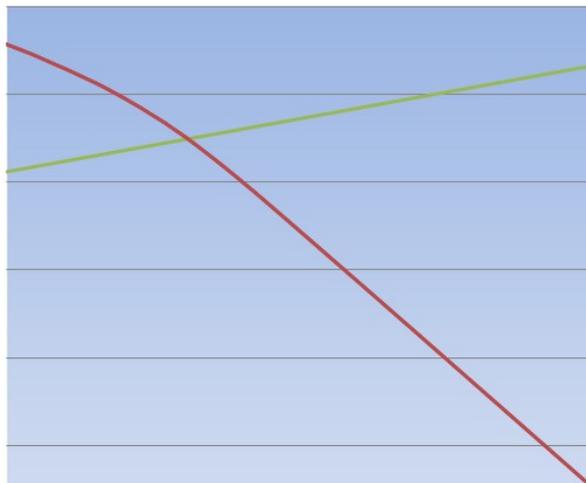


Figura 32: Curva BxH real obtida de acordo com o ANEXO 1, onde em verde tem-se a curva característica do ímã de neodímio [12], e em vermelho tem-se a curva característica do circuito magnético do gerador linear.

A tabela 1 apresenta os dados obtidos de acordo com o ANEXO 1.

**Tabela 1: Especificação das características geométricas do Gerador Linear.**

C (largura da sapata polar [m])	0,028
$\tau_p$ ( passo polar [m])	0,036
$l_g$ ( entreferro [m])	0,001
$T_s$ (passo do estator [m])	0,012
$b_r$ (espaçamento entre ranhuras do estator [m])	0,006
$D_r$ (Diâmetro da sapata polar [m])	0,05
$D_R$ (diâmetro externo estator [m])	0,118
$l_{ds}$ (altura do dente [m])	0,033
$b_d$ (espessura do dente [m])	0,006
$k_c$ [m] (Fator de empacotamento)	0,95
$n^\circ$ dentes por polo	2,00
$D_i$ (Diâmetro interno Sapata Polar [m])	0,022
$l_p$ (Altura transversal Sapata Polar [m])	0,017
$b_d$ (Largura transversal da Sapata Polar [m])	0,018
$k_d$ ( fator de dispersão)	1,20
$D_{ext\ imã}$ [m]	0,04
$D_{int\ imã}$ [m]	0,01
$l_{cs}$ (altura do dente [m])	0,033
$l_p$ (altura do sapata polar [m])	0,017
$l_{imã}$ [m]	0,008
N (número de espiras por bobina)	90,00
$N_{polo}$ (número de espiras por polo)	180,00
p (número de par de pólos)	3
Número de bobina	9

Para uma frequência média da onda do mar de 0,5 Hz (critério de técnico de projeto) e utilizando a equação (9.34) tem-se uma frequência de gerador de 2,77 Hz, a tabela 2 é obtida de acordo com os cálculos do ANEXO 1.

**Tabela 2: Especificações Elétricas do Gerador Linear.**

E (Tensão Induzida por polo Estator [V])	2,6202
$E_{gerador}$ (Tensão do Gerador) [V]	15,7209
Relutância do gerador [ $H^{-1}$ ]	9529578,1756
$L_{gerador}$ [H]	0,0076
$X_s$ gerador [ $\Omega$ ] (reatância série)	0,1331
Área secção do fio [ $m^2$ ]	1,4660E-06
$R_{gerador}$ [ $\Omega$ ]	0,773
$Z_{gerador}$ [ $\Omega$ ]	0,784

O dimensionamento do fio das bobinas é de acordo com a corrente de carga fornecida pelo gerador linear, o diâmetro do fio das bobinas implicam diretamente na impedância interna do gerador e conseqüentemente em perdas por efeito Joule, quanto

maior for a secção menor será a perda, de acordo com a equação (9.40). Deve-se atentar aos aspectos construtivos já que fios com diâmetros maiores ocupam grande volume proporcionando poucas espiras.

O dado referente à área transversal entre os dentes onde será acomodada a espira estática define a bitola de fio a ser utilizado na bobina, utilizando uma tabela de fio esmaltado AWG foram definidas as seguintes características para do gerador linear, tabela 3.

**Tabela 3: Especificação da bitola da bobina do estator.**

AWG	16
Diâmetro do fio [mm]	1,1286
Secção[mm <sup>2</sup> ]	1,30
Peso [kg/km]	11.8
Resistência [ $\Omega$ /km]	13.2
$I_{\max}$ [A]	3,90

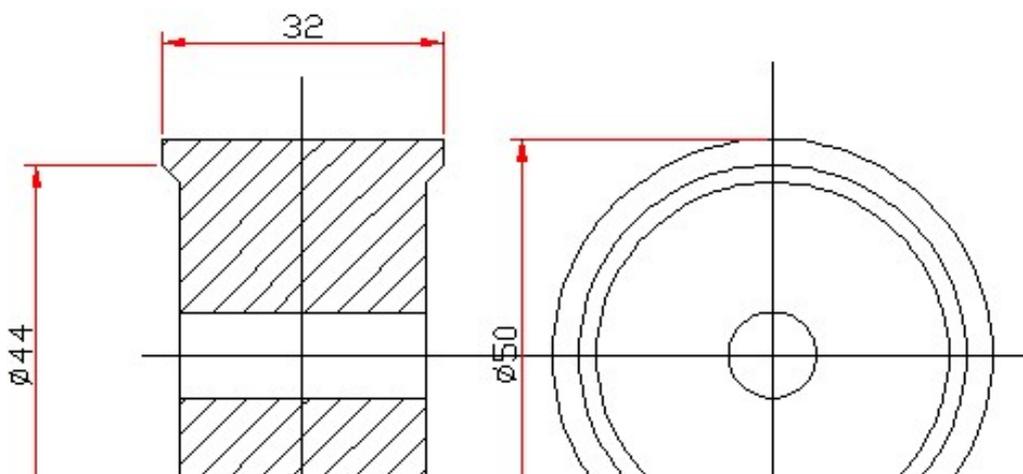
Utilizando o modelo elétrico podemos calcular o valor teórico da corrente máxima admissível de acordo com a tensão, resistência interna, corrente e potência de carga.

## 10. ESTRUTURA MECÂNICA

Baseados nos valores calculados no capítulo 9.6, o gerador linear foi projetado em escala utilizando o software AutoCAD. A seguir serão expostas todas as peças projetadas para a confecção do gerador linear.

### 10.1 Sapata Polar

Tem a função de direcionar o fluxo dos ímãs (axialmente polarizados) radialmente ao eixo.



*Figura 32: Sapata polar de aço carbono magnético.*

## 10.2 Ímã

Optou-se por utilizar os ímãs de neodímio pelo seu alto poder de magnetização e também pelo seu tamanho reduzido, o aspecto construtivo partiu-se do catálogo [12] onde foi definido o ímã VACODYM 745 (curva de operação a 20°C), a partir do ímã definiu-se todos os demais aspectos construtivos do gerador linear.

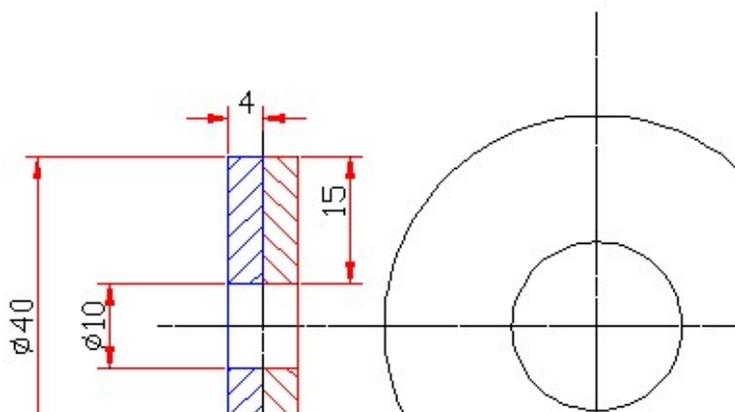


Figura 33: Ímã de neodímio.

## 10.3 Dente

Definiu-se como o aço silício magnético laminado como material do dente, pois esse possui uma pequena perda magnética. Tem a função de fechar e concatenar o fluxo magnético. Deve-se atentar ao fechamento do anel, o qual pode ocasionar correntes parasitas.

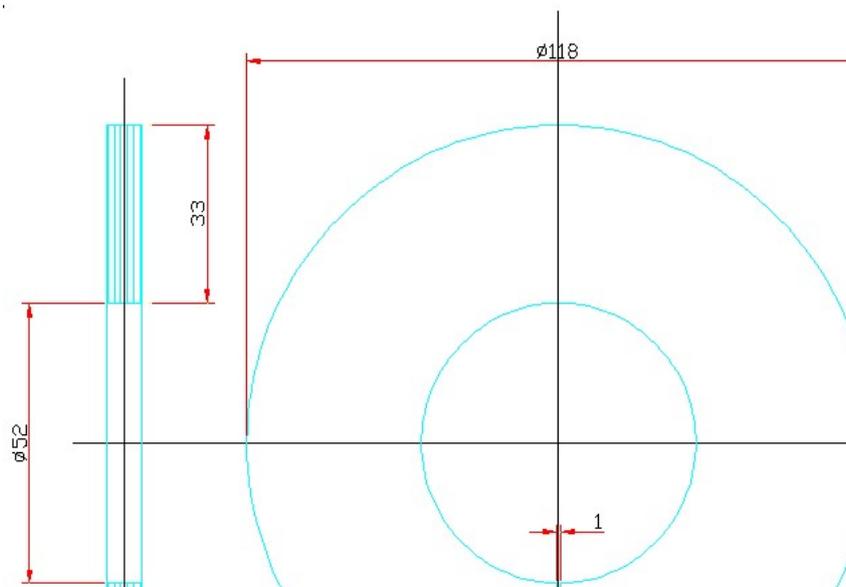


Figura 34: Dente do estator.

## 10.4 Bobina

Confeccionado por fios de cobre esmaltados, representa apenas uma ilustração já que este é formado por espiras.

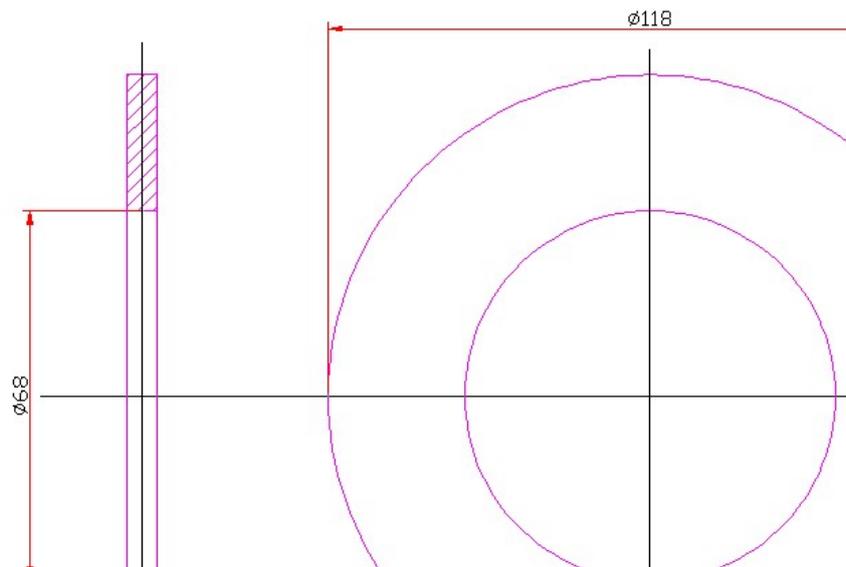


Figura 35:

## 10.5 Arruela fim de curso

Tem a finalidade de fixar as sapatas polares e os ímãs de neodímio, deve-se ter a precaução de utilizar um material não ferro-magnético.

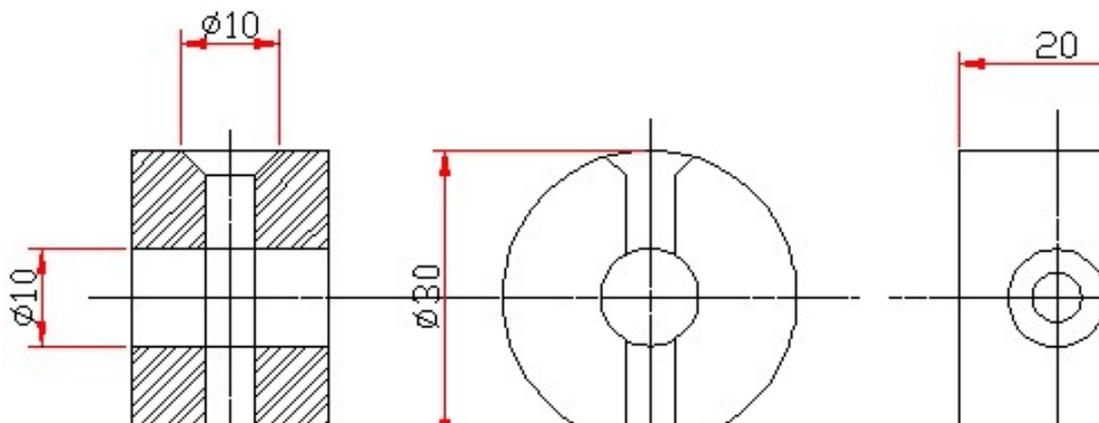


Figura 36: Arruela fim de curso.

## 10.6 Parafuso Haste

Juntamente com a porca fim de curso, possui a finalidade de fixar todo o conjunto sapata polar e ímãs de neodímio. Deve-se utilizar o aço inoxidável para a confecção do parafuso.

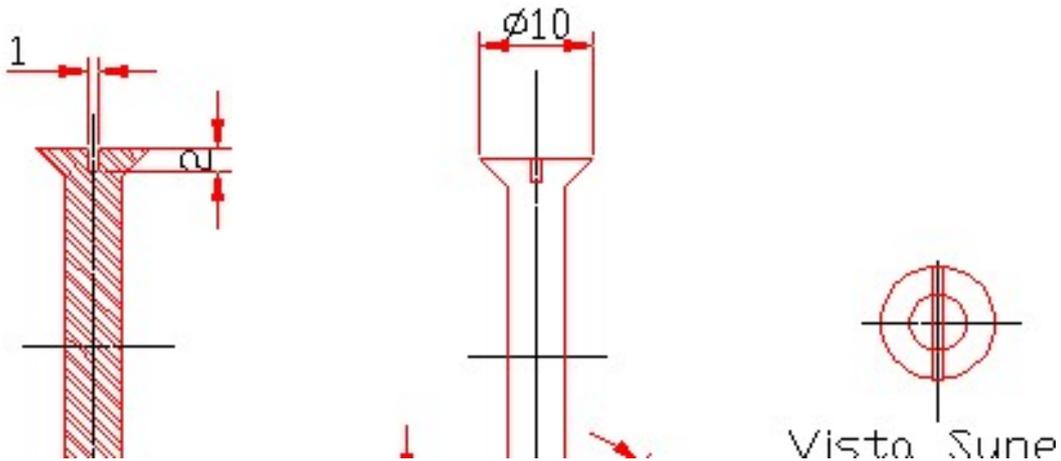


Figura 37: Parafuso fim de curso.

## 10.7 Porca Sextavada

Último componente para fixação do conjunto porca fim de curso e parafuso fim de curso. Deve-se utilizar o aço inoxidável para a confecção da porca sextavada.

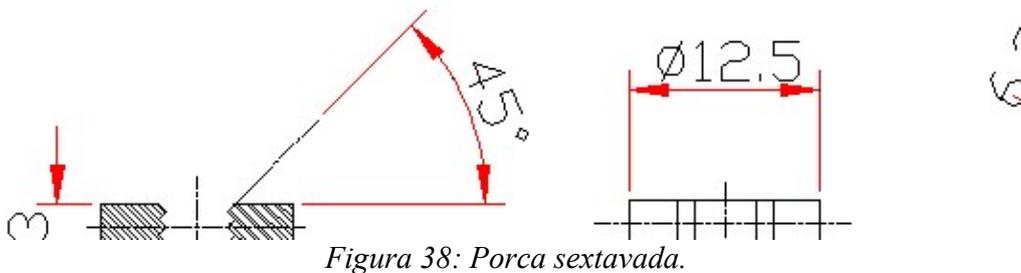


Figura 38: Porca sextavada.

## 10.8 Borracha fim de curso

Serve como um mecanismo de segurança para evitar a colisão direta das sapatas polares e ímãs no fim de curso, tem a finalidade de absorver parte da energia de impacto caso outros mecanismo de segurança falhem. Deve ser confeccionada de um material que absorva energia tal como borrachas ou polímeros.

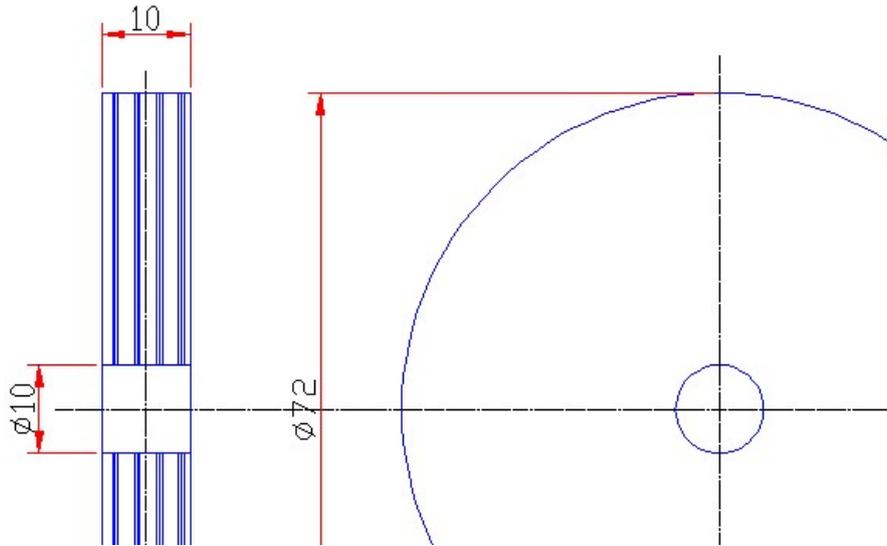


Figura 39: Borracha fim de curso.

## 10.9 Parafuso de Fixação

Será utilizado em grande parte do projeto, pois fixará as partes das carcaças. Deve-se utilizar o aço inoxidável para a confecção do parafuso.

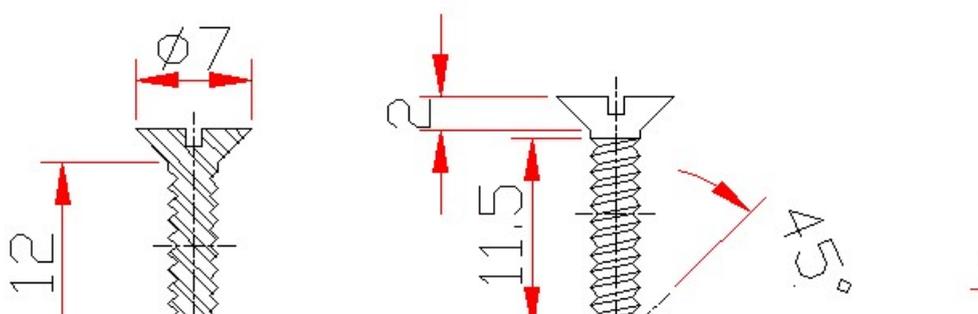


Figura 40: Parafuso de fixação.

## 10.10 Parafuso da carcaça

Utilizado para fixar as carcaças parte 2 e carcaça parte 3, a modificação construtiva do parafuso de fixação é a profundidade, isso é necessário para uma maior fixação entre as carcaças. Deve-se utilizar o aço inoxidável para a confecção.

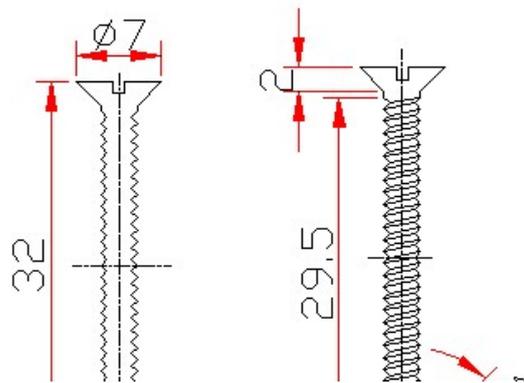


Figura 41: Parafuso da carcaça.

## 10.11 Bucha

Possui a finalidade de impedir a passagem de líquidos através do eixo, deve ser confeccionada de material polimérico.

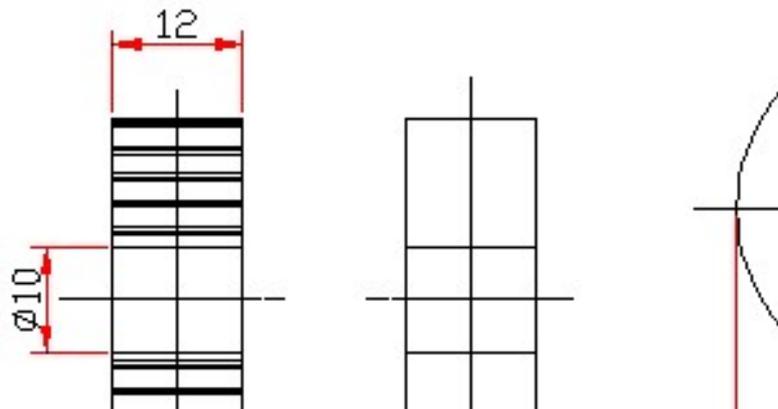


Figura 42: Buchas.

## 10.12 Tampa da Carcaça

Tem a finalidade de conservar o conjunto elétrico isolado do meio externo devido ao grande poder corrosivo da água marinha. Deve-se utilizar o aço inoxidável não magnético para a confecção da tampa da carcaça.

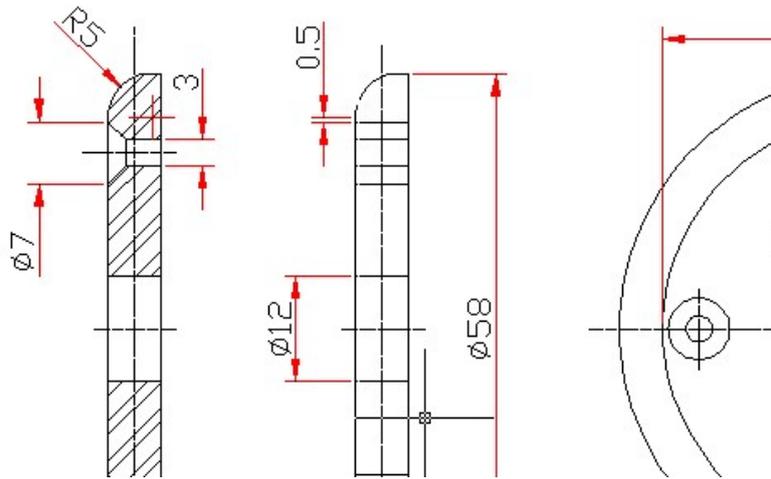


Figura 43: Tampa da Carcaça.

## 10.13 Carcaça Parte 1

Tem a finalidade de conservar o conjunto elétrico isolado do meio externo devido ao grande poder corrosivo da água marinha. Deve-se utilizar o aço inoxidável não magnético para a confecção da carcaça parte 1.

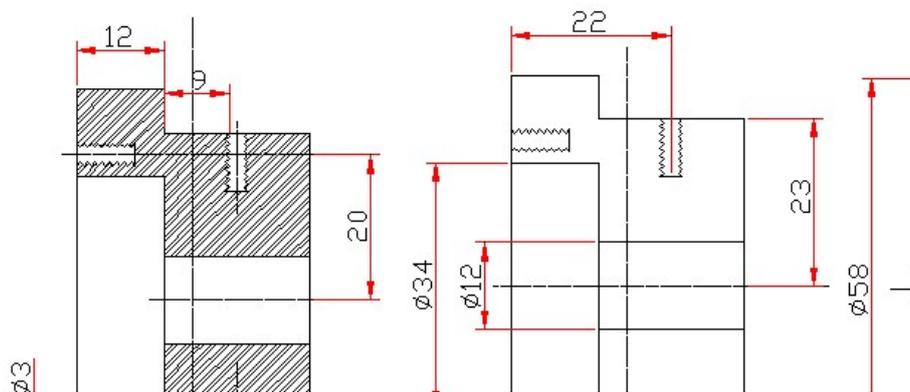


Figura 44: Carcaça parte 1.

## 10.14 Carcaça Parte 2

Tem a finalidade de conservar o conjunto elétrico isolado do meio externo devido ao grande poder corrosivo da água marinha. Deve-se utilizar o aço inoxidável não magnético para a confecção da carcaça parte 2.

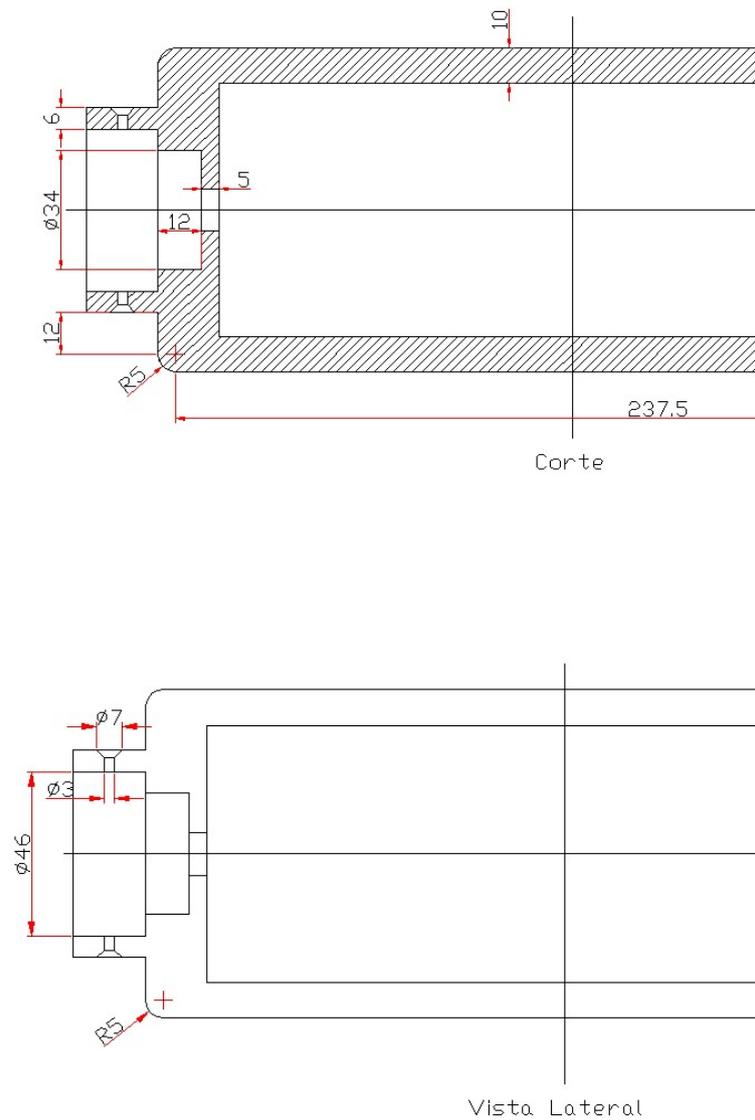


Figura 45: Carcaça parte 2

### 10.15 Carcaça Parte 3

Tem a finalidade de conservar o conjunto elétrico isolado do meio externo devido ao grande poder corrosivo da água marinha. Deve-se utilizar o aço inoxidável não magnético para a confecção da carcaça parte 3.

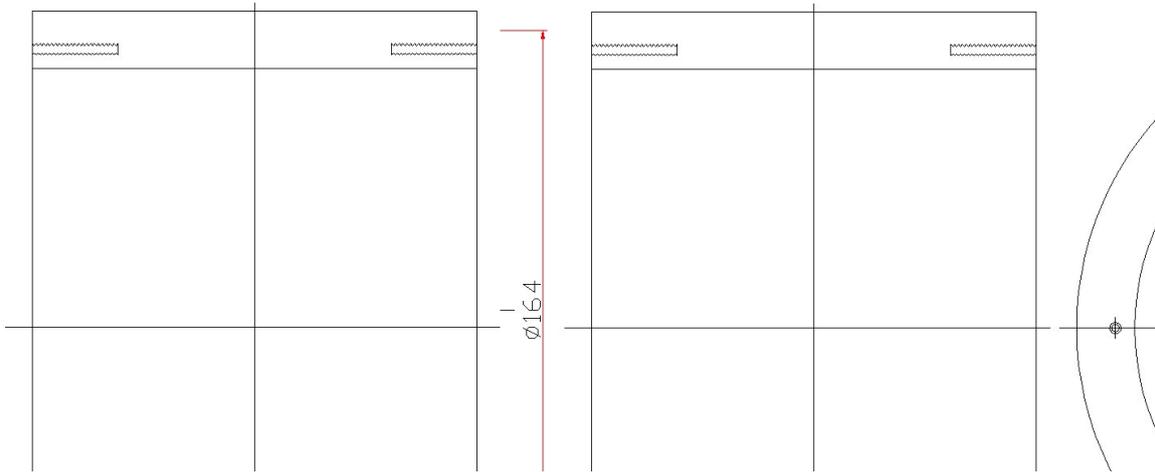


Figura 46: Carcaça parte 3.

### 10.16 Cilindro externo do Estator

Fecha o circuito magnético dos dentes, deve ser confeccionado de aço silício magnético, possui uma baixa perda magnética.

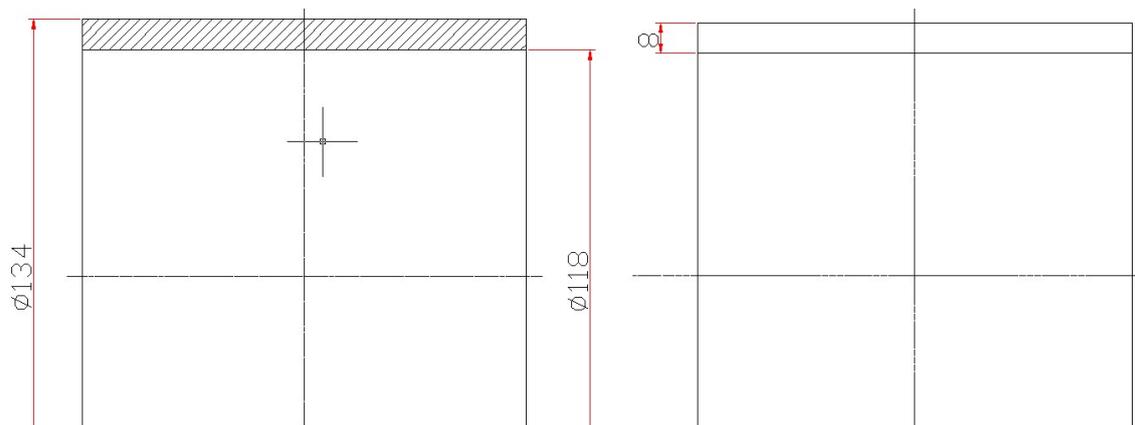


Figura 47: "Transladador".

## 10.17 Eixo

Haste o qual serão fixados todos os elementos do transladador, esse deve ser construído de um material não ferro magnético e inoxidável.

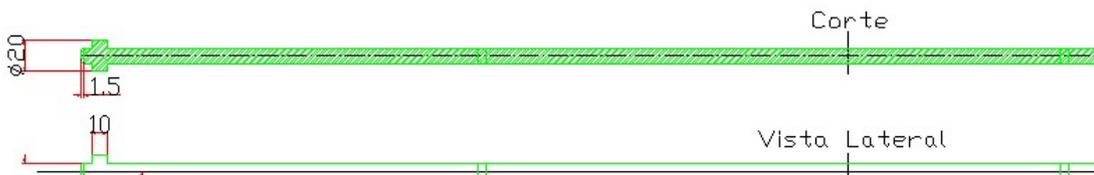


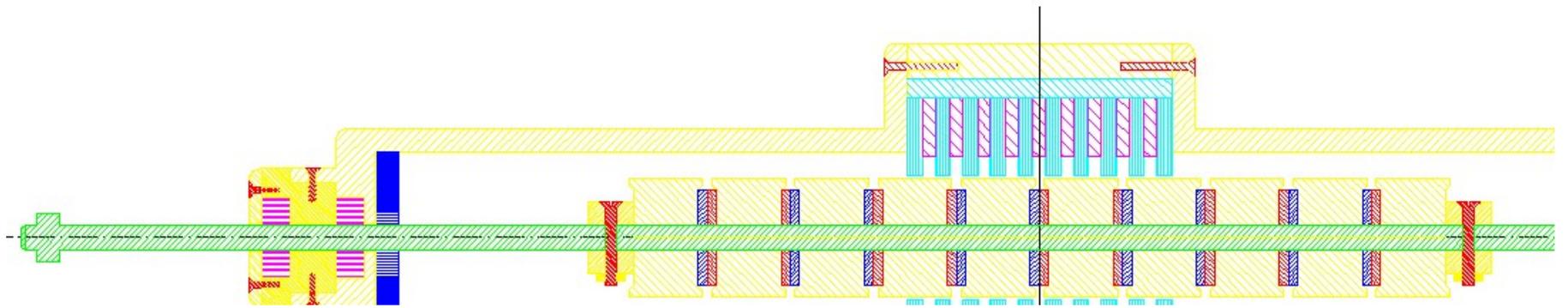
Figura 48:

## 10.18 Corte do Gerador Linear

Para a construção do Gerador Linear serão necessários os seguintes componentes da Tabela 4.

**Tabela 4:Componentes do gerador**

Componente	Quantidade
Sapata Polar	10
Ímã	9
Dente	10
Bobina	9
Parafuso Carcaça	4
Porca fim de curso	2
Porca Sextavada	2
Borracha fim de curso	2
Parafuso de fixação	16
Buchas	4
Tampa da Carcaça	8
Carcaça Parte 1	2
Carcaça Parte 2	2
Carcaça Parte 3	2
Eixo	1
Transladador	1



*Figura 49: Ilustração do gerador linear em escala, com os componentes constituintes.*

## 11. Sistema de Armazenamento de Energia

Foi discutido a implementação de alguns dispositivos de acondicionamento de energia elétrica gerado pelo gerador linear. A princípio fora adotado uma ponte de diodo com filtro capacitivo e posteriormente fora levantado a hipótese de um sistema de armazenamento mais aprimorado.

A tensão nos terminais do gerador linear é dada pela equação (9.30).

$$V_{gerador} = V_p \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{onda} \cdot t) \cdot \text{sen} \left[ \frac{\pi \cdot H}{\tau_p} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f_{onda} \cdot t) \right] \text{ [V]} \quad (9.30)$$

Onde  $V_p$  é determinado através dos cálculos utilizando a planilha em Excel

### 11.1. Ponte de diodos com Filtro Capacitivo

Empregado como a primeira solução do projeto, tem a capacidade de armazenamento de energia com baixa eficiência. A figura 50 exemplifica o sistema de armazenamento de energia simulado em PSIM para esse caso.

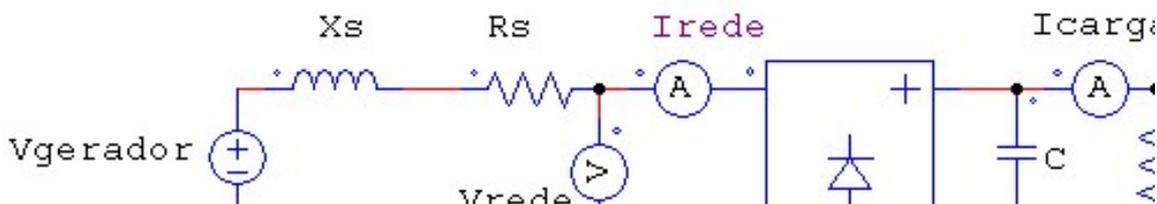


Figura 50: Conjunto elétrico Gerador linear e ponte de diodos com filtro capacitivo simulado em PSIM

Os seguintes dados foram adotados para a realização da simulação:

Tabela 5: Parâmetros da Simulação utilizando Ponte de diodos com Filtro Capacitivo

$V_{gerador}$ [V <sub>p</sub> ]	22,23
$X_s$ [H]	0,007
$R_s$ [ $\Omega$ ]	0,773
$C$ [F]	0,022
$R_{carga}$ [ $\Omega$ ]	6
$V_{bat}$ [V]	12
$R_{bat}$ [ $\Omega$ ]	0,022

Para esse caso apenas haverá fluxo de corrente para a bateria quando a tensão retificada ( $V_{carga}$ ) for maior que a tensão da Bateria (12 volts), esse fenômeno pode ser visto

na figura 51. A resistência interna da bateria foi obtida de acordo com o fabricante APC [13].

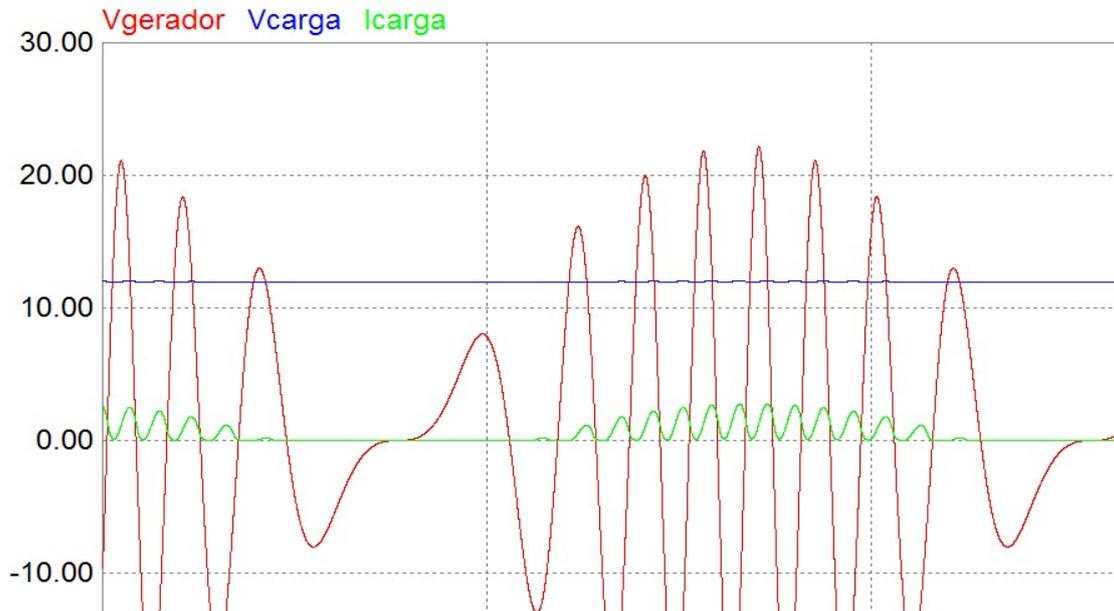


Figura 51: Nota-se que a corrente absorvida só ocorre quando a tensão fornecida pelo gerador linear é maior que a tensão da bateria.

## 11.2 Conversor Boost

O conversor Boost proposto foi utilizado na matéria PEA2503 - Laboratório de Qualidade experiência 10c [14], o princípio de funcionamento é a elevação do fator de potência e o envio constante de corrente para a bateria. A figura 52 apresenta o circuito simulado.

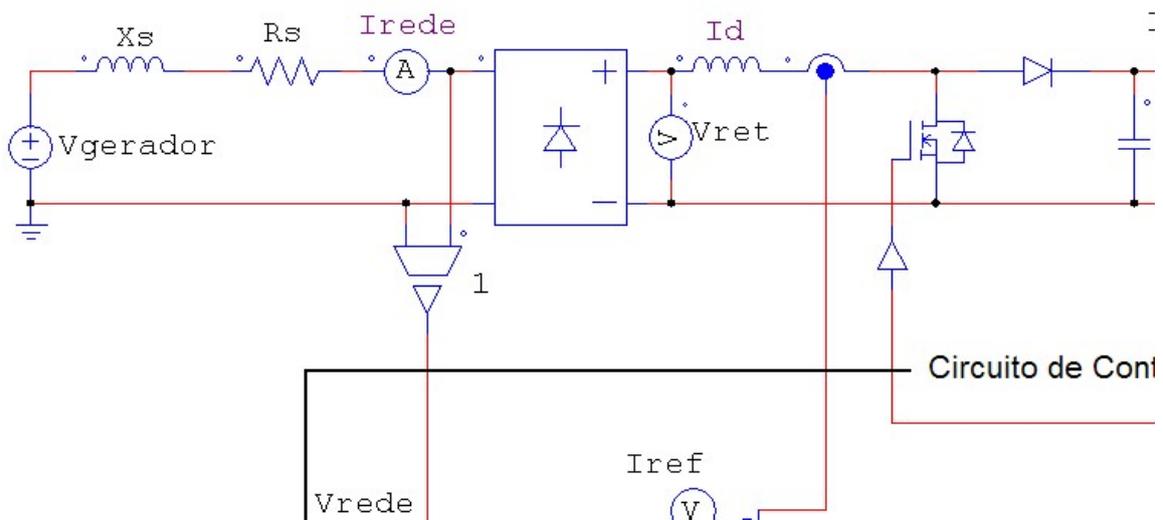
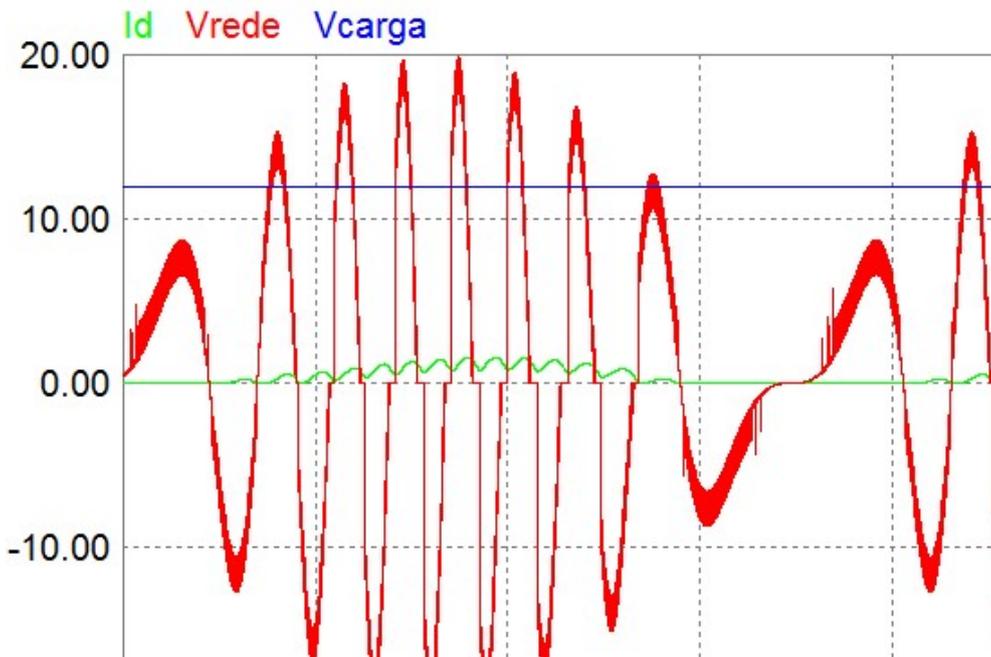


Figura 52: Conjunto elétrico Gerador linear e conversor boost com alto fator de potência PSIM.

Os seguintes parâmetros foram adotados para a realização da simulação

**Tabela 6: Parâmetros da Simulação utilizando o Conversor Boost**

$V_{\text{gerador}} [V_p]$	22,23
$X_s [H]$	0,0076
$R_s [\Omega]$	0,773
$C [F]$	0,022
$R_{\text{carga}} [\Omega]$	6
$V_{\text{bat}} [V]$	12
$R_{\text{bat}} [\Omega]$	0,022



*Figura 53: Note que há fornecimento de corrente (em verde) na carga constantemente, mesmo em condições de tensão fornecida pelo gerador linear (em vermelho) abaixo da tensão da bateria (em azul).*

## 12-RESULTADOS E CONCLUSÕES

Com a análise da formação e caracterização da onda do mar compreendemos o processo de formação da onda, aspectos como a velocidade de propagação, altura e periodicidade. Através desses estudos obtivemos um modelo de onda padrão em frequência, amplitude e conteúdo energético adequado ao projeto do protótipo.

A escolha da técnica de conversão mostrou as peculiaridades de cada tipo de arranjo, onde se pode optar por uma grande gama de configurações de conversor de ondas. Por esses motivos a escolha baseou-se nos critérios de flexibilidade, menor perdas mecânicas, menor complexidade, maior confiabilidade, menor impacto ambiental e econômico para a pesca e transporte marítimo, menor custo de projeto, implementação e manutenção devido à

simplicidade do arranjo. A opção que mais satisfaz estes critérios é o arranjo de coluna oscilante acoplado a um gerador linear.

O gerador linear em geral tem aplicações restritas e específicas, devido à característica de só poder transladar até uma dada distância, tal característica foi considerada positiva para a escolha devido à vantagem de poder suprimir engrenagens (diminuir as perdas por atrito), estruturas e dispositivos de regulação de tensão como inversores de frequência, que adicionaria perdas na conversão de energia.

O flutuador terá perfil hidrodinâmico na direção horizontal para minimizar forças fletoras verticais e será semi-submerso garantindo que o líquido interno funcione como lastro vertical para auxiliar seguir o movimento do perfil de onda.

Definimos o tipo de configuração do gerador linear, com “transladador” de ímãs permanentes o que isentaria a excitação por fonte externa, um ímã com densidade de campo magnético forte é necessário, a opção foi utilizar ímãs de Neodímio para garantir uma maior força magneto-motriz induzida além de seu pequeno tamanho.

A escolha do formato do ímã foi de acordo com a geometria que melhor aproveita o fluxo de campo, a opção foi o ímã-permanente em anéis. Para ímãs permanentes em anéis, temos a maior parte do fluxo magnético em direção axial. O fluxo magnético dos ímãs permanentes do “transladador” (fonte de indução) é direcionado radialmente utilizando-se discos de material ferromagnéticos entre ímãs instalados com mesmo polo, vide Figura 18, estes discos também fazem a função de sapata polar responsável na transferência de fluxo magnético para o estator.

A geometria do estator segue o desenho do “transladador” para que se obtenha uma diminuição do entreferro e melhor acoplamento magnético entre as partes indutor e induzido no circuito magnético, assim o estator tem geometria cilíndrica. As espiras estão alojadas entre os dentes de ferro-silício laminado (ranhuras), para que não haja circulação de corrente de Foucault na espira corta-se o arco do anel do dente.

Com as geometrias do estator aplica-se o procedimento de caracterização do gerador, vide Capítulo 9, inicialmente define-se o circuito magnético, em seguida através de uma densidade de campo imposta, determina-se o fluxo passante por pólo da máquina que define a tensão eficaz induzida nos terminais da máquina. O processo é iterativo até achar valores que se adequam as especificações do gerador, ou seja, será levantada a curva do circuito magnético e posteriormente o ponto de operação, vide Figura 22.

A onda do mar tem frequências e amplitudes variadas, assim é necessário um estudo do comportamento dinâmico no tempo e frequência, estes resultados são obtidos pela simulação. Ajudando no dimensionamento dos parâmetros do circuito magnético e do filtro de tensão do retificador de onda trifásico, que converterá a tensão que varia em frequência em uma tensão DC (tensão de carga).

O processo de definição das dimensões e especificações do projeto foi contemplado iterativamente, até convergir a uma solução final.

As definições das partes do gerador como as dimensões e materiais serão especificados por estes procedimentos abordados neste relatório parcial. Com as especificações definidas, inicia-se a compra, confecção das partes e montagem do gerador, estes últimos passos serão contemplados no relatório final.

### 13. CRONOGRAMA

Foi necessária uma readequação das atividades do cronograma visto que algumas das atividades são dependentes de resultados de outras, podemos citar como exemplo a atividade “Definição das especificações e configuração do protótipo” que foi necessária o adiamento, pois a “Simulação” não estava concluída.

A montagem da planilha Excel para o dimensionamento auxiliou na detecção de erros e definir outras características. Porém a atividade de criar a planilha tomou um tempo considerável no cronograma, o qual não foi planejado. Os levantamentos de valores do processo iterativo com a planilha acarretaram atrasos por não poder estimar precisamente os valores das características geométricas.

A análise das fórmulas e correções foram feitas iterativamente, seguindo recomendações do professor orientador, conseguimos minimizar os erros e convergir para valores coerentes de cálculos efetuados da planilha. A depuração de erros e falhas na planilha demandou tempo além do previsto, acarretando atrasos na execução dos desenhos em CAD e na simulação da interface de acumulação de energia utilizando o PSIM.

O Cronograma foi alterado para se adequar ao projeto e para as suas novas atividades, abaixo os “x” em vermelho são as atividades que foram adiadas.

<b>Atividade</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>Mai.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Set.</b>	<b>Out.</b>	<b>Nov.</b>
Pesquisa das opções técnicas e teóricas de conversão de energia das ondas do mar.	X	X							
Modelamento e formulação dos métodos de conversão.		X	X						
Definição das especificações e configuração do protótipo.		X	X	X	X				
Caracterização do diagrama esquemático do protótipo do conversor.			X	X					
Simulação				X					
Validação dos resultados TF1			X	X					
Relatório Parcial TF1		X	X	X					

<b>Atividade</b>	<b>Mar.</b>	<b>Abr.</b>	<b>Mai.</b>	<b>Jun.</b>	<b>Jul.</b>	<b>Ago.</b>	<b>Set.</b>	<b>Out.</b>	<b>Nov.</b>
Aquisição dos materiais para a implementação do protótipo.					X	X			
Montagem do protótipo.					X	X	X	X	
Testes e ensaios do protótipo.						X	X	X	
Validação dos resultados TF2								X	
Relatório TF2 final						X	X	X	X

## 14. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PSIM Demo Version; <http://www.powersimtech.com/download.html>.
- [2] McCormick, M. E., Ocean Wave Energy Conversion, Editora Dover, Edição., ano.
- [3] Ross,D.; “Power from the waves”, University of Oxford,1995.
- [4] Bent Sørensen: “Renewable Energy”, Elsevier Academic Press, 2004 Edition.
- [5] Silveira, F. L.; Varriale, M. C.; “Propagação das ondas marítimas e dos Tsunamis”. UFRGS, 2005.
- [6] Basak, A.; “Permanent-Magnetic DC Linear Motors”, ISBN 019859392, 1996.
- [7] Say, M. G., Alternating Current Machines, Editora Pitman, 1976.
- [8] Fitzgerald A.E. , “Máquinas Elétricas”, Edição. 6, 2006.
- [9] Chabu, Ivan Eduardo, Notas de aula da disciplina de Maquinas elétricas e acionamentos I e II.
- [10] Orsini, L. Q.; Consonni, D.; “Curso de Circuitos Elétricos”; Volume 2; Editora Blücher, 2ª edição, 2004.
- [11] Waters,R.,”Energy from Ocean Waves Full Scale Experimental Verification of Wave Energy Converter”, ISBN 978-91-554-7354-9, 2008
- [12] Catálogo de ímãs – “PD 002 – Vacodym/Vacomax Edition 2007”, VacuumSchmelze Gmbh & Co.KG.
- [13] American Power Conversion Corp– Catálogo Baterias CSB 12volts
- [14] Matakas, L. Jr., Apostilas de Laboratório de Qualidade de Energia-PEA 2502

## ANEXO 1

$B_{\text{gref}}$ (Campo magnético de referência) [T]	$B_{\text{ds}}$ (campo magnético nos dentes) [T]	$B_{\text{cs}}$ (campo magnético corrigido) [T]	$B_{\text{imã}}$ (Campo Imã) [T]	$H_{\text{ds}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{cs}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{p}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{imã}}$ [A/m]
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,00	0,00	0,00
0,01	0,0068	0,0068	0,0174	4,92	4,92	17,22	2869,63
0,02	0,0136	0,0136	0,0348	10,66	10,66	35,26	5752,89
0,03	0,0205	0,0205	0,0523	16,40	16,40	42,50	8590,24
0,04	0,0273	0,0273	0,0697	22,14	22,14	44,70	11406,18
0,05	0,0341	0,0341	0,0871	27,88	27,88	46,80	14221,70
0,06	0,0409	0,0409	0,1045	32,80	32,80	49,00	17027,49
0,07	0,0478	0,0478	0,1220	38,54	38,54	51,20	19843,43
0,08	0,0546	0,0546	0,1394	41,40	41,40	53,40	22623,73
0,09	0,0614	0,0614	0,1568	42,10	42,10	55,60	25377,29
0,1	0,0682	0,0682	0,1742	42,80	42,80	57,70	28130,44
0,11	0,0750	0,0750	0,1916	43,50	43,50	59,90	30884,01
0,12	0,0819	0,0819	0,2091	44,10	44,10	62,10	33636,34
0,13	0,0887	0,0887	0,2265	44,80	44,80	64,30	36389,91
0,14	0,0955	0,0955	0,2439	45,50	45,50	66,72	39144,41
0,15	0,1023	0,1023	0,2613	46,20	46,20	70,68	41905,46
0,16	0,1092	0,1092	0,2788	46,90	46,90	74,64	44666,51
0,17	0,1160	0,1160	0,2962	47,50	47,50	77,40	47421,22
0,18	0,1228	0,1228	0,3136	48,20	48,20	80,04	50176,66
0,19	0,1296	0,1296	0,3310	48,90	48,90	82,04	52929,38
0,2	0,1365	0,1365	0,3484	49,60	49,60	83,80	55681,08
0,21	0,1433	0,1433	0,3659	50,30	50,30	85,56	58432,77
0,22	0,1501	0,1501	0,3833	51,00	51,00	87,32	61184,47

$B_{\text{gref}}$ (Campo magnético de referência) [T]	$B_{\text{ds}}$ (campo magnético nos dentes) [T]	$B_{\text{cs}}$ (campo magnético corrigido) [T]	$B_{\text{imã}}$ (Campo Imã) [T]	$H_{\text{ds}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{cs}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{p}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{imã}}$ [A/m]
0,23	0,1569	0,1569	0,4007	51,60	51,60	89,00	63934,59
0,24	0,1637	0,1637	0,4181	52,30	52,30	89,88	66682,55
0,25	0,1706	0,1706	0,4356	53,00	53,00	90,76	69430,51
0,26	0,1774	0,1774	0,4530	53,70	53,70	92,60	72182,55
0,27	0,1842	0,1842	0,4704	54,40	54,40	94,80	74936,12
0,28	0,1910	0,1910	0,4878	55,10	55,10	96,72	77688,50
0,29	0,1979	0,1979	0,5052	55,70	55,70	98,48	80438,96
0,3	0,2047	0,2047	0,5227	56,40	56,40	100,18	83190,40
0,31	0,2115	0,2115	0,5401	57,10	57,10	101,50	85940,23
0,32	0,2183	0,2183	0,5575	57,80	57,80	102,76	88689,81
0,33	0,2251	0,2251	0,5749	58,50	58,50	105,52	91445,75
0,34	0,2320	0,2320	0,5924	59,10	59,10	108,60	94201,83
0,35	0,2388	0,2388	0,6098	59,80	59,80	110,72	96955,05
0,36	0,2456	0,2456	0,6272	60,50	60,50	112,04	99704,88
0,37	0,2524	0,2524	0,6446	61,20	61,20	113,80	102456,58
0,38	0,2593	0,2593	0,6620	61,90	61,90	117,32	105215,76
0,39	0,2661	0,2661	0,6795	62,60	62,60	120,84	107974,94
0,4	0,2729	0,2729	0,6969	63,20	63,20	123,10	110727,53
0,41	0,2797	0,2797	0,7143	63,90	63,90	125,20	113480,67
0,42	0,2865	0,2865	0,7317	64,60	64,60	127,96	116236,62
0,43	0,2934	0,2934	0,7492	65,30	65,30	131,04	118993,93
0,44	0,3002	0,3002	0,7666	66,00	66,00	134,12	121751,24
0,45	0,3070	0,3070	0,7840	67,26	67,26	137,20	124515,47
0,46	0,3138	0,3138	0,8014	68,34	68,34	140,20	127277,15
0,47	0,3207	0,3207	0,8188	69,60	69,60	144,60	130046,99
0,48	0,3275	0,3275	0,8363	70,86	70,86	149,00	132816,84

$B_{\text{gref}}$ (Campo magnético de referência) [T]	$B_{\text{ds}}$ (campo magnético nos dentes) [T]	$B_{\text{cs}}$ (campo magnético corrigido) [T]	$B_{\text{imã}}$ (Campo Imã) [T]	$H_{\text{ds}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{cs}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{p}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{imã}}$ [A/m]
0,49	0,3343	0,3343	0,8537	72,12	72,12	153,40	135586,69
0,5	0,3411	0,3411	0,8711	73,38	73,38	157,60	138355,69
0,51	0,3480	0,3480	0,8885	74,46	74,46	163,00	141127,56
0,52	0,3548	0,3548	0,9060	75,48	75,48	169,60	143903,79
0,53	0,3616	0,3616	0,9234	76,32	76,32	176,20	146677,79
0,54	0,3684	0,3684	0,9408	77,16	77,16	182,80	149451,79
0,55	0,3752	0,3752	0,9582	78,00	78,00	189,10	152224,52
0,56	0,3821	0,3821	0,9756	78,84	78,84	197,60	155006,60
0,57	0,3889	0,3889	0,9931	79,56	79,56	206,40	157788,46
0,58	0,3957	0,3957	1,0105	80,40	80,40	217,80	160582,86
0,59	0,4025	0,4025	1,0279	81,16	81,16	230,40	163381,37
0,6	0,4094	0,4094	1,0453	81,72	81,72	244,92	166185,57
0,61	0,4162	0,4162	1,0628	82,28	82,28	262,96	169004,73
0,62	0,4230	0,4230	1,0802	82,84	82,84	281,00	171823,88
0,63	0,4298	0,4298	1,0976	83,32	83,32	321,48	174737,42
0,64	0,4366	0,4366	1,1150	83,88	83,88	360,12	177644,13
0,65	0,4435	0,4435	1,1324	84,44	84,44	417,10	180628,78
0,66	0,4503	0,4503	1,1499	85,00	85,00	481,78	183646,15
0,67	0,4571	0,4571	1,1673	85,56	85,56	561,40	186727,02
0,68	0,4639	0,4639	1,1847	86,04	86,04	658,00	189879,07
0,69	0,4708	0,4708	1,2021	86,60	86,60	766,40	193082,26
0,7	0,4776	0,4776	1,2196	87,16	87,16	946,80	196591,44
0,71	0,4844	0,4844	1,2370	87,72	87,72	1127,20	200100,63
0,72	0,4912	0,4912	1,2544	88,28	88,28	1390,40	203961,72
0,73	0,4981	0,4981	1,2718	88,84	88,84	1659,20	207846,60
0,74	0,5049	0,5049	1,2892	89,16	89,16	1991,40	211997,97

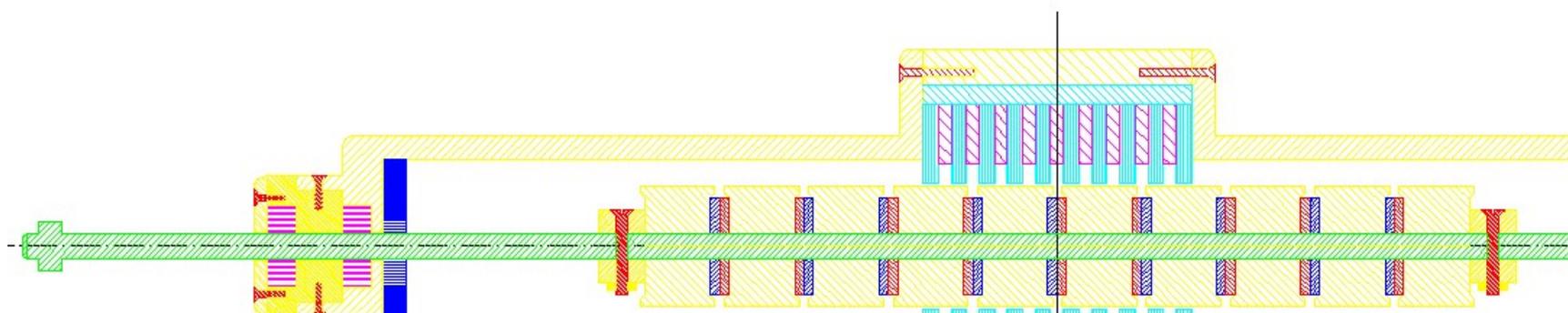
$B_{\text{gref}}$ (Campo magnético de referência) [T]	$B_{\text{ds}}$ (campo magnético nos dentes) [T]	$B_{\text{cs}}$ (campo magnético corrigido) [T]	$B_{\text{imã}}$ (Campo Imã) [T]	$H_{\text{ds}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{cs}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{p}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{imã}}$ [A/m]
0,75	0,5117	0,5117	1,3067	89,44	89,44	2374,20	216363,89
0,76	0,5185	0,5185	1,3241	89,72	89,72	2803,00	220925,31
0,77	0,5253	0,5253	1,3415	90,00	90,00	3361,60	226038,38
0,78	0,5322	0,5322	1,3589	90,28	90,28	3946,80	231264,50
0,79	0,5390	0,5390	1,3764	90,52	90,52	4600,00	236779,13
0,8	0,5458	0,5458	1,3938	90,80	90,80	5260,00	242323,15
0,81	0,5526	0,5526	1,4112	91,20	91,20	6060,00	248463,66
0,82	0,5595	0,5595	1,4286	91,90	91,90	6900,00	254777,88
0,83	0,5663	0,5663	1,4460	92,60	92,60	7892,00	261738,09
0,84	0,5731	0,5731	1,4635	93,30	93,30	9124,00	269718,31
0,85	0,5799	0,5799	1,4809	93,90	93,90	10340,00	277629,29
0,86	0,5867	0,5867	1,4983	94,60	94,60	11180,00	283943,51
0,87	0,5936	0,5936	1,5157	95,30	95,30	12060,00	290427,73
0,88	0,6004	0,6004	1,5332	96,00	96,00	13484,00	299223,95
0,89	0,6072	0,6072	1,5506	96,56	96,56	15112,00	308885,44
0,9	0,6140	0,6140	1,5680	97,12	97,12	17000,00	319651,92
0,91	0,6209	0,6209	1,5854	97,60	97,60	19100,00	331318,42
0,92	0,6277	0,6277	1,6028	98,16	98,16	21360,00	343665,91
0,93	0,6345	0,6345	1,6203	98,72	98,72	24000,00	357628,39
0,94	0,6413	0,6413	1,6377	99,28	99,28	26640,00	371590,88
0,95	0,6481	0,6481	1,6551	99,84	99,84	29880,00	388103,36
0,96	0,6550	0,6550	1,6725	100,24	100,24	33400,00	405803,87
0,97	0,6618	0,6618	1,6900	100,66	100,66	37400,00	425544,63
0,98	0,6686	0,6686	1,7074	101,08	101,08	41800,00	446985,38
0,99	0,6754	0,6754	1,7248	101,50	101,50	46560,00	469956,13
1	0,6823	0,6823	1,7422	101,92	101,92	52020,00	495901,89

$B_{\text{gref}}$ (Campo magnético de referência) [T]	$B_{\text{ds}}$ (campo magnético nos dentes) [T]	$B_{\text{cs}}$ (campo magnético corrigido) [T]	$B_{\text{imã}}$ (Campo Imã) [T]	$H_{\text{ds}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{cs}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{p}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{imã}}$ [A/m]
1,01	0,6891	0,6891	1,7596	102,34	102,34	57740,00	522952,64
1,02	0,6959	0,6959	1,7771	102,70	102,70	65560,00	558927,65
1,03	0,7027	0,7027	1,7945	103,28	103,28	73480,00	595330,39
1,04	0,7096	0,7096	1,8119	104,26	104,26	82160,00	634968,07
1,05	0,7164	0,7164	1,8293	105,24	105,24	91840,00	678855,75
1,06	0,7232	0,7232	1,8468	106,22	106,22	102800,00	728183,44
1,07	0,7300	0,7300	1,8642	107,20	107,20	116000,00	787031,12
1,08	0,7368	0,7368	1,8816	108,04	108,04	129600,00	847577,07
1,09	0,7437	0,7437	1,8990	109,02	109,02	146400,00	921724,76
1,1	0,7505	0,7505	1,9164	110,00	110,00	164000,00	999272,44
1,11	0,7573	0,7573	1,9339	110,42	110,42	185000,00	1091263,19
1,12	0,7641	0,7641	1,9513	110,84	110,84	207000,00	1187503,95
1,13	10	0,7710	1,9687	111,20	111,20	230400,00	1289693,96
1,14	0,7778	0,7778	1,9861	111,62	111,62	257680,00	1408374,71
1,15	0,7846	0,7846	2,0036	112,04	112,04	286400,00	1533175,47
1,16	0,7914	0,7914	2,0210	112,46	112,46	321600,00	1685516,22
1,17	0,7982	0,7982	2,0384	112,88	112,88	356800,00	1837856,97
1,18	0,8051	0,8051	2,0558	113,80	113,80	398000,00	2015703,91
1,19	0,8119	0,8119	2,0732	114,76	114,76	442000,00	2205451,35
1,2	0,8187	0,8187	2,0907	115,88	115,88	460000,00	2284700,77
1,21	0,8255	0,8255	2,1081	117,00	117,00	460000,00	2287450,18
1,22	0,8324	0,8324	2,1255	118,12	118,12	460000,00	2290199,60
1,23	0,8392	0,8392	2,1429	119,24	119,24	460000,00	2292949,02
1,24	0,8460	0,8460	2,1604	120,36	120,36	460000,00	2295698,43
1,25	0,8528	0,8528	2,1778	121,20	121,20	460000,00	2298444,38
1,26	0,8596	0,8596	2,1952	121,90	121,90	460000,00	2301188,60

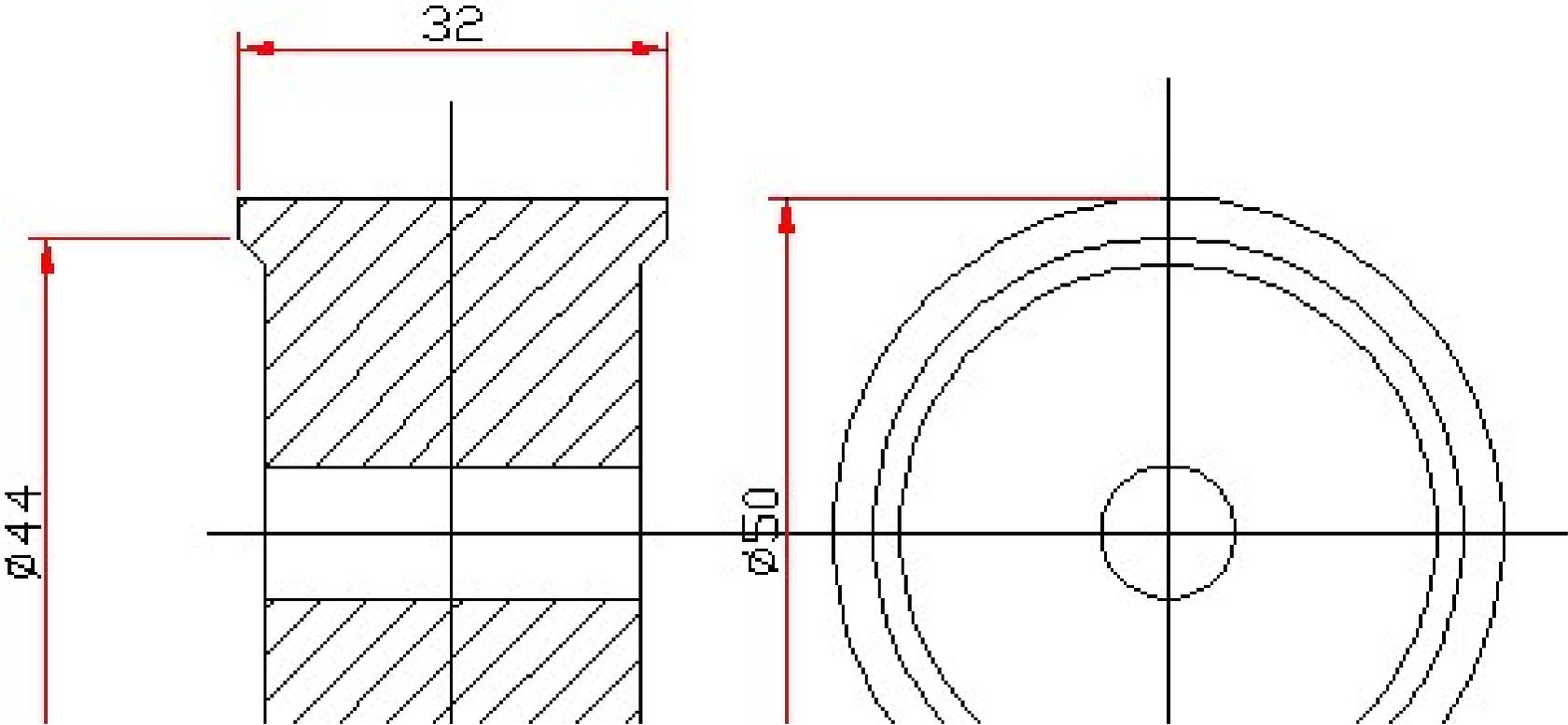
$B_{\text{gref}}$ (Campo magnético de referência) [T]	$B_{\text{ds}}$ (campo magnético nos dentes) [T]	$B_{\text{cs}}$ (campo magnético corrigido) [T]	$B_{\text{imã}}$ (Campo Imã) [T]	$H_{\text{ds}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{cs}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{p}}$ (obtido no gráfico BxH) [A/m]	$H_{\text{imã}}$ [A/m]
1,27	0,8665	0,8665	2,2126	122,60	122,60	460000,00	2303932,82
1,28	0,8733	0,8733	2,2300	123,30	123,30	460000,00	2306677,04
1,29	0,8801	0,8801	2,2475	124,00	124,00	460000,00	2309421,26
1,3	0,8869	0,8869	2,2649	124,60	124,60	460000,00	2312164,24
1,31	0,8938	0,8938	2,2823	125,30	125,30	460000,00	2314908,46
1,32	0,9006	0,9006	2,2997	126,00	126,00	460000,00	2317652,68
1,33	0,9074	0,9074	2,3172	126,98	126,98	460000,00	2320400,36
1,34	0,9142	0,9142	2,3346	127,96	127,96	460000,00	2323148,04
1,35	0,9211	0,9211	2,3520	128,94	128,94	460000,00	2325895,73
1,36	0,9279	0,9279	2,3694	129,78	129,78	460000,00	2328641,68
1,37	0,9347	0,9347	2,3868	130,76	130,76	460000,00	2331389,36
1,38	0,9415	0,9415	2,4043	131,74	131,74	460000,00	2334137,05
1,39	0,9483	0,9483	2,4217	132,72	132,72	460000,00	2336884,73
1,4	0,9552	0,9552	2,4391	133,70	133,70	460000,00	2339632,41
1,41	0,9620	0,9620	2,4565	134,54	134,54	460000,00	2342378,37
1,42	0,9688	0,9688	2,4740	135,52	135,52	460000,00	2345126,05

## ANEXO 2-Desenhos de vistas e cortes do Gerador Linear.

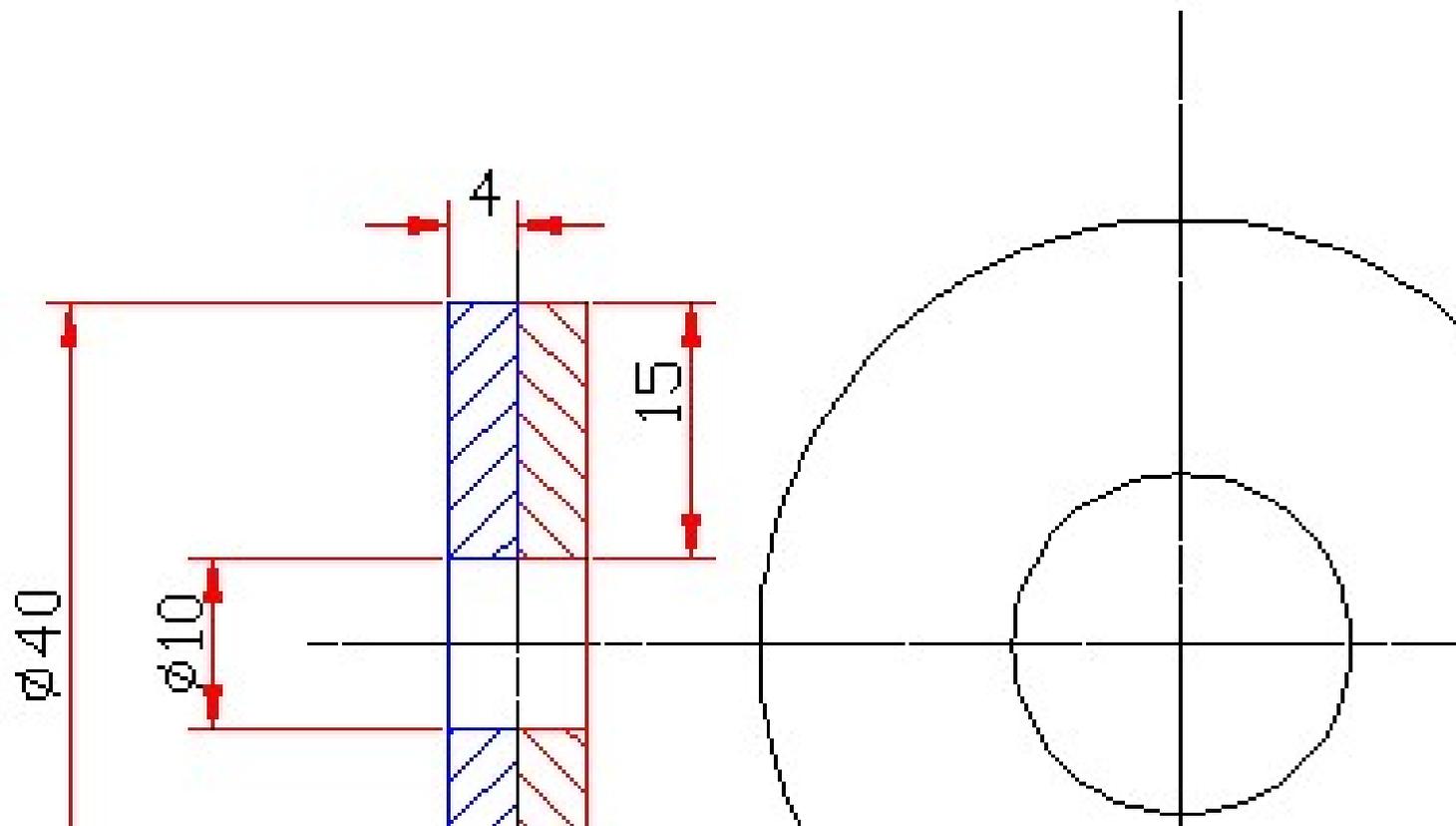
Vista em corte do Gerador Linear:



**Sapata Polar:**

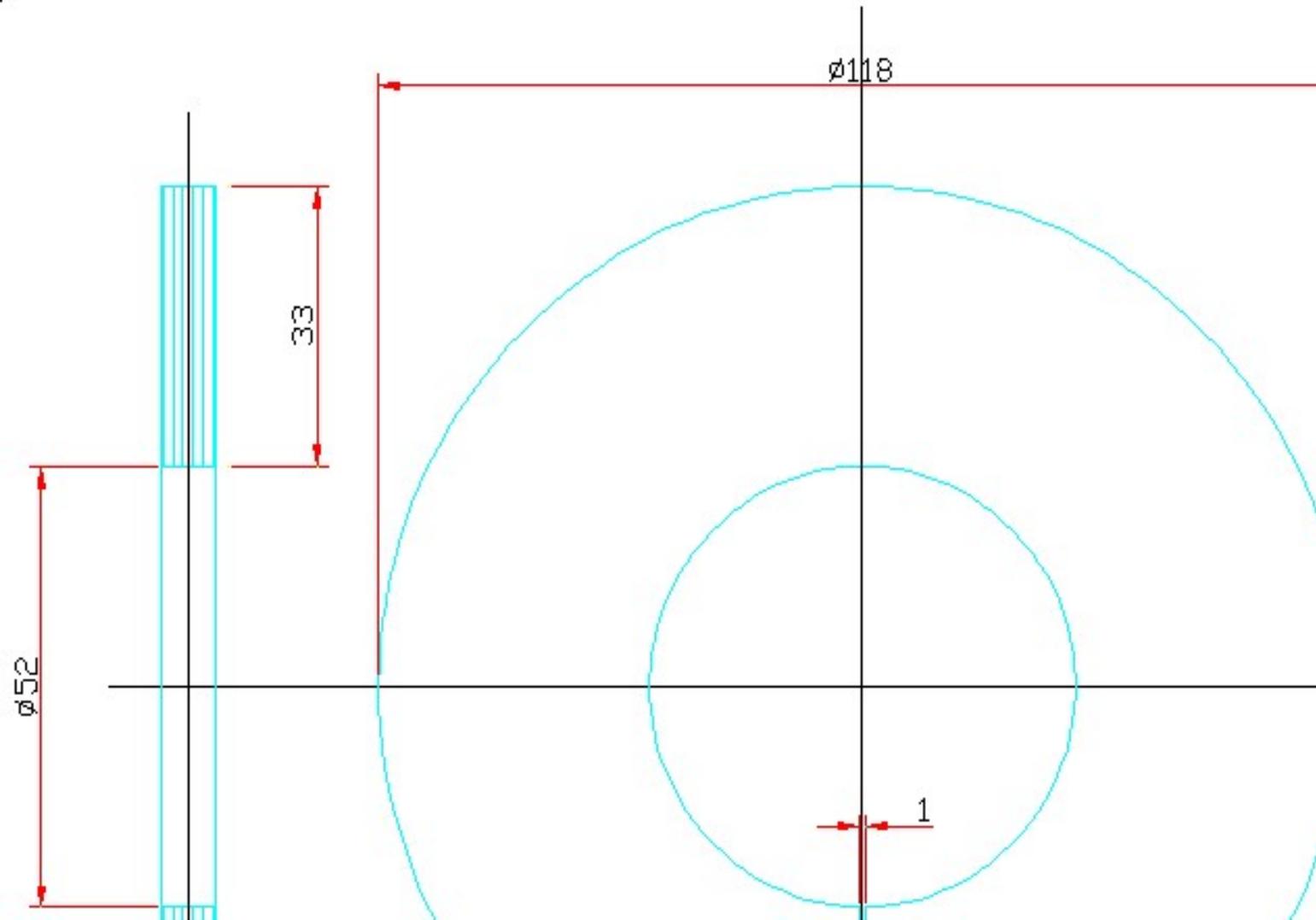


Ímã:

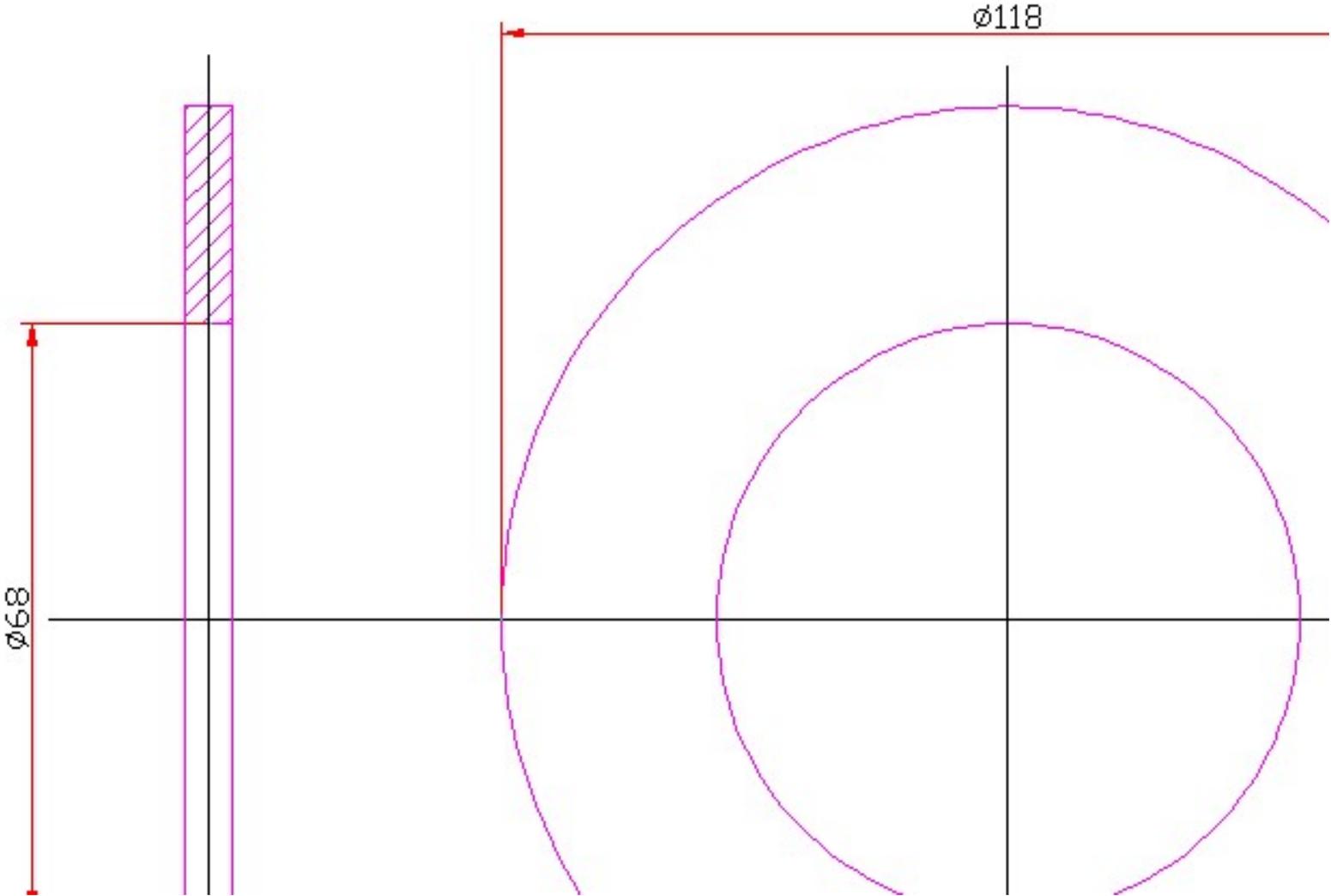




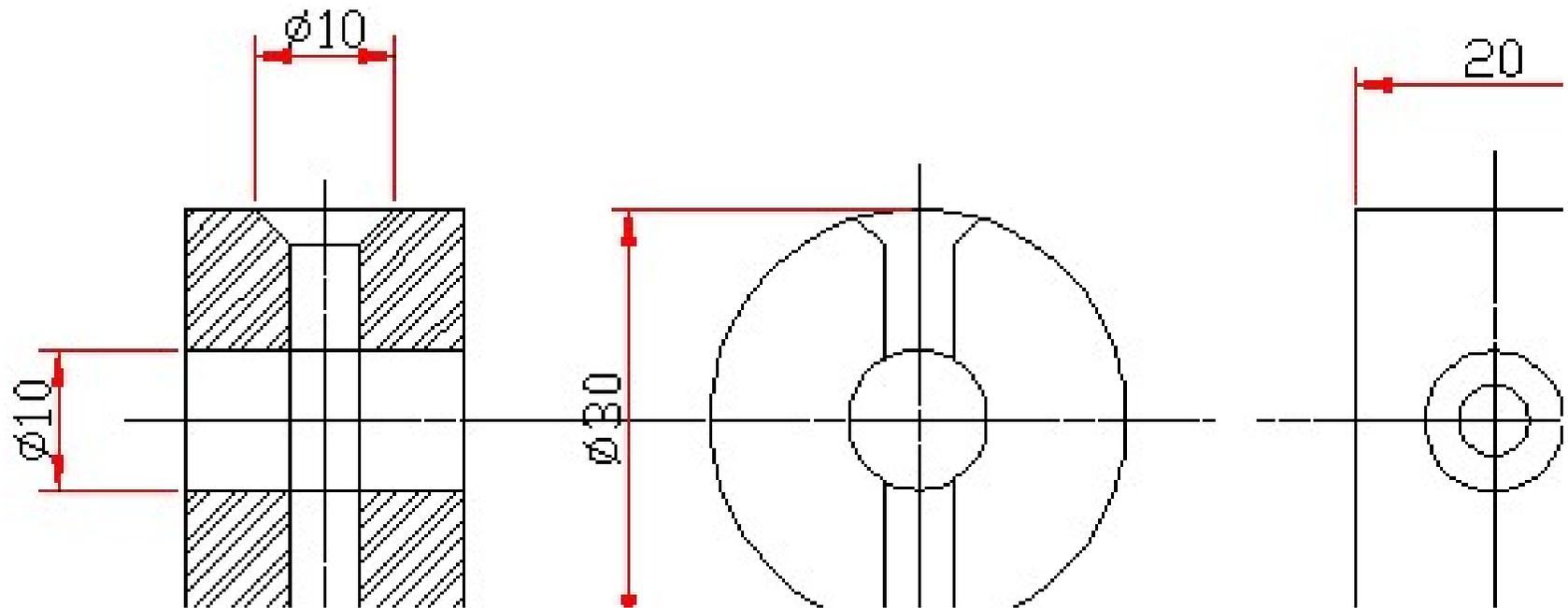
**Dente do Estaror:**



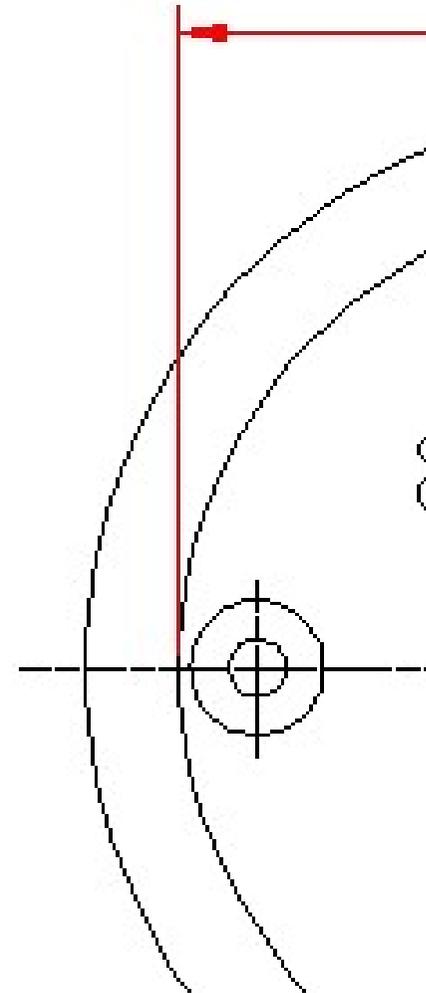
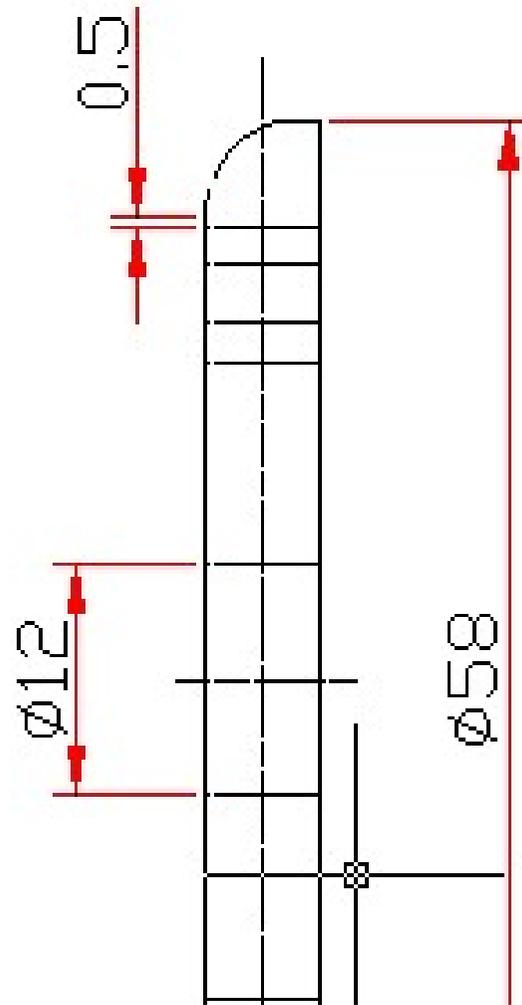
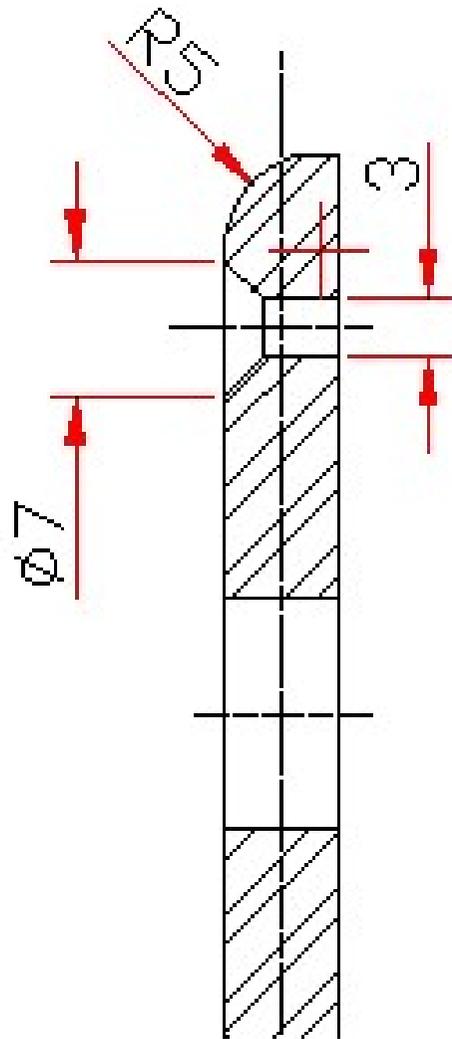
**Bobina**



**Aruela fim de curso:**

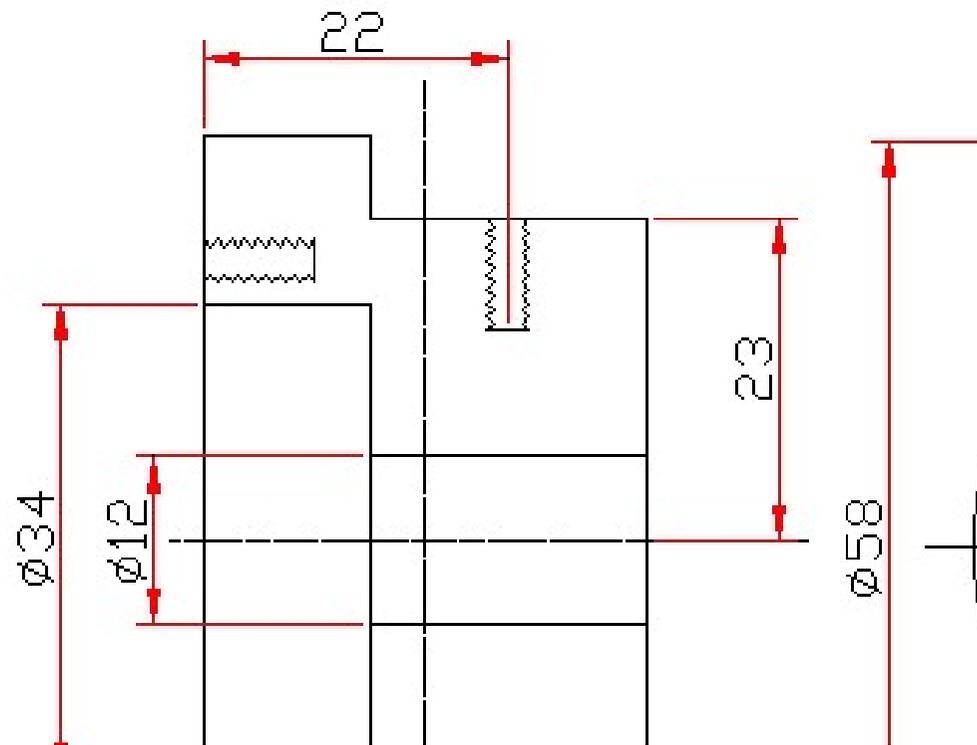
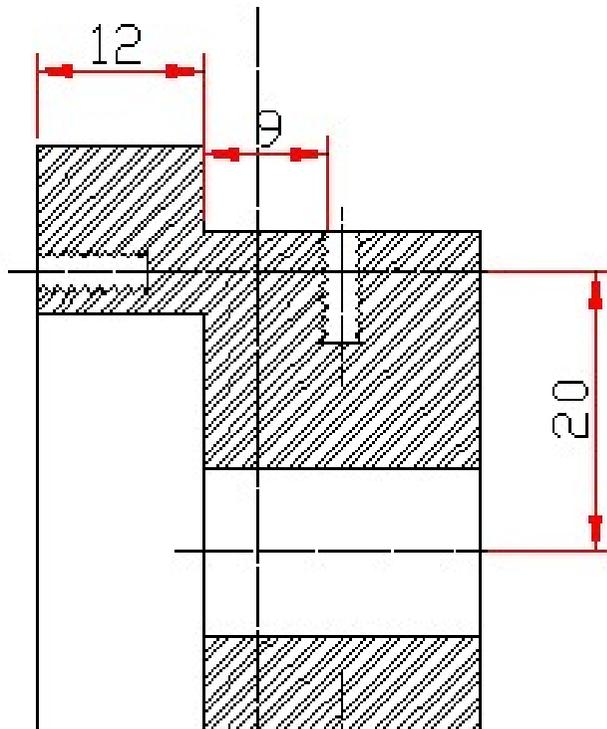


**Tampa da Carcaça:**

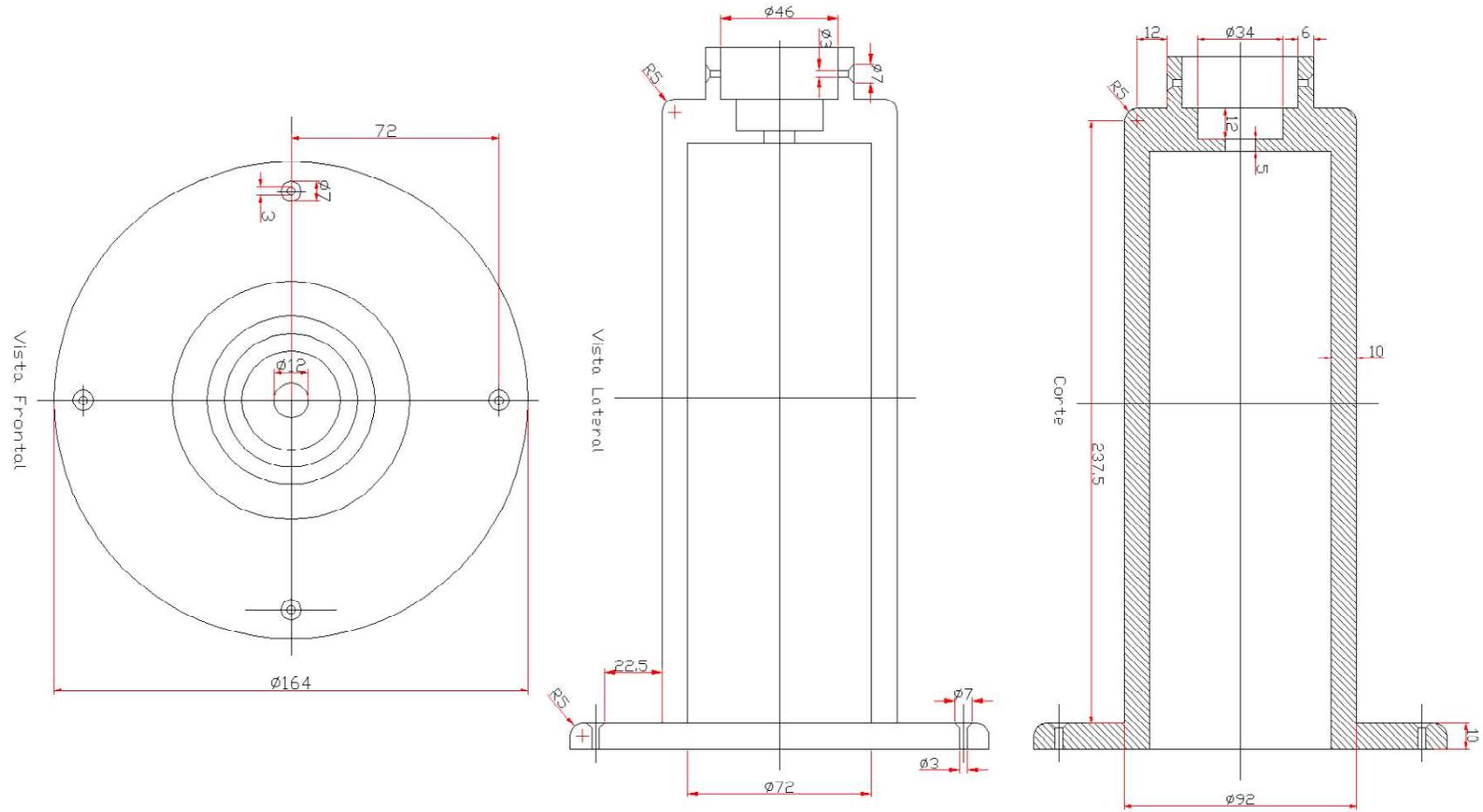


**Carça Parte 1:**

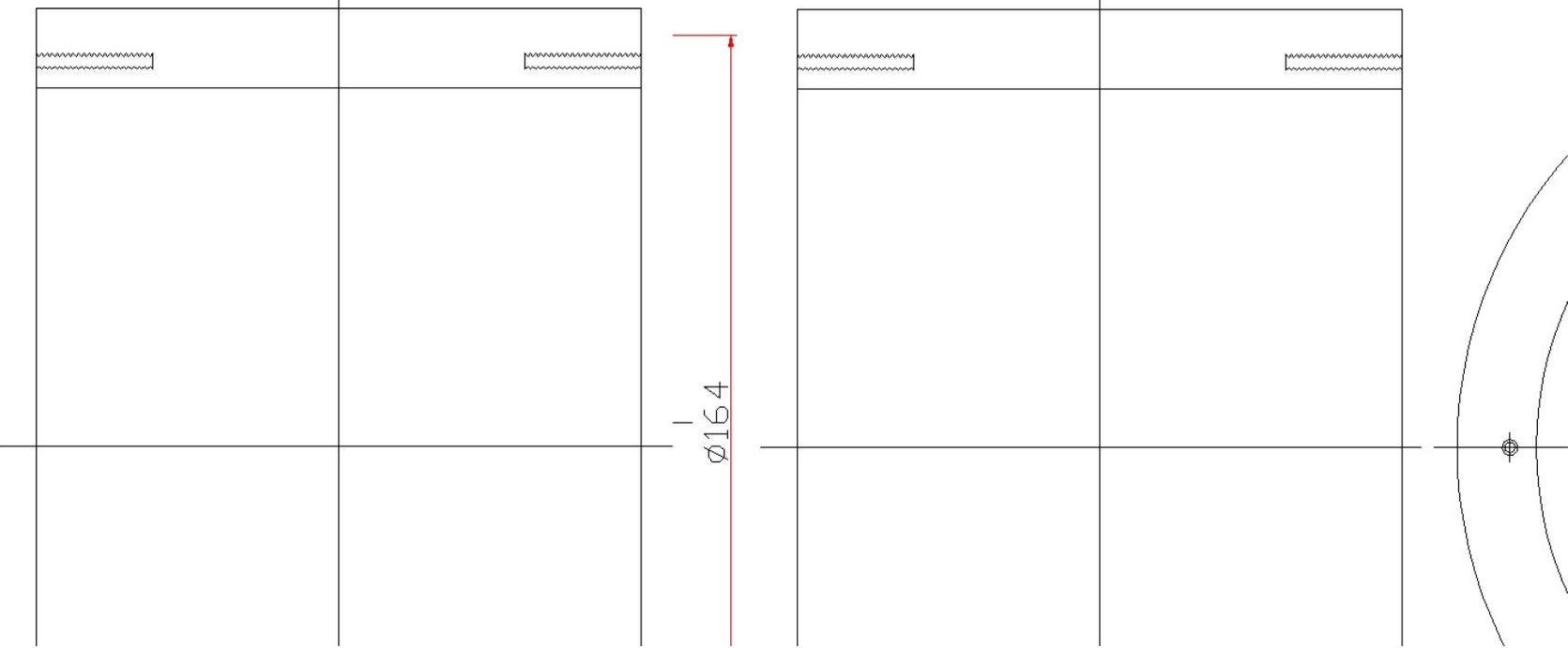
Ø3



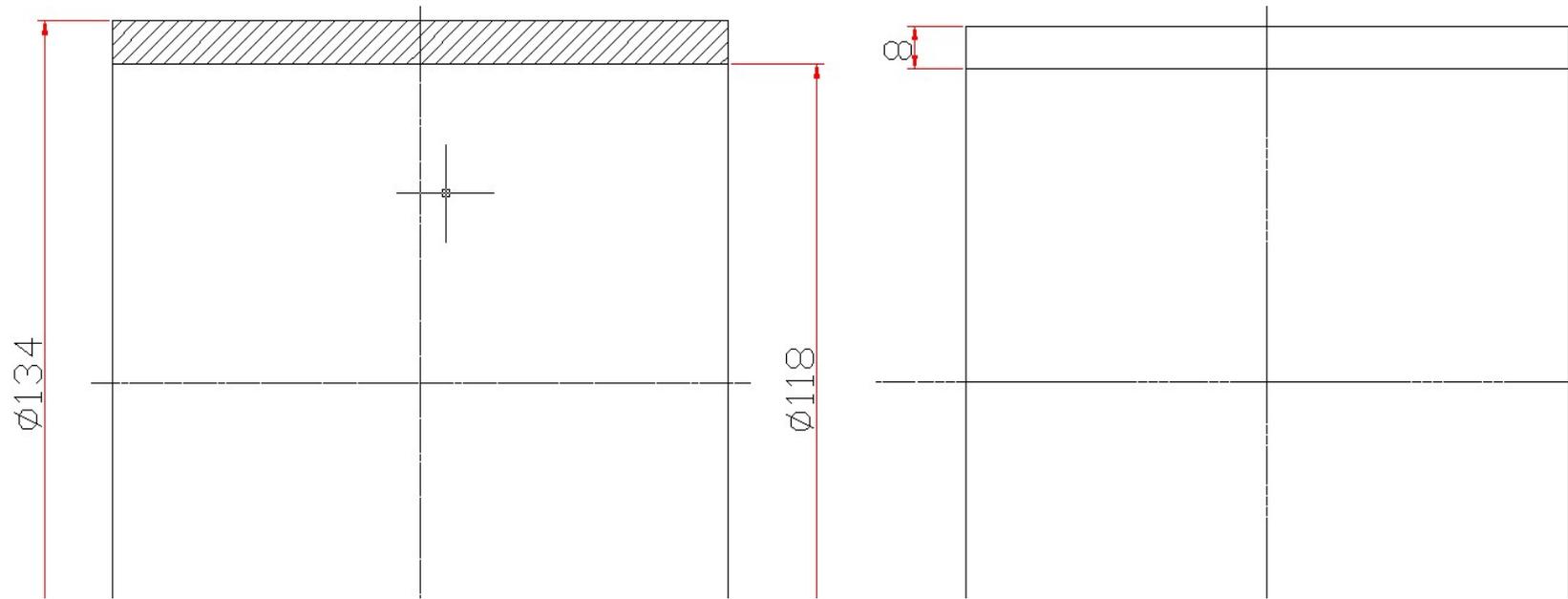
## Carcaça Parte 2:



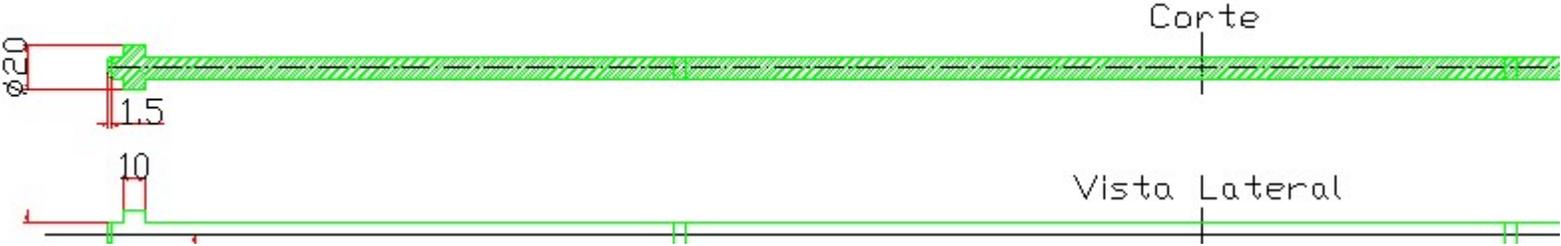
**Carçaça Parte 3:**



**Cilindro externo do Estator:**



**Eixo:**



# Projeto de um protótipo de Gerador de Energia Elétrica utilizando Ondas Marítimas

Anderson Hitoshi Uyekita, Claudio Shisei Yada

Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

## RESUMO

*Este documento apresenta os resultados das pesquisas das técnicas de geração de energia elétrica através de ondas marítimas, obtendo aspectos de configuração mecânica e a geométrica do protótipo do gerador linear a ímãs permanentes. Estão contidas informações construtivas como dimensionamento e escolha das alternativas disponíveis para a especificação do protótipo e configuração do conjunto mecânico do conversor e do gerador elétrico linear a ímãs permanentes.*

## SUMMARY

*This paper shows how to convert energy of ocean waves in electric energy using a linear generator. As a result, the mechanical structures and electrical aspects of the permanent linear generator are presented in this paper. Also, a concept of the construction and sizing are discussed as well as the specifications of material and configuration of permanent magnet linear generator.*

## INTRODUÇÃO

O presente projeto contempla técnicas de geração de energia elétrica através das ondas marítimas assim como as metodologias de desenvolvimento de topologia física, elétrica e eletromecânica do protótipo de gerador linear a ímãs permanentes.

Nesta fase obtiveram-se as dimensões e os aspectos construtivos, tanto de materiais e aspectos de montagem.

O resultado final tanto de dimensões e aspectos finais de montagem foi baseado na formulação do circuito magnético. Foi utilizada uma ferramenta CAD para visualização e construção de um desenho técnico. O desenho em CAD auxiliou na correção de elementos críticos tais como: tamanho de dente, sapata polar, bobina e dimensões diversas na construção da máquina elétrica.

## ONDAS MARÍTIMAS

A energia contida nas ondas marítimas é oriunda da energia solar incidente sobre os oceanos o qual é responsável pela evaporação da água dos mares,

pelos dos gradientes de temperatura e pelos dos deslocamentos de massa de ar [1].

Os perfis de onda dependem também da profundidade, sendo que quanto menor a profundidade maior a deformação do perfil bem com a perda da energia contida (perda de carga hidrodinâmica). [1] [2] [3] [4]

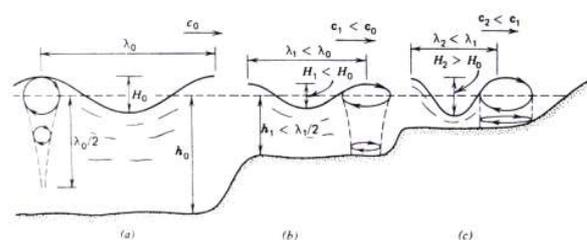


Figura 1: a) o escoamento é laminar (águas profundas), b) há o efeito de escoamento turbulento (profundidade de transição c) a turbulência torna-se mais acentuada (água rasa). [1]

Para os fins de análise de projeto optou-se por um modelo de onda linear no deslocamento e perfil senoidal. [1],[2],[3]

## Energia Contida nas Ondas do Mar

A onda do mar transporta energia mecânica, sendo esta em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ), amplitude ( $H$ ) e largura da frente de onda ( $b$ ), utilizando o modelo linear de onda, tem-se que a energia mecânica total é dada pela equação (1) [1] [2]:

$$E_m = E_p + E_c = \frac{\rho \cdot g \cdot H^2 \cdot \lambda \cdot b}{8} \text{ [J]} \quad (1)$$

Onde:

$\rho$  = densidade da água [1000 kg/m<sup>3</sup>];  
 $g$  = aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>];  
 $H$  = amplitude pico a pico da onda [m];  
 $v$  = velocidade da onda [m/s];  
 $\lambda$  = comprimento de onda [m];  
 $b$  = frente de onda [m].

## TOPOLOGIAS DOS DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO.

Atualmente com a aplicação de novas tecnologias a construção de mecanismos de conversão de energia através das ondas marítimas tornou-se mais diversificada. Portanto, podemos classificá-las em

algumas famílias genéricas de conversores, a Figura 2 ilustra as três configurações básicas [1], [2].

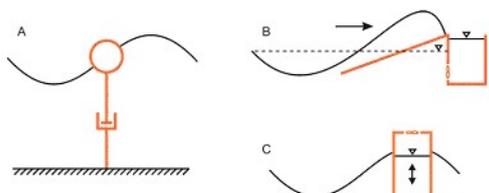


Figura 2: Tipos de conversores de energia de ondas do mar; a) Conversores por coluna oscilante; b) conversor por transbordamento (Overtopping device); c) Dispositivo por pressão de coluna de água e ar.

## PROJETO DO GERADOR LINEAR.

### Topologia Adotada

A configuração do sistema adotado é o conversor ativado por coluna oscilante, onde esse é composto por um flutuador semi-submerso (esse tipo de flutuador possui líquido no seu interior) para garantir que a variação de translação vertical seja igual a da onda. O eixo que liga o gerador pode ser uma barra flexível ou barra rígida que é conectada ao gerador linear de eletricidade.

### Dimensionamento do Flutuador.

O flutuador é o responsável pela captura da energia contida na onda do mar. O flutuador aplicável para o nosso projeto é o semi-submerso, que possui um lastro de água no qual efetuam-se ajustes finos na relação de massa de água deslocada e a massa total do eixo do gerador. Para este ajuste de relação de massas temos que apenas tirar ou adicionar água dentro do flutuador.

A energia mecânica é transferida para o flutuador através da força de empuxo da coluna de água oscilante da onda em contato com o flutuador.

$$F_{H2O} = m_{H2O} \cdot g \quad [N] \quad (2)$$

$$F_{H2O} = \rho_{H2O} \cdot H \cdot A_{flut} \cdot g \quad [N] \quad (3)$$

$$P_{flut} = F_{H2O} \cdot \frac{2L_{flut}}{T} \quad [W] \quad (4)$$

Onde:

$F_{H2O}$  = força da massa de água no flutuador [N];

$A_{flut}$  = área do flutuador [m<sup>2</sup>];

$P_{flut}$  = potencia transferida ao flutuador [W];

$L_{flut}$  = comprimento do flutuador [m].

$H_{flut}$  = altura do flutuador [m].

A área de contato do flutuador é feita através do enchimento de água igualando-se as equações (3) e (4). [1] [2]

$$A_{flut} = \frac{Volume_{H2O}}{H} \quad [m^2] \quad (5)$$

## Projeto do Gerador Linear de Eletricidade

Neste projeto de protótipo, o conversor de ondas por coluna oscilante utiliza um gerador linear para converter o movimento vertical em energia elétrica.

A máquina linear é caracterizada como qualquer outra máquina elétrica pelas Leis elementares de eletricidade e eletromagnetismo. A Figura 3 é um esboço do protótipo.

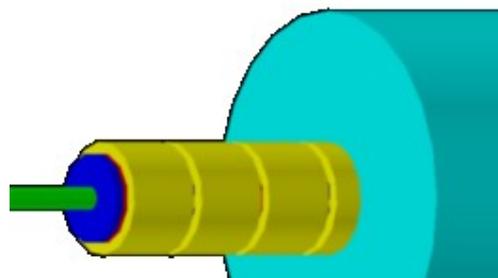


Figura 3: Visão do “transladador” em perspectiva.

### Geometria do Gerador Linear.

O estator do gerador linear é cilíndrico com corpo de aço silício magnético, composto de anéis de material laminado disposto axialmente formando os dentes, as ranhuras entre os dentes alojam as bobinas. Note que há uma carcaça cilíndrica que envolve as ranhuras e os dentes.

A parte móvel do gerador linear é composta por anéis de ímãs permanentes de Neodímio com direção de magnetização axial e as sapatas polares direcionam o fluxo do campo magnético na direção radial para que exista um circuito magnético fechado. Para uma melhor explicação a Figura 4 ilustra o protótipo expondo o “transladador” e estator.

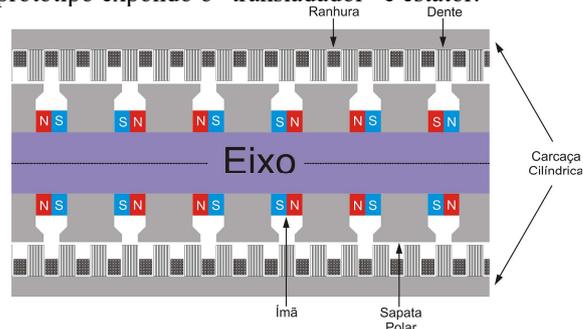


Figura 4: Corte transversal do estator (Ranhuras, dentes e a carcaça cilíndrica) e do “transladador” (ímãs, sapatas polares e eixo).

### Corte transversal do Gerador Linear

A análise do circuito magnético é feita no corte transversal (Figura 5), onde podemos definir a circuitação do contorno do fechamento do fluxo magnético.

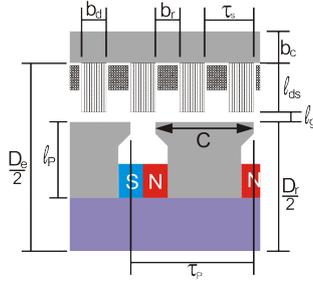


Figura 5: Corte transversal com as definições dos parâmetros do gerador linear.

Calcula-se o Fator de forma ( $k_F$ ), pois a sapata polar não é ideal, de acordo com a equação (6).

$$k_F = \frac{C}{\tau_p} \quad (6)$$

onde:

$C$  = largura da sapata polar [m];

$\tau_p$  = passo polar [m].

Para uma boa aproximação do projeto utiliza-se o Fator de forma entre os valores 0,7 e 0,8. O entreferro equivalente levando em conta o Fator de Carter, que considera o aumento de relutância devido à presença de abertura da ranhura, pode ser calculado pela equação (7).

$$l_{g_{eq}} = l_g \cdot k_c \quad (7)$$

onde:

$l_{g_{eq}}$  = entreferro equivalente [m];

$l_g$  = entreferro [m];

$k_c$  = Fator de Carter.

Devemos respeitar a seguinte condição para o Fator de Carter do projeto para o estator em função de  $\gamma$ .

$$k_c = \frac{\tau_s}{\tau_s - \gamma \cdot l_g} > 1 \quad (8)$$

Onde,  $\gamma$  pode ser calculado pela equação (9).

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_r}{l_g}\right)^2}{5 + \frac{b_r}{l_g}} \quad (9)$$

onde:

$\tau_s$  - passo do estator [m];

$b_r$  - espaçamento entre ranhuras do estator [m].

### Circuito Magnético

Inicialmente impõe-se uma indução de referência no entreferro com a finalidade de levantar a curva do circuito magnético e determinar o cruzamento com a curva de desmagnetização do ímã definindo assim o ponto de operação do ímã, a Figura 6 ilustra o procedimento.

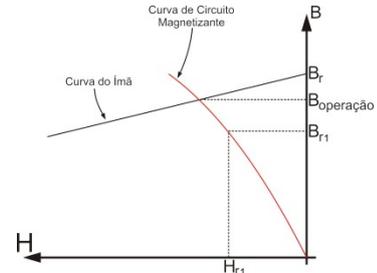


Figura 6: Curva característica BxH do ímã e do circuito magnético.

### Campo magnético de referência

De acordo com o Fator de forma (6), tem-se que o Campo magnético médio pode ser equacionado por (10).

$$B_{gm} = k_F \cdot B_{gref} \quad (10)$$

onde:

$B_{gref}$  = Campo magnético de referência [T];

$B_{gm}$  = Campo magnético médio [T];

$k_F$  = Fator de forma.

### Fluxo por polo

O fluxo por polo de referência é determinado pela equação (11). Através do produto do campo magnético médio multiplicado pela superfície polar.

$$\phi_{Pref} = B_{gm} \cdot S_p = B_{gref} \cdot k_F \cdot S_p \quad (11)$$

Sabe-se que a superfície polar é calculada por:

$$S_p = \pi \cdot D_R \cdot \tau_p \quad (12)$$

Substituindo a equação (12) em (11), tem-se:

$$\phi_{Pref} = \pi \cdot D_R \cdot \tau_p \cdot k_F \cdot B_{gref} \quad (13)$$

onde:

$\phi_{Pref}$  = Fluxo por polo do Campo Magnético de referência [Wb];

$S_p$  = Superfície polar [m<sup>2</sup>];

$D_R$  = Diâmetro da sapata polar [m].

### Distribuição de indução nas várias partes do circuito magnético:

Para um melhor entendimento do processo de cálculo do campo no indutor e no indutor, dividiremos essa análise em duas partes.

## -Parte I: Campos Magnéticos no estator (induzido)

Para calcular o  $B_{ds}$ , devem-se considerar os números de dentes por polo, onde a equação (14) demonstra matematicamente esse cálculo.

$$B_{ds} = \frac{\phi_{pref}}{Sd_{s1/3} \cdot (n^{\circ}_{dentesporpolo})} [T] \quad (14)$$

Onde  $Sd_{1/3}$  é calculado de acordo com a diminuição magneticamente equivalente.

$$Sd_{s1/3} = \pi \cdot (D_R + \frac{1}{3} \cdot lds \cdot 2) \cdot b_d \cdot k_e \quad (15)$$

onde:

$k_e$  = Fator de empacotamento;

$b_d$  = espessura do dente;

$lds$  = altura do dente.

Portanto, substituindo (15) em (14), obtém-se (16).

$$B_{cs} = \frac{\phi_{pref}}{\pi \cdot D_e \cdot b_{cs}} [T] \quad (16)$$

onde:

$$D_e = D_R + \frac{1}{3} \cdot lds \cdot 2 [m]$$

$$b_{cs} = b_d \cdot k_e [m]$$

## -Parte II: Campos Magnéticos no “Transladador” (indutor).

De acordo com a Figura 6, aproximamos a trajetória do fluxo ao comprimento  $l_p$ , e essa simplificação resultará na equação (17). Note que há dispersão de fluxo logo se deve impor um Fator de dispersão de 1,2 aproximadamente. [10]

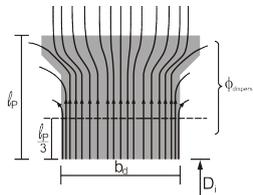


Figura 6: Sapata Polar em detalhes, note que há dispersão de fluxo.

$$B_p \cong \frac{\phi_{pref} \cdot k_d}{S_{cp}} [T] \quad (17)$$

onde:

$k_d$  = fator de dispersão;

$S_{cp}$  = Superfície Corpo do Polo [ $m^2$ ].

O cálculo da superfície polar deverá ser corrigido devido ao efeito de espriamento, logo, deve-se considerar 1/3 da altura do polo.

$$S_{cp} = \pi \cdot \left( D_i + \frac{2}{3} \cdot l_p \right) \cdot b_p \quad (18)$$

Substituindo (18) em (17), obtém-se o campo do ímã.

$$B_{imã} \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot \phi_{pref} \cdot k_d}{S_{imã}} [T] \quad (19)$$

onde:

$$S_{imã} \cong S_{cp}$$

## Força Magneto-motriz no entreferro

Estima-se a força magneto-motriz no entreferro de acordo com a equação (20).

$$F_g = \frac{B_{gref}}{\mu_o} \cdot l_g \cdot k_c [A/m] \quad (20)$$

onde:

$$\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} [H/m];$$

## Força Magneto-motriz no estator

Após os cálculos dos Campos Magnéticos  $B_{ds}$  e  $B_{cs}$  pelas equações (14) e (16) obtém-se os valores de intensidade de campo  $H$  através das curvas de magnetização dos materiais que compõe o circuito magnético do estator (aço silício), resultando na força magneto-motriz requerida no estator. Portanto,  $F_{ds}$  e  $F_{cs}$  podem ser equacionadas de acordo com (21) e (22) respectivamente.

$$F_{ds} = H_{ds} \cdot l_{ds} [A/m] \quad (21)$$

$$F_{cs} = H_{cs} \cdot l_{cs} [A/m] \quad (22)$$

## Força Magneto-motriz na sapata polar

Analogamente ao item anterior, utilizando a curva de magnetização do material da sapata polar, tem-se que a força magneto-motriz é igual a:

$$F_p = H_p \cdot l_p [A. espira] \quad (23)$$

Logo, o Potencial Magnetostático ou F.M.M. total requerida pelo circuito magnético a ser suprida pelo ímã permanente.

$$F_{TOTAL} = 2 \cdot F_g + 2 \cdot F_{ds} + F_{cs} + 2 \cdot F_p [A. espira] \quad (24)$$

Referindo ao ímã permanente:

$$H_{imã} = \frac{F_{TOTAL}}{l_{imã}} \text{ [A/m]} \quad (25)$$

### Coordenação da característica do ímã com a curva de carga do circuito magnético.

Para uma adequação ao projeto será necessário corrigir a indução no entreferro, segundo a equação (26).

$$B_{gop} = B_{gref} \cdot \frac{B_{op}}{B_{imã}} \text{ [T]} \quad (26)$$

O cálculo do fluxo de operação por polo é, de acordo com a equação (27).

$$\phi_{Pop} = B_{gop} \cdot k_F \cdot S_p \text{ [Wb]} \quad (27)$$

Logo, a tensão eficaz induzida nos terminais do estator é: [7], [8], [9], [10].

$$E = 4,44 \cdot f_{gerador} \cdot N \cdot \phi_{Pop} \text{ [V]} \quad (28)$$

### Características elétricas do gerador linear

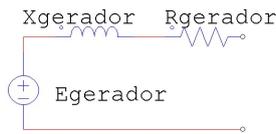


Figura 7: Modelo elétrico do gerador.

A reatância do gerador  $X_{gerador}$  é determinada através da relutância eletromagnética do circuito magnético que é calculado através da geometria do entreferro, equação (29) [8], [9].

$$\mathfrak{R}_{gerador} = \frac{\mathfrak{R}_{imã}}{2} + \mathfrak{R}_{entreferro} \text{ [H}^{-1}] \quad (29)$$

$$\mathfrak{R}_{gerador} = \frac{6 \cdot l_{imã}}{1,05 \cdot \mu_o \cdot S_{imã}} + \frac{6 \cdot l_{entreferro}}{\mu_o \cdot S_p} \text{ [H}^{-1}] \quad (30)$$

onde:

$\mathfrak{R}_{gerador}$  = Relutância do Gerador Linear;

$S_p$  = Superfície polar [m<sup>2</sup>];

$S_{imã}$  = Superfície ímã [m<sup>2</sup>];

$l_{entreferro}$  = Comprimento do entreferro [m];

$l_{imã}$  = Comprimento do ímã no circuito

magnético [m];

Logo, a indutância dor gerador pode ser calculado a partir da equação (31) [8], [9], [10].

$$L_{gerador} = \frac{N^2}{\mathfrak{R}_{gerador}} \text{ [H]} \quad (31)$$

Portanto, a reatância série do gerador por (32): [7][8][9]

$$X_{gerador} = 2\pi \cdot f_{elétrica} \cdot L_{gerador} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (32)$$

Onde:

$X_{gerador}$  = Reatância do Gerador Linear [Ω];

$f_{elétrica}$  = frequência elétrica do gerador [Hz];

$L_{gerador}$  = Indutância do Gerador [H];

N = Número de espiras [m].

Finalmente tem-se, que a resistência ôhmica interna do gerador linear é dada pela seguinte equação (33) [7].

$$R_{gerador} = \frac{\rho_{Cobre} \cdot l_{cobre}}{A_{cobre}} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (33)$$

Onde:

$R_{gerador}$  = Resistência internado Gerador Linear

$\rho_{Cobre}$  = Resistividade do fio de cobre.

$l_{Cobre}$  = comprimento do fio da bobina de

cobre.

$$l_{cobre} = 2 \cdot \pi \cdot r_{medio\_estator}$$

$A_{Cobre}$  = área da secção transversal do fio de cobre.

A impedância do gerador linear é dada por (34) [7].

$$Z_{gerador} = \sqrt{R_{gerador}^2 + X_{gerador}^2} \text{ [}\Omega\text{]} \quad (34)$$

## ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR LINEAR

Utilizaram-se os dados de referência de projeto o valor de frequência de onda senoidal de 0,5[Hz] e amplitude média de 10 cm. O fator de escala do projeto é de 1 para 10, dados tomados em referencia da onda tipo swell.[1] [5].

Tabela 1: Especificação das características geométricas do Gerador Linear.

C ( largura da sapata polar [m])	0,028
T <sub>p</sub> ( passo polar [m])	0,036
l <sub>g</sub> ( entreferro [m])	0,001
T <sub>s</sub> (passo do estator [m])	0,012
b <sub>r</sub> (espaçamento entre ranhuras do estator [m])	0,006
D <sub>r</sub> (Diâmetro da sapata polar [m])	0,05
D <sub>R</sub> (diâmetro externo estator [m])	0,118
l <sub>ds</sub> (altura do dente[m])	0,033
b <sub>a</sub> (espessura do dente [m])	0,006
k <sub>e</sub> [m] (Fator de empacotamento)	0,95
n° dentes por polo	2,00
D <sub>i</sub> (Diâmetro interno Sapata Polar[m])	0,022
l <sub>p</sub> (Altura transversal Sapata Polar [m])	0,017
b <sub>d</sub> (Largura transversal da Sapata Polar [m])	0,018
k <sub>d</sub> ( fator de dispersão)	1,20
D <sub>ext imã</sub> [m]	0,04
D <sub>int imã</sub> [m]	0,01
l <sub>es</sub> (altura do dente[m])	0,033
l <sub>p</sub> (altura do sapata polar [m])	0,017
l <sub>imã</sub> [m]	0,008
N (número de espiras)	90,00

O valor da tensão induzida nos terminais do gerador foi obtida ligando se em série todas as bobinas do estator do gerador. A tensão induzida no terminal no gerador é definida pela soma fasorial das tensões em cada bobina que possui uma defasagem ou ângulo elétrico.

$$\phi_i = \frac{180}{n} \cdot i \text{ [graus]} \quad (35)$$

Onde  $i$  é o índice relativo ao dente tomado no centro da primeira sapata polar, no caso  $i$  varia de 0 a 2. O valor de  $n$  é o numero de dentes contido no intervalo de um passo polar. Assim, a tensão induzida ficará definida pela equação (36).

$$\dot{V}_{gerador} = \sum_{i=0}^2 E_{polo} \angle \phi_i \text{ [V]} \quad (36)$$

Através da tensão do gerador e do modelo elétrico pode-se estimar a corrente de carga e outros aspectos elétricos. Para uma frequência elétrica de 2,77[Hz] gerada por uma onda do mar com frequência média de 0,5[Hz] (critério técnico de projeto). Pode-se obter a Tabela 2.

Tabela 2: Especificações Elétricas do Gerador Linear.

E (Tensão Induzida por polo Estator [V])	2,620
$E_{gerador}$ (Tensão do Gerador) [V]	15,721
Relutância do gerador[H <sup>-1</sup> ]	2754329,557
$L_{gerador}$ [H]	0,026
$X_s$ gerador [ $\Omega$ ] (reatância série)	0,460
Área secção do fio [m <sup>2</sup> ]	1,31E-06
$R_{gerador}$ [ $\Omega$ ]	1,731
$Z_{gerador}$ [ $\Omega$ ]	1,791

A escolha da bitola do fio da bobina leva em conta a princípio a potência da carga. Com os dados de potência e tensão especifica-se a corrente de operação nominal de projeto.

Os dados referente à área transversal entre os dentes onde será acomodada a espira estatórica, define a bitola de fio a ser utilizado na bobina utilizando uma tabela de fio esmaltado AWG. Assim a potência do gerador é definida indiretamente, dado pela corrente máxima admissível do fio esmaltado (Tabela 3).

Tabela 3: Especificação da bitona da bobina do estator.

AWG	17
Diâmetro do fio [mm]	1,15
Secção[mm <sup>2</sup> ]	1,04
Peso [kg/km]	9,32
Resistência [ $\Omega$ /km]	16,6
$I_{max}$ [A]	3,12

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Escola Politécnica da universidade de São Paulo e a todos os professores de graduação.

Especialmente aos professores orientadores Dr.Ivan Eduardo Chabu, em que nos atendeu e nos deu valiosas orientações para o andamento do trabalho de formatura e Dr. José Aquiles Grimoni.

A todos os professores do Departamento de Energia e automação que estiveram presentes durante todo o período do curso um especial apreço.

## REFERÊNCIAS

- [1] McCormick, M. E., Ocean Wave Energy Conversion, Editora Dover Edição
- [2] Bent Sørensen: “Renewable Energy”, Elsevier Academic Press, 2004 Edition.
- [3] Silveira, F. L.; Varriale, M. C.; “Propagação das ondas marítimas e dos Tsunamis”. UFRGS, 2005.
- [4] IEEE Power & Energy Magazine, Catch the Wave to Electricity, Page 50, February/2009
- [5] Waters,R.2008.Energy from Ocean Waves Full Scale Experimental Verification of Wave Energy Converter. ISBN 978-91-554-7354-9
- [6] Basak, A. – Permanent-Magnetic DC Linear Motors ISBN 019859392, 1996.
- [7] L.Q. Orsini , Denise Consonni : Curso de Circuitos elétricos Volume 2.
- [8] Fitzgerald A.E. , Maquinas Eletricas Ed. 6
- [9] Chabu, Ivan Eduardo, Notas de aula da disciplina de Maquinas elétricas e acionamentos I e II.
- [10] Say, M. G., Alternating Current Machines, Editora Pitman, 1976.

## BIOGRAFIA



Anderson Hitoshi Uyekita, natural de Mogi das Cruzes, Brasil, nascido em 03/09/1985. Cursou o segundo grau no Colégio Objetivo. Aluno de graduação do curso de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, formando em 2010. Estagiário na Daimon Engenharia e Sistemas.



Claudio Shisei Yada, natural de Mogi das Cruzes, Brasil, nascido em 26/08/1970. Cursou o segundo grau na Escola Técnica Federal de São Paulo em São Paulo. Aluno de graduação do curso de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, formando em 2009. Estagiário na SMZ Consultoria em Automação e Controle.