

ESCOLA POLITÉCNICA - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO



PEA2500 – Projeto de Formatura I

Projeto: Desenvolvimento de um Protótipo de Gerador de Energia Elétrica utilizando Ondas Marítimas

	No USP
NOME DO ALUNO: Anderson Hitoshi Uyekita	5175471
Claudio Shisei Yada	225571

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

COORDENADOR: Prof. Carlos Eduardo Senger

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. OBJETIVOS	4
3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO	5
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
5. ONDAS MARÍTIMAS.....	7
5.1 Origens das ondas marítimas	7
5.2 Análise das ondas marítimas	10
6. ENERGIA CONTIDA NAS ONDAS DO MAR.....	13
7. TOPOLOGIAS DOS DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO.....	15
7.1 Conversor Ativado por coluna Oscilante	15
7.2 Transbordamento (Overtopping device).....	16
7.3 Conversor acionado por Pressão de coluna de água e ar	17
7.4 Topologia Adotada.....	18
8. DIMENSIONAMENTO DO FLUTUADOR.....	19
9. PROJETO DO GERADOR LINEAR.....	21
9.1 Determinação da Geometria do Gerador Linear	23
9.2 Corte transversal do Gerador Linear	24
9.3 Circuito Magnético	25
9.3.1 Campo magnético de referência.....	26
9.3.2 FLUXO POR PÓLO.....	27
9.3.3 Distribuição de indução.....	27
-Parte I: Campos Magnéticos no estator	27
-Parte II: Campos Magnéticos no Transladador	29
9.3.4 FORÇAS MAGNETO-MOTRIZ REFERIDAS	30
-Força Magneto-motriz no entreferro	30
-Força Magneto-motriz no estator	30
-Força Magneto-motriz na sapata polar	31
9.3.5 Coordenação da característica do ímã.	31
9.4-Análise da tensão induzida.	33

<i>10. RETIFICADOR</i>	37
<i>11. Simulação</i>	39
<i>11.1 Tensão do gerador</i>	40
<i>11.2 Tensão de Saída (V_{carga})</i>	43
<i>11.3 Capacitância de Filtro</i>	46
<i>11.4 Carga Resistiva</i>	47
<i>12-RESULTADOS E CONCLUSÕES</i>	49
<i>13. CRONOGRAMA</i>	51
<i>14.REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i>	52

1. INTRODUÇÃO

Este projeto de formatura tem o objetivo de pesquisar as diversas tecnologias de geração de energia elétrica através de ondas marítimas. Será realizada uma pesquisa dos atuais métodos, tecnologias e materiais utilizados e posteriormente será projetado e construído um protótipo em escala reduzida para avaliação do experimento e validação da metodologia de pesquisa.

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 até agora.

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 potência.

2. OBJETIVOS

- Pesquisar técnicas de geração de energia elétrica através de ondas marítimas;
- Através dos resultados das pesquisas e consultas às referências bibliográficas, obtém-se os aspectos relevantes e características do protótipo de gerador.
- Desenvolver um projeto de um protótipo de um gerador de energia elétrica de ondas marítimas;
- Obter informações construtivas por catálogo, livros e consulta aos especialistas
- Escolher as alternativas de materiais disponíveis e especificar o protótipo, configurar o conjunto mecânico do conversor e do gerador elétrico linear a ímãs permanentes.
- Construir o protótipo de gerador baseado nos estudos preliminar e realizar testes e análises dos resultados obtidos e corrigir eventuais defeitos.

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

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

- Pesquisa de campo sobre as teorias e modelos através da Web, periódicos do IEEE, Wikipédia, 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 a criação do relatório técnico;
- Escopo para escolha do modelo para projeto do protótipo;
- Definições das especificações do protótipo;
- Escolha dos materiais e equipamentos de montagem;
- Escolha dos equipamentos de medição e simulação;
- Testes e simulação e correção das deficiências 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 iniciou-se no século XVIII (McCormick 1981; Ross, 1995; João M.B.P. Cruz 2004) e durante muito tempo o desenvolvimento ficou a encargo de inventores como na 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 WECs (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).

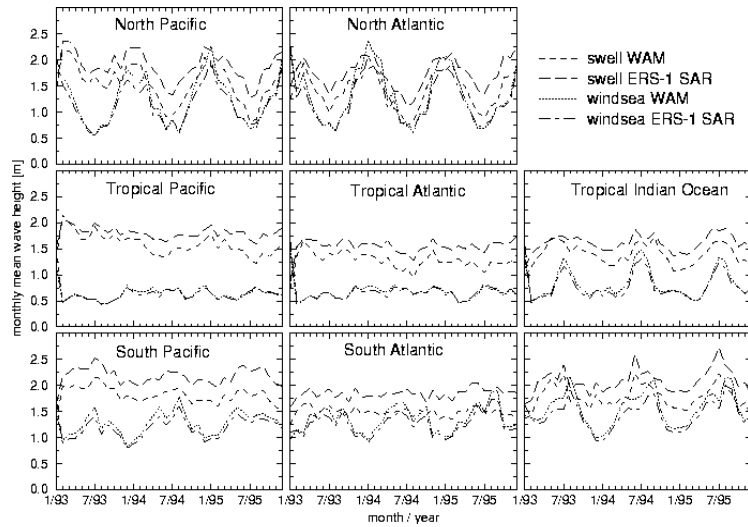
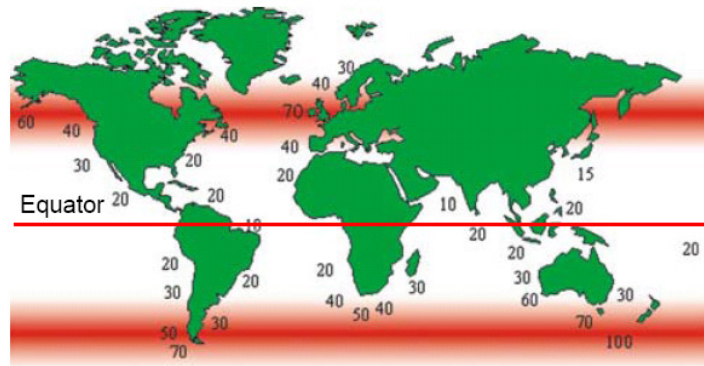


Figura 1: Dado mundial das alturas médias mensais.

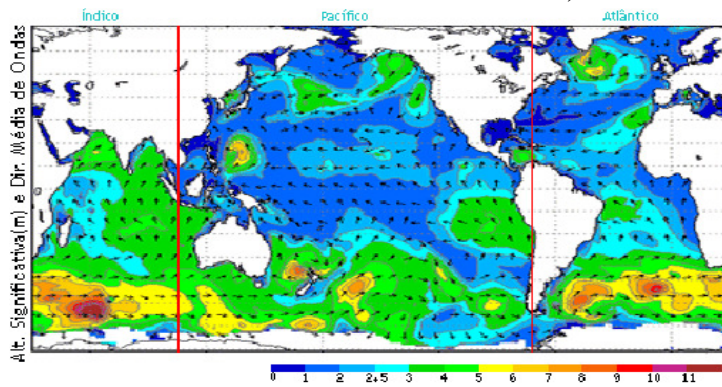
No Brasil o mapeamento do potencial das ondas marítimas da Figura 2, foram obtidos pela COPPE-UFRJ, ELETROBRÁS e governo do Ceará. Para a auferição dos dados foi utilizado um conversor energia de modelagem de onda com propagação hiperbólica.



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 das alturas 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, gradientes de temperatura e deslocamentos de massa de ar. A Figura 3 ilustra essa teoria.

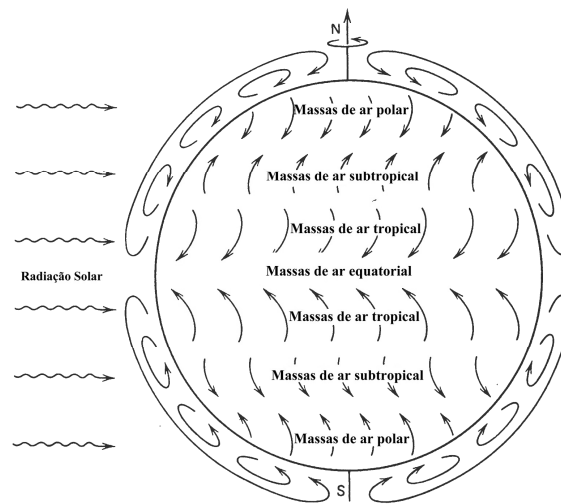


Figura 3: Movimento das Massas de ar.

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 determinada 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 denomina de onda oscilante (swell).

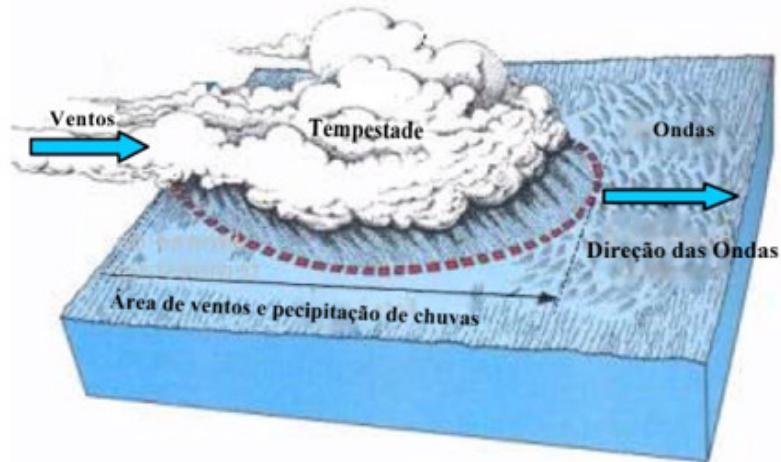
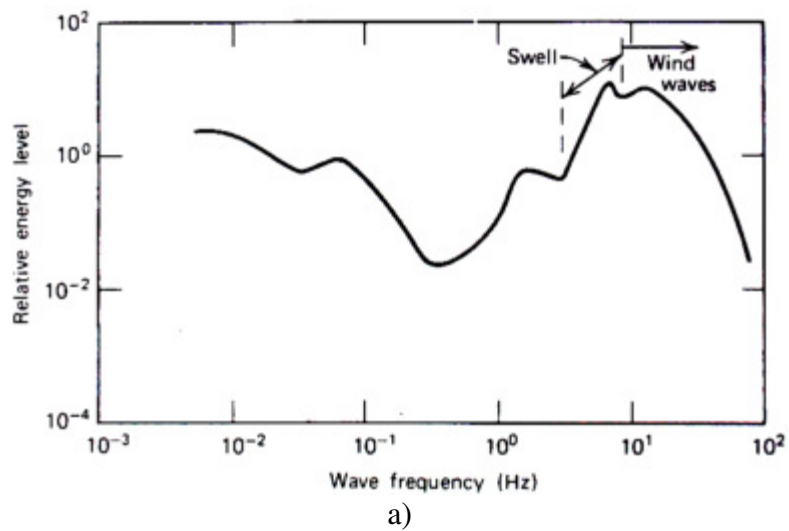
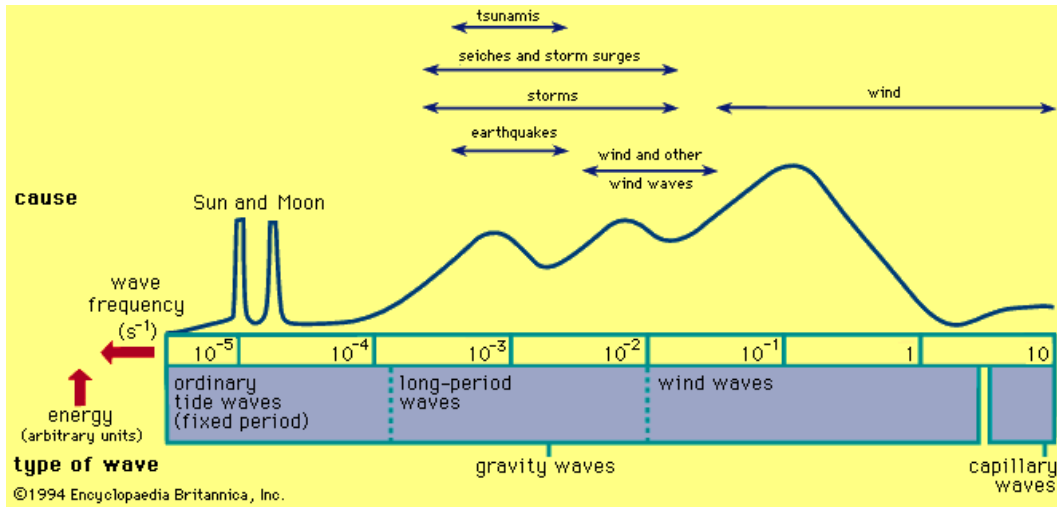


Figura 4: Formação de ondas causadas pela ação do vento e tempestade.

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 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.





b)

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

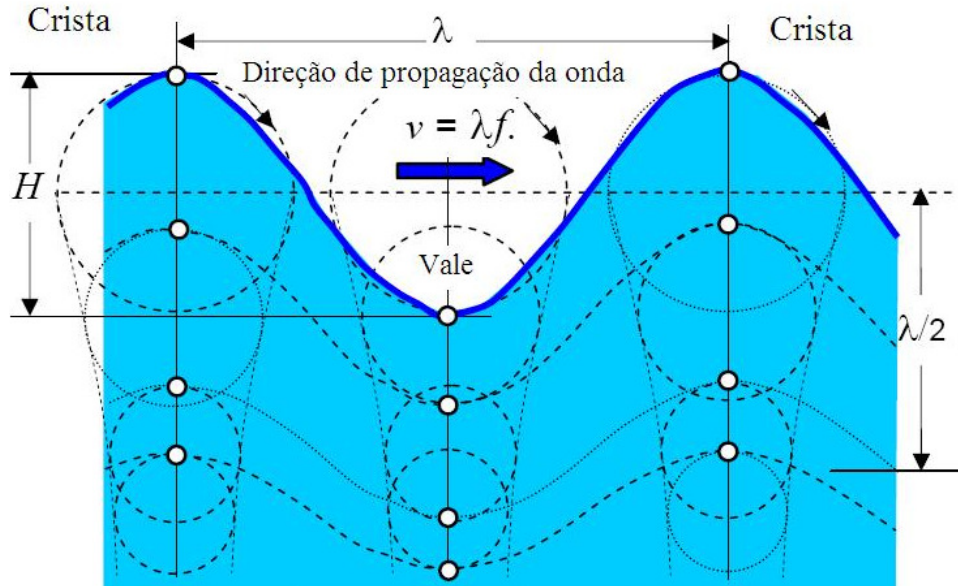


Figura 6: Propagação da onda do mar modelo linear com perfil senoidal.

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: água profundas= $\lambda/2h$, profundidade de transição= $\lambda/25 \leq h \leq \lambda/4$ e água rasa= $\lambda/25$

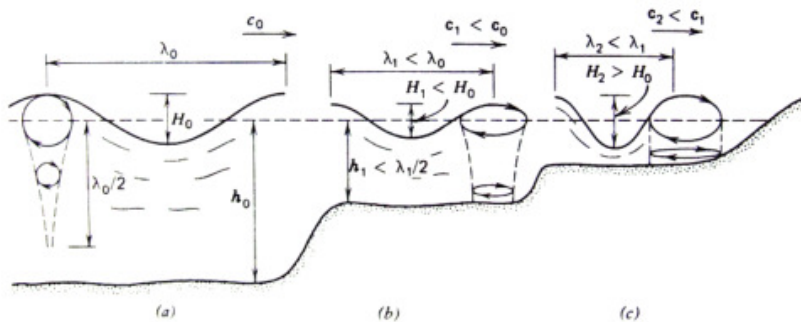


Figura 7: Nota-se que no caso a) o escoamento é laminar (águas profundas), no caso b) há o efeito de escoamento turbulento (profundidade de transição), e no caso c) a turbulência torna-se mais acentuada (água rasa).

Adotando a onda marítima como senoidal tem-se que a distância entre duas cristas consecutivas obtém-se o comprimento de onda λ , 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 dado por:

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

De acordo com [McCormick, 2007], 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/λ) de uma onda linear. Esse gráfico foi obtido experimentalmente através de estudos de mecânica dos fluidos aplicadas às ondas do mar [McCormick, 2007].

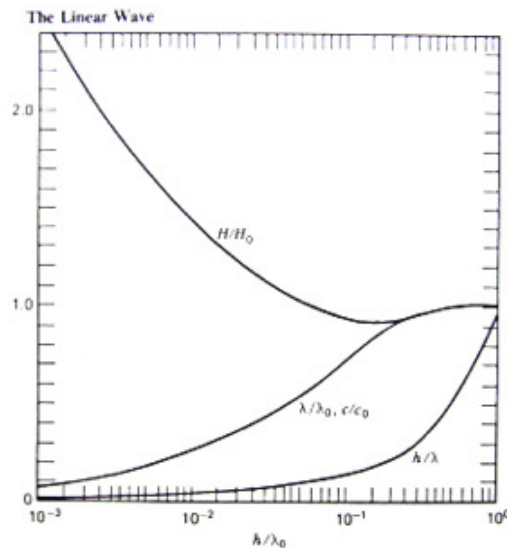


Figura 8: Propriedade adimensional da onda em função da altura da onda pelo comprimento de onda.

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 deduzido a fórmula para cálculo da energia contida na onda:

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

Dado que η 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 λ , 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):

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

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 (λ) 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 λ e amplitude h, pode-se estimar a energia infinitesimalmente pela substituição da equação (6.4) em (6.3).

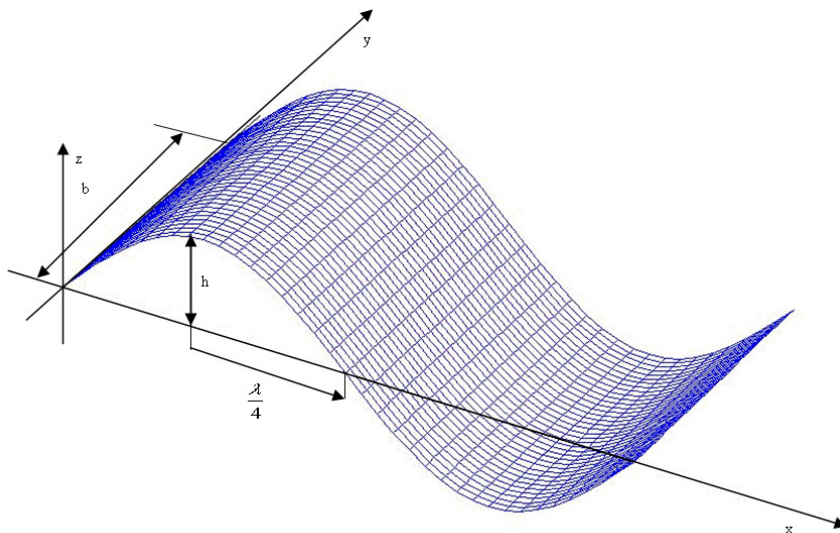


Figura 9: Modelo de onda senoidal linear com frente de onda b

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

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

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

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

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

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:

- ρ =densidade da água [$1000 \text{ kg} / \text{m}^3$]
- g =aceleração da gravidade [m / s^2]
- H =amplitude pico a pico da onda [m]
- v =velocidade da onda [m/s]
- λ =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.

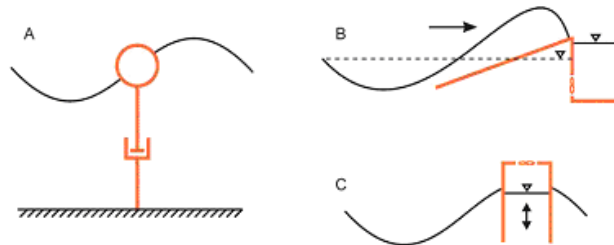


Figura 10: Tipos de conversores de energia de ondas do mar; a) Conversores por coluna oscilante; b) conversor por transbordamento (Overtopping device); c) Dispositivo por pressão de coluna de água e ar.

Analisaremos à seguir as famílias de conversores observando as vantagens e desvantagens de cada tipo e suas aplicações como 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) e energia como a altura de marés e fluxo de ar causado pelo deslocamento de

massa de água. Alguns exemplos de conversores de coluna oscilante está ilustrada na Figura 11.

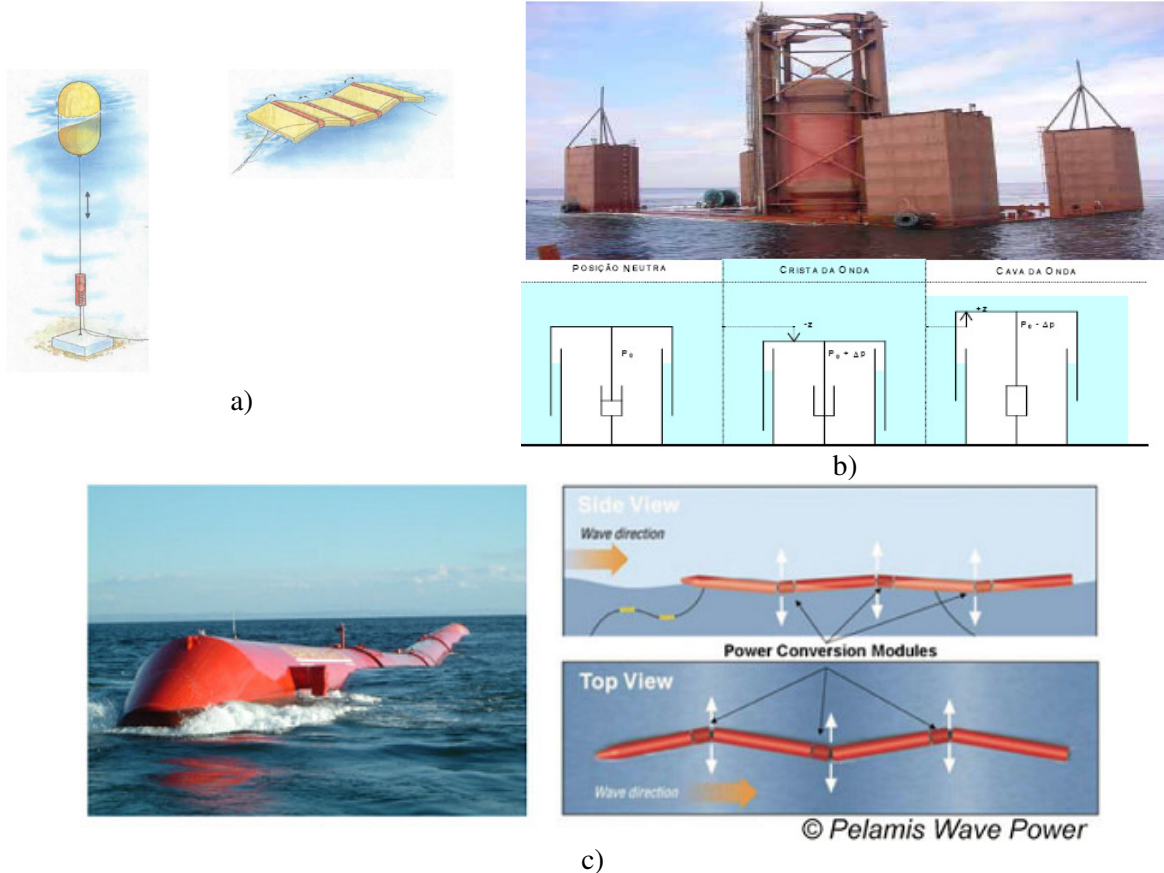


Figura 11: Alguns exemplos de conversores por coluna oscilante; a) ;b) AWS; c) Pelamis.

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 idéia básica desse método é semelhante a 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.

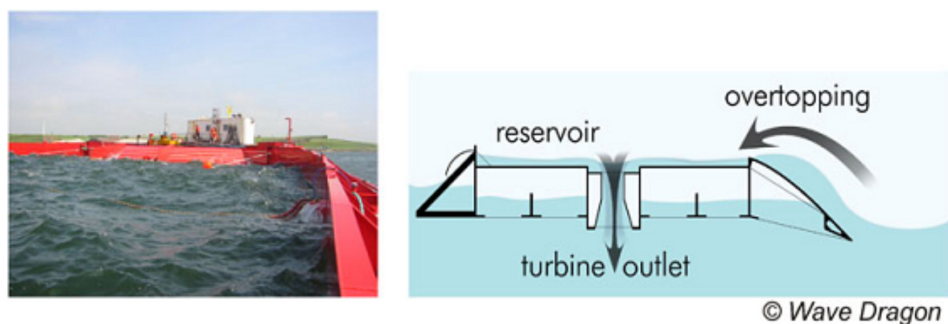


Figura 12: Exemplo de conversor por transbordamento.

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 pelo 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 piloto 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 exemplifica alguns exemplos), assim causando um circulação de ar o qual movimentará uma turbina que gire no 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.

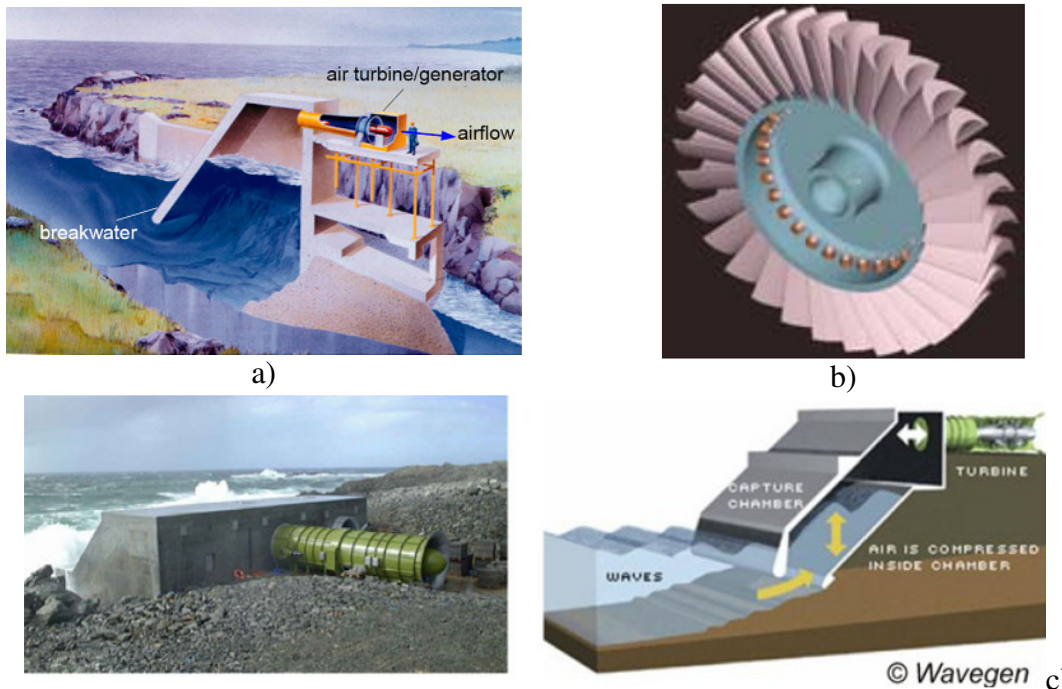


Figura 13: a) Exemplo de conversor acionado por coluna de água e ar; b) Turbina Wells; c) LIMPET conversor instalado na ilha Isle, Escócia.

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 próximo à costa ou alto mar, facilidade de montagem, manutenção e transporte. Além da robustez e confiabilidade garantidos 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 composto 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 um ilustração do protótipo escolhido.

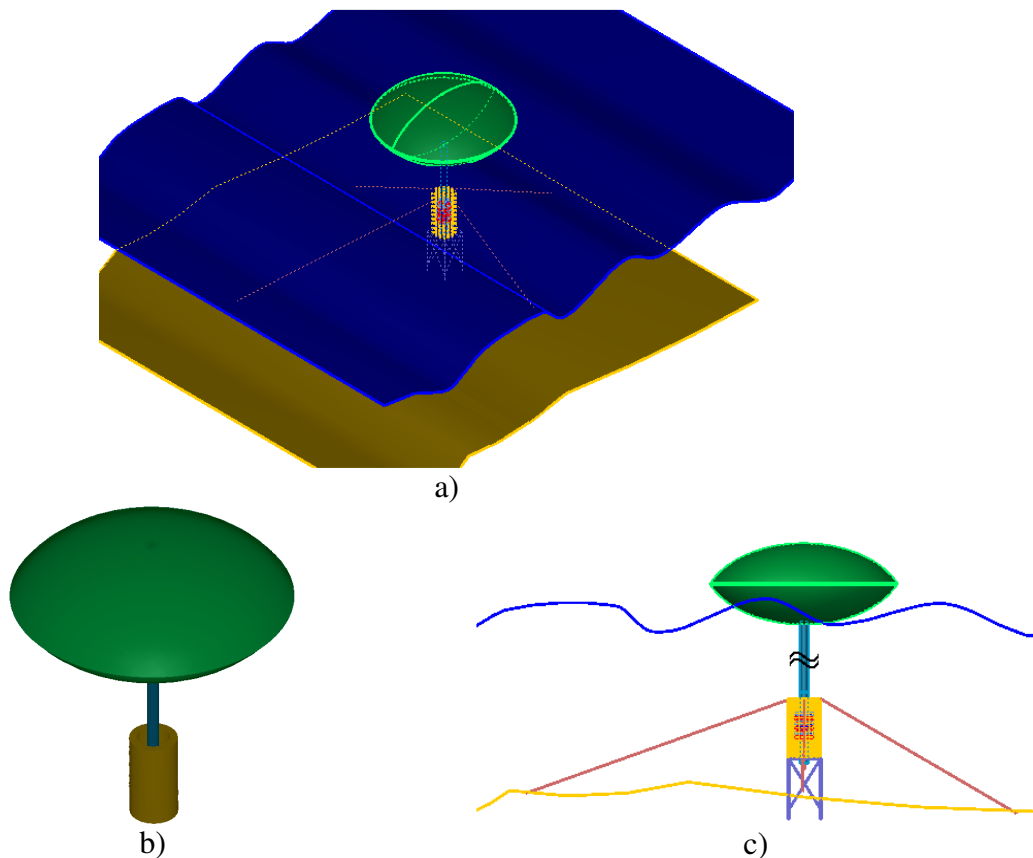


Figura 14: a) Vista do flutuador e do gerador em perspectiva no mar; b) Vista do flutuador e gerador em perspectiva; c) Perfil da instalação do Flutuador e gerador.

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.

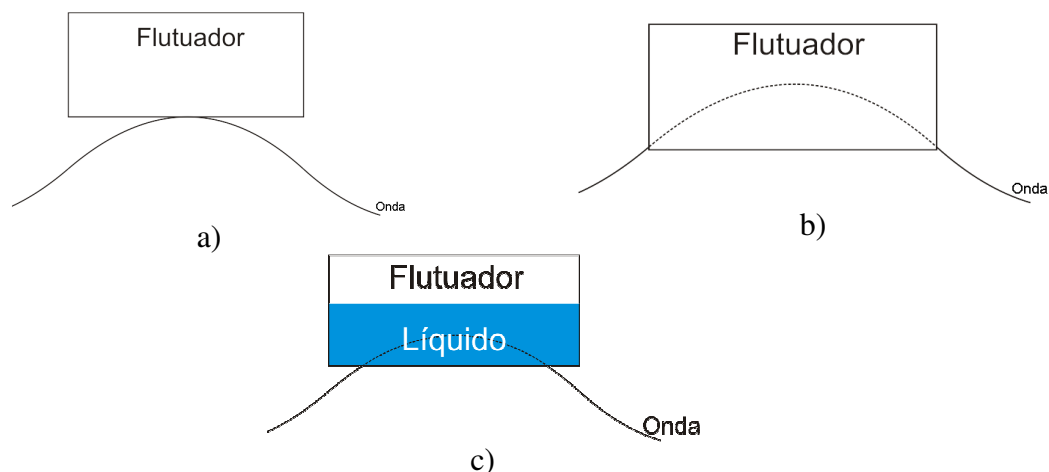


Figura 15: a) Flutuador não submerso; b) flutuador semi-submerso; c) flutuador com líquido.

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.

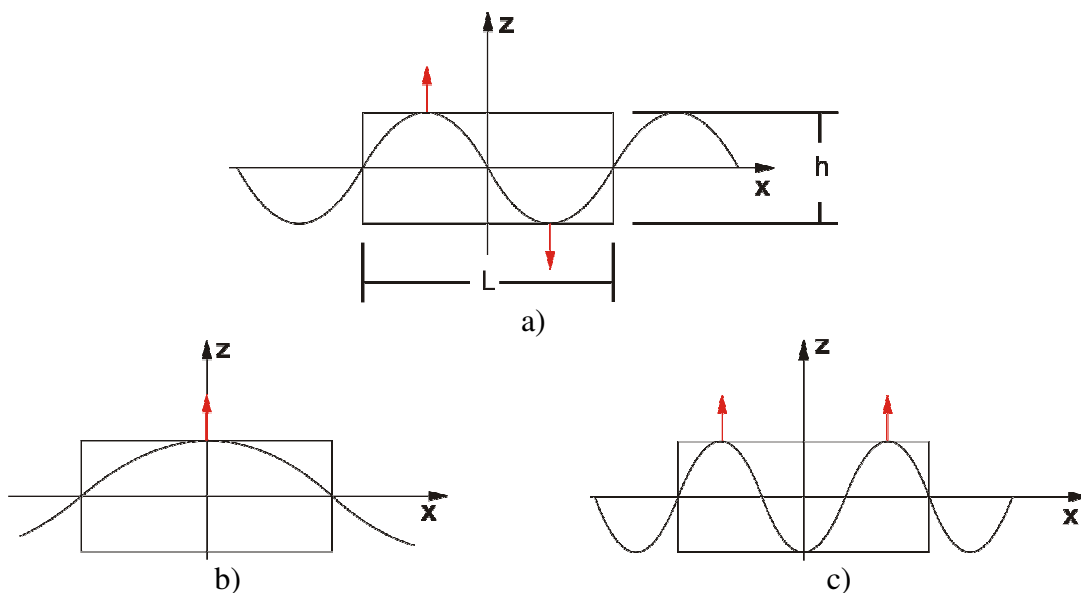


Figura 16: a) Comprimento de onda exatamente do tamanho do Flutuador; b) Flutuador com metade do valor de comprimento de onda, caso ideal; C) flutuador com $1,5\lambda$.

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^2];

$P_{flutuador} \equiv$ potencia transferida ao flutuador [W];

$L_{flutuador} \equiv$ comprimento do flutador [m];

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.

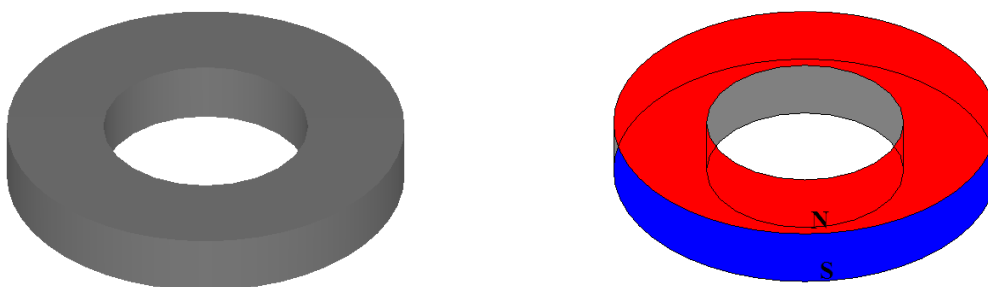


Figura 17: Ímã permanente axial utilizado para a construção do translador.

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

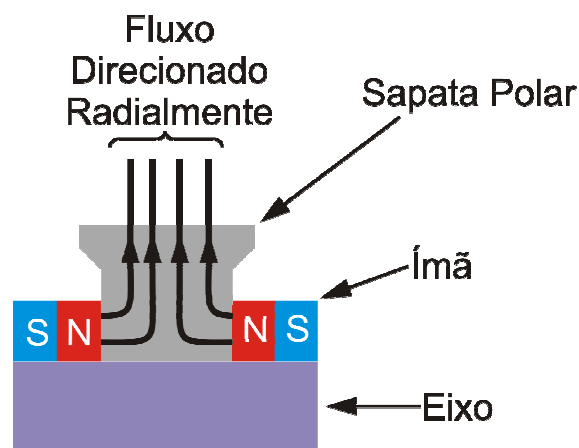


Figura 18: Direcionamento radial do fluxo utilizando as sapatas polares.

Sabe-se que a máquina rotativa para conversão de movimentos com frequência e amplitude variada 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 o monofásico o 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 translador. A Figura 19 é um esboço do protótipo.

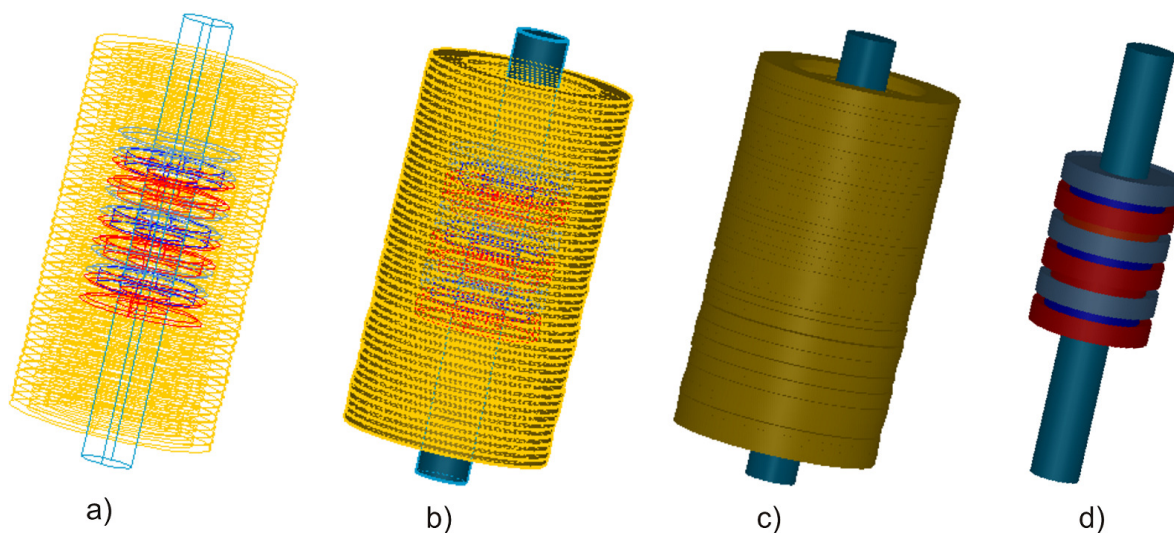


Figura 19: a) Visão interna do gerador detalhada; b) Visão renderizada do translador; c) Visão isométrica do Gerador; d) Visão do translador em perspectiva.

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 circuitação 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. [Basak, A,1996].

A máquina linear é caracterizada como qualquer outra máquina elétrica pelas Leis elementares de eletricidade e eletromagnetismo que relaciona grandezas elétricas, magnéticas e mecânicas [Basak, A,1996].

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.

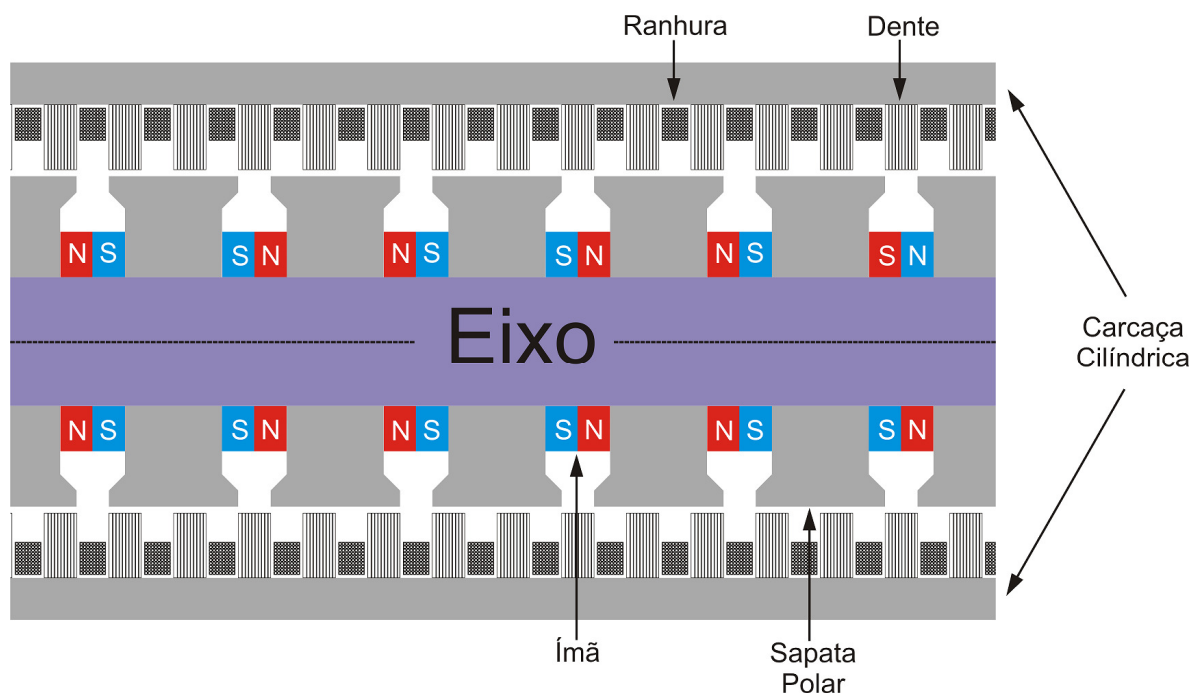


Figura 20: Corte transversal do estator (Ranhuras, dentes e a carcaça cilíndrica) e do transladador (ímãs, sapatas polares e eixo).

9.2 Corte transversal do Gerador Linear

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

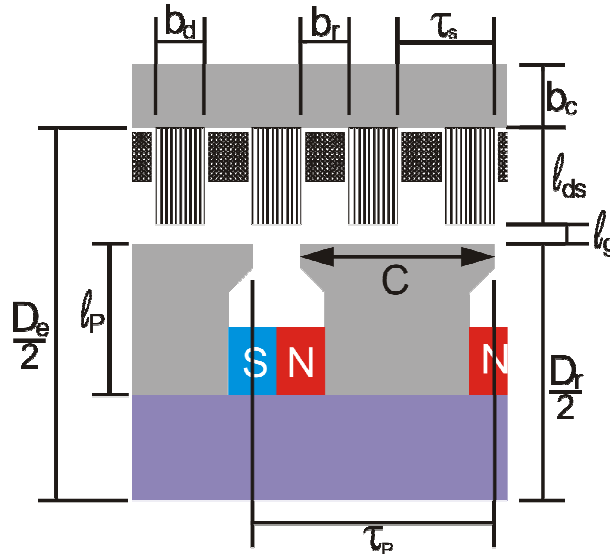


Figura 21: Corte transversal com as definições dos parâmetros do gerador linear.

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]

τ_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 γ .

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

onde γ 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:

τ_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.

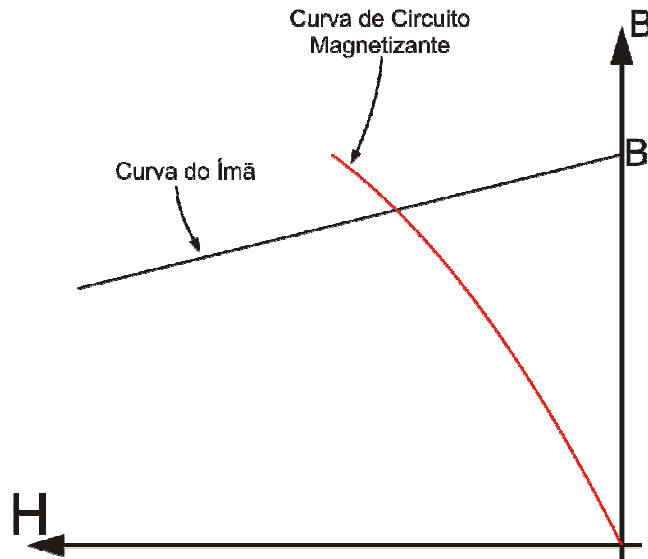


Figura 22: Note que para cada indução de campo imposta tem-se um valor na Curva de circuito magnetizante (em vermelho), logo para um melhor dimensionamento dever-se-á calcular para vários a fim de levantar uma regressão linear.

9.3.1 Campo magnético de referência

Impõem-se uma indução de referência no entreferro de:

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

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]

k_F = Fator de forma

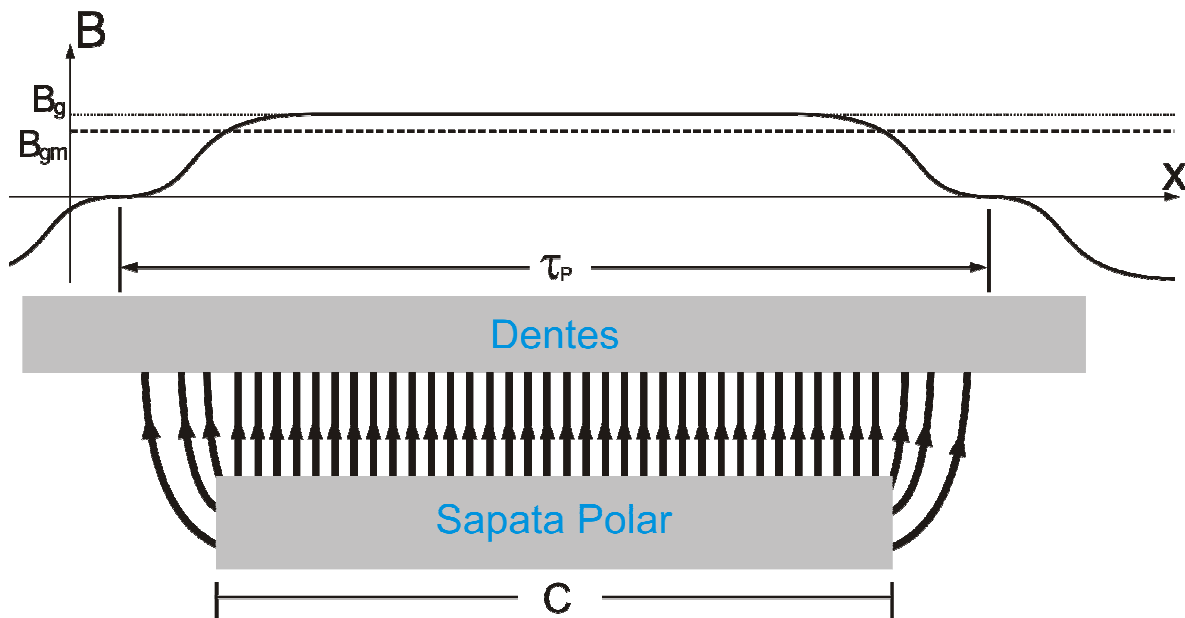


Figura 23: Campo magnético médio para $B_{gref} = 0,6 [T]$, observe que o Fator de forma implica em uma superfície de dentes contínua sem ranhuras.

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.

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

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 [m²]

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 esse 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 espraiamento deve-se corrigir a superfície do dente essa correção se faz a 1/3 do comprimento do dente.

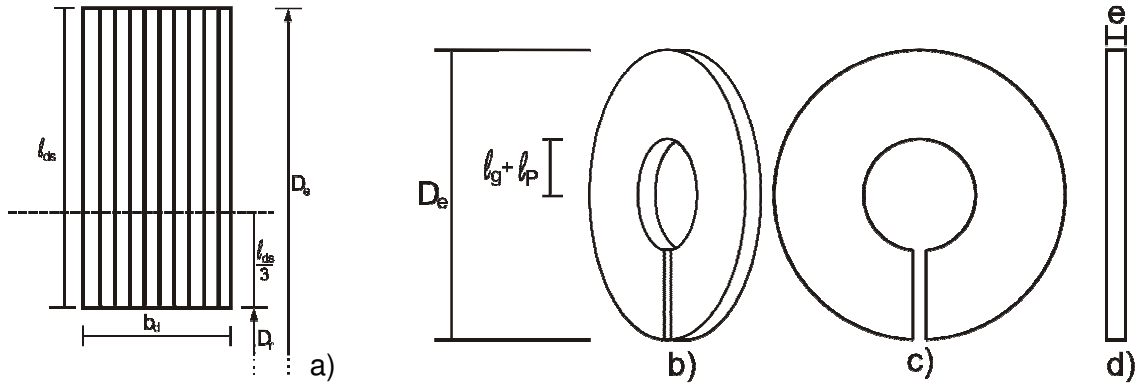


Figura 24: Dente do estator em detalhes note que o dente é composto por lâminas (deve-se atentar que essas lâminas não se fecham formando um anel, isso provocaria um campo induzido o qual causaria perdas por Foucault).

Para calcular o B_{ds} , deve-se considerar o número de dentes por pólo, a equação (9.8) demonstra matematicamente esse cálculo.

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

onde $Sd_{s1/3}$ é calculado de acordo com a correção do espraimento.

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

onde:

k_e = Fator de empacotamento

b_d = espessura do dente

lds = altura do dente

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

$$B_{cs} = \frac{\phi_{pref}}{\pi \cdot D_e \cdot b_{cs}} [T], \quad (9.10)$$

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.

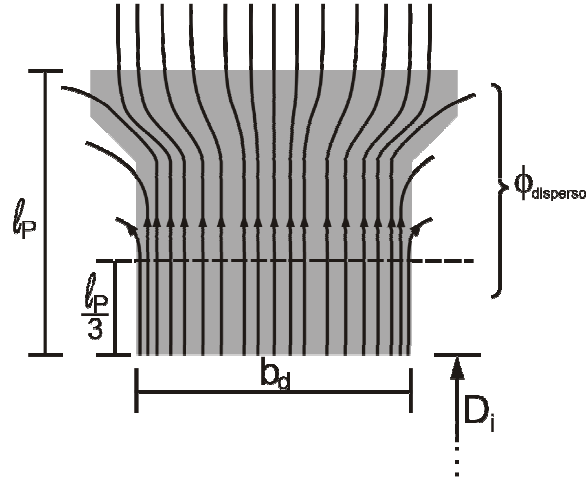


Figura 25: Sapata Polar em detalhes, note que há dispersão de fluxo.

De acordo com a Figura 25, aproximamos a trajetória do fluxo ao comprimento l_p , essa simplificação resultará na equação (9.11). Note que há dispersão de fluxo logo se deve impor um Fator de dispersão de 1,2.

$$B_p \cong \frac{\phi_{pref} \cdot k_d}{S_p} [T] \quad (9.11)$$

onde:

k_d = fator de dispersão

S_p = Superfície Polar

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

$$S_p = \pi \cdot \left(D_i + \frac{2}{3} \cdot l_p \right) \cdot b_p \quad (9.12)$$

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

$$B_{ímã} \cong \frac{\frac{1}{2} \cdot \phi_{pref} \cdot k_d}{S_{ímã}} [T] \quad (9.13)$$

onde:

$$S_{ímã} \cong S_p$$

9.3.4 FORÇAS MAGNETO-MOTRIZ 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 (9.14).

$$F_g = \frac{B_{gref}}{\mu_o} \cdot l_g \cdot k_c \text{ [A/m]} \quad (9.14)$$

onde:

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

-Força Magneto-motriz no estator

Após os cálculos dos Campos Magnéticos B_{ds} e B_{cs} pelas equações (9.9) e (9.10) 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, assim temos a força magneto-motriz requerida no estator. Portanto, F_{ds} e F_{cs} podem ser equacionadas de acordo com (9.15) e (9.16) respectivamente.

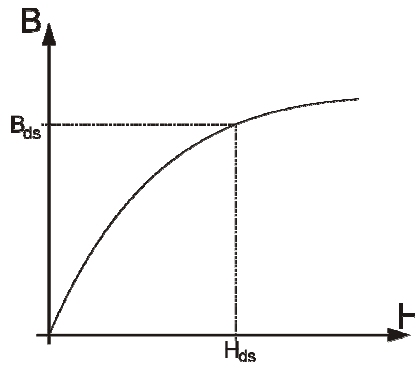


Figura 26: Curva de magnetização $B \times H$

$$F_{ds} = H_{ds} \cdot l_{ds} \text{ [A/m]} \quad (9.15)$$

$$F_{cs} = H_{cs} \cdot l_{cs} \text{ [A/m]} \quad (9.16)$$

-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:

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

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

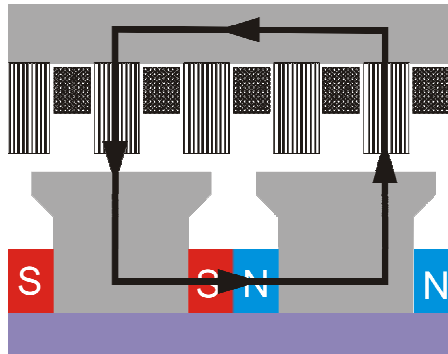


Figura 27: Fluxo magnético entre as sapatas polares

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

Referindo ao ímã permanente:

$$H_{ímã} = \frac{F_{TOTAL}}{l_{ímã}} \quad (9.19)$$

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

A coordenação é efetuado 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. Através do valor de $H_{ímã}$ 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}).

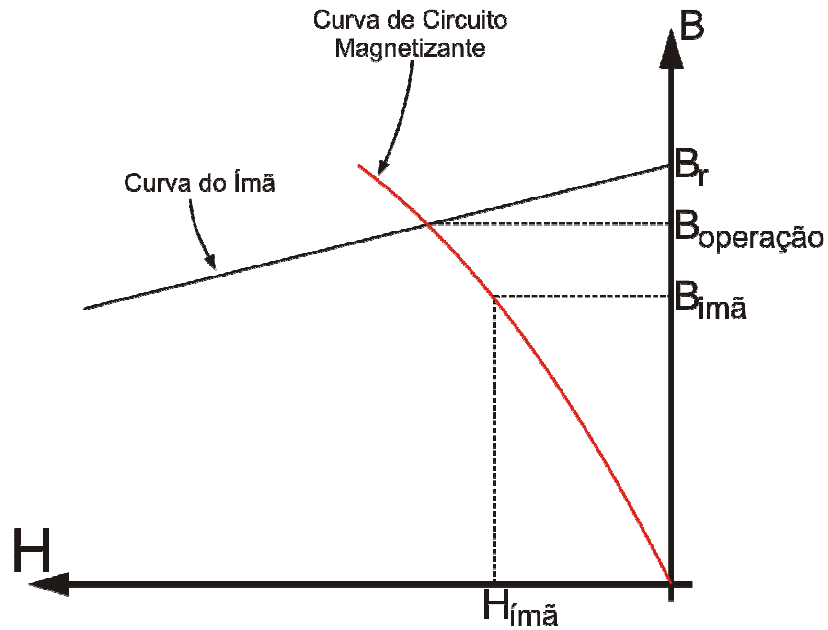


Figura 28: Note que para $B_{g,ref}$ de 0,6T o ponto na curva de circuito magnetizante do ímã ($B_{ímã}$) fica aquém do ponto de operação.

Para uma adequação ao projeto será necessário corrigir o entreferro (l_g), conseqüentemente será necessário corrigir o campo magnético segundo a equação (9.20).

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

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

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

Logo, a tensão eficaz induzida nos terminais do estator é:

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

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.

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

onde:

- $x(t)$ = posição vertical do transladador [m]
- $H/2$ = amplitude da onda [m]
- Ω = velocidade angular do transladador [rad/s]
- α = ângulo de defasagem [rad]

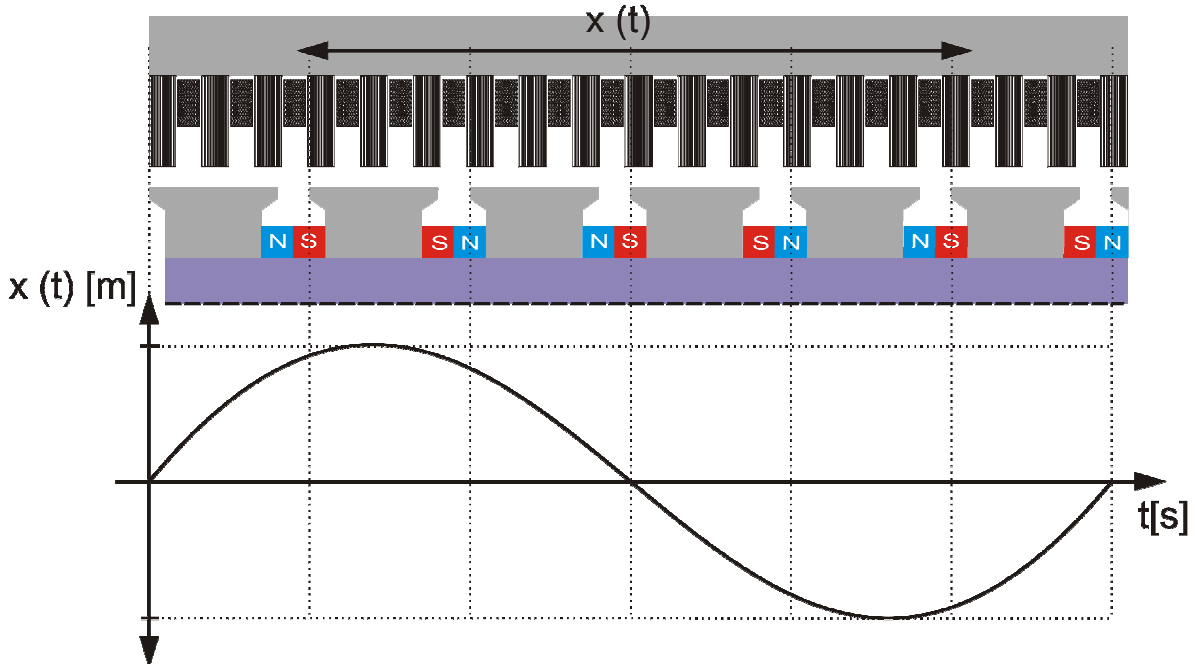


Figura 29: Observe que o transladador apenas converte o movimento vertical da onda.

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

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

onde:

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

Derivando a equação (9.23) no tempo, obtém-se a velocidade do translador.

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

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

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

onde:

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

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

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

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

onde:

$$\Omega = \text{velocidade angular do translador} \quad [\text{rad/s}]$$

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

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

onde:

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

Note que os ângulos de defasagens α e γ são arbitrários e serão adotados como zero.

A tensão induzida ou força eletromotriz induzida é obtida através da Lei de Faraday.

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

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).

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

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

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

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

onde a tensão induzida varia a freqüência, esta parcela causará o aparecimento de harmônicas de freqüências.

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

Para analisarmos as amplitudes e freqüências 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 $\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \phi_{pop} \cdot \cos(\Omega \cdot t + \alpha)$
 $sen(\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot sen(\Omega \cdot t + \alpha) \cdot t + \gamma)$ 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.

10. RETIFICADOR

A tensão eficaz nos terminais da máquina linear para uma faixa de frequências das ondas do mar é de acordo com o fluxo induzido pelo imã permanente do transladador da máquina linear, essa tensão é dada pela equação (9.22).

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

De acordo com os estudos levantados nos itens anteriores podemos assumir que a tensão nos terminais do gerador terá um perfil senoidal com conteúdo harmônico causado pelas geometrias e dimensões dos dentes e da sapa polar, nota-se que o passo da sapata polar e os dentes provêm da passagem do fluxo que induzirá tensão nas bobinas, assim temos uma frequência por pólo relacionada com a frequência do gerador de acordo com a equação (10.1):

$$f_{gerador} = \frac{f_{pólo}}{p} \quad (10.1)$$

onde:

p = par de pólos

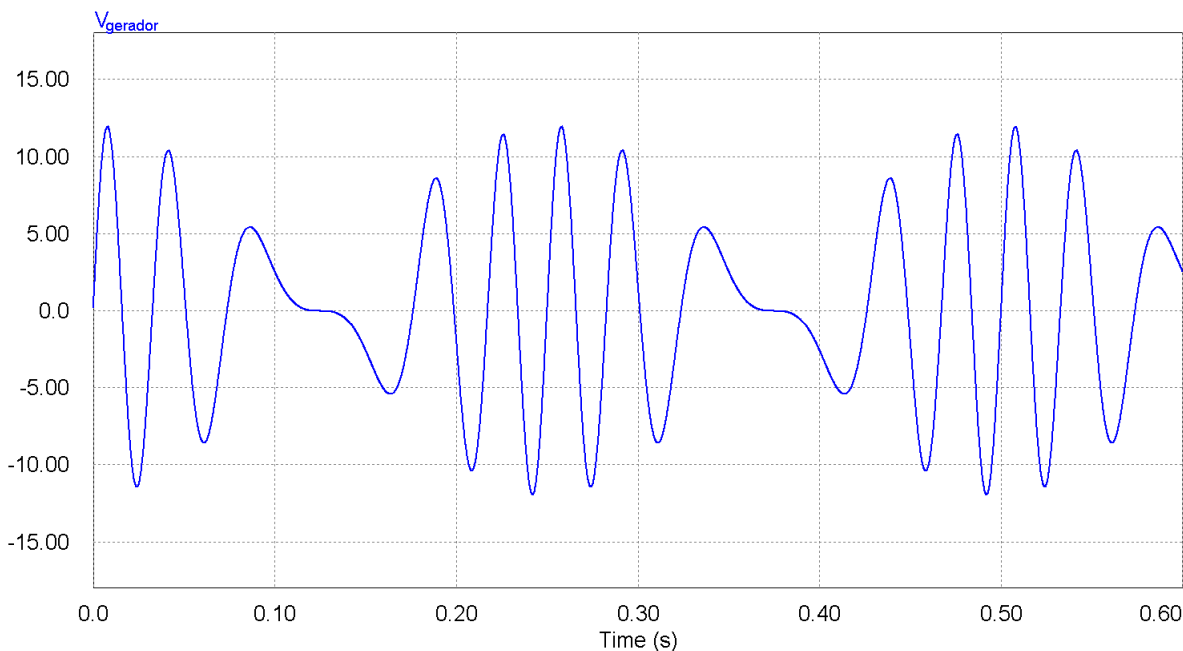


Figura 29: Tensão fornecida nos terminais do gerador linear (Capítulo 11, Figura 33)

Outra característica da tensão gerada nos terminais em função da onda do mar é a variação da frequência, porém para fins de projeto utiliza-se o critério de análise harmônica

levando em conta a variação de frequência em uma faixa de maior ocorrência em uma dada região onde será instalado o protótipo.

Devido à frequência variável da tensão obtida nos terminais do gerador linear, deverá ser construído um retificador de onda completa com filtro capacitivo para podermos aproveitar melhor a conversão de energia numa faixa maior de frequência. Há outro aspecto positivo na retificação da tensão, o transporte de energia a longa distância possui um desempenho melhor quando feito em tensão CC, isso se deve ao efeito corona no caso de transporte de energia em tensão CA em altas tensões. Deve-se analisar também que o transporte de tensão CC utiliza menos condutores, isso diminui o custo, pois condutores submarinos possuem elevado custo devido ao seu isolamento, a Figura 30 apresenta o esquema elétrico do retificador proposto.

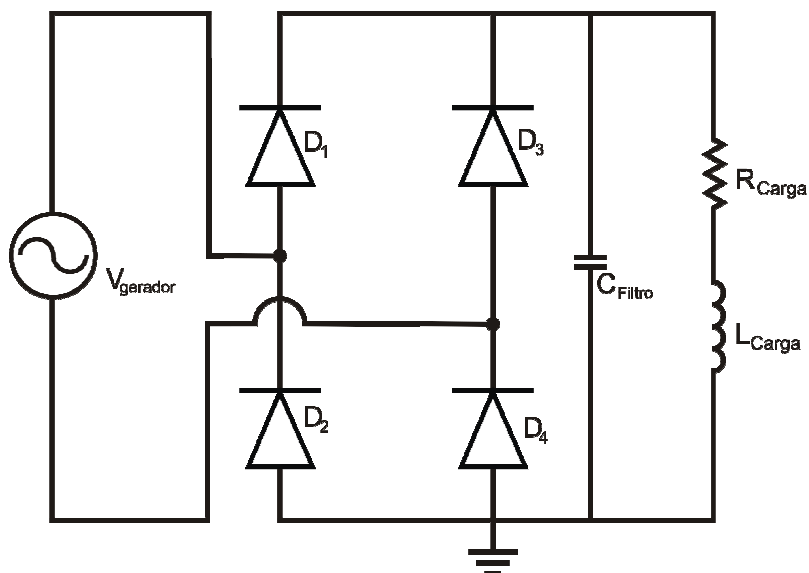


Figura 30: Circuito retificador de diodos de onda completa com filtro capacitivo.

11. Simulação

As simulações necessárias desse projeto terão como software a versão PSIM Demo (<http://www.powersimtech.com/download.html>).

Para fins de simulação utilizaremos os seguintes valores:

Tabela 1: Valores adotados para simulação.

Tensão de pico	V_{pico}	12	V
Amplitude de onda	H	20	cm
Passo polar	τ_p	4	cm
Período	T	0,5	s
Velocidade de onda	v	1	m/s
Par de pólos	p	6	
Carga Resistiva	R_{carga}	5	Ω
Capacitor	C_f	22000	mF
Potência	P_{ot}	30	W

O cálculo da frequência de onda pode ser equacionado por (5.1).

$$f_{\text{onda}} = 1/T = 1/0,5 = 2 \text{ [Hz]}$$

Logo, utilizaremos o gerador de funções para simular a tensão fornecida pelo gerador linear. A equação (11.1) é uma simplificação da equação (9.30), onde α e γ são postos como zeros e as demais variáveis são substituídos pelos valores da **Tabela 1**.

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

onde $N \cdot \left[\frac{2 \cdot \pi}{\tau_p} \cdot \frac{H}{2} \cdot \phi_{\text{pop}} \right]$ é assumido como tensão de pico (12 volts de pico). Como o dimensionamento em escala diminuída não foi concluído a quantidade de espiras não pode ser estimada com precisão assim como ϕ_{pop} também será impreciso.

$$V_{\text{gerador}} = 12 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{onda}} \cdot t) \cdot \text{sen} \left[\frac{\pi \cdot H}{\tau_p} \cdot \text{sen}(2 \cdot \pi \cdot f_{\text{onda}} \cdot t) \right] \quad (11.1)$$

11.1 Tensão do gerador

Nessa primeira etapa de simulação analisaremos o comportamento da tensão para diversas frequências de onda, a Figura 31 ilustra a tensão simulada da equação (11.1)

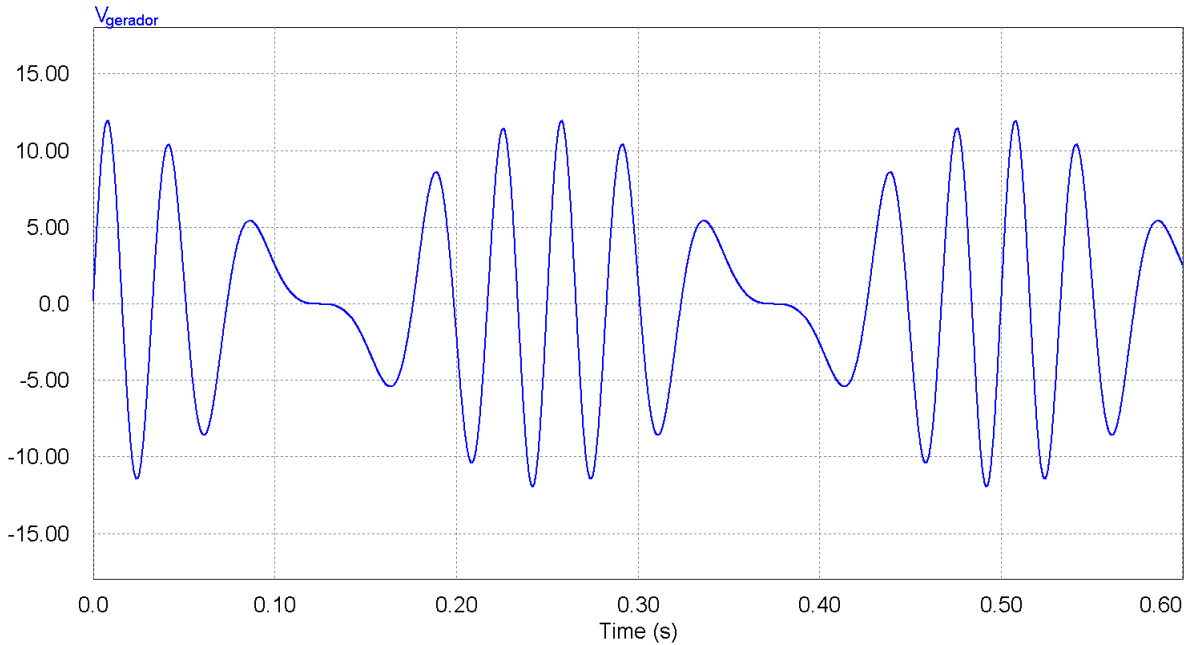


Figura 31: Tensão fornecida pelo gerador linear para os valores adotados na Tabela 1.

Para um estudo com maior detalhamento utilizaremos a análise de Fourier para estimar a significância dos harmônicos, na Figura 32 pode-se observar a FFT.

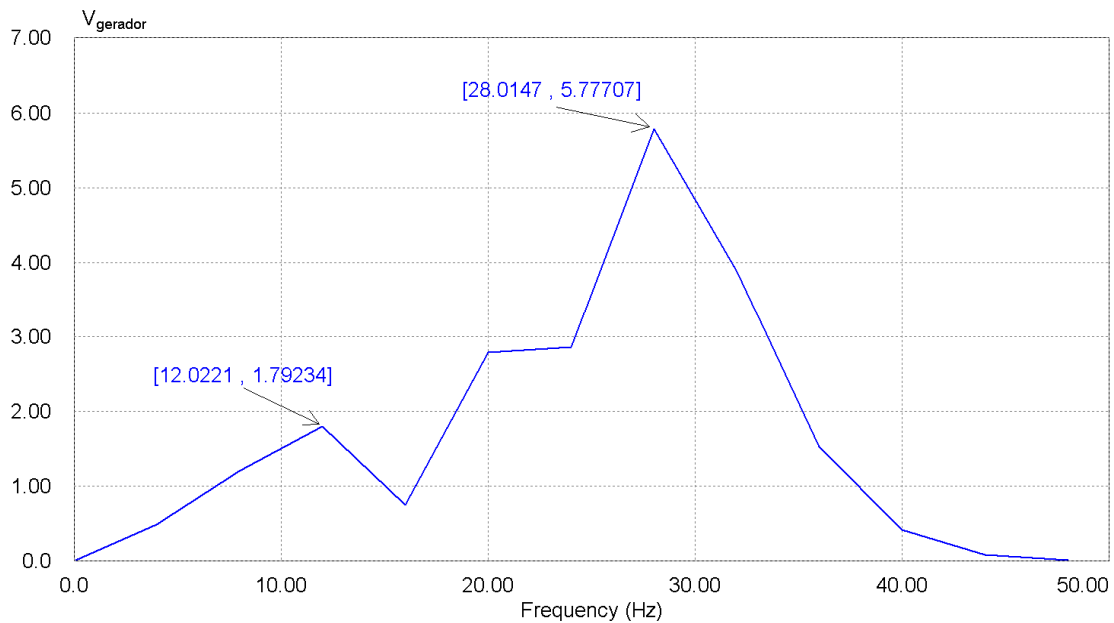


Figura 32: Espectros da tensão induzida através da FFT do PSIM em diversas frequências (resposta discreta em frequência).

Com base na simulação da tensão induzida temos como verificar o comportamento da tensão no espectro da frequência e estudarmos o comportamento dinâmico em diversas frequências de operação. Outra observação é em relação à amplitude das harmônicas com a harmônica fundamental. A Figura 33 apresentará uma comparação da tensão V_{gerador} em função da frequência de onda e a Figura 34 apresentará o FFT, ambas as figuras com frequência de onda variando entre 1 Hz e 5 Hz.

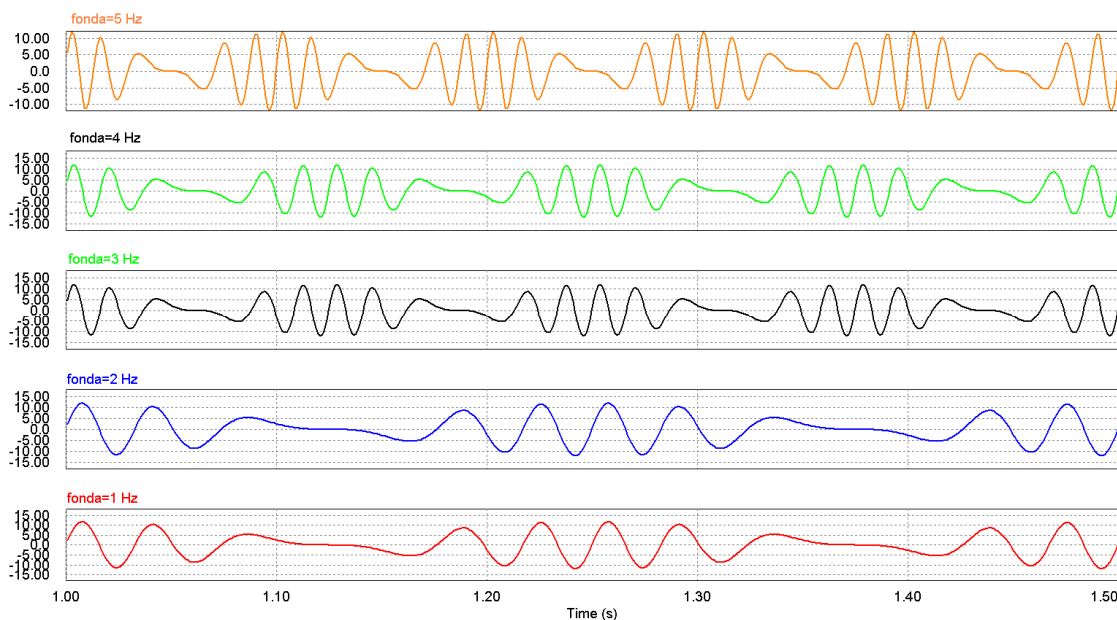


Figura 33: Observe que ao aumentar a frequência da onda o período da tensão V_{gerador} diminui.

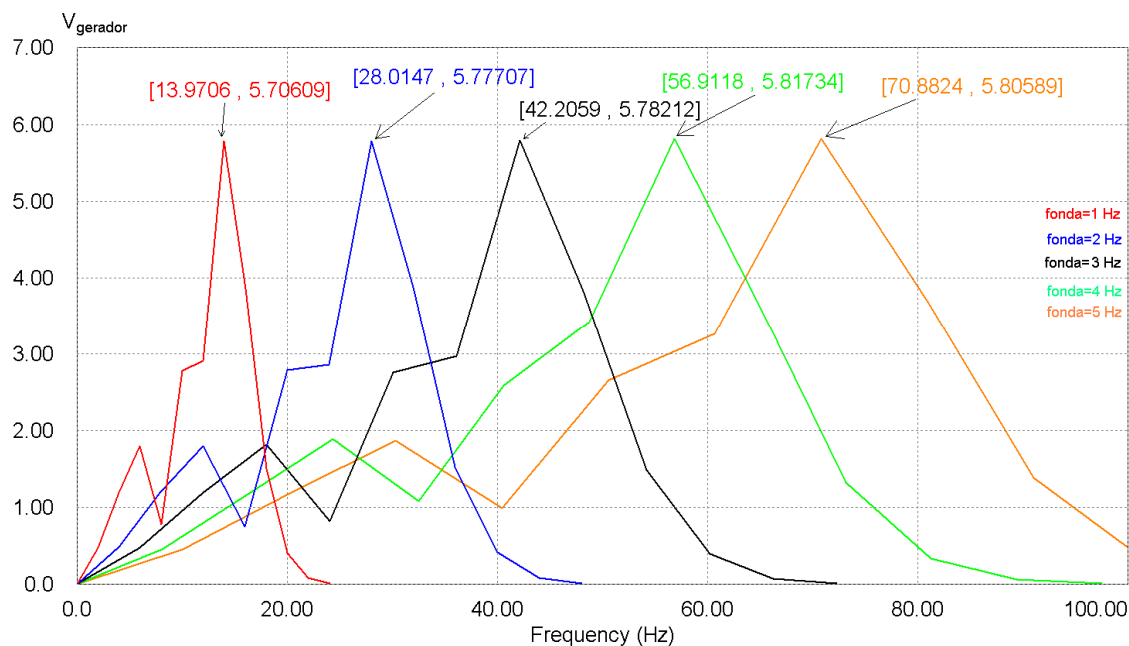


Figura 34: Note que de acordo com as tensões da Figura 33, o espectro de harmônicas se mantém inalterado, porém sua frequência aumenta de acordo com o aumento da frequência de onda. Nessa figura há apenas os valores de pico da fundamental.

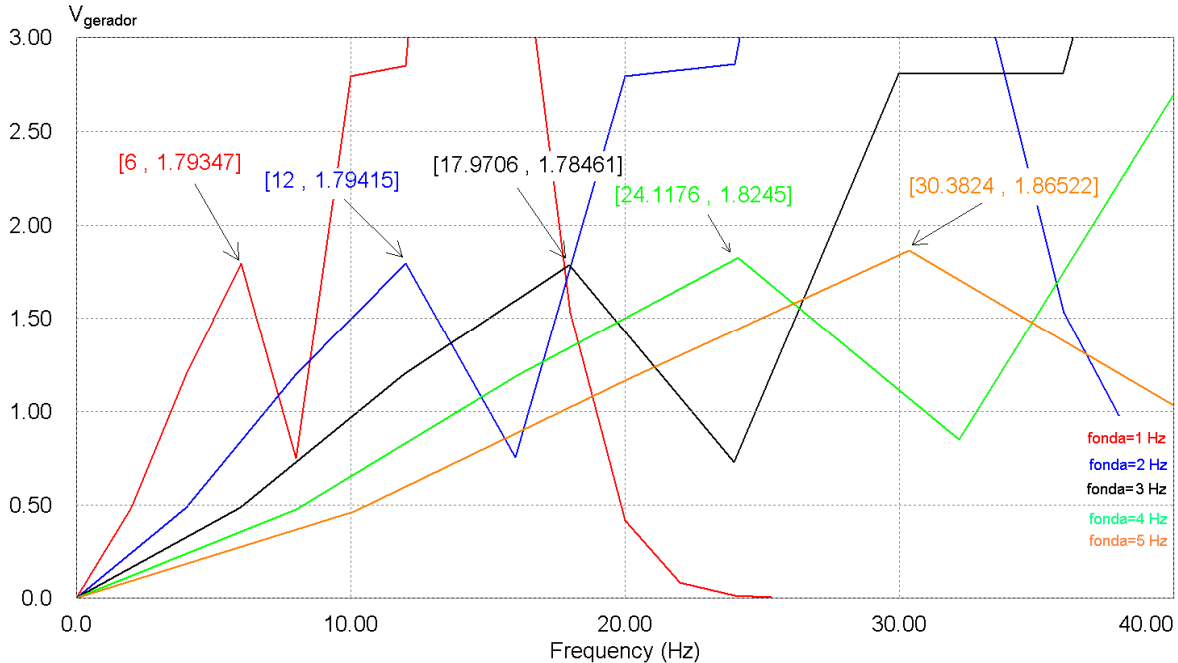


Figura 35: Essa figura expõe em detalhes a Figura 34, note que os valores de picos dos harmônicos aumentam de acordo com a frequência de onda, ou seja, analogamente aos valores de picos da fundamental.

Após a simulação podemos caracterizar os harmônicos contidos para cada frequência de onda, a tabela 2 apresenta os dados obtidos na simulação.

Tabela 2: Valores de frequências, amplitudes da fundamenta, amplitudes dos harmônicos e DTH.

Frequência da onda [Hz]	Magnitude Da Fundamental [V]	Frequência da fundamental [Hz]	Magnitude do Harmônico [V]	Frequência do Harmônico [Hz]	THD
1,0 Hz	5,70609	13,9706	1,79347	6,0	0,9540
2,0 Hz	5,77707	28,0147	1,79415	12,0	0,9550
3,0 Hz	5,78212	42,2059	1,78461	17,9706	0,9555
4,0 Hz	5,81734	56,9118	1,8245	24,1176	0,9542
5,0 Hz	5,80589	70,8824	1,86522	30,3824	0,9521

Pelos dados obtidos da simulação pode-se afirmar que o THD é constante para qualquer valor de frequência de onda, e, além disso, pode-se afirmar que a frequência da fundamental e do harmônico varia linearmente com a frequência de onda.

11.2 Tensão de Saída (V_{carga})

O circuito completo para simulação está ilustrado na Figura 36.

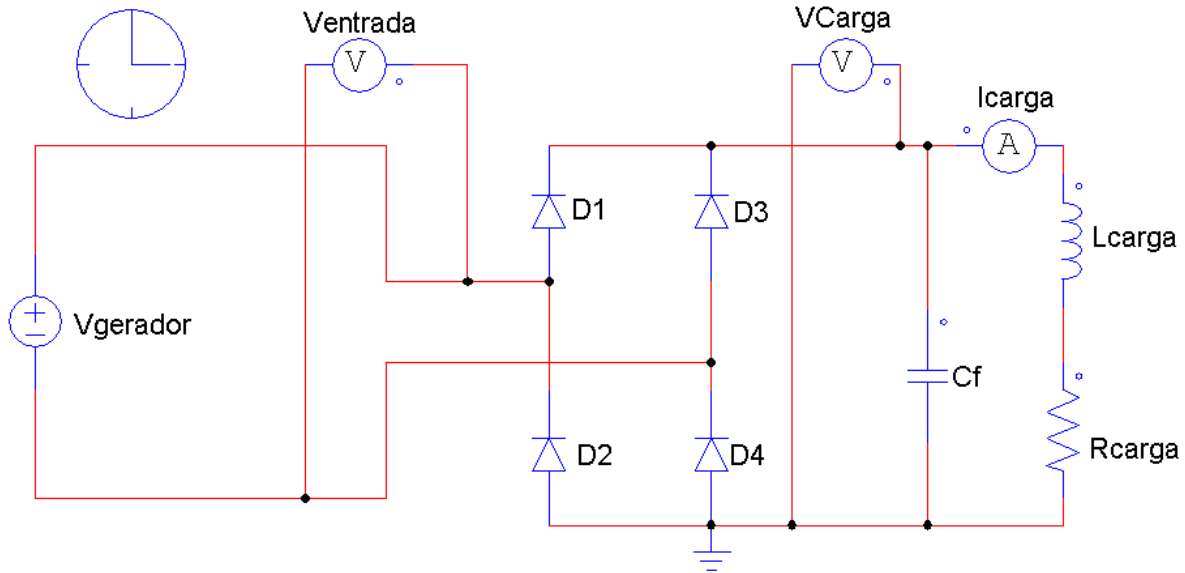


Figura 36: Esquema elétrico simulado no PSIM.

O circuito retificador de onda completa com filtro capacitivo pode ser detalhada na Figura 37.

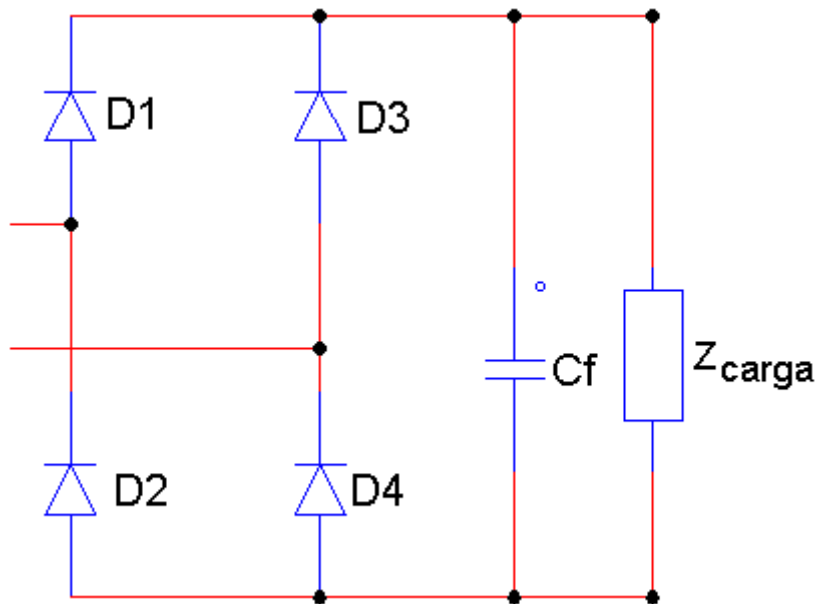


Figura 37: Circuito retificador de diodos de onda completa com filtro capacitivo

Para os valores definidos na **Tabela 1**, a tensão de carga obtida está representada na Figura 38.

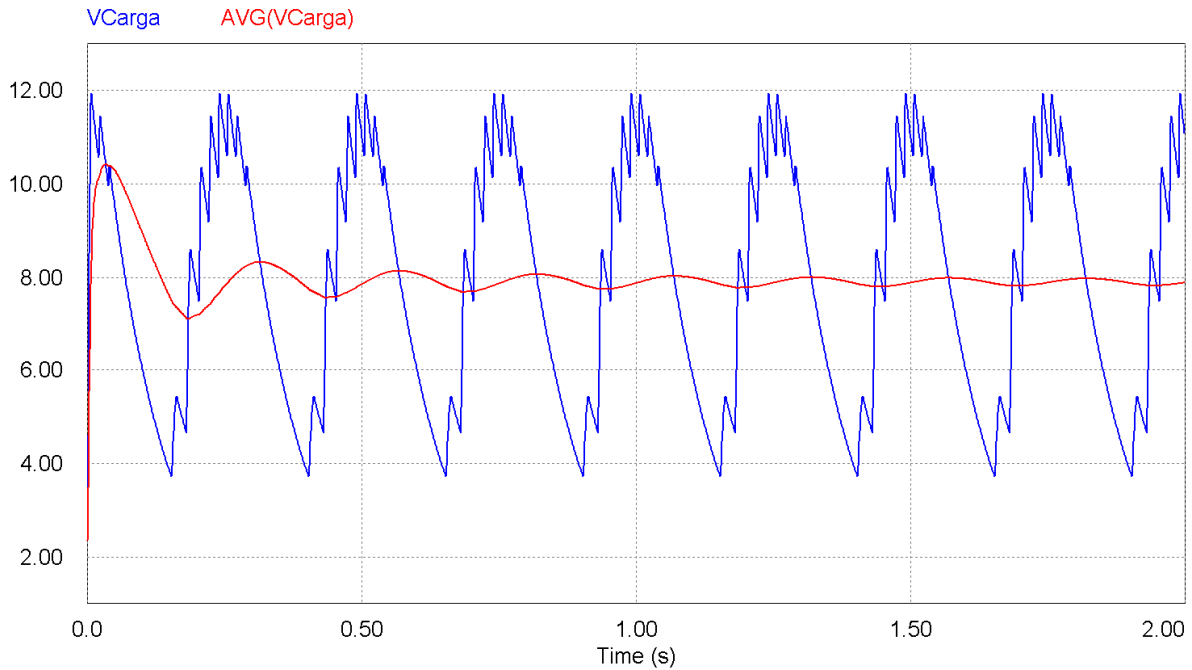


Figura 38: Oscilograma obtido de acordo com a Tabela 1, observa-se uma ondulação de certa de 8 volts, e um valor médio de 8 volts (traço vermelho).

Analogamente na simulação do gerador linear, a Figura 39 apresentará uma comparação das tensões de carga variando-se a frequência de onda de 1 Hz a 5 Hz.

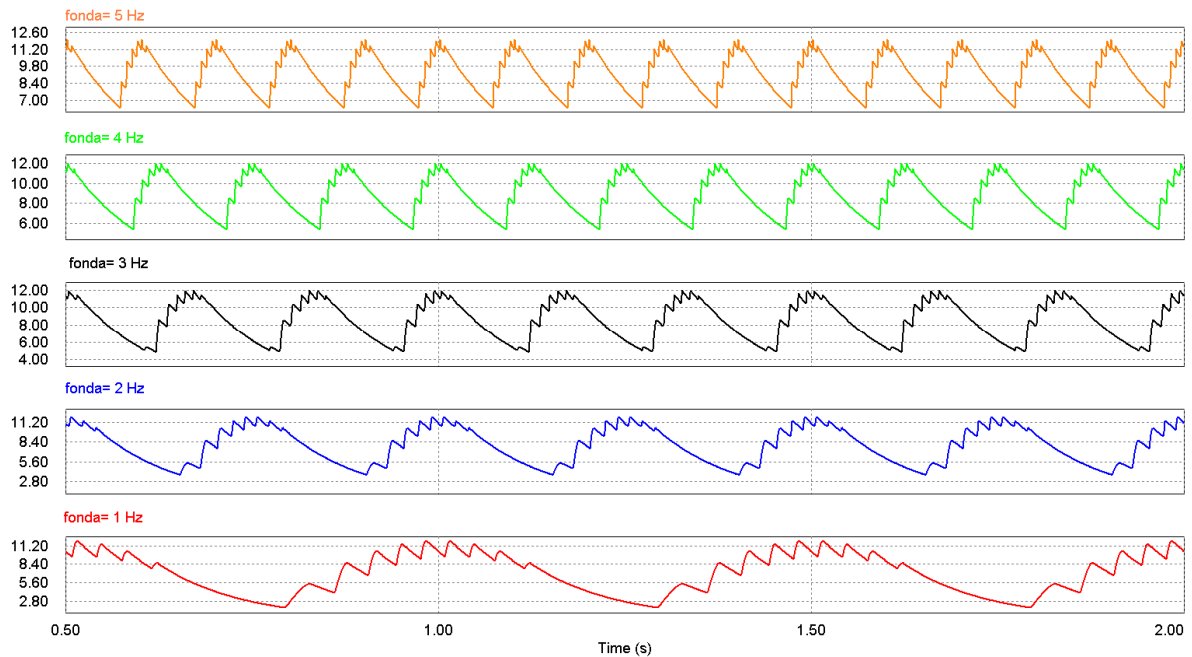


Figura 39: Tensão Retificada, note que a ondulação pode ser amenizada ao aumentar a frequência de onda.

A comparação dos valores médios das tensões de saída pode ser observada na Figura 40, devido a média os primeiros pontos devem ser descartados, portanto os valores confiáveis são a partir de 1 segundo.

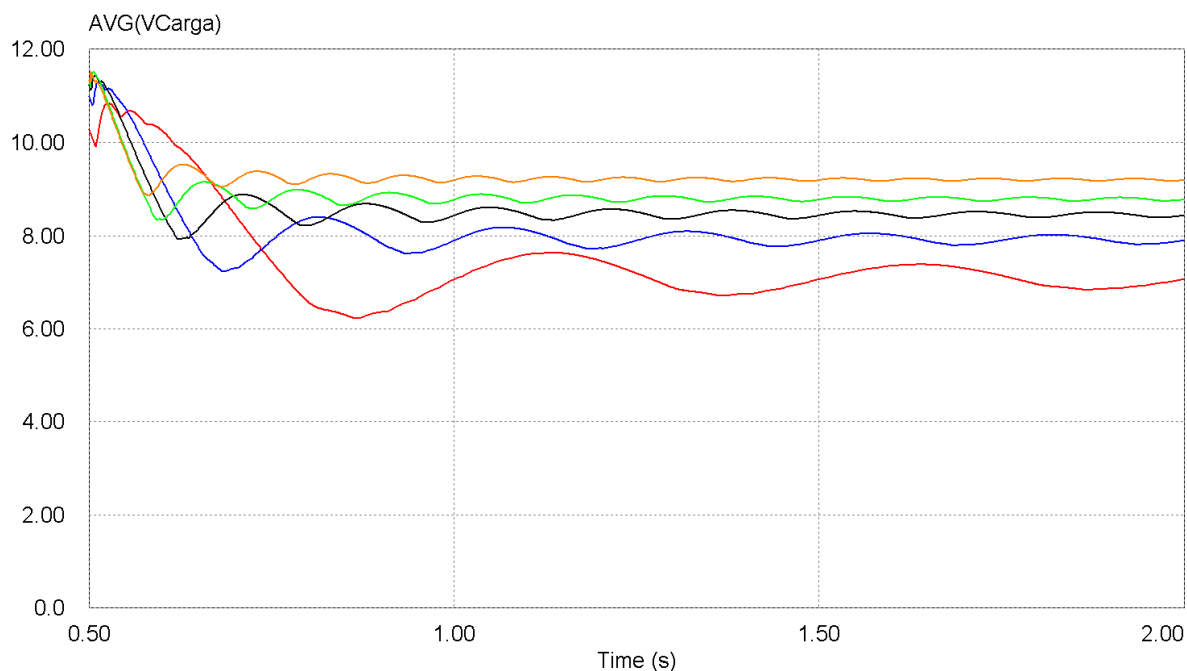


Figura 40: Comparação dos valores médios, como esperado o valor médio se elevada ao aumentar a frequência de onda.

Os valores das tensões médias de saída da simulação em frequência estão na Tabela 3, a potência fornecida pode ser calculada de acordo com a equação (11.2)

$$P_{ot} = \frac{V_{CC}^2}{R_{CARGA}}, \quad (11.2)$$

Tabela 3: Valores médios para cada frequência de onda

Frequência da onda [Hz]	V _{carga} [V]	Potência fornecida[W]
1,0 Hz	7,07298	10,0054
2,0 Hz	7,90284	12,4910
3,0 Hz	8,438645	14,2421
4,0 Hz	8,777695	15,4096
5,0 Hz	9,19425	16,9068

Através dos dados obtidos na simulação podemos afirmar que a tensão média na carga aumenta de acordo com a frequência de onda, já a ondulação é inversamente linear.

11.3 Capacitância de Filtro

Para essa etapa de simulação a capacitância de filtro será variada em: $4.700\mu\text{F}$, $10.000\mu\text{F}$, $22.000\mu\text{F}$, $39.000\mu\text{F}$, e $51.000\mu\text{F}$. Assumindo os valores da Tabela 1, obtém-se a Figura 41.

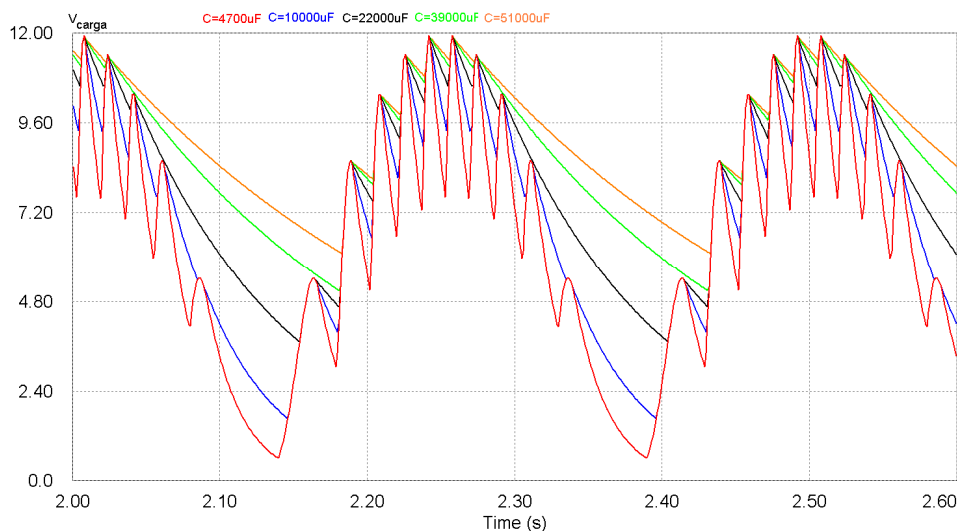


Figura 41: Tensão na carga variando o capacitor de filtro, carga resistiva de $5\ \Omega$ e frequência de onda de 2 Hz.

O uso do capacitor se deve para melhorar a ondulação de saída na Figura 41 é possível observar essa diminuição. Na Figura 42 observaremos a tensão média para os mesmo valores de capacitores.

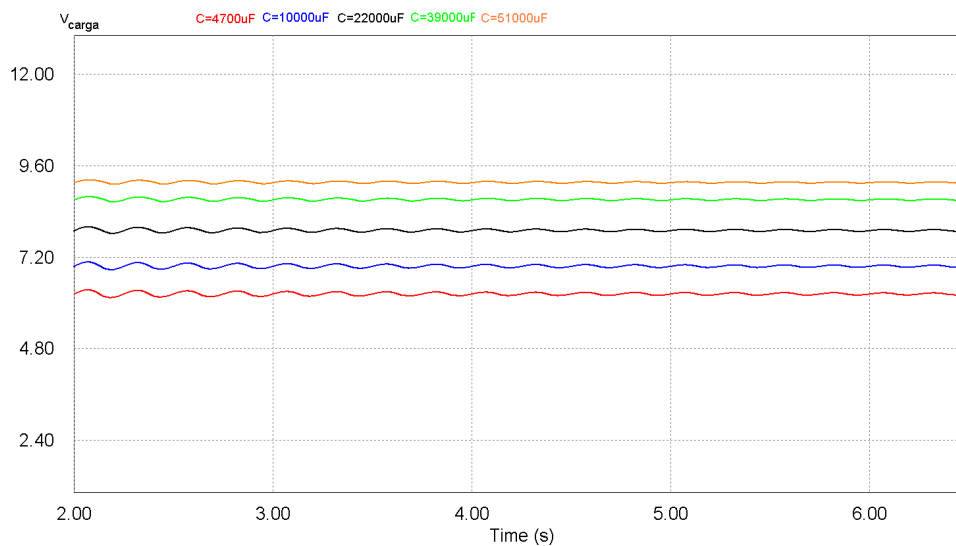


Figura 42: Tensões médias na carga para os de capacitância: 4700 uF (traço vermelho), 10000 uF (traço azul), 22000 uF (traço preto), 39000 uF (traço verde) e 51000 uF (traço laranja).

Os valores das tensões médias de saída da simulação variando o capacitor de filtro estão na Tabela 4, a potência fornecida pode ser calculada de acordo com a equação (11.2)

Tabela 4: Valores médios para cada frequência de onda

Capacitância [uF]	V _{carga} [V]	Potência fornecida[W]
4700	6,18962	7,6623
10000	6,94092	9,6353
22000	7,87958	12,4176
39000	8,69143	15,1082
51000	9,14461	16,7248

Nota-se que ao aumentar o capacitor de filtro a tensão na carga torna-se menos ondulada, aumentando o valor médio de saída e conseqüentemente aumentando a Potência fornecida.

11.4 Carga Resistiva

A carga resistiva implica diretamente na potência fornecida, equação (11.2), logo se aumentarmos a carga resistiva estaremos diminuindo a potência fornecida. Utilizaremos 5 valores de cargas resistivas: 1Ω, 3Ω, 5Ω, 7Ω e 10Ω.

$$P_{ot} = \frac{V_{CC}^2}{R_{CARGA}} \quad (11.2)$$

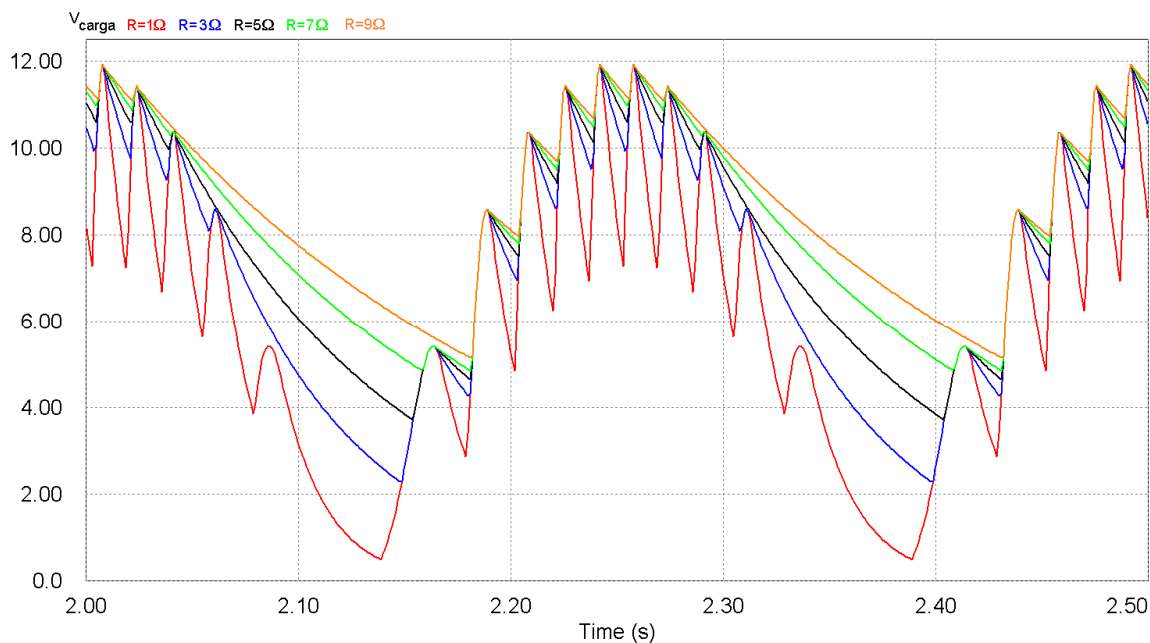


Figura 43: Observa-se que há uma melhora na ondulação diminuindo a carga resistiva.

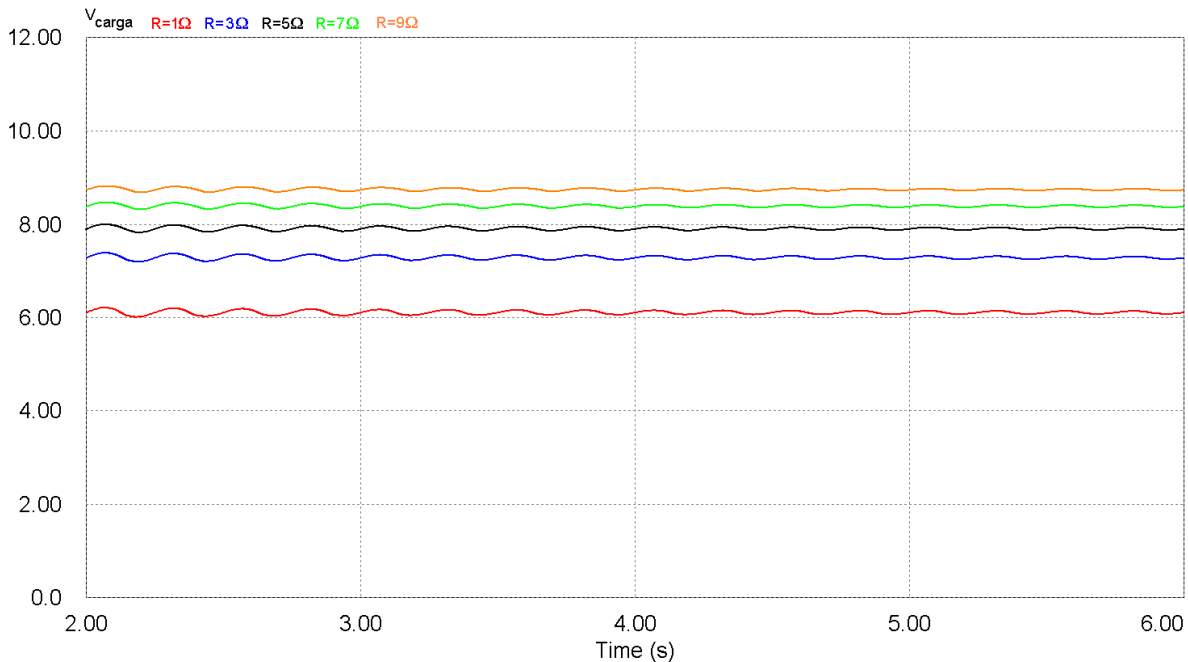


Figura 44: Tensões médias na carga para os valores de resistência de carga de 1Ω (traço vermelho), 3Ω (traço azul), 5Ω (traço preto), 7Ω (traço verde) e 10Ω (traço laranja).

Os valores das tensões médias de saída da simulação variando a carga resistiva estão na Tabela 5, a potência fornecida pode ser calculada de acordo com a equação (11.2)

Tabela 5: Valores médios para cada frequência de onda

Resistência de carga [Ω]	V_{carga} [V]	Potência fornecida[W]
1	6,08677	37,0488
3	7,26176	17,5777
5	7,88672	12,4401
7	8,3733	10,0160
9	8,73195	8,4719

De acordo com os valores de potencia obtidos pode-se afirmar que a variação da carga resistiva causa uma grande variação e, portanto deve ser tratada com muito rigor.

Através da simulação podemos definir dimensões da máquina, como a sapata polar ,o número de pólos, amplitude da onda, faixa de operação da máquina em frequência, e iterativamente aproximar e otimizar ao modelo físico e observar o comportamento da tensão nos terminais do gerador em diversas condições sem termos um modelo real implementado.

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, menores 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 translador 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 translador (fonte de indução) é direcionado radialmente utilizando-se discos de material ferromagnéticos entre ímãs instalados com mesmo pólo, 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 translador 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 adéquam as especificações do gerador, ou seja, será levantada a curva do circuito magnetizante e posteriormente o ponto de operação, vide Figura 28.

A onda do mar tem freqüências e amplitudes variadas, assim é necessário um estudo do comportamento dinâmico no tempo e freqüência, 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 freqüência em uma tensão DC (tensão de carga).

O processo de definição das dimensões e especificações do projeto será contemplada iterativamente, até convergir a uma solução final, a definição 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 da partes e montagem do gerador, estes últimos passos serão contemplados no relatório final. Todos os ensaios previstos no projeto serão realizados no tanque de provas da Engenharia Naval da Escola Politécnica da USP.

13. CRONOGRAMA

Devido às diversas tarefas programadas para esse semestre houve alguns atrasados referentes à definição do método de conversão, devido a complexidade do projeto foi necessário a adição da atividade Simulação, o qual culminou no atrasado da definição da metodologia já que não estava previsto.

Foi necessária uma readequação das Atividades do Cronograma visto que algumas das atividades são dependentes de resultados de outras, no caso da atividade “Definição das especificações e configuração do protótipo” foi necessário adiar, pois a “Simulação” não estava concluída e conseqüentemente as Atividades “Aquisição dos materiais para a implementação do protótipo” e “Montagem do protótipo” não puderam ser atendidas.

Um novo Cronograma é proposto para se adequar ao projeto e para as suas novas atividades, abaixo os “x” em vermelho são as atividades que foram adiadas.

Atividade	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
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					
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] – McCormick, M. E., Ocean Wave Energy Conversion, Editora Dover Edição
- [2] – Bent Sørensen: “Renewable Energy”, Elsevier Academic Press, 2004 Edition.
- [3] – Estefen, S., Status & Perspectives in Brazil, COPPE/UFRJ – Ocean Engineering Department, 2007
- [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] – Wikipédia: http://en.wikipedia.org/wiki/Wave_power