

Algumas considerações sobre a utilização de geradores lineares em sistemas de conversão de energia das ondas

Federico Bernardino Morante Trigo (UFABC) - federicoufabc@gmail.com

Rodrigo Garcia da Silva Viana (UFABC) - rodrigo.viana@ufabc.edu.br

Resumo:

O objetivo deste artigo é apresentar aspectos importantes relacionados com os fundamentos do gerador linear utilizado na conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica visando o aprimoramento da pesquisa relacionada com esse assunto no Brasil. Para tal será apresentada uma breve revisão da conversão de energia das ondas, indicando os diferentes sistemas propostos baseados em oscilação, com destaque para o gerador linear. Também são apresentados alguns problemas remanescentes identificados a partir de construção de plantas piloto, simulações, correlação entre os parâmetros medidos e calculados, comparação de desempenhos de controle para maximizar a produção de energia e possíveis soluções que precisam de mais pesquisas para investigar possibilidades de melhoria. Alguns autores sugerem que melhoria da eficiência pode ser obtida com o aumento da velocidade do movimento linear do conversor e com maiores densidades de força.

Palavras-chave: *Gerador Elétrico Linear, Conversão de Energia das Ondas, Arquimedes Wave Swing (AWS).*

Área temática: *Outras fontes renováveis de energia*

Subárea temática: *Marés, ondas e outras fontes renováveis*

ALGUMAS CONSIDERAÇÕES SOBRE A UTILIZAÇÃO DE GERADORES LINEARES EM SISTEMAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

Rodrigo Garcia da Silva Viana – rodrigo.viana@ufabc.edu.br

Federico Bernardino Morante Trigo – federico.trigo@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC – Programa de Pós-Graduação em Energia - Laboratório de Energias Renováveis

Av. dos Estados, 5001 – Santo André – São Paulo – SP – Brasil – CEP 09210-971

Tel.: +55 11 4996-0101

Resumo. O objetivo deste artigo é apresentar aspectos importantes relacionados com os fundamentos do gerador linear utilizado na conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica visando o aprimoramento da pesquisa relacionada com esse assunto no Brasil. Para tal será apresentada uma breve revisão da conversão de energia das ondas, indicando os diferentes sistemas propostos baseados em oscilação, com destaque para o gerador linear. Também são apresentados alguns problemas remanescentes identificados a partir de construção de plantas piloto, simulações, correlação entre os parâmetros medidos e calculados, comparação de desempenhos de controle para maximizar a produção de energia e possíveis soluções que precisam de mais pesquisas para investigar possibilidades de melhoria. Alguns autores sugerem que melhoria da eficiência pode ser obtida com o aumento da velocidade do movimento linear do conversor e com maiores densidades de força.

Palavras-chave: Gerador Elétrico Linear, Conversão de Energia das Ondas, Arquimedes Wave Swing (AWS).

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a demanda energética global cresceu de forma significativa. A tendência é aumentar ainda mais no futuro e, além disso, a produção de energia a partir de combustíveis fósseis está contribuindo para sérios problemas ambientais e sociais. No entanto, as fontes de energia renováveis devem ser consideradas alternativas válidas para a produção de energia. Entre as fontes de energia renovável que estão sendo exploradas atualmente, as ondas do mar estão recebendo maior atenção, pois representam uma potência global estimada de 1 TW e sua densidade de potência é maior que a dos ventos marítimos. Conforme exposto por Wu *et al.* (2008), o recurso no mundo é de 10 TW em alto mar, o que é comparável ao consumo total da energia mundial.

É possível converter parte da energia das ondas do mar em eletricidade. Vários dispositivos para esse fim, conhecidos como conversores de energia das ondas – *Wave Energy Converter* (WEC) estão em diferentes estágios de desenvolvimento. Diferentes dispositivos usam diferentes princípios de funcionamento (colunas de água oscilantes, dispositivos de sobreposição, corpos flutuantes, corpos oscilantes) e são projetados para diferentes tipos de locais (*on-shore*: em terra firme, *near shore*: perto da costa marítima, *off-shore*: em alto mar).

A conversão da energia das ondas em eletricidade pode ser realizada por diferentes meios. A produção de eletricidade dependerá da energia das ondas disponível no local de implantação, uma vez que as ondas não são apenas diferentes em regiões distintas, mas às vezes também mudam significativamente com distâncias curtas. Outro fator importante é a eficiência alcançada pelo WEC, no qual a modelagem e o controle desempenham um papel importante, conforme defendido por Valério *et al.* (2008).

Atualmente existem diversos sistemas para conversão de energia das ondas em energia elétrica. Estes são classificados de acordo com o princípio de funcionamento: a) Colunas de água oscilantes, que utilizam turbinas de ar, as quais acionam geradores rotativos; b) Dispositivos *Overtopping*, os quais têm turbinas hidráulicas que acionam geradores rotativos; c) Dispositivos articulados de contorno, que usam sistemas de tomada de potência hidráulica; d) Dispositivos atracados flutuantes, com sistemas geradores lineares em movimento vertical, conforme mencionado por Polinder (2007). Os sistemas com geradores lineares são úteis somente em aplicações onde o movimento é linear, Fig. 1. Porém, quando há movimento rotativo, não faz sentido convertê-lo em movimento linear.

Em dispositivos articulados, como por exemplo, o Pelamis, também utiliza um sistema linear de tomada de potência. No entanto, as pressões são extremamente grandes, enquanto a velocidade do movimento é baixa, na ordem de 0,1 m/s. Neste caso de baixa velocidade e alta pressão, os sistemas de força hidráulica são provavelmente mais adequados que os sistemas geradores lineares, conforme apresentado por Polinder (2007).

Conforme destacado por Bard e Kracht (2013), algumas características importantes dos geradores lineares são: a) Baixo investimento e baixo custo com operação e manutenção; b) Alta eficiência; c) Confiabilidade do sistema. No entanto, há controvérsias.

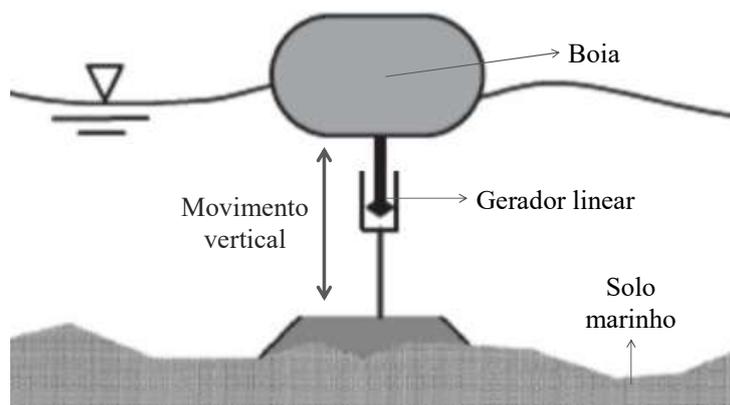


Figura 1 - Esquema de um conversor composto por uma boia conectada ao solo marinho (Bard e Kracht, 2013)

Nesse contexto, o objetivo deste artigo é apresentar os fundamentos dos sistemas geradores lineares para conversão de energia das ondas do mar em energia elétrica e as questões de pesquisa relacionadas ao assunto. Quanto à metodologia utilizada, este artigo é de natureza exploratória e visa gerar conhecimentos úteis para o avanço da ciência pela descrição das características básicas de um gerador linear com base em artigos e documentos publicados.

2. O GERADOR LINEAR

2.1 Linha de tempo sobre conversão de energia das ondas

Na busca por fontes de energias renováveis, o potencial de energia das ondas tem atraído atenção de pesquisadores e investidores nos últimos anos. Como resultado deste avanço, atualmente existem mais de 100 projetos em andamento com diversos estágios de progresso tecnológico (Elkström, Ekergård e Leijon, 2015).

Porém, no alvorecer do avanço dos conversores de energia das ondas, era muito comum a utilização de um gerador rotativo como ponto de recebimento da energia das ondas. Entretanto, os geradores rotativos funcionavam com maior eficiência em altas rotações. Por conta disto, era necessário que as caixas de engrenagens fossem externas, o que, consequentemente diminuía a confiabilidade do sistema (Elkström, Ekergård e Leijon, 2015). Como alternativa para superar este desafio, as pesquisas começaram a considerar os geradores lineares.

Até chegar ao nível de desenvolvimento atual, houve fatos importantes que se iniciaram a mais de 50 anos atrás. Conforme descrito por Beirão (2010), existem sistemas de aproveitamento da energia das ondas patenteados desde o final do século XVIII. Porém, somente a partir de 1960, no Japão, apareceu o primeiro sistema de aplicação prática. A crise do petróleo dos anos 70 contribuiu para o avanço das pesquisas e, desde então, os investimentos nesta área tem aumentado significativamente. A Tab. 1 apresenta os principais acontecimentos relacionados à conversão de energia das ondas.

Tabela 1 - Cronograma dos fatos mais relevantes sobre conversão de energia das ondas (Beirão, 2010).

Ano	Fatos relevantes
1960	• Aplicação industrial no Japão
1970	• Proposta de Stephen Salter para produção em larga escala • Programa Reino Unido (2 GW)
1980	• Teoria linear no domínio da frequência • Primeiras centrais piloto no Japão e na Noruega • Modelos lineares no domínio do tempo de WEC's • Análise linear no domínio da frequência de conjuntos de WEC's
1990	• Modelos "Wave-to-Wire" de WEC's • Análise hidrodinâmica não linear de WEC's
2000	• Teste no mar de diversas centrais piloto • Demonstração da tecnologia • Demonstração da viabilidade econômica da tecnologia

No início de 2010 foi anunciada a entrada da Siemens no mercado da energia das marés, pela compra de 10% das ações da maior companhia, a Marine Current Turbines (Beirão 2010).

2.2 Princípio de funcionamento do gerador linear

Para facilitar a compreensão do princípio de funcionamento de um gerador elétrico linear, pode se dizer de forma genérica que eles são motores elétricos sem enrolamento, no qual as bobinas são fixadas no estator e os ímãs permanentes são fixados no translado fixo à boia, conforme a Fig. 2.

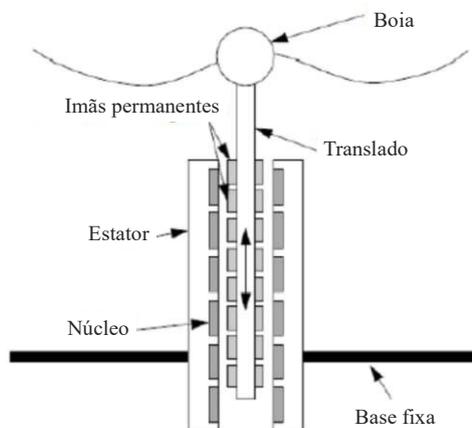


Figura 2 - Esquema de um gerador elétrico linear baseado em ímã permanente (Bard e Kracht, 2013).

O princípio teórico de funcionamento do gerador elétrico linear é regido pela lei de Faraday para a indução eletromagnética que diz: Se um condutor retilíneo se desloca em um campo magnetostático de forma a cruzar as linhas de campo, uma tensão é induzida através do condutor e tem como resultado a produção de corrente contínua, como ilustra a Fig. 3.

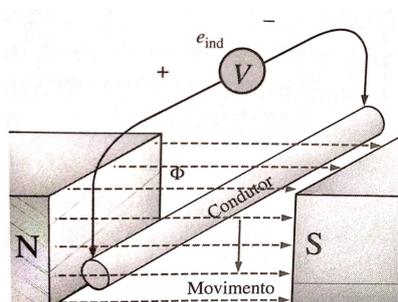


Figura 3 - Gerando tensão induzida a partir do movimento de um condutor em um campo magnético (Boylestad, 2004, p. 339).

Quanto maior o número de linhas de campo cruzadas por unidade de tempo (aumentando a velocidade com que o condutor cruza as linhas de campo), ou quanto maior a intensidade do campo magnético, maior será a tensão induzida através do condutor. O mesmo efeito de tensão induzida ocorrerá se o condutor for mantido em uma posição fixa e o campo magnético se mover, conforme a Fig. 2.

Diferentemente do gerador elétrico linear, um gerador convencional de campo girante tem como resultado final a produção de corrente alternada, cujo princípio de funcionamento consiste na excitação de fluxo no rotor.

Num projeto de um gerador linear, se faz necessário o uso de um conversor com fonte de tensão *back-to-back*, como apresentado na Fig. 4. Esta escolha permite variar o ângulo entre a tensão e a corrente sem carga, conforme exposto por Polinder, Damen e Gardner (2005). Uma vez que a potência de saída do conversor flutua e a frequência e magnitude da tensão do terminal também variam, os conversores *back-to-back* são empregados para fazer a interface do sistema conversor com a rede elétrica para manter uma potência ativa constante na saída.

Eles consistem em dois conversores controlados de fonte de tensão do tipo VSC e um capacitor. Um dos VSCs está conectado ao estator do gerador linear, que converte a energia CA do WEC em energia CC e armazena no capacitor. O outro VSC, sendo conectado à rede elétrica, usa a técnica de controle PWM e injeta corrente na rede elétrica. O capacitor posicionado entre os dois conversores, chamado *DC Link*, absorve a diferença de potência ativa instantânea entre os dois conversores e funciona como uma fonte de tensão para os conversores (Wu *et al.* 2008).

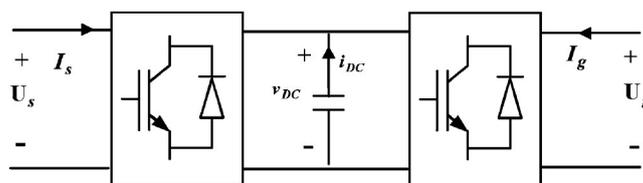


Figura 4 - Configuração de um conversor *back-to-back* (Wu *et al.*, 2008).

A utilização da corrente em fase com tensão sem carga resulta em menores perdas no cobre. No entanto, o nível de densidade do fluxo é aumentado, o que pode resultar em saturação e assim o conversor tem que ser superdimensionado devido ao baixo fator de potência atrelado a ele. Além disto, a utilização da corrente em fase com a tensão resulta num projeto de conversor menor, o que é vantajoso, mas que limita significativamente a potência que pode ser retirada no gerador. Portanto, a fase da corrente I_s está entre a fase da tensão sem carga e a tensão no terminal, conforme indicado no diagrama fasorial da Fig. 5.

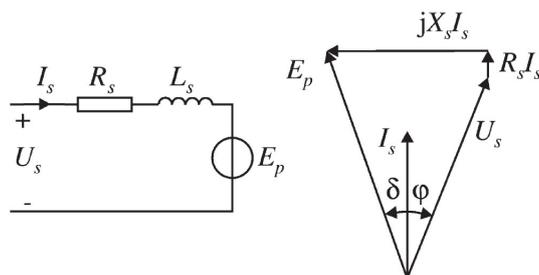


Figura 5 - Circuito equivalente e diagrama fasorial de um gerador síncrono linear (Polinder, Damen e Gardner, 2005).

2.3 Variáveis envolvidas

Sobre as variáveis envolvidas, Polinder (2007) diz que o gerador deve funcionar como um amortecedor, cujo amortecimento depende do período e da amplitude da onda. Portanto, a força do gerador deve ser proporcional à velocidade do flutuador, ou seja, ela deve estar em ressonância. A partir da força de atuação no gerador, pode-se calcular a corrente usando o diagrama fasorial da Fig. 5, levando em consideração as perdas no cobre do estator.

As perdas no ferro são assumidas como sendo proporcionais à frequência e são calculadas como a soma das perdas por histerese e por correntes parasitas.

2.4 Operação e estratégias de controle

De acordo com Brady *et al.* (2012), da mesma forma como acontece com muitas tecnologias de geração de energia renovável, um dos principais desafios é converter a energia elétrica irregular variável, em um formato regular que pode ser entregue a rede elétrica.

A maior parte da literatura sobre o controle aplicado nos conversores abordam estratégias chamadas de travamento e controle ótimo, que compreende o controle reativo ou controle de fase e amplitude.

Valério *et al.* (2008) afirmam que o estudo sobre o controle em geradores elétricos lineares já foi objeto de trabalhos anteriores, onde apenas estratégias de controle baseadas em modelos lineares foram utilizadas. No entanto, ele aborda a identificação de modelos de controle com redes neurais para maximizar a absorção de energia das ondas. Este sistema de controle é baseado nas técnicas de controle de fase e amplitude, controle de modelo interno e controle de comutação.

Antes de pensar sobre o uso extensivo de um modelo não linear para o caso específico do conversor Arquimedes (*Archimedes Wave Swing - AWS*) que será comentado mais adiante, em primeiro lugar deve-se identificar um modelo linear aproximado. Isso é possível porque, embora o AWS seja um sistema não linear, uma entrada senoidal causa uma saída razoavelmente sinusoidal, com uma amplitude praticamente proporcional à da entrada, para todos os períodos e amplitudes de onda que se espera que ocorram.

A engenharia de controle desempenha um papel importante em relação a esse objetivo. Daqui em diante, pretende-se comparar o desempenho de várias estratégias de controle adequadas para o AWS. O objetivo é ver, por meio de simulações, qual tipo de controle tem melhor eficiência.

A irregularidade na formação das ondas marítimas é um dos principais fatores de não linearidade que influenciam na complexidade para obter uma forma de controle ideal. No caso do protótipo testado em Leixões, Portugal, as características das irregularidades das ondas foram obtidas com o software ONDATLAS, o qual é apresentado na Tab. 2 com os valores de Hs (altura da onda, em metros) e Te (períodos máximos e mínimos da energia da onda, em segundos).

Tabela 2 – Características das irregularidades das ondas marítimas em Leixões, Portugal, de acordo com o software ONDATLAS (Valério, Beirão e Costa, 2007).

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
H_s (m)	3,2	3,0	2,6	2,5	1,8	1,7	1,5	1,6	1,9	2,3	2,8	3,1
$T_{e,min}$ (s)	5,8	5,8	5,2	5,5	5,0	4,7	4,6	5,0	5,2	5,3	5,5	5,3
$T_{e,max}$ (s)	16,1	14,5	13,7	14,8	12,2	9,7	11,1	10,5	12,0	12,6	13,3	14,2

O AWS possui amortecedores de água que são acionados quando o flutuador se aproxima do fim de curso para reduzir sua velocidade e evitar o impacto. Este amortecimento também é acionado junto ao gerador elétrico linear que é utilizado quando o amortecimento natural não é suficiente para controlar a força necessária ao movimento natural. É importante ressaltar que estes amortecedores de água são desativados em determinados momentos, de modo a não prejudicar a extração de energia das ondas. Portanto, o que pode ser controlado é a força exercida por esses dois componentes: a) Gerador elétrico linear e, b) Amortecedores de água.

Com o objetivo de maximizar a energia absorvida das ondas, Valério, Beirão e Costa, (2007) apresentam estratégias de Controle Ótimo que se mostram muito boas em teoria, porém na prática, o controle só pode ser implementado por aproximações que de fato diminuem a eficiência. Tais estratégias são: a) Controle reativo; b) Controle de fase e amplitude.

No caso de um gerador linear de relutância comutada, Brady *et al.* (2012) apresenta uma metodologia na qual a tensão de saída pode ser controlada escolhendo um *setpoint* de corrente de fase. Ele adverte que, atingir uma tensão de saída constante é difícil em uma ampla faixa de velocidade de trabalho do absorvedor de energia das ondas. Por essa razão, é feito o controle da tensão durante todo o curso mecânico do conversor. Também é possível controlar a força e a potência.

Um problema com ambas as condições ótimas de controle é que elas incluem, de forma geral, funções de transferência não causais: $-Z_i^*(\omega)$ e $1/2R_i$. É importante ressaltar que em condições generalistas, R_i pode variar de acordo com a frequência.

Esta última condição ideal requer até mesmo o conhecimento prévio das características das ondas (amplitude, período, velocidade etc.), que na prática está disponível por meio de previsões baseadas em dados medidos por boias posicionadas no entorno do AWS.

Valério, Beirão e Costa (2007) afirmam que ambas as condições utilizam forças de controle que auxiliam a força de excitação das ondas; em outras palavras, ao invés de extrair energia das ondas, se fornece energia a elas.

Isto acontecerá naturalmente apenas em uma pequena fração do tempo. Desta forma, é necessário extrair a máxima energia das ondas durante o restante do período. Caso isto não seja possível, o sistema estará limitado a uma solução sub ótima. Na verdade, todas as aproximações permitidas para desenvolver as funções de transferência causais também diminuirão a extração de energia das ondas e assim haverá novamente uma solução sub ótima.

A solução sub ótima não deve ser vista como uma grande desvantagem pelo fato de que ela pode ser viável. Por outro lado, a solução ótima não as permitem. Ambas as estratégias de controle (ótima e sub ótima) também podem ser aplicadas a um conversor não linear, desde que exista um modelo linear válido. O controlador deve ser projetado usando o modelo linear e depois aplicado ao conversor não linear. Naturalmente não se pode esperar que os resultados sejam tão bons quanto em uma planta linear. Neste caso existem dois tipos de controle:

2.4.1 Controle de linearização realimentado

Quando, ao fim de seu curso, o flutuador é travado pelo amortecedor, o sistema de controle sabe qual foi a duração do período do movimento e supõe que o próximo período terá a mesma duração. Além disso, é considerado que a velocidade vertical do flutuador atinja os valores máximo ou mínimo precisamente durante este período. Desta forma, o tempo de travamento é calculado para que a velocidade máxima ou mínima coincida no tempo com o próximo (máximo ou mínimo) da força de excitação da onda. Vale ressaltar que a força necessária dos amortecedores de água para travar o flutuador é constante.

A dinâmica descrita está longe de ser linear. As expressões de quase todas as forças envolvidas mostram que elas dependem de variáveis como, posição vertical, velocidade ou aceleração do flutuador. Estas não linearidades, consideradas suaves (com derivadas contínuas de qualquer ordem), e também as rígidas (sem derivadas contínuas), se referem a não linearidades comuns, como saturações, zonas mortas ou histerese que estão sempre presentes. Isso torna o AWS um candidato apropriado para uma estratégia de controle não linear, chamada controle de linearização realimentado. Seus objetivos são de fornecer uma ação de controle criteriosamente escolhida para cancelar a dinâmica não linear da planta, de modo que a dinâmica de circuito fechado seja linear (Valério, Beirão e Costa, 2007).

2.4.2 Controle de fase por travamento

O travamento é uma forma de controle discreta e não linear. No que diz respeito ao AWS, o travamento é obtido por atuação dos amortecedores de água de modo a evitar que o flutuador se mova. Destruar significa inabilitar os amortecedores de água para permitir que o flutuador se mova livremente.

Devido às dificuldades associadas para estabelecer a velocidade vertical do flutuador em fase com a força de excitação da onda, uma alternativa sub otimizada à qual se pode recorrer é travar o flutuador durante alguns períodos de sua oscilação e destravá-lo de modo que ele esteja em fase com a força de excitação das ondas, conforme o diagrama da Fig. 6. Mais precisamente, o flutuador será travado quando sua velocidade tender a zero, e liberado quando for previsto que as velocidades (máxima ou mínima) coincidam no tempo com a força de excitação (máxima ou mínima) da onda (Valério *et al.*, 2007). Este controle de travamento é considerado sub ótimo, pelo fato de que ele nunca pode alcançar a eficiência de absorção de energia das ondas que o controle ótimo alcançaria.

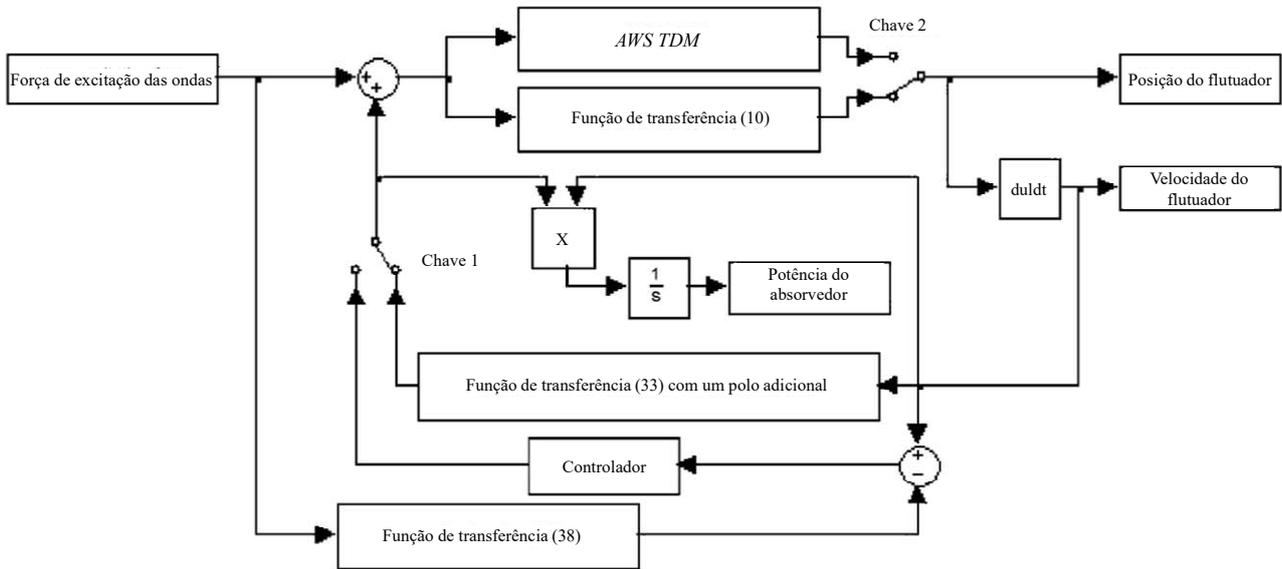


Figura 6 - Diagrama de blocos do controle ótimo (Valério, Beirão e Costa, 2007).

2.5 Modelos matemáticos

Conforme mostrado na Fig. 7, em um gerador linear existem duas forças eletromagnéticas atuantes: a primeira é a força de produção de torque, ou impulso, atuando tangencialmente à superfície do rotor. A segunda é a força normal, atraindo as duas superfícies.

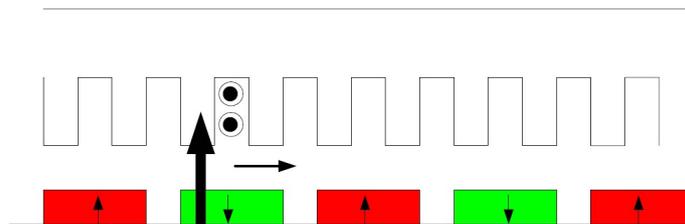


Figura 7 - Forças eletromagnéticas atuantes em uma máquina elétrica (Polinder, 2007).

Os parâmetros de um gerador linear são calculados de forma convencional. O entreferro efetivo da máquina (g_{eff}) é calculado pela Eq. (1):

$$\begin{aligned}
 g_{eff} &= g_1 k_c \\
 g_1 &= g + \frac{l_m}{\mu_{rm}} \\
 k_c &= \frac{b_s + b_t}{b_s + b_t - \gamma g_1} \\
 \gamma &= \frac{4}{\pi} \left(\frac{b_s}{2g_1} \arctan \frac{b_s}{2g_1} - \log \sqrt{1 + \left(\frac{b_s}{2g_1} \right)^2} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

onde k_C é o fator Carter, g_1 é o intervalo de ar mecânico, lm é o comprimento do ímã na direção de magnetização, μ_{rm} é a permeabilidade de recuo dos ímãs, bt é a largura do dente e bs é a largura da ranhura.

A indutância L_{sm} é calculada como:

$$L_{sm} = \frac{6\mu_0 l_s \tau_p (k_w N_s)^2}{p\pi^2 g_{eff}} \quad (2)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo, l_s é o comprimento da pilha da máquina perpendicular ao plano, τ_p é o passo do polo, N_s é o número de voltas do enrolamento, k_w é o fator de enrolamento, e p é o número de pares de polos.

O espaço harmônico fundamental da densidade do fluxo magnético no entreferro devido aos ímãs \hat{B}_{gm} , é dado pela Eq. (3):

$$\hat{B}_{gm} = \frac{l_m}{\mu_{rm} g_{eff}} B_{rm} \frac{4}{\pi} \sin\left(\frac{\pi b_p}{2\tau_p}\right) \quad (3)$$

onde B_{rm} é a densidade de fluxo remanescente nos ímãs, e b_p é a largura do polo do ímã. A tensão induzida sem carga para essa densidade de fluxo no enrolamento do estator E_p é dada pela Eq. (4):

$$E_p = \sqrt{2I_s N_s v \hat{B}_{gm}} \quad (4)$$

onde v é a velocidade do flutuador.

A resistência da fase R_s do estator E_p é calculada pela Eq. (5), a partir das dimensões da máquina, considerando o número de voltas em uma ranhura e a seção transversal de um slot:

$$R_s = \rho C_u \frac{I_{Cus}}{A_{Cus}} = \rho C_u \frac{2N_s^2 (l_s + 2\tau_p)}{p h_s b_s k_{sfil}} \quad (5)$$

Onde ρC_u é a resistividade do cobre, h_s é a largura do slot e k_{sfil} é o fator de preenchimento de cobre das ranhuras, Polinder, Damen e Gardner. (2005).

3. UTILIZAÇÃO DO GERADOR LINEAR NUM CONVERSOR ARQUIMEDES (AWS)

O gerador Arquimedes, citado na literatura como AWS, é um conversor de energia das ondas que fica submerso em alto mar (*off-shore*) e que pertence a uma categoria de conversores chamados de absorvedores pontuais pelo fato de que seu diâmetro é insignificante em comparação ao comprimento de onda típico. O AWS é composto basicamente por duas partes: o flutuador e o compartimento onde se dispõe o gerador elétrico linear (Valério *et al.* 2008). O flutuador fica livre para subir e descer em ressonância com a onda incidente dentro da faixa de travamentos mecânicos. A Fig. 8 apresenta um protótipo do AWS que foi construído e testado em Portugal, perto de Leixões, a 5 km da costa, em profundidade de 43 m. Após os testes realizados em 2004, este protótipo foi desativado.

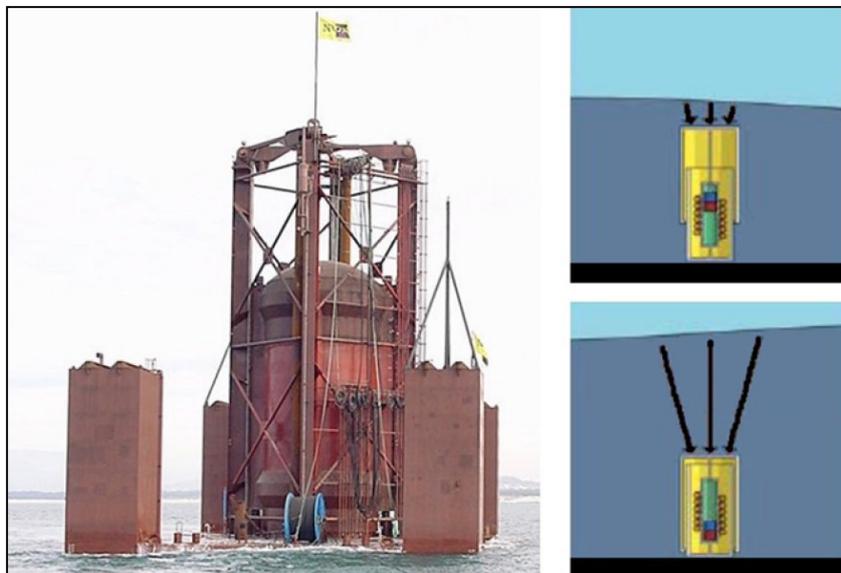


Figura 8 - Primeiro protótipo Arquimedes (AWS) antes da submersão (Valério *et al.*, 2008).

O princípio de funcionamento da AWS é o seguinte: quando a crista de onda passa sobre o AWS, a coluna d'água sobre ele aumenta e, conseqüentemente, aumenta a pressão fazendo que o flutuador desça. Quando a onda se desloca a coluna d'água diminui reduzindo a pressão sobre ele, assim o flutuador se move para cima. Portanto, o movimento oscilante (sobe e desce) do flutuador é convertido em eletricidade pelo gerador elétrico linear.

Amortecedores de água são montados na estrutura AWS, fora do silo e do flutuador. Eles se tornam ativos quando o flutuador se aproxima do fim de curso, fornecendo uma força de amortecimento adicional para evitar a colisão. Em termos de controle, espera-se que a AWS se comporte como um sistema amortecedor de molas em massa. Porém, o controle não é tão simples de se obter pelo fato de que fenômenos não lineares estão presentes no sistema (Valério *et al.*, 2008).

Os resultados de potência de pico (kW) mostrados na Tab. 3 comprovam a importância de um controlador bem planejado para o desempenho do protótipo do conversor AWS. É importante ressaltar que os dados de absorção de energia das ondas sob diferentes tipos de controle foram gerados a partir de simulações.

Tabela 3 - Potência (kW) obtida durante um ano sob diferentes tipos de controle (Valério *et al.*, 2008).

Tipo de controle	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Nenhum	14,3	11,4	9,1	7,7	4,5	4,5	3,5	3,4	4,5	6,7	9,9	13,6
Controle PID	44,9	35,6	22,7	21,0	6,5	6,5	3,2	3,9	7,8	14,9	27,9	38,8
PID em modelo linear	87,5	68,1	50,6	48,3	18,1	12,5	9,6	10,2	21,0	33,5	57,4	78,3
PID com redes neurais	115,7	92,6	63,0	55,4	6,9	4,7	3,2	3,9	8,7	42,5	76,2	103,1
Alternância entre modelos de redes neurais	111,7	94,8	60,4	50,2	17,7	12,8	9,4	10,5	17,9	37,6	80,0	100,6

Para este protótipo testado, Valério *et al.* (2008) afirma que os modelos PID com redes neurais podem fornecer um aumento médio de absorção de energia de até 160% sobre o desempenho do controlador PID convencional.

Devido ao fato de que os valores de potência durante o verão podem ser menores de acordo com o tipo de controle, os dados de “alternância entre modelos de redes neurais” apresentados na última linha da Tabela 4 significam que o tipo de controle varia conforme a intensidade da onda do mar, o que resulta em maior eficiência.

3.1 Modelos matemáticos

O projeto piloto do gerador (AWS) testado em Portugal foi concebido com um flutuador de 9 metros de diâmetro e uma potência de pico instalada de 2MW. A capacidade calculada de entrega anual de energia fornecida à rede elétrica por este protótipo foi de 1,94 GWh. O principal objetivo do protótipo era provar a sobrevivência do equipamento em condições reais de trabalho (Polinder, Damen e Gardner, 2005).

Neste caso, os resultados de desempenho foram obtidos considerando meio período de onda com alta densidade, sendo que, a força da onda, a posição e a velocidade do flutuador são funções sinusoidais do tempo.

Na Fig. 9, é possível observar que o valor RMS de tensão não é proporcional à velocidade/posição porque a sobreposição entre o estator e o conversor muda no tempo. A força necessária é proporcional à velocidade e depende da amplitude e do período da onda. Para exercer esta força, uma corrente é injetada no estator e assume-se que ela está em fase com a tensão sem carga.

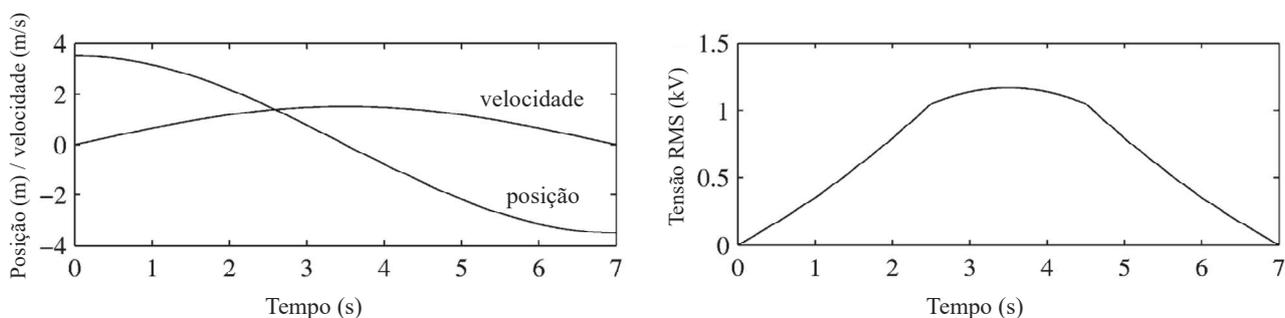


Figura 9 - Posição/Velocidade e Tensão RMS (Polinder, Damen e Gardner, 2005).

Na Fig. 10, o valor RMS da corrente não varia sinusoidalmente devido à sobreposição entre o estator e os ímãs permanentes que variam no tempo. Quando a sobreposição diminui, é necessário aumentar a corrente para se obter a força necessária.

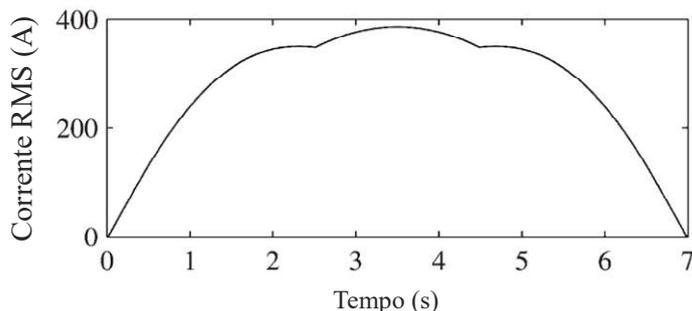


Figura 10 - Corrente RMS (Polinder, Damen e Gardner, 2005).

Com base nos testes realizados, Polinder, Damen e Gardner, (2005) afirmam que perdas no conversor são assumidas como sendo 2,5% da potência nominal em carga máxima, 0,5% da potência nominal em sem carga e 2% proporcional à potência real fornecida pelo conversor. Uma parte substancial da energia retirada das ondas é dissipada no gerador e no cabo de transmissão.

A eficiência é melhor em carga parcial, onde o conversor AWS normalmente opera, é apresentado no gráfico tridimensional da Fig. 11 que mostra a eficiência média do conjunto ao longo de um período de onda.

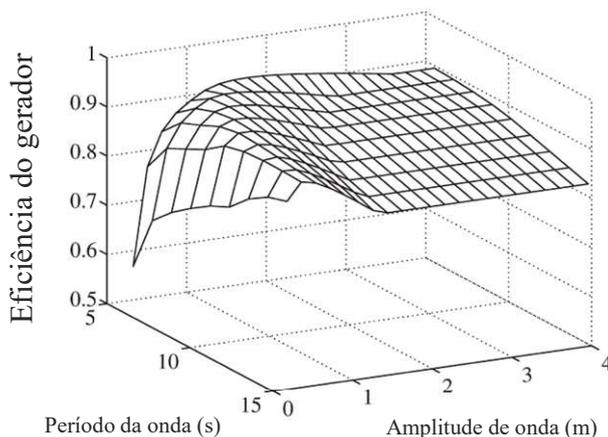


Figura 11 - Eficiência média do gerador linear com conversor AWS em um período de onda, como função da amplitude e período (Polinder, Damen e Gardner, 2005).

Neste caso, Polinder (2007) concluiu que a correlação medida é calculada entre os parâmetros do gerador e a tensão sem carga é equilibrada, indicando que o gerador tem possibilidades de ter sucesso.

4. VANTAGENS E DESVANTAGENS DO GERADOR LINEAR

Polinder (2007) afirma que, em máquinas lineares, a densidade da força é limitada. A amplitude da densidade de fluxo do entreferro é limitada por causa da saturação magnética. A amplitude da carga também é limitada porque ela produz calor e a dissipação de calor, neste caso, precisa de melhorias. Para máquinas que produzem uma força constante e têm refrigeração a ar, a densidade de força resultante é limitada a cerca de 25-50 kN/m². Porém, com um sistema de refrigeração a água, a densidade de força pode ser aumentada.

O fato de que a densidade de força é limitada a um certo valor, implica que a área de superfície ativa do gerador é proporcional à força, o que tem sérias implicações em termos de tamanho físico e massa do equipamento. Se por exemplo, a amplitude da densidade de fluxo do entreferro for de 1 Tesla, então a densidade de força será de aproximadamente 200 kN/m², enquanto o limite será da ordem de 40 kN/m² Polinder (2007).

Para uma máquina de acionamento direto de 100 kW funcionando a 1 m/s, a força tangencial necessária seria de 100 kN o que exigiria uma área de superfície de entreferro de aproximadamente 2,5 m². Portanto, a força de atração magnética seria da ordem de 500 kN. A estrutura do equipamento e o sistema de mancais teriam que suportar esta força para manter o espaço de ar necessário. No AWS, a força máxima é de 1 MN, porém, para produzir essa força, seria necessária uma área de superfície ativa na ordem de 20 m².

Todas as máquinas de núcleo de ferro, isto é, aquelas em que uma superfície de ferro se move em relação à outra superfície de ferro, sofrerão com este problema de força de atração magnética.

5. COMENTÁRIOS FINAIS

Brady *et al.* (2012) afirma que o projeto e a construção do gerador linear, prova que o uso desta tecnologia em uma aplicação de geração direta envolvendo movimento oscilatório das ondas é uma opção viável para os projetistas. A força eletromagnética desenvolvida demonstrou que pode ser controlada num curto espaço de tempo. A construção do equipamento de teste, capaz de recriar as condições das ondas oceânicas em um ambiente de laboratório escalonado, também provou ser uma ferramenta de validação eficaz e um recurso de teste importante.

Polinder 2007 faz uma revisão dos sistemas geradores lineares para conversão de energia das ondas e as questões de pesquisas relacionadas, com uma breve revisão da conversão de energia das ondas, indicando que os diferentes sistemas de conversão de energia das ondas que foram apresentados na literatura têm sistemas geradores muito diferentes. O artigo conclui com algumas direções sensatas para futuras pesquisas, como investigar um aumento da velocidade do movimento linear do conversor de energia das ondas, além de outros tipos de geradores com maiores densidades de força e possivelmente melhores eficiências.

Pode-se concluir que, para os testes realizados em Portugal, a correlação entre os valores medidos e calculados foi coerente e satisfatória e que, a saturação magnética é um fenômeno não desejado para os geradores lineares.

Em busca de um bom desempenho para o gerador linear foram apresentadas formas de controle como: controle por travamento, uma estratégia de controle discreta altamente não linear e intrinsecamente sub ótima; controle reativo; controle de fase e amplitude, duas estratégias de controle ótimas que envolvem funções de transferência não causais e que devem ser implementadas com aproximações; controle de linearização realimentado, uma estratégia de controle não linear que se mostrou mais eficiente em relação às outras alternativas ao absorver a energia da onda. A partir de extensas simulações, conclui-se que ele funciona melhor, independentemente do estado do mar.

REFERÊNCIAS

- Bard, J., Kracht, P., 2013. Linear Generator Systems for Wave Energy Converters, Aalborg University - Department of Civil Engineering.
- Beirão, F. B., 2010. Protótipo de um Gerador Linear para Aproveitamento de Energia das Ondas num Sistema AWS. 91 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Universidade Técnica de Lisboa, Porto.
- Boylestad, R. L., 2004. Introdução a análise de circuitos, 10^o ed. [S.I.]: Pearson.
- Brady G., O'Loughlin C., Massey J., Griffiths D., Villegas C., 2012. Design and test of a linear switched reluctance generator for use in wave-energy applications, 4th International Conference on Ocean Energy.
- Ekström, R., Ekergård, B., Leijon, M., 2015. Electrical damping of linear generators for wave energy converters - A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 42, pp. 116-128.
- Polinder, H., Damen, M. E. C., Gardner, F., 2005. Design, modelling and test results of the AWS PM linear generator, European Transactions on Electrical Power, vol. 15, pp. 245–256.
- Polinder, H. 2007. Linear generator systems for wave energy conversion, Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference.
- Valério, D., Beirão, P., Costa, J., 2007. Optimisation of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing, Ocean Engineering, vol. 34, pp. 2330–2344.
- Valério, D., Mendes, M., Beirão, P., Costa, J., 2008. Identification and control of the AWS using neural network models, Applied Ocean Research, vol. 30, pp. 178-188.
- Wu, F., Zhang, X., Ju, P., Sterling, M. J. H., 2008. Modeling and Control of AWS-Based Wave Energy Conversion System Integrated Into Power Grid, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, pp. 1196-1204.

A FEW CONSIDERATIONS ABOUT THE USE OF LINEAR GENERATORS IN WAVE ENERGY CONVERSION SYSTEMS

Abstract. *The aim of this paper is to present important aspects related to the fundamentals of the linear generator used in the conversion of sea wave energy to electrical energy, targeting the improvement of the research related to this subject in Brazil. For this, a brief review of the wave energy conversion will be presented, showing the different proposed systems and highlighting the linear generator based on oscillation. Some remaining problems identified from pilot plant construction, simulations, correlation between measured and calculated parameters, comparison of control performances to maximize energy production, and possible solutions that need further research to investigate possibilities for improvement are also presented in this paper. Some authors suggest that improved efficiency can be obtained by increasing force densities and the speed of the linear motion of the converter.*

Key words: *Electric Linear Generators, Wave Energy Conversion, Archimedes Wave Swing (AWS).*