

#### CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDA

Maximização da geração de eletricidade: controle *latching* 

Milad Shadman, D.Sc.
Professor Visitante
Programa de Engenharia Oceânica
COPPE/UFRJ

Julho de 2020



#### Grupo de Energia Renovável no Oceano (GERO)



Liderança:

Segen Farid Estefen, Ph.D.

**Professor Titular** 

Programa de Engenharia Oceânica

Integrantes:

Milad Shadman, D.Sc.

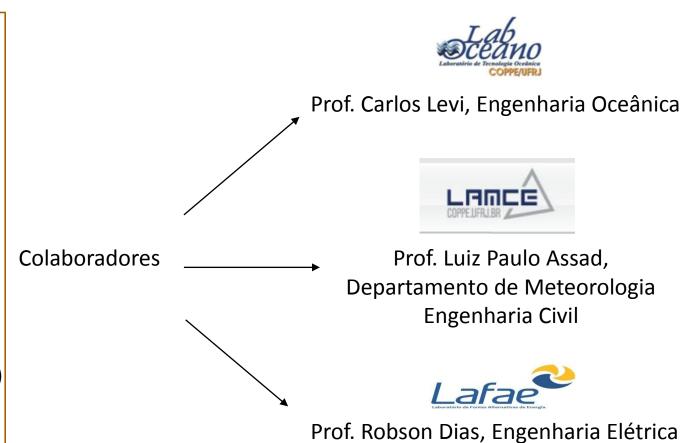
John Chujutalli, D.SC.

Mojtaba Maali Amiri, D.SC.

Luiz Filipe de Assis Tavares, M.Sc. (doutorando)

Guilherme Pimenat (graduando)

Marcelo Nagata (graduando)



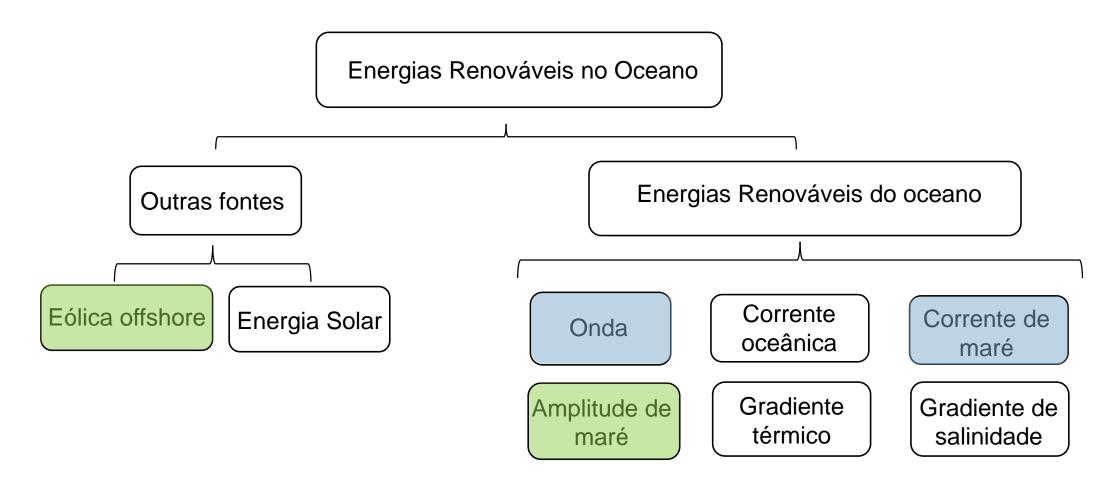


#### Sumário

- > Energias renováveis no oceano
- > Conversores de energia de onda: tecnologias, princípio de funcionamento e protótipos
- > Absorção de energia de onda e controle latching
- ➤ Conversor de energia de onda COPPE/Seahorse Nearshore Rio de Janeiro

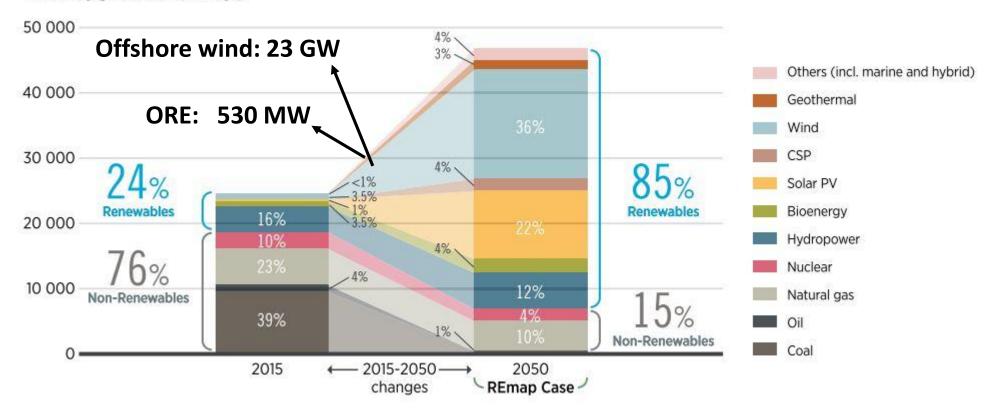
### Energias renováveis no oceano







#### Electricity generation (TWh/yr)



Global Energy Transformation, IRENA 2018

# Tecnologias, princípio de funcionamento e protótipos

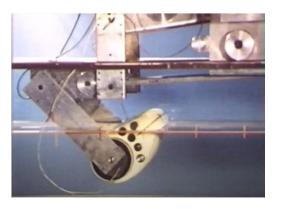


#### Primeiros conversores de energia de onda



Fonte: Pecher A, Kofoed JP. Handbook of Ocean Wave Energy. SpringerOpen; 2017. doi:10.1007/978-3-319-39889-1

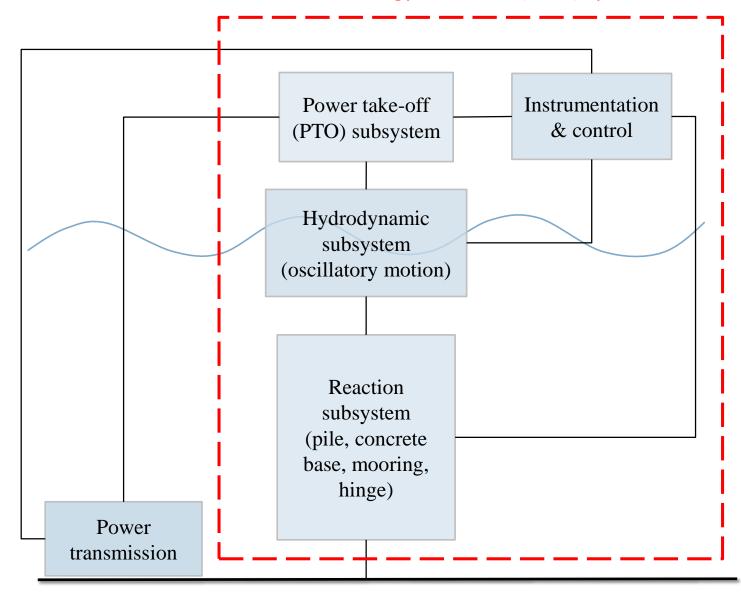
- Cartão Postal de um experimento de motor movido a onda na costa de Santa Cruz (Califórnia) em 1898
- Artigo do Prof. Stephen Salter na revista científica Nature em 1974.



University of Edinburgh, 1974 to the mid-80s, Duck wave energy device.

#### Wave energy converter (WEC) system

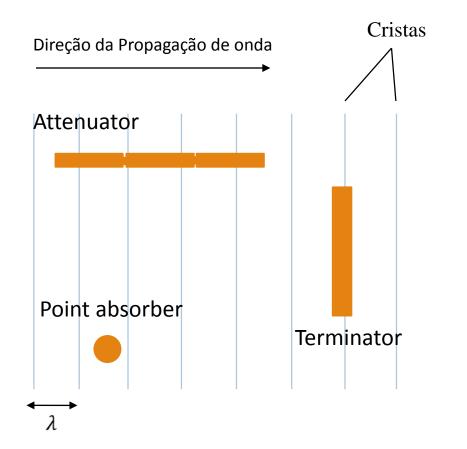


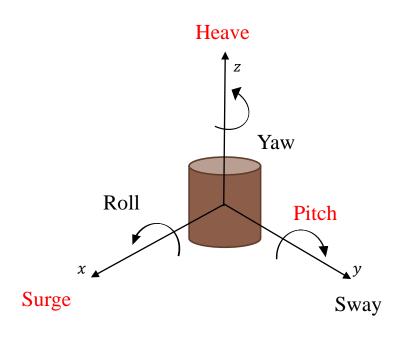


Leito marinho

#### Categorias baseado em princípio de funcionamento



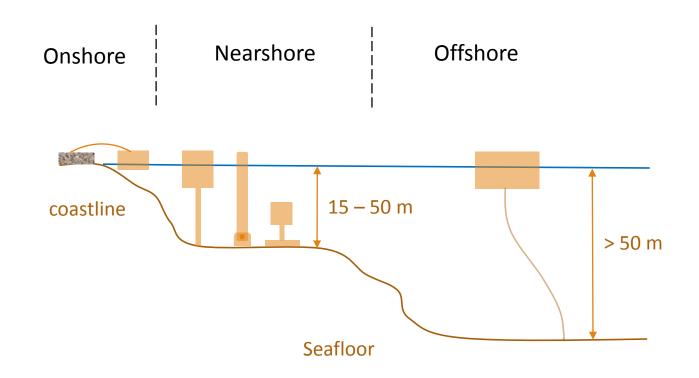




Comprimento da onda



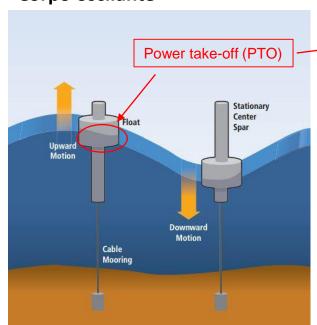
#### Categorias baseado em local de instalação



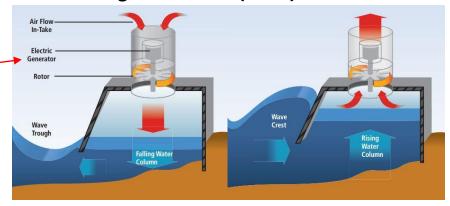


#### Conversores de energia de onda (CEO)

#### **Corpo oscilante**



#### Coluna da água oscilante (OWC)



# Overtopping Reservoir Turbine Turbine Outlet

Images: NREL

#### Power Take-Off (PTO)



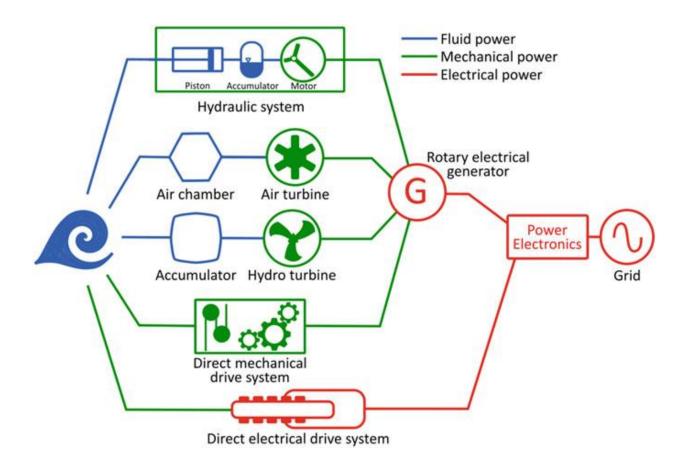
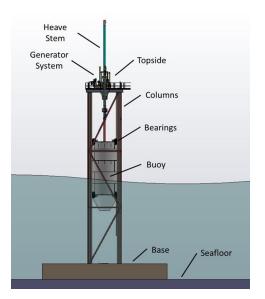


Image: Handbook of ocean wave energy, Springer 2017

#### Nearshore – Rio de Janeiro



#### COPPE WECs

Onshore – Pecém, 2012

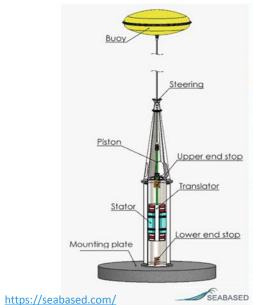






SeaBased Uppsala university, Suécia







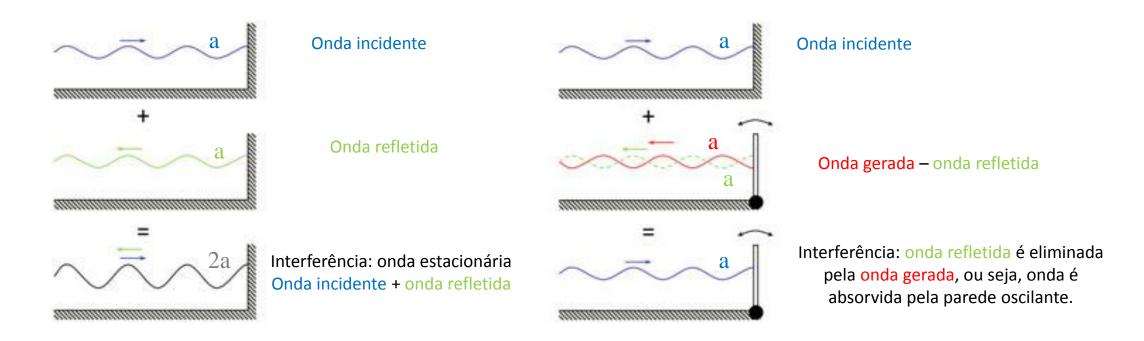






## **COPPE** UFRJ

#### "A good wave absorber is a good wave maker" (Falnes)

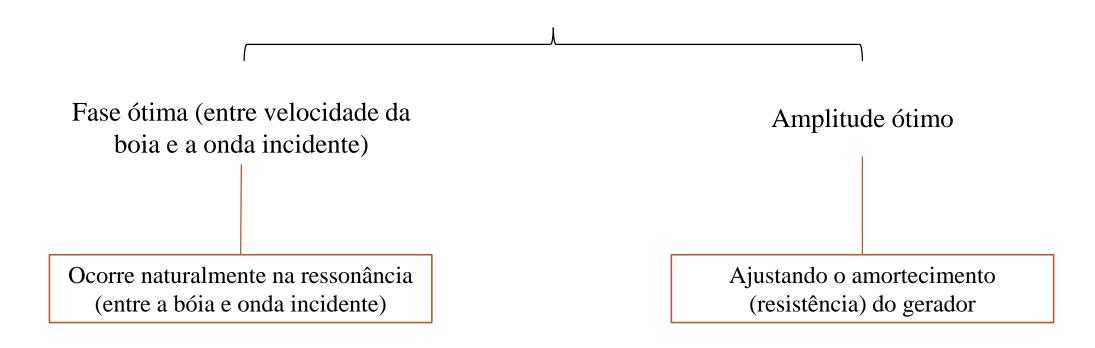


- ➤ Phase (timing)
- ➤ Amplitude

Image: Handbook of ocean wave energy (chapter 6, "hydrodynamics of WECs" by Jorgen Hals), Springer 2017



#### Principais condições para maximização da absorção de energia



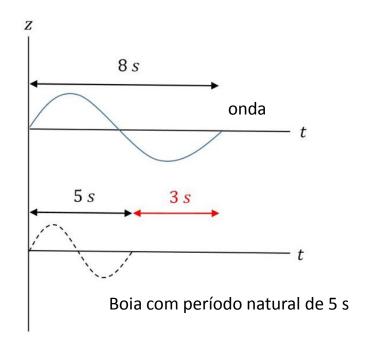
Latching: travar a boia no memento de velocidade zero e destravar no momento certo para igualar a fase de velocidade da boia a fase da onda incidente

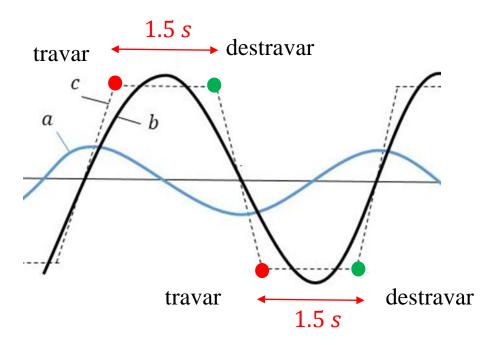


Duração de latching

Não preditivo

Simplificado (Sheng et al. 2014) = 
$$(T_{onda} - T_{boia})/2$$

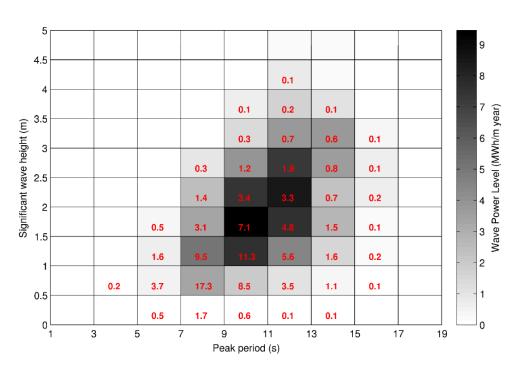


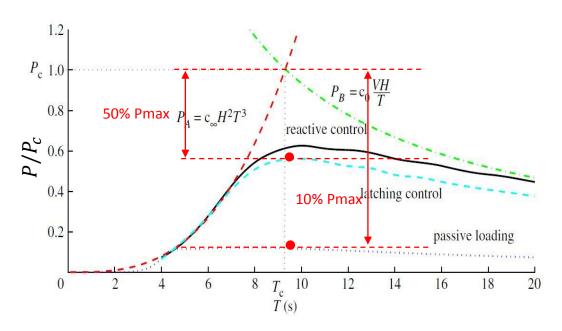


(Modificado baseado na figura apresentada por Flanes, 1982)



#### Projeto de um WEC: limites para absorção de energia (caso *point absorber*)





Fonte: Falnes & Hals (2012)

Máximo teórico:  $P_A = c_{\infty}H^2T^3$ 

Volume máximo :  $P_B = c_0 \frac{VH}{T}$ 

# Conversor de energia de onda COPPE/Seahorse – Nearshore Rio de Janeiro

#### Conversor de energia de onda – Nearshore, Ilha Rasa - COPPE / Seahorse





- > 25 m profundidade
- > 14 km da praia de Copacabana
- > COPPE/UFRJ, Seahorse e FURNAS

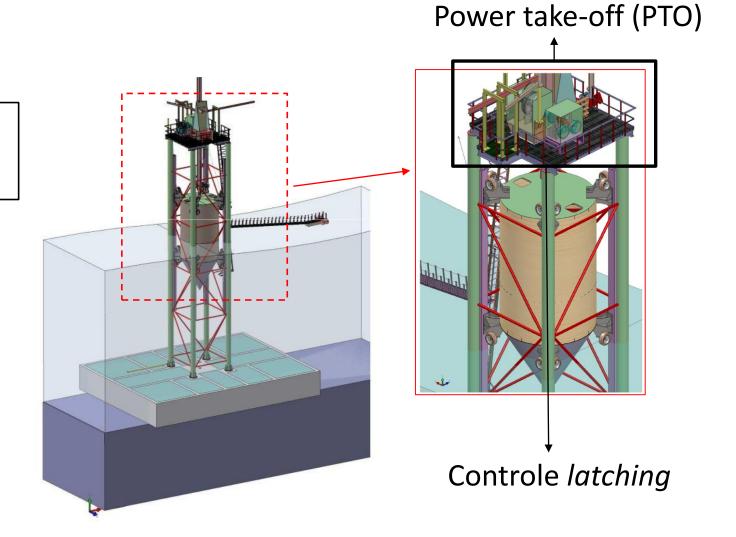


#### Conversor de energia de onda – COPPE / Seahorse

Diâmetro: 4 m

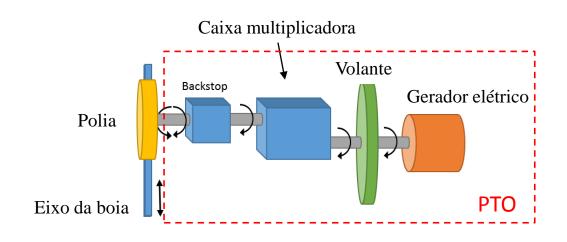
Calado: 5 m

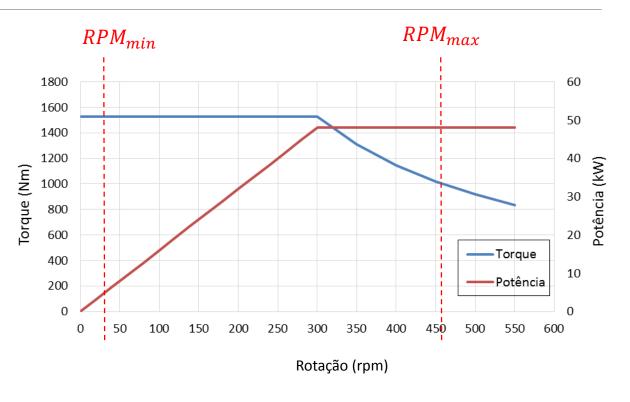
Peso: 60 t





#### Restrições do PTO





 A boia aciona o PTO somente quando a velocidade da boia é maior do que a velocidade do eixo (depois do backstop)

II. O gerador funciona somente dentro da faixa operacional



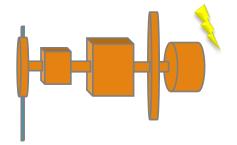
#### Modos operacionais do PTO

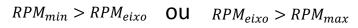
#### Modo operacional I

Vboia > Veixo (A boia aciona o PTO)

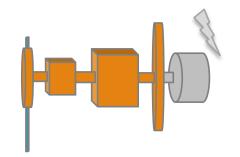
 $RPM_{min} < RPM_{eixo} < RPM_{max}$ 

Fpto: elétro-mecânica





Fpto: mecânica



#### **Modo operacional II**

Vboia < Veixo (A boia não aciona o PTO)

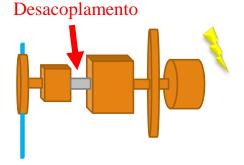
 $RPM_{min} < RPM_{eixo} < RPM_{max}$ 

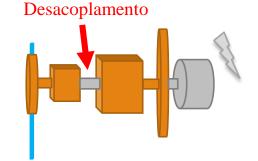
Fpto: elétro-mecânica O gerador está consumindo a energia do volante

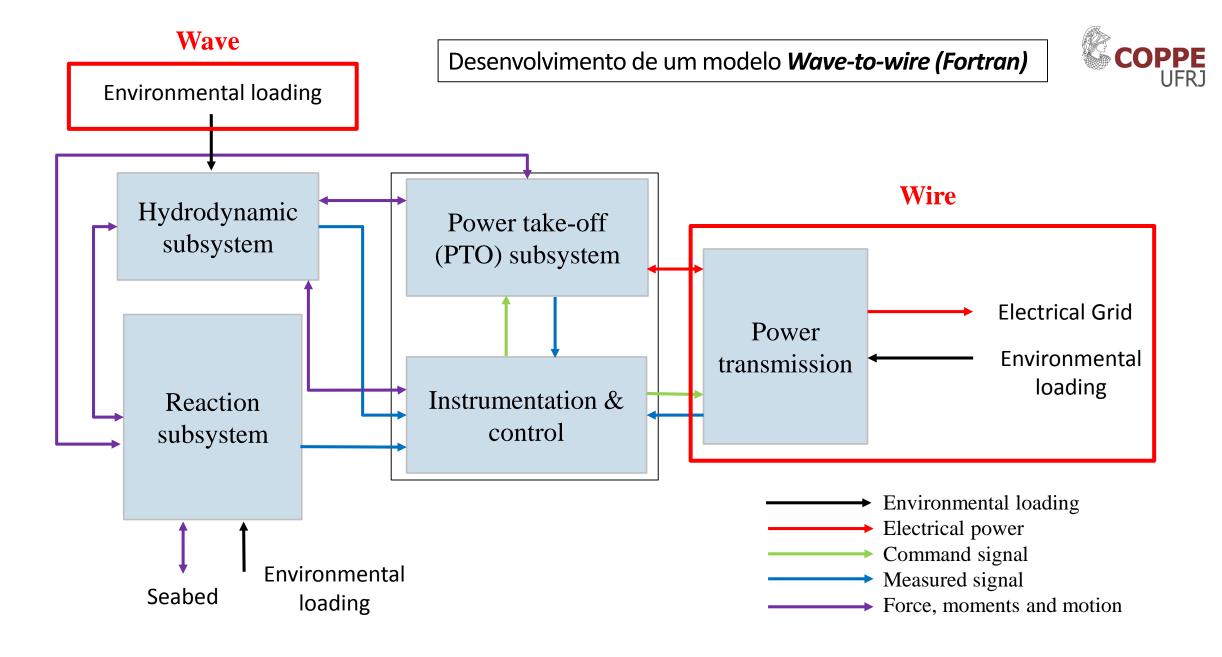
$$RPM_{min} > RPM_{eixo}$$

ou

 $RPM_{eixo} > RPM_{max}$ 







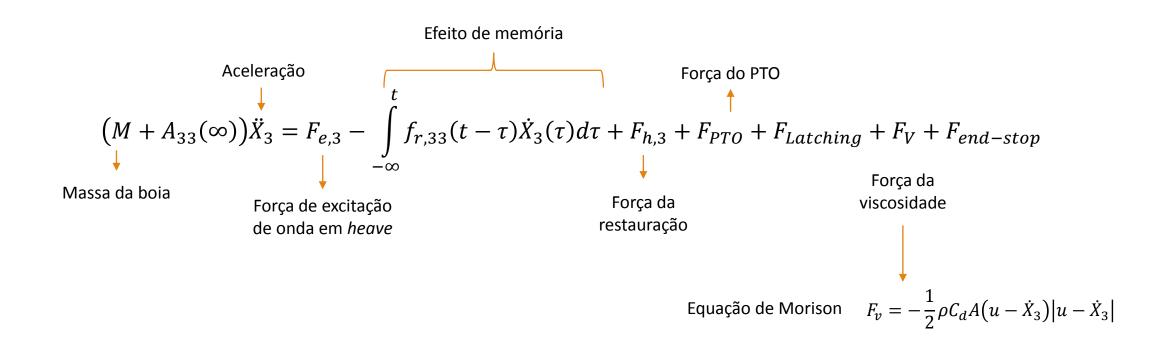


#### Suposições

- Teoria linear de hidrodinâmica considerando a força não linear devido ao viscosidade
- Um grau de liberdade tendo somente movimento em *heave*
- Utilização de um sistema de conversão (PTO) mecânico com seus próprios limitações
- Considerando um limite igual à 3 metros para a amplitude de oscilação da boia (End-stop control)

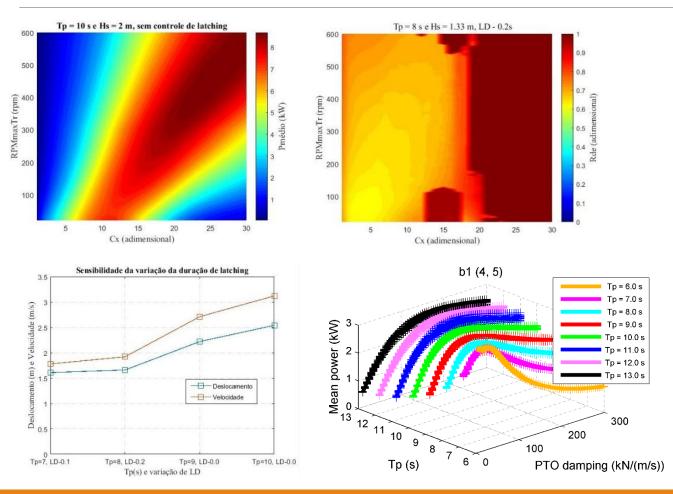


#### Equação dinâmica do conversor





#### Desempenho do conversor de energia de onda – COPPE / Seahorse



- Modelo wave-to-wire
- Ondas regulares
- Ondas irregulares
- Otimização dos parâmetros do PTO
- Estudo de sensibilidade da Hs, duração de latching e limite operacional do gerador
- Análise de custo de energia



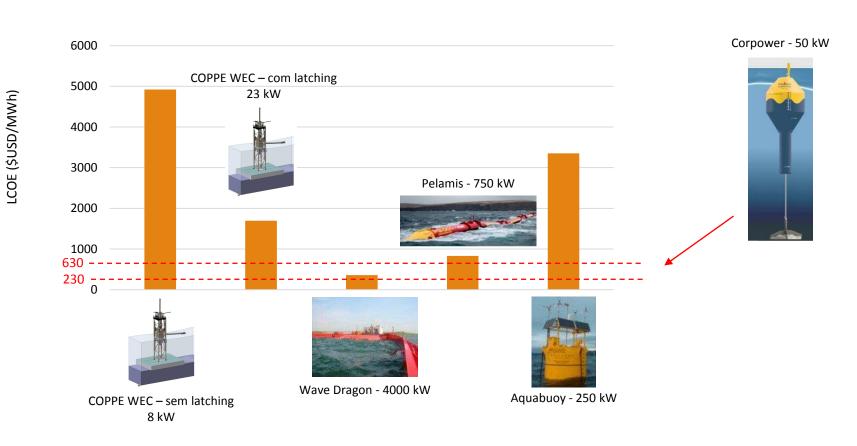
#### Produção de energia – COPPE Nearshore WEC

	Fator de capacidade (%)	Energia produzida por ano (MWh/yr)	Energia elétrica média produzida anualmente (kW)	Eficiência média de wave-to-wire	Capacidade instalada (kW)
Sem latching – COPPE WEC	31	22	2	4%	8
Com latching – COPPE WEC	31	63	7	13%	23
	1	86%		187%	

#### Custo nivelado de energia - Levelized Cost of Energy (LCOE)



$$LCOE = \frac{CapEx + \sum_{t=1}^{n} \frac{OpEx_{t}}{(1+r)^{t}}}{\sum_{t=1}^{n} \frac{Energia\ produzida\ por\ ano_{t}}{(1+r)^{t}}}$$



Andres at al. Techno-Economic Related Metrics for a Wave Energy Converters Feasibility Assessment-Energies, 2016 Laura Castro-Santos et al. Economic Feasibility of Wave Energy Farms in Portugal, 2018 - https://doi.org/10.3390/en11113149



## Considerações finais

- > Sistemas de controle são vitais para comercialização dos conversores de energia de onda.
- Consideração da força de viscosidade no modelo *wave-to-wire* é necessário para obter resultados realísticos.
- ➤ Controle latching trouxe melhorias na produção de energia elétrica, portanto, os desafios práticos como suprir a força necessária para travar a boia e tempo ótimo para destravar a boia precisam ser superados.
- > O conversor de energia de onda da COPPE se mostrou promissor, portanto, a redução de custo e a resistência do sistema nas condições de sobrevivência do mar são dois principais desafios.

# Obrigado!



