



# REVISTA BRASILEIRA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

## ESTUDO DOS PROCEDIMENTOS NUMÉRICOS PARA SIMULAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE GALGAMENTO<sup>1</sup>

JAIKER CORRÊA MARTINS<sup>2</sup>, DANTE VINÍCIUS ELOY BARBOSA<sup>3</sup>, MARCELO MORAES GOULART<sup>4</sup>, ANTÔNIO RICKES VIEGAS<sup>5</sup>, ANDERSON SORRIBAS FURICH<sup>5</sup>, LUIZ ALBERTO OLIVEIRA ROCHA<sup>6</sup>, JEFERSON AVILA SOUZA<sup>7</sup>, LIÉRCIO ANDRÉ ISOLDI<sup>7</sup>, ELIZALDO DOMINGUES DOS SANTOS<sup>7</sup>

<sup>1</sup> Apresentado no 7º Conferência Sul em Modelagem Computacional (MCSul) e do VII Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO).

<sup>2</sup> Doutorando em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), [jaifercm@gmail.com](mailto:jaifercm@gmail.com).

<sup>3</sup> Mestre em Engenharia Oceânica pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG), [dante\\_barbosa@yahoo.com.br](mailto:dante_barbosa@yahoo.com.br).

<sup>4</sup> Doutorando em Modelagem Computacional na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), [moraesgoulart@yahoo.com.br](mailto:moraesgoulart@yahoo.com.br).

<sup>5</sup> Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG), [antoniorviegas@hotmail.com](mailto:antoniorviegas@hotmail.com), [a\\_furich@hotmail.com](mailto:a_furich@hotmail.com).

<sup>6</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS),

<sup>7</sup> Professor do Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), [jasouza@furg.br](mailto:jasouza@furg.br), [liercioisoldi@furg.br](mailto:liercioisoldi@furg.br), [elizaldosantos@furg.br](mailto:elizaldosantos@furg.br).

**RESUMO** – O dispositivo de galgamento é um conversor de energia das ondas em energia elétrica. Seu princípio de funcionamento consiste no galgamento de ondas do mar através de uma rampa, a água então é acumulada no reservatório do dispositivo escoando por uma turbina de baixa queda ligada a um gerador, convertendo a energia potencial da água em energia elétrica. O presente trabalho aborda a simulação numérica de um dispositivo de galgamento de ondas, anteriormente estudado na literatura. O principal objetivo foi avaliar a influência do emprego de diferentes parâmetros e métodos numéricos disponíveis no *software* FLUENT sobre o comportamento transiente do galgamento. Para todos os casos testados foram empregados os seguintes parâmetros e/ou métodos: discretização da pressão foi utilizado o método *PRESTO*, acoplamento pressão-velocidade foram utilizados os métodos *PISO* e *SIMPLEC*, reconstrução geométrica, *Geo-Reconstruct* e *Modified HRIC*, e por fim, os esquemas advectivos *Upwind* de primeira ordem, *Upwind* de segunda ordem, *Upwind* de terceira ordem e *Power Law* foram empregados. Os resultados mostraram que o comportamento da altura de superfície livre da onda em função do tempo foi o mesmo para os diferentes esquemas de advecção, acoplamento pressão-velocidade e reconstrução geométrica. Com relação ao galgamento foi observado que os esquemas *Upwind* de primeira ordem e *Power Law* podem ser empregados para a determinação da massa total de água que entra no reservatório. Entretanto, em comparação com esquemas de ordem superior (segunda e terceira ordens), o esquema *Upwind* apresentou um comportamento com maior amortecimento nos picos de vazão mássica instantânea.

**Palavras-chave** - Dispositivo de galgamento, simulação numérica, esquemas de advecção.

## NUMERICAL PROCEDURES FOR SIMULATION OF AN OVERTOPPING DEVICE

**ABSTRACT** - Overtopping device is an ocean wave energy converter to electrical energy. Its main operational principle consists on the overtop ocean waves through a ramp, the accumulated water in the reservoir flows through a low-head turbine connected at an electric generator, converting the potential energy of the water in electric energy. The present work is about the numerical simulation of an overtopping device previously studied in the literature. The main objective was to evaluate the influence to use different parameters and numerical methods available in the software FLUENT on the transient behavior of the overtopping. For all the cases tested, the following parameters and / or methods were used: PRESTO method; for pressure-velocity coupling PISO and SIMPLEC methods; geometric reconstruction, Geo-Reconstruct and Modified HRIC; and the advective schemes Upwind of first order, Upwind of second order, Upwind of third order and Power Law were employed. The results showed that the behavior of the free surface height of the wave as a function of time was the same for the different advection schemes, pressure-velocity coupling and geometric reconstruction. Concerning to overtopping, was observed that the first-order Upwind and Power Law schemes can be used to determine the total mass of water entering to the reservoir. Indeed, in comparison to higher orders (second and third orders), the Upwind scheme showed a better damping behavior in the instantaneous mass flow peaks.

**Keywords** – Overtopping device, numerical simulation, advection Schemes.

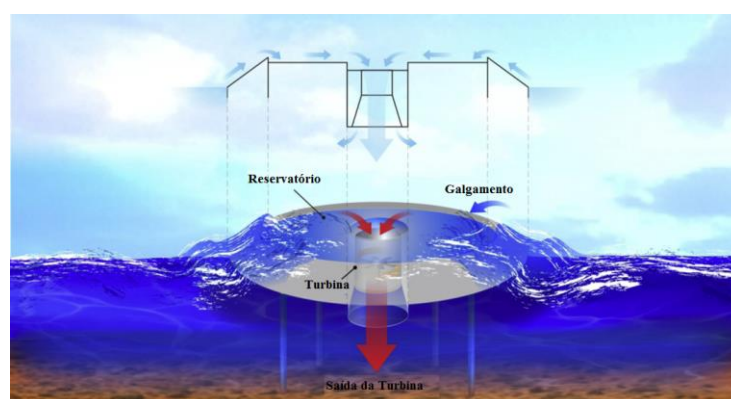
## INTRODUÇÃO

A maior parte dos estudos encontrados na literatura sobre o dispositivo de galgamento são experimentais, com a finalidade de avaliação de parâmetros construtivos do dispositivo (Kofoed et al. 2006, Margheritini et al. 2009). Porém, nos últimos anos houve um aumento de estudos no âmbito numérico, a fim de obter uma melhor compreensão da fenomenologia do escoamento, além de avaliar parâmetros geométricos (Beels et al. 2010, Rocha et al. 2013). Os dispositivos de galgamento são tecnologias fixas ou flutuantes, para aplicação em alto mar ou costeira. Seu princípio de funcionamento consiste no galgamento da onda do mar sobre uma rampa, onde a água ao passar pela mesma é acumulada em um tanque. No tanque é instalada uma turbina de baixa queda, onde o escoamento da água ao passar por esta, transformando a energia potencial em

cinética, que pela passagem sobre a turbina gera energia elétrica. Um exemplo de como ocorre o galgamento no dispositivo é mostrado na Fig. 1.

Entre os estudos encontrados na literatura, são apresentados a seguir os de maior relevância:

Kofoed (2002) realizou um estudo desenvolvendo orientações para o cálculo de descargas da água no galgamento para uma grande variedade de layouts de rampa por meio de experimentos em laboratório. Avaliando a influência de vários parâmetros geométricos tais como: a inclinação da rampa, diferença de altura entre a borda do topo da rampa e a superfície livre da água, a forma do projeto das paredes de orientação, a saída livre da água na descarga e o efeito do uso de múltiplos reservatórios com diferença de nível foram quantificados, com a finalidade de maximizar a energia potencial da água acumulada no galgamento. Com os resultados foi possível determinar, através dos seus experimentos, que a eficiência hidráulica global de conversores de energia das ondas, com base no princípio de galgamento, está entre 20% e 35% quando um único reservatório é utilizado, e até 45% - 50% para uma estrutura com quatro níveis nos reservatórios.



**Figura 1.** Dispositivo de Galgamento de Ondas (Adaptado de Li e Yu, 2012).

Em Liu et al. (2008) foi apresentada a modelagem computacional de um dispositivo do tipo de galgamento. Utilizando a metodologia VOF (*Volume of Fluid*) para a interação entre ar, água no dispositivo. Para isso, geometrias diferentes para o conversor foram analisadas empregando modelos computacionais 2D (bidimensional). As equações de conservação foram resolvidas com o método de volumes finitos, mais precisamente com o *software* FLUENT. Várias condições das ondas incidentes e geometrias do dispositivo foram analisadas, resultando em recomendações sobre a inclinação da rampa do dispositivo. Relações fixas de altura por comprimento da rampa de 1:1, 1:2 e 2:3 foram investigadas.

Iahnke (2010) avaliou a inclinação da rampa de um dispositivo de galgamento em um escoamento bidimensional. Considerou-se um clima de ondas, semelhante ao encontrado no sul do Brasil (cidade de Rio Grande, colocada em aproximadamente 32°S e 52°W). Nesse trabalho, observou-se que a melhor geometria foi obtida para um ângulo de 30°. Vale destacar que a área da rampa variava para cada caso.

Goulart (2014) fez um estudo numérico de análise e otimização da geometria da rampa de um dispositivo de galgamento através do método *Constructal Design*, para diferentes relações de altura e comprimento. Através da utilização de UDF (*User-Defined Function*) foi realizada a geração de ondas em um tanque contendo uma mistura de água e ar, onde as equações de conservação foram resolvidas com o método dos volumes finitos (MVF) pelo *software* FLUENT.

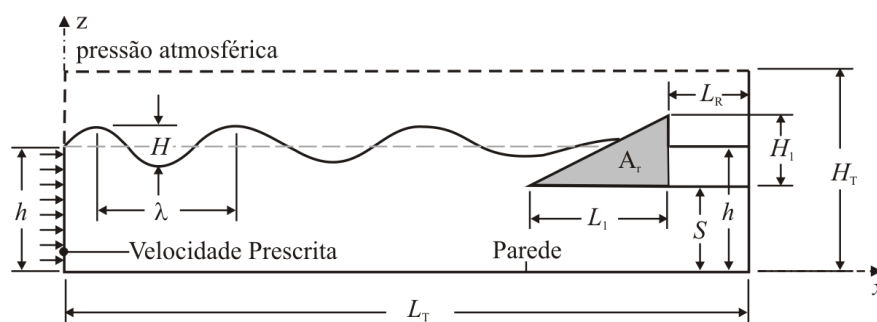
No presente trabalho foi realizada uma avaliação do efeito de diferentes parâmetros e métodos numéricos disponíveis no *software* FLUENT sobre o comportamento instantâneo e global de uma onda do mar em um dispositivo de galgamento estudado anteriormente em Goulart (2014). Para isso, é mensurada a vazão mássica de água que entra no dispositivo e a massa total de água acumulada no reservatório do mesmo. Foram avaliados isoladamente os efeitos de cada um dos parâmetros e métodos numérico sobre o comportamento instantâneo e global de uma onda monocromática sobre o dispositivo de galgamento. Os parâmetros e métodos numéricos avaliados formam: discretização da pressão foi utilizado o método *PRESTO*, esquemas de advecção (*Upwind* de 1ª, 2ª e de 3ª ordem e *PowerLaw*), métodos de fração volumétrica (*Geo-Reconstruct* e *Modified HRIC*) e métodos de acoplamento pressão velocidade (*PISO* e *SIMPLEC*). Sendo possível, assim, comparar o tempo de processamento, a vazão mássica e massa de água galgada no dispositivo para as diferentes combinações de parâmetros e métodos numéricos. Este tipo de análise é relevante pois possibilita a obtenção de modelos numéricos confiáveis, com a finalidade de determinar futuras recomendações teóricas para o projeto de dispositivos conversores de energia das ondas.

## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### *Descrição do problema e modelagem matemática*

Para este estudo foi utilizado o mesmo domínio computacional empregado por Goulart (2014), Fig. 2. O *software* comercial FLUENT (FLUENT, 2007), baseado no Método dos Volumes Finitos (MVF) (Patankar, 1980, Versteeg e Malalasekera, 2007) foi utilizado para a solução numérica das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e do modelo

multifásico *Volume of Fluid* (VOF) (Liu et al., 2008, Lv et al., 2011), sendo este usado para a abordagem adequada da interação entre ar-água. A Teoria Linear de Ondas foi empregada para geração da onda, realizada através da imposição de um campo de velocidades conhecido na entrada do tanque empregando uma Função Definida pelo Usuário (*User Defined Function* - UDF). As dimensões do domínio são: altura do tanque  $H_T = 20$  m, comprimento do tanque  $L_T = 327$  m, altura da lâmina de água  $h = 10,0$  m, submersão do tanque  $S = 3,5$  m, razão entre a área da rampa e a área do tanque  $\phi = 0,012$ , razão  $H_1/L_1 = 0,34$ , comprimento do reservatório  $L_R = 20$  m, comprimento da onda  $\lambda = 65,4$  m, período da onda  $T = 7,5$  s e altura da onda  $H = 1,0$  m.



**Figura 2.** Domínio computacional de um dispositivo de galgamento em escala real com dois graus de liberdades.

### *O modelo multifásico Volume of Fluid (VOF)*

A equação de conservação da massa para a mistura ar e água em um escoamento isotérmico, laminar e incompressível é dada por (Dos Santos et al., 2014):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

onde  $\rho$  é a massa específica da mistura ( $\text{kg/m}^3$ ) e  $\vec{v}$  o vetor de velocidade do escoamento ( $\text{m/s}$ ).

A equação de conservação da quantidade de movimento para a mistura é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

onde  $p$  é a pressão ( $\text{N/m}^2$ ),  $\rho \vec{v}$  e  $\vec{F}$  são as forças de campo e externas ao corpo ( $\text{N/m}^3$ ), respectivamente.

Neste trabalho, a única força de campo que atua sobre o escoamento é a força de empuxo, consequentemente o vetor de forças externas foi desconsiderado. O termo  $\bar{\tau}$  é o tensor taxa de deformação (N/m<sup>2</sup>), que para um fluido Newtoniano, é dado por:

$$\bar{\tau} = \mu \left[ \left( \nabla \cdot \vec{v} + \nabla \cdot \vec{v}^T \right) \right] \quad (3)$$

onde  $\mu$  é a viscosidade dinâmica (kg/(ms)). Para lidar com o escoamento da mistura de ar e água e avaliar a sua interação com o dispositivo, é empregado o método *Volume of fluid* (VOF). O VOF é um modelo multifásico usado para escoamentos de fluido com duas ou mais fases. Neste modelo, as fases são imiscíveis, ou seja, o volume de uma fase não pode ser ocupado por outra fase (Lv et al., 2011).

Nas simulações deste estudo, são consideradas duas diferentes fases: ar e água. Portanto, o conceito de fração de volume ( $\alpha_q$ ) é usado para representar as duas fases dentro de um volume de controle. Neste modelo, a soma das frações de volume, dentro de um volume de controle, deve ser unitária ( $0 \leq \alpha_q \leq 1$ ). Consequentemente, se  $\alpha_{\text{água}} = 0$ , o volume de controle está vazio de água e cheio de ar ( $\alpha_{\text{ar}} = 1$ ). Se o fluido tem uma mistura de ar e água, uma fase é o complemento da outra, ou seja,  $\alpha_{\text{ar}} = 1 - \alpha_{\text{água}}$ . Assim, uma equação de transporte adicional para uma das frações de volume é necessária (Lv et al., 2011, Dos Santos et al., 2014):

$$\frac{\partial(\rho\alpha_{\text{água}})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\alpha_{\text{água}}\vec{v}) = 0 \quad (4)$$

As equações de conservação de massa e quantidade de movimento foram resolvidas para a mistura. Portanto, foi necessário obter os valores de massa específica e viscosidade para a mistura, dadas por:

$$\rho = \alpha_{\text{água}}\rho_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\rho_{\text{ar}} \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_{\text{água}}\mu_{\text{água}} + \alpha_{\text{ar}}\mu_{\text{ar}} \quad (6)$$

Com relação à geração de onda, um perfil de velocidades é imposto na entrada do canal (superfície lateral esquerda da Fig. 2) e simula o comportamento de um gerador de onda (Horko,

2007). As componentes de velocidade nas direções de propagação de onda ( $x$ ) e vertical ( $z$ ) para o canal de entrada são baseados na Teoria Linear de Airy, dadas por (Chakrabarti, 2005):

$$u(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (7)$$

$$w(x, z) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \sigma t) \quad (8)$$

onde  $H$  é a altura de onda (m),  $k$  é o número de onda dado por  $k = 2\pi/\lambda$  ( $\text{m}^{-1}$ ),  $h$  é a profundidade da água (m),  $T$  é o período da onda (s),  $\sigma = 2\pi/T$  é a frequência (rad/s) e  $t$  é o tempo (s).

Para as outras condições de contorno, a região superior da superfície lateral esquerda, bem como, a superfície superior impõe-se uma pressão atmosférica  $P_{\text{abs}} = 101,3$  kPa (superfícies tracejadas na Fig. 2). Nas superfícies inferior, lateral direita, bem como, na superfície do dispositivo de galgamento é imposta uma condição de não-deslizamento e impermeabilidade ( $u = w = 0$  m/s). Com relação as condições iniciais, foi considerado que o fluido está em repouso e que a lâmina de água possui uma superfície livre com altura  $h = 10,0$  m.

### *Procedimentos numéricos*

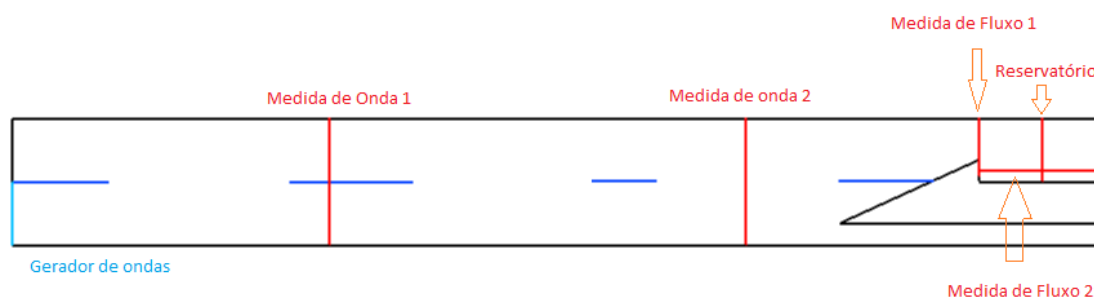
No presente trabalho foram testados diferentes esquemas de advecção, acoplamento pressão velocidade e esquemas de reconstrução geométrica. Entre os esquemas de advecção, foram estudados o *Upwind* de primeira, segunda e terceira ordens e método *Power Law*. Para o acoplamento pressão-velocidade foram avaliados os algoritmos *PISO* e *SIMPLEC* e para os esquemas de reconstrução geométrica os métodos *Modified HRIC* e *Geo-reconstruct*. Para discretização da pressão foi utilizado *PRESTO* para todos os casos. Um detalhamento das combinações entre os procedimentos utilizados é mostrado na Tabela 1.



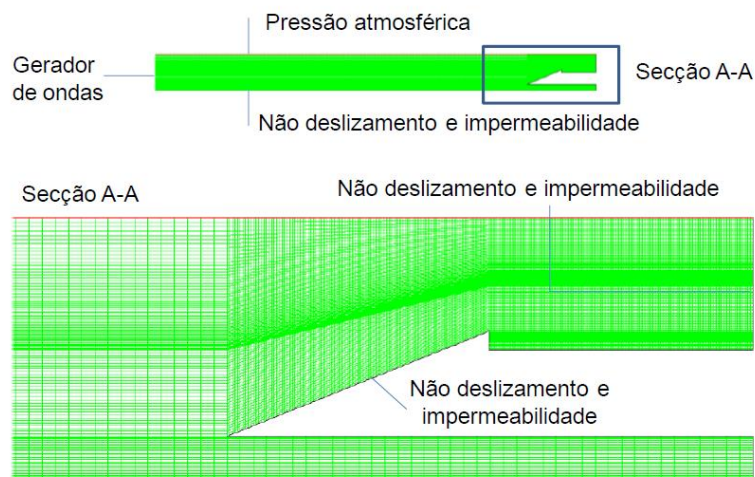
**Tabela 1.** Combinações de métodos de discretização.

Combinação	Discretização da pressão	Acoplamento Pressão-Velocidade	Método de fração volumétrica	Esquema de advecção
1	PRESTO	PISO	Geo-Reconstruct	First Order
	PRESTO	PISO	Geo-Reconstruct	Power Law
	PRESTO	PISO	Geo-Reconstruct	Second Order
	PRESTO	PISO	Geo-Reconstruct	Third Order
2	PRESTO	PISO	HRIC	First Order
	PRESTO	PISO	HRIC	Power Law
	PRESTO	PISO	HRIC	Second Order
	PRESTO	PISO	HRIC	Third Order
3	PRESTO	SIMPLEC	Geo-Reconstruct	First Order
	PRESTO	SIMPLEC	Geo-Reconstruct	Power Law
	PRESTO	SIMPLEC	Geo-Reconstruct	Second Order
	PRESTO	SIMPLEC	Geo-Reconstruct	Third Order
4	PRESTO	SIMPLEC	HRIC	First Order
	PRESTO	SIMPLEC	HRIC	Power Law
	PRESTO	SIMPLEC	HRIC	Second Order
	PRESTO	SIMPLEC	HRIC	Third Order

Além disso, na Fig. 3 são mostradas as cinco regiões onde foram colocados monitores dentro do volume de controle, ou seja, pontos nos quais ocorreram as medições. Estas cinco regiões foram chamadas de: Medida de Onda Um, Medida de Onda Dois, Medida de Fluxo Um, Medida de Fluxo Dois e Medida de Reservatório. Os monitores Medida de Onda Um e Medida de Onda Dois medem a altura da superfície livre ( $\eta$ ) da lâmina de água. Já os monitores Medida de Fluxo Um (vertical) e Medida de Fluxo Dois (horizontal) são utilizados para registrar a vazão mássica instantânea (kg/s) durante o escoamento. Já a Medida de Reservatório, é o monitor o qual mede a variação de altura de água acumulada no interior do reservatório ( $h_a$ ).

**Figura 3.** Posições dos monitores de análise de escoamento.

Na Figura 4 é mostrada a malha utilizada, com elementos retangulares, conhecida como *stretched* e as condições de contorno do domínio. Foram gerados aproximadamente 120000 volumes finitos retangulares, vale destacar que está foi a mesma malha empregada em Goulart (2014).



**Figura 4.** Discretização espacial aplicada ao dispositivo de galgamento *onshore* em escala real.

Além disso, nas simulações foram utilizados 5000 avanços no tempo e um passo de tempo de 0,02 segundos, totalizando os  $t = 100,0$  segundos de simulação, e 200 iterações por passo de tempo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os valores da quantidade de água acumulada no reservatório e o tempo decorrido (em horas) das simulações para um período de tempo  $t = 100,0$  s de escoamento, além de todas as combinações utilizadas no estudo. Os casos riscados na Tabela 2 foram aqueles onde a combinação de parâmetros não conduziu a soluções numéricas convergidas. Mais precisamente, a simulação foi interrompida pela divergência dos campos de velocidades, pressão e fração volumétrica.

Como pode ser visto na Tab. 2, a quantidade de água final no reservatório para cada combinação estudada é relativamente próxima para cada esquema de advecção. No entanto, a não convergência dos casos de segunda e terceira ordem com a utilização do método *Geo-Reconstruct* leva a uma carência de resultados de comparação para estes esquemas. Observando-se os casos da combinação *PRESTO*, *PISO* e *Modified HRIC*, pode-se considerar o caso onde se utiliza o esquema *Power Law* como um ponto fora da curva, uma vez que o mesmo apresentou um comportamento não esperado e diferente das outras três combinações.

Ainda na Tabela 2, são mostrados os tempos decorridos (em horas) de cada uma das simulações analisadas. Como ferramenta de medição de esforço computacional, foi utilizado o tempo decorrido em cada simulação, em condições consideradas ideais, ou seja, rodando apenas uma simulação de cada vez, com apenas o *software* FLUENT em execução. Para as combinações 1 e 2, o tempo decorrido para as simulações que convergiram apresentaram resultados satisfatórios e relativamente próximos entres si, sendo a diferença entre o maior e menor tempo, de apenas 5,85%. Já para o tempo decorrido para as simulações das combinações 3 e 4 a diferença entre maior e menor tempo foi de aproximadamente 4,8%.

Considerando agora a comparação entre as combinações que utilizam o método de acoplamento pressão-velocidade *PISO* com aqueles que utilizam *SIMPLEC*, nota-se uma diferença mais relevante entre tempos decorridos, chegando a 20,9% entre os casos extremos *PISO*, *PRESTO*, *Geo-Reconstruct*, *Upwind* de segunda ordem e *SIMPLEC*, *PRESTO*, *Geo-Reconstruct*, *Upwind* de primeira ordem. Percebe-se também, que os fatores que mais influenciam nos tempos decorridos das simulações são os métodos de acoplamento pressão-velocidade *PISO* e *SIMPLEC*. Tem-se, como esperado, que os tempos de simulação para os esquemas *Upwind* de primeira ordem e *Power Law* são menores que os esquemas de mais alta ordem, quando dentro da mesma combinação de procedimentos. Além disso, também se observou que os métodos *Geo-Reconstruct* e *Modified HRIC* não influenciam de forma efetiva a relação de esforço computacional.

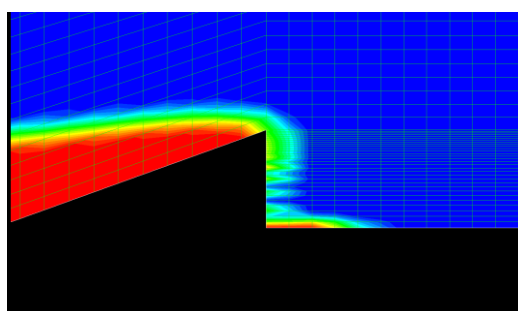
Para os casos de não convergência da solução apresentados na Tab.2, são mostradas nas Fig. 5a à 5d as representações de fração volumétrica imediatamente antes da solução divergir, para ilustrar assim, o momento em que se encontrava o escoamento.

A Figura 5a ilustra a fração volumétrica para o caso *PISO*, *Geo-Reconstruct*, *PRESTO* e *Upwind* de segunda ordem, onde pode-se notar que a divergência da solução ocorreu pouco após o início do galgamento de água para dentro do reservatório. Na Figura 5b é mostrada a representação da fração volumétrica para o caso *PISO*, *Geo-Reconstruct*, *PRESTO* e *Upwind* de terceira ordem, onde é possível observar que nem mesmo houve galgamento de água para o reservatório. Na Figura 5c é apresentada a relação de fração volumétrica para o caso *SIMPLEC*, *Geo-Reconstruct*, *PRESTO* e *Upwind* de segunda ordem, onde a divergência da solução ocorreu pouco tempo após o início da entrada de água no reservatório. Finalmente, na Figura 5d é mostrada a representação de fração volumétrica para o caso *SIMPLEC*, *Geo-Reconstruct*, *PRESTO* e *Upwind* de terceira ordem, onde percebe-se que a solução divergiu aproximadamente no momento do início do galgamento,

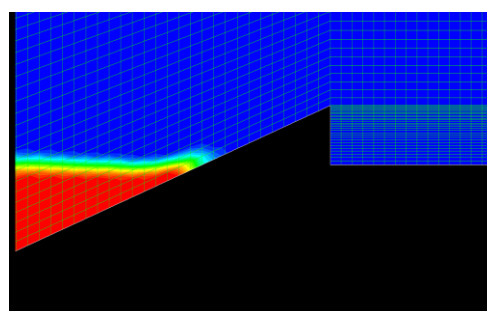
diferente do que aconteceu para o caso de terceira ordem com o método *PISO*. Vale destacar que a divergência da solução encontrada será investigada de forma mais detalhada em trabalhos futuros.

**Tabela 2.** Quantidade de água final no reservatório e tempo decorrido nas simulações.

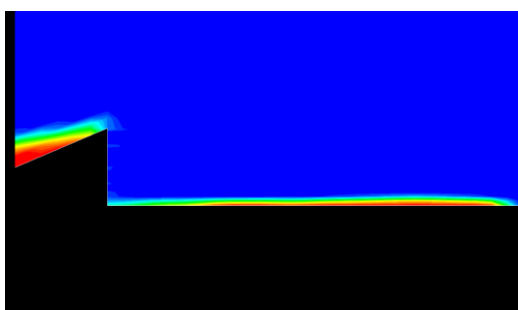
Combinação	Discretização da pressão	Acoplamento Pressão-Velocidade	Método de fração volumétrica	Esquema de advecção	Quantidade de água (kg)	Tempo decorrido (horas)
1	PRESTO	PISO	Geo-Reconstruct	First Order	8204,37	18:02
	PRESTO	PISO	Geo-Reconstruct	Power Law	8169,68	17:43
	PRESTO	PISO	Geo-Reconstruct	Second Order	180,94	xxxx
	PRESTO	PISO	Geo-Reconstruct	Third Order	140,77	xxxx
2	PRESTO	PISO	HRIC	First Order	8169,68	18:00
	PRESTO	PISO	HRIC	Power Law	7253,00	17:49
	PRESTO	PISO	HRIC	Second Order	8401,93	18:49
	PRESTO	PISO	HRIC	Third Order	8491,16	18:20
3	PRESTO	SIMPLEC	Geo-Reconstruct	First Order	8219,82	14:53
	PRESTO	SIMPLEC	Geo-Reconstruct	Power Law	8185,66	15:30
	PRESTO	SIMPLEC	Geo-Reconstruct	Second Order	190,02	xxxx
	PRESTO	SIMPLEC	Geo-Reconstruct	Third Order	257,86	xxxx
4	PRESTO	SIMPLEC	HRIC	First Order	7178,94	15:00
	PRESTO	SIMPLEC	HRIC	Power Law	7203,14	14:57
	PRESTO	SIMPLEC	HRIC	Second Order	8288,95	15:23
	PRESTO	SIMPLEC	HRIC	Third Order	8748,18	15:38



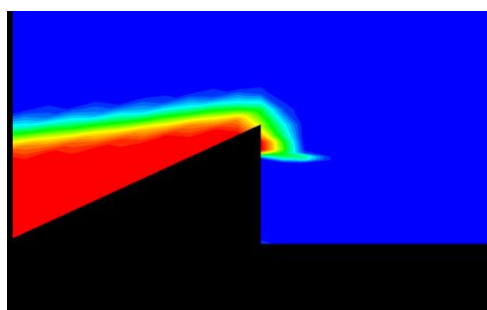
a)



b)



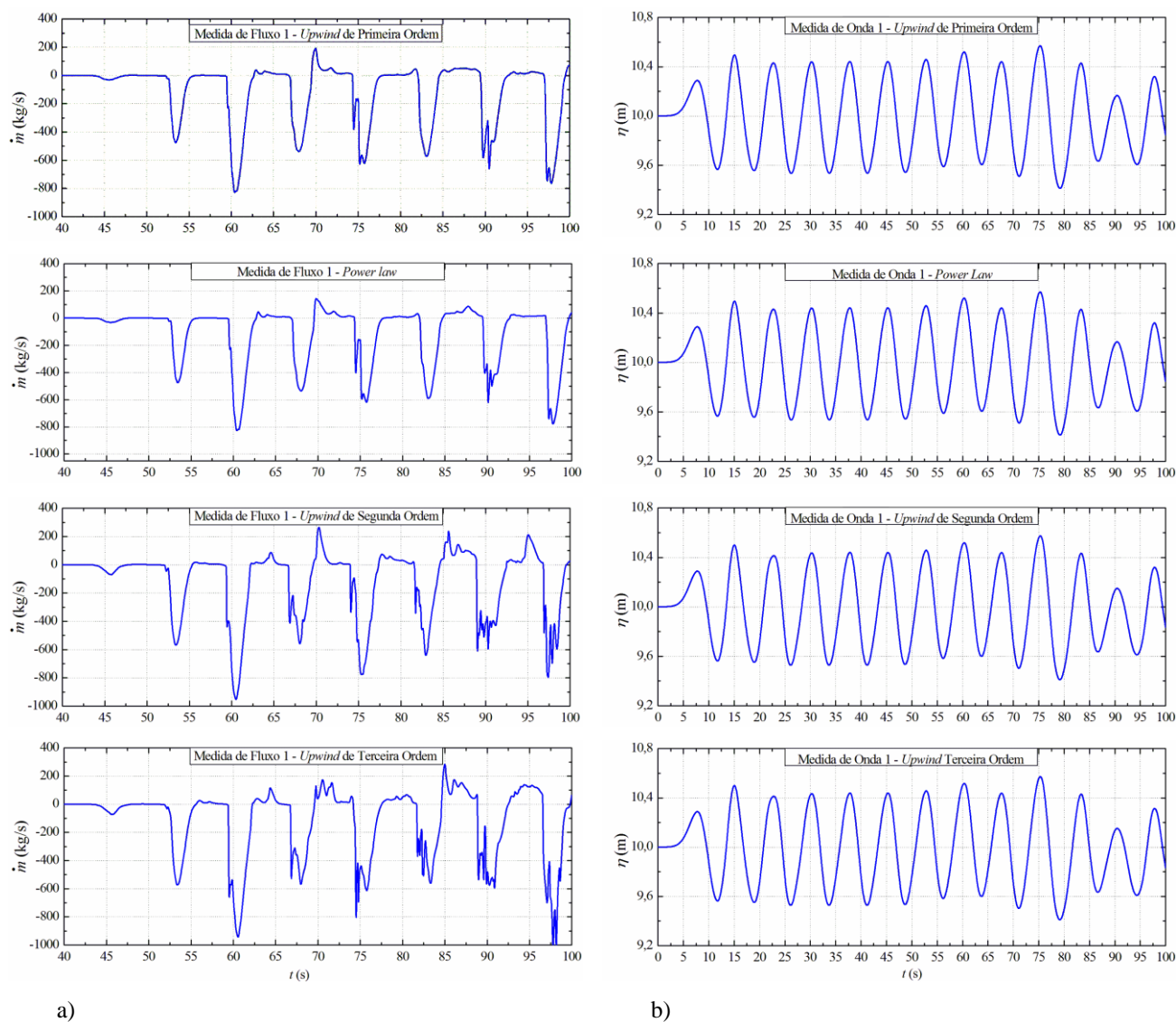
c)



d)

**Figura 5.** Frações volumétricas imediatamente antes das soluções divergirem.

A Figura 6a apresenta os resultados para a Medida de Fluxo 1 (um), sendo nesse caso utilizados os parâmetros *SIMPLEC*, *Modified HRIC* e *PRESTO* para cada um dos esquemas de advecção. Para esta combinação de parâmetros observa-se um aumento de intensidade dos fenômenos considerados não físicos, podendo-se dizer então, que a união dos métodos *SIMPLEC* e *Modified HRIC* para o problema em questão, causa um grau relativamente alto de oscilações indesejadas, até mesmo para o esquema *Upwind* de primeira ordem. Já a Figura 6b mostra o comportamento transiente da superfície livre da onda para os parâmetros *SIMPLEC*, *Modified HRIC* e *PRESTO*, para cada um dos esquemas de advecção. Além disso, o provável motivo do maior número de oscilações da solução apresentado pelo esquema *Upwind* de 3ª ordem em comparação com o *Upwind* de 1ª ordem, seja que o primeiro é naturalmente instável do ponto de vista numérico, enquanto o segundo é tem um maior amortecimento, porém é necessário investigar futuramente.



**Figura 6.** a) Medida de fluxo 1, b) Medida de onda 1 (combinação 4).

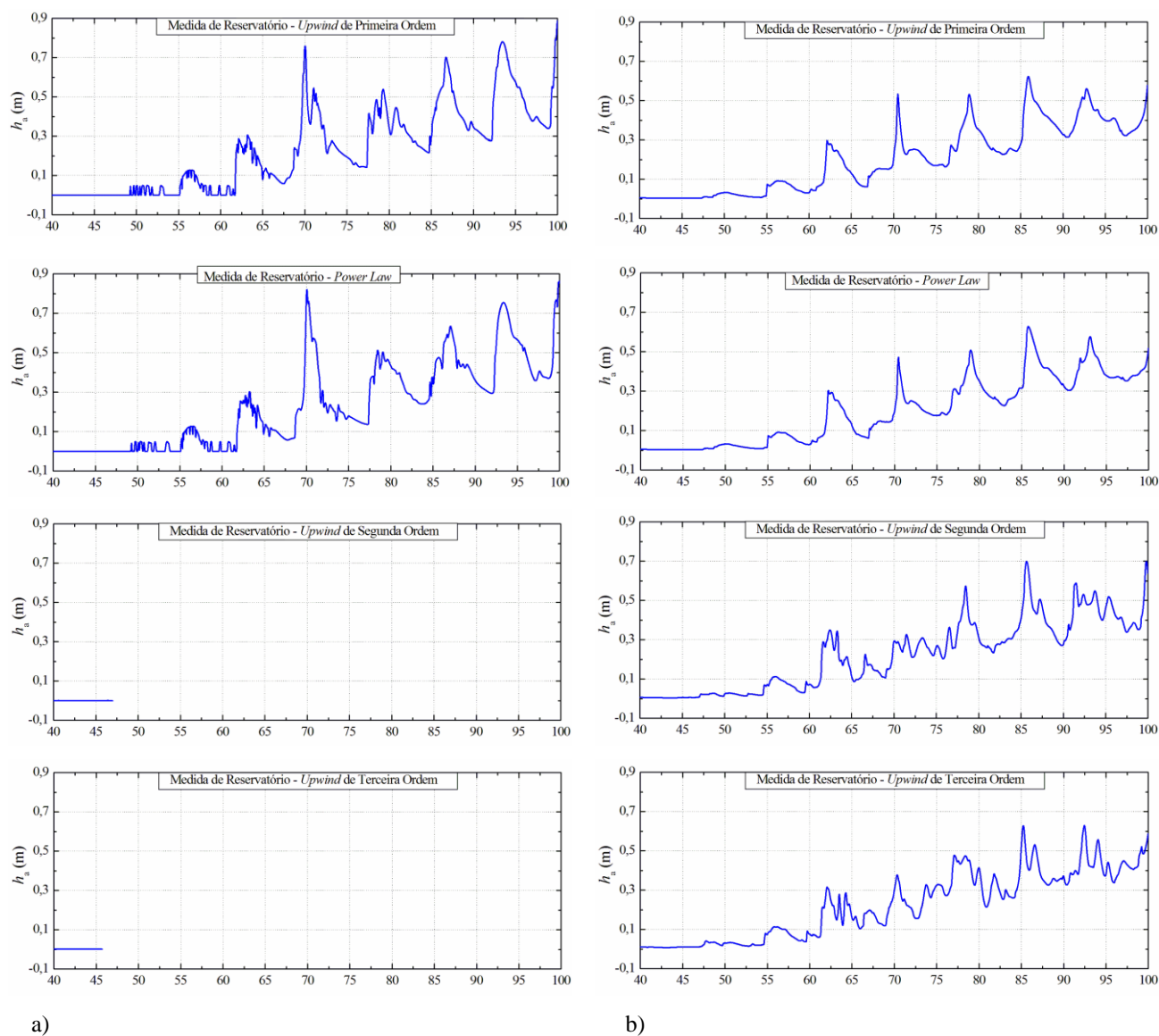
Na Figura 7 são apresentados os gráficos referentes à altura de água acumulada no reservatório em função do tempo para as combinações 3 e 4 medidas pelo monitor. Nessa linha de monitoramento é medida a fração de água presente no reservatório. Pode ser observado o crescimento do volume de fluido dentro do reservatório de forma pulsante, como já esperado para o dispositivo de galgamento, reforçando assim, a confiabilidade da simulação numérica para a estimativa do comportamento do acúmulo de água no dispositivo de galgamento. Também pode ser observado que, como a medida do acúmulo de água no reservatório é amortecida pela acomodação da água dentro do dispositivo, as diferenças nas flutuações (para os casos que convergiram) não é tão significativa. Também pode ser observado que a altura de água dentro da linha de monitoramento do reservatório é aproximadamente a mesma para os diferentes procedimentos no instante de tempo  $t = 100$  s. Des-

sa forma, os resultados tendem a uma indicação que para o projeto do dispositivo em função da massa acumulada no reservatório não sofre grande influência do tipo de procedimento numérico empregado. Pode ser destacado também que para estudos de avaliação geométrica e sua influência sobre a massa de água galgada e potência disponível, o esquema *upwind* de primeira ordem e a variação para os demais parâmetros podem ser empregados.

## CONCLUSÕES

O estudo consistiu na análise do comportamento do escoamento para os esquemas de advecção *Upwind* de primeira ordem, segunda ordem, terceira ordem e *Power Law*, de acoplamento pressão-velocidade *PISO* e *SIMPLEC*, métodos de fração volumétrica *Geo-Reconstruct* e *Modified HRIC* e discretização da pressão *PRESTO*. Para acompanhamento do escoamento foram utilizados cinco linhas de monitoramento: Medida de Fluxo 1, sendo a principal linha de análise por representar diretamente o escoamento de água para o reservatório sem a influência do mesmo, Medida de Fluxo 2, linha horizontal localizada dentro do reservatório, Medida de Onda 1 e Medida de Onda 2, ambas verticais e localizadas antes da rampa e Medida de Reservatório, responsável por captar a fração volumétrica de água dentro do reservatório.

A análise geral dos resultados indicou que a utilização do método *Geo-Reconstruct* em conjunto com os esquemas de advecção *Upwind* de segunda ou terceira ordem não é possível para o caso aqui estudado, mantendo-se os mesmos parâmetros e malha, pois não apresenta convergência da solução, podendo ser causada por conflito com a forma retangular da malha ou pela grande dificuldade em reproduzir o complexo fenômeno físico ocorrido durante o galgamento.



**Figura 7.** Medida de reservatório: a) combinação 3; b) combinação 4.

Além disso, foi analisado o esforço computacional exercido pelo *software FLUENT* na realização das simulações numéricas para todos os casos que obtiveram convergência da solução, através do tempo necessário para obtê-la. Como resultado pôde-se notar que apesar dos esquemas de advecção *Upwind* de segunda e terceira ordem utilizarem mais recursos computacionais, a diferença de tempo não foi significativa para o estudo em questão. Entretanto, comparando-se as combinações onde se utilizaram os métodos de acoplamento pressão-velocidade *PISO* e *SIMPLEC*, a diferença temporal se tornou mais relevante, se mostrando menor para o método *SIMPLEC*, chegando a cerca de 17% entre os casos do esquema *Upwind* de primeira ordem. Vale ressaltar que o problema aqui analisado consistiu no escoamento da mistura água e ar para um tempo  $t = 100$  s,



onde as simulações não duraram mais de 19 horas. Para um estudo de projeto de um dispositivo de galgamento podem ser necessários escoamentos de maior duração para análise mais precisa do problema, onde a diferença de 17% seria uma diferença considerável.

Com relação a análise da quantidade final de água presente do reservatório, captados pela linha de monitoramento Medida de Fluxo 1, os resultados obtidos não diferem muito entre si, demonstrando que os esquemas de menor ordem podem ser usados para fins de projeto sem prejuízos notáveis em precisão numérica. Considerando ainda a carência de resultados de casos com esquemas de maior ordem, pode-se dizer que a combinação 2, *PISO*, *Modified HRIC* e *PRESTO*, mostrou maior consistência de resultados, sendo o caso do esquema *Power Law* desconsiderado por apresentar comportamento distante daquele esperado, que deveria ser semelhante ao do esquema *Upwind* de primeira ordem. Para a linha de monitoramento Medida de Fluxo 2, conclui-se que a mesma não consiste na análise mais adequada para acompanhamento do escoamento, pois a mesma sofre influência do movimento da água de dentro do reservatório.

No que diz respeito a análise gráfica do comportamento da mistura água e ar no tanque, pôde-se notar que para as linhas de monitoramento Medida de Onda 1 e Medida de Onda 2, os resultados para qualquer caso que obteve convergência de solução são muito semelhantes, pois se encontram em uma região sem obstáculos físicos ao escoamento, facilitando a resolução numérica pelo *software* FLUENT.

Em relação a linha de monitoramento Medida de Reservatório, pode-se afirmar que a mesma é importante para comprovação de que o escoamento está ocorrendo de fato, sendo visível o volume crescente de água no reservatório.

De forma geral, apesar dos casos de solução divergente, confirmaram-se informações encontradas na literatura, que indicam que os esquemas de advecção de mais alta ordem reproduzem o problema de forma mais detalhada que os esquemas de menor ordem, porém, podendo apresentar oscilações espúrias, como aconteceu para todos os casos de segunda e terceira ordem, onde pode-se observar parte do fluxo conduzido para o sentido contrário do escoamento. Os esquemas de menor ordem, *Upwind* de primeira ordem e *Power Law*, apresentaram comportamento mais amortecido para estimativa dos picos de vazão mássica instantânea.

## AGRADECIMENTOS

O autor J. C. Martins agradece a CAPES pela bolsa de estudo. Os autores L. A. O. Rocha, J. A. Souza, L. A. Isoldi e E. D. dos Santos agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro.

**REFERÊNCIAS**

BEELS, C.; TROCH, P.; DE VISCH, K.; KOFOED, J. P.; DE BACKER, G.; Application of the time-dependent mild-slope equations for the simulation of wake effects in the lee of a farm of Wave Dragon wave energy converters. **Renewable Energy**. 35(8):1644–61. 2010.

CHAKRABARTI, S. K. **Handbook of offshore engineering**. Amsterdam; London: Elsevier. 2005.

DOS SANTOS, E. D.; MACHADO, B. N.; ZANELLA, M. M.; GOMES, M. DAS N.; SOUZA J. A.; ISOLDI, L. A.; Numerical Study of the Effect of the Relative Depth on the Overtopping Wave Energy Converters According to Constructal Design. **Defect Diffusion Forum**. 348: 232–44. 2014.

FLUENT, **Manual do fluent** (version 6.3.16), 2007.

GOULART, M. M.; **Estudo numérico da geometria de um dispositivo de galgamento onshore em escala real empregando constructal design**. Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, 2014.

HORKO, M.; **CFD Optimisation of an Oscillating Water Column Energy Converter**, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, The University of Western. 2007.

IAHNKE, S. L. P.; **Estado da Arte e Desenvolvimento de um Modelo de Simulação Numérica para o Princípio de Galgamento**, Dissertação de Mestrado em Modelagem Computacional, Universidade Federal do Rio Grande, 2010.

KOFOED, J. P.; FRIGAARD, P.; FRIIS-MADSEN, E.; SØRENSEN, H. C.; Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. **Renewable Energy**. 31(2):181–189. 2006.

KOFOED, J. P.; **Wave Overtopping of Marine Structures: Utilization Of Wave Energy**, Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Hydraulics & Coastal Engineering Laboratory, Department of Civil Engineering: Aalborg University. 2002.

LI, Y.; YU, Y.-H.; A synthesis of numerical methods for modeling wave energy converter-point absorbers, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16: 4352 – 4364. 2012.

LIU, Z.; HYUN, B.; JIN, J.; Numerical Prediction for Overtopping Performance of OWEC. **J Korean Soc Mar Environ Eng**. 11(1):35–41. 2008.

LV, X.; ZOU, Q.; REEVE, D.; Numerical simulation of overflow at vertical weirs using a hybrid level set/VOF method. **Adv Water Resour**. 34(10):1320–34. 2011.

MARGHERITINI, L.; VICINANZA, D.; FRIGAARD, P.; SSG wave energy converter: Design, reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. **Renewable Energy**. 34(5):1371–80. 2009.

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York, USA: McGraw Hill. 1980.

ROCHA, L. A. O.; LORENTE, S.; BEJAN, A.; **Constructal law and the unifying principle of design**. New York: Springer. 2013.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W.; **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Pearson. 2007.