

Artigo Científico

# Fluidodinâmica computacional da descarga marinha de solução hipersalina

*Computational fluid dynamics of marine discharge of hypersaline solution*

Levi de Brito Ximenes<sup>1</sup> , Silvano Porto Pereira<sup>2</sup> , Iran Eduardo Lima Neto<sup>1\*</sup> 

## RESUMO

Visando a uma alternativa ao abastecimento público de água, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará lançou edital para implantação de uma planta de dessalinização. A solução hipersalina, rejeito do processo de dessalinização, será despejada no mar. Pela diferença de densidade entre os fluidos, o escoamento se divide em duas regiões: jato ascendente, com grande quantidade de movimento; e fonte descendente, onde o fluxo é governado pelo empuxo negativo. A presente pesquisa apresenta uma modelagem da dinâmica dos fluidos computacional (*computational fluid dynamics*) de jatos e fontes, através do *software* Ansys Fluent, com foco nas condições de projeto apresentadas para a planta de dessalinização de Fortaleza. O modelo foi comparado aos dados disponíveis na literatura e, em seguida, simulado para as características da planta de dessalinização da Companhia de Água e Esgoto do Ceará. Além disso, os resultados foram comparados aos obtidos através de simulações com o *software* integral Visual Plumes para diferentes ângulos de descarga (30°, 45°, 60° e 90°). Os resultados apresentaram boa concordância com os trabalhos publicados, gerando a equação  $Z_m/D = 1,8 Fr$ , capaz de prever a altura alcançada por jatos/fontes ( $Z_m$ ), dados o diâmetro do difusor e o número de Froude. As simulações do tipo *computational fluid dynamics* foram semelhantes às obtidas com o Visual Plumes.

**Palavras-chave:** CFD; fluente; fontes; jatos; salmoura; Visual Plumes.

## ABSTRACT

Seeking an alternative for public water supply, the Water and Sewage Company of the State of Ceará launched a public bidding for the implementation of a desalination plant. The hypersaline solution, discarded from the desalination process, will be dumped into the sea. Due to the density difference between the fluids, the outflow is divided into two regions: ascending jet, with large momentum; and descending fountain, where the flow is governed by the negative buoyancy. This research presents a computational fluid dynamics modeling of jets and fountains, through the Ansys Fluent software, focusing on the project conditions presented for the desalination plant in Fortaleza. The model was compared to the data available in the literature and then simulated for the characteristics of the Water and Sewage Company of the State of Ceará desalination plant. In addition, the results were compared to those obtained through simulations with the integral Visual Plumes software for different discharge angles (30°, 45°, 60° and 90°). The results revealed a good agreement with published data, generating the equation  $Z_m/D = 1,8 Fr$ , which is able to predict the height reached by the jets/fountains ( $Z_m$ ), based on the diffuser diameter and the Froude number. The computational fluid dynamics simulations produced similar results as those obtained with Visual Plumes.

**Keywords:** CFD; fluent; fountains; jets; brine; Visual Plumes.

## INTRODUÇÃO

O aumento populacional com consequente avanço no consumo de água, além dos efeitos das mudanças climáticas na escassez de água doce, tem levado ao uso da dessalinização de água salgada ou água salobra (AS) como alternativa no abastecimento humano (ALMEIDA *et al.*, 2020), como é o caso de Fortaleza e outros 18 municípios que formam a sua macrorregião. Em função disso, a Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) lançou edital para implantação de uma planta de dessalinização visando atender aproximadamente 300

mil pessoas, com expectativa de produção de 1 m<sup>3</sup> de água potável por segundo (PEREIRA *et al.*, 2021).

Plantas de dessalinização, bem como usinas termelétricas e instalações de tratamento de água, geram rejeitos que são usualmente despejados no oceano, ocasionando uma variedade de problemas de saúde pública e, principalmente, ambientais (JONES, 2015). No caso das plantas de dessalinização, o rejeito é um fluido hipersalino que, apesar de apresentar menor risco à saúde pública, tem efeitos, no longo prazo, na vida marinha reconhecidos pela comunidade

<sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará – Fortaleza (CE), Brasil.

<sup>2</sup>Companhia de Água e Esgoto do Ceará – Fortaleza (CE), Brasil.

\*Autor correspondente: iran@deha.ufc.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Processo nº 441115/2016-0/BRICS-CNPq.

Recebido: 24/01/2021 – Aceito: 02/02/2023

científica (EINAV; HARUSSI; PERRY, 2003; GARCIA *et al.*, 2007; MABROOK, 1994; MATSUMOTO; MARTIN, 2008).

Visando à diminuição dos impactos ambientais através da diluição do fluido próximo à fonte, um recurso muito utilizado são os difusores. Estes têm como objetivo realizar mistura rápida, reduzindo a salinidade do concentrado a níveis próximos ao ambiente (ROBERTS, 2015). Os difusores expulsam a solução em fluxo ascendente, caracterizado por escoamento com grande quantidade de movimento e definido como jato. Com o distanciamento da origem desse jato, o escoamento passa a ser governado pelo empuxo negativo a que o fluido é submetido, desse modo enquadrado na definição de fonte: fluxos localizados que são livres para circular no ambiente e para os quais a força de flutuação está em uma direção que se opõe ao fluxo da fonte (HUNT; BURRIDGE, 2015).

A literatura dispõe de diversos trabalhos experimentais sobre o assunto — como os de Turner (1966), Abraham (1967), Zeitoun e McIlhenny (1971), Tong e Stolzenbach (1979), James, Vergara e Kim (1983), McLellan e Randall (1986), Roberts, Ferrier e Daviero (1997), Bloomfield e Kerr (1998; 2002), Cipolina *et al.* (2005), Nemlioglu e Roberts (2006), Kikkert, Davidson e Nokes (2007), Ansong, Kiba e Sutherland (2008), Shao e Law (2010), Ansong, Anderson-Frey e Sutherland (2011), Mehaddi, Vauquelin e Candelier (2012; 2013) e Lima Neto, Cardoso e Woods (2016) —, os quais obtiveram equações preditivas da altura alcançada por fontes em diferentes situações, utilizando distintos métodos e distintas formas de avaliação. No entanto, ainda não há consenso com relação à melhor formulação a ser adotada em cada caso, uma vez que os resultados gerados por diferentes autores divergem significativamente entre si.

Modelos matemáticos também são utilizados como ferramenta de simulação de jatos hipersalinos, podendo ser baseados em análise dimensional, integração das equações do movimento e modelagem numérica usando dinâmica dos fluidos computacionais (*computational fluid dynamics* — CFD) (PALOMAR; LARA; LOSADA, 2012; PALOMAR *et al.*, 2012). Dentre os modelos que utilizam análise dimensional e integração das equações do movimento, destacam-se o CORMIX (AKAR; JIRKA, 1991; DONEKER; JIRKA, 1990; 2001), o CorJet (BLENINGER; JIRKA, 2008; JIRKA, 2004; 2006), o VISJET (LEE; CHEUNG, 1990) e o Visual Plumes (FRICK, 2004). Por outro lado, a literatura apresenta um número limitado de trabalhos sobre o uso de modelos baseados em CFD, como o Ansys Fluent, o CFX e o OpenFOAM, para a aplicação específica em simulações de descargas salinas, como é o caso de Tang *et al.* (2008), Oliver, Davidson e Nokes (2008), Plum (2008), Muller, Seil e Hubbert (2011) e Abou-Elhaggag, El-Gamal e Farouk (2011). Embora demandem maior esforço computacional do que os modelos integrais como o CORMIX e o Visual Plumes, os modelos CFD fornecem informações mais detalhadas do escoamento (médio e turbulento) e podem resolver problemas com geometrias mais complexas, envolvendo inclusive interações entre múltiplos jatos e correntes ambientes estratificadas.

Dada a escassez de estudos envolvendo simulações do tipo CFD para a descarga e dispersão de soluções hipersalinas e a falta de orientações gerais visando à máxima diluição dos efluentes, o presente artigo visa investigar a fluidodinâmica computacional de jatos e fontes. Utilizando um modelo de referência na área de simulação de escoamentos complexos (Ansys Fluent 2020R1), os resultados serão aplicados ao caso real da planta de dessalinização a ser instalada pela CAGECE em Fortaleza e comparados aos resultados gerados pelo Visual Plumes. Além da análise detalhada de aspectos médios e transientes do

escoamento, também será proposta uma nova formulação para prever a altura alcançada pela descarga hipersalina. Espera-se que os resultados deste estudo possam auxiliar na otimização dos processos de descarga e dispersão de soluções hipersalinas no oceano.

## METODOLOGIA

A metodologia será dividida em três partes: a primeira é referente aos modelos e métodos de solução disponíveis no Ansys Fluent; a segunda refere-se à criação de uma simulação validada com modelos já existentes; e a terceira se relaciona à elaboração de simulação com as condições reais a serem implantadas pela CAGECE, na planta de dessalinização, utilizando o modelo validado na primeira etapa.

### Ansys Fluent 2020R1

Em sua versão de 2022, o *software* Ansys Fluent<sup>1</sup> é continuamente aperfeiçoado para organizar o processo de execução de simulações com um fluxo de trabalho baseado em tarefas que guiam o usuário através do processo de simulação, reduzindo as opções em cada ponto do processo para aquelas mais relevantes e fornecendo as melhores práticas como padrão. Com uso de CFD baseada no Método dos Volumes Finitos (MVF) para discretização espacial do domínio do escoamento, esse *software* permite ao usuário escolher entre uma gama de técnicas para simulações, das quais se pode destacar o modelo do tipo Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), que apresenta esforço computacional relativamente baixo na modelagem de escoamentos turbulentos. Cabe salientar que, no modelo, podem ainda ser inseridos ou retirados termos das equações de continuidade, quantidade de movimento e energia, dependendo do problema a ser analisado. O modelo de fechamento de turbulência adotado neste artigo foi o k- $\epsilon$ , por se tratar de um modelo amplamente validado pela comunidade científica (GILDEH *et al.*, 2015). Conhecido por sua precisão, o Ansys Fluent se utiliza de computação de alto desempenho para resolução de escoamentos complexos, sendo validado para ampla gama de aplicações industriais e ambientais (ÇENGEL; CIMBALA, 2017).

### Geometria e malha

Na primeira etapa da pesquisa, foi criado um modelo virtual com o objetivo de determinar os modelos e métodos capazes de produzir resultados consistentes com o que a literatura apresenta para a escala de laboratório. Utilizando o Ansys DesignModeler, recriou-se a geometria de um tanque de medidas 0,6 m de largura, 1,2 m de comprimento e 0,6 m de altura, no qual, no meio, foi colocado o dispositivo de entrada da solução hipersalina, um tubo de 5 cm de comprimento e diâmetro de 5 mm. A fim de reduzir o número de nós e elementos e decorrente da simetria do tanque, foi criado o modelo de apenas  $\frac{1}{4}$  do domínio, como mostrado na Figura 1, aplicando contornos de simetria. Tal simplificação geométrica tem suporte nos estudos experimentais, teóricos e numéricos conduzidos pelos autores em escoamentos monofásicos/multifásicos gerados pela descarga vertical de jatos, plumas e fontes em tanques de laboratório e corpos hídricos lênticos (LIMA NETO; ZHU; RAJARATNAM, 2008a; LIMA NETO; CARDOSO; WOODS, 2016; LIMA; LIMA NETO, 2018; LIMA NETO, 2012; 2019a; 2019b).

Como é possível perceber, o Ansys Meshing refina automaticamente a malha ao redor das superfícies de entrada do fluido, diminuindo a dimensão

<sup>1</sup> <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.

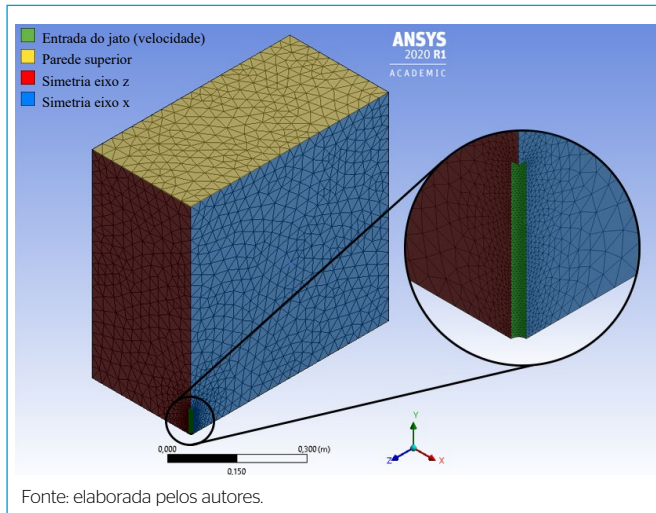


Figura 1 - Malha criada no Ansys Meshing e detalhamento das regiões de interesse.

dos elementos. Tendo em vista que, nesses pontos de descarga, ocorrem os maiores gradientes de velocidade, o refinamento da malha neles foi necessário. Foram testados quatro tipos de malhas para o referido modelo, com dimensões médias dos elementos de 0,002; 0,005; 0,007; e 0,010 m. As malhas de 0,002 e 0,005 m forneceram convergência numérica com resíduos dentro dos limites preconizados pelo Ansys Fluent ( $< 10^{-6}$ ) e características médias e flutuações do escoamento com diferenças inferiores a 0,5%. Logo, selecionou-se a malha de 0,005 m, uma vez que, para o mesmo tempo de escoamento ( $t = 100$  s), o tempo de processamento foi em torno da metade ( $\approx 5$  h) daquele observado para a malha de 0,002 m ( $\approx 11$  h).

## Modelo matemático

As simulações numéricas do escoamento consideraram um sistema bifásico constituído por um único fluido, água, mas com massas específicas diferentes, ambas em regime transiente e turbulento. Ao contrário de um sistema monofásico, que considera a mistura das águas, com as propriedades dessa mistura, o sistema bifásico permite inserção das propriedades individuais de cada componente da mistura, bem como suas frações volumétricas.

A base teórica detalhada do modelo matemático e das técnicas numéricas utilizados pode ser encontrada no manual do *software* (ANSYS, 2020 — ver modelo multifásico). Por se tratar de um modelo multifásico do tipo euleriano, as leis de conservação de massa e momento para cada fase foram aplicadas. As propriedades turbulentas do fluido foram avaliadas usando o modelo padrão  $k-\epsilon$ , que simula as características de fluxo médio para as condições turbulentas que satisfazem as equações de transporte para a energia cinética turbulenta  $k$  e a sua taxa de dissipação  $\epsilon$ . Um detalhamento das equações e técnicas numéricas utilizadas no presente estudo é apresentado em Ximenes (2021).

Para definir as condições de fluxo, as fronteiras e condições de contorno foram detalhadas. São ao todo cinco:

1. entrada, em que foi especificada a fração volumétrica da água do mar e da solução hipersalina, além da velocidade desta última, mantendo as condições padrão de contorno da turbulência, sendo elas intensidade (5%) e razão de viscosidade (10), utilizadas pelo Ansys Fluent para determinar os valores de  $k$  e  $\epsilon$  através das Equações 1 e 2;

2. paredes, especificando a rugosidade, que influencia na presença de força de cisalhamento;
3. fluido interior;
4. simetria  $z$ ; e
5. simetria  $x$ .

O Ansys Fluent assume um fluxo zero de todas as quantidades nos planos de simetria, ou seja, velocidade normal e gradientes de todas as variáveis são zeradas nos planos definidos.

$$k = \frac{3}{2} (u_{avg} I)^2 \quad (1)$$

$$\epsilon = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\mu} \left( \frac{\mu_t}{\mu} \right)^{-1} \quad (2)$$

Em que:

$\mu_{avg}$  = velocidade média do fluxo;

$I$  = intensidade de turbulência;

$\rho$  = massa específica do fluido;

$C_{\mu}$  = constante empírica específica do modelo de turbulência;

$\frac{\mu_t}{\mu}$  = razão da viscosidade turbulenta.

As velocidades inseridas na fronteira de entrada, para testes iniciais, foram tais que produzissem números de Froude ( $Fr$ ) na faixa  $4 < Fr < 60$ , intervalo este que abrange as condições de projeto da planta de dessalinização da CAGECE e está classificado segundo Burridge e Hunt (2012) como a faixa para fontes forçadas e altamente forçadas. Também foram escolhidas de modo que contemplasse escoamentos em regimes laminares, de transição e turbulento, com número de Reynolds ( $Re$ ) entre  $360 < Re < 5600$ . Assim, adotou-se a velocidade de  $0,6 \text{ m.s}^{-1}$  para início dos testes. Note que os números  $Fr$  e  $Re$  são dados pelas Equações 3 e 4:

$$Fr = V_0 / [Dg(\rho - \rho_0) / \rho_0]^{0.5} \quad (3)$$

$$Re = V_0 D / \nu, \quad (4)$$

Em que:

$V_0$  = velocidade de descarga do fluido hipersalino;

$\rho$  = massa específica desse fluido;

$\rho_0$  = massa específica do fluido ambiente;

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido ambiente;

$D$  = diâmetro do tubo de descarga (difusor).

Essa definição do  $Fr$  apresentada, denominada número de Froude denso-métrico, é constantemente utilizada para descrição de jatos, plumas e fontes (BURRIDGE; HUNT, 2012; JAMES; VERGARA; KIM, 1983; LIMA NETO; ZHU; RAJARATNAM, 2008a; LIMA NETO; CARDOSO; WOODS, 2016; TURNER, 1966), uma vez que caracteriza a força de inércia no escoamento em relação à força de flutuação oposta (empuxo negativo) (HUNT; BURRIDGE, 2015).

Até este ponto, o problema era bem definido pela literatura e pelas condições próprias. Entretanto, para definir completamente a simulação, necessitava-se definir o modelo de viscosidade e de turbulência, bem como os métodos de solução apropriados. Em decorrência da falta de protocolos específicos e da

singularidade do sistema, inúmeras simulações foram executadas alternando entre os modelos e métodos, utilizando inicialmente aqueles que a literatura (ÇENGEL; CIMBALA, 2017) e o próprio manual do *software* (ANSYS, 2020) afirmavam serem os mais coerentes para o problema.

Na Tabela 1, são apresentados os modelos, métodos e parâmetros que melhor se adequaram à situação. No caso dos demais parâmetros não apresentados na referida tabela, foram utilizados os valores padrão do programa.

O modelo euleriano multifásico foi escolhido tendo em vista a possibilidade de se modelarem múltiplas fases e a interação entre elas, em contrapartida dos modelos Volume de Fluido (*Volume of Fluid* — VOF), usado para fluidos imiscíveis, e Mistura, usado em casos multifásicos com interação mais simples. O Ansys Fluent utiliza um único valor de pressão (P) compartilhado entre as fases (“p” e “q”), solucionando as equações de momento e continuidade para cada uma, as quais se apresentam respectivamente pelas Equações 5 e 6:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n [K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq}\vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp}\vec{v}_{qp}] + \vec{F} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho_r} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (6)$$

**Tabela 1 - Modelos, métodos e parâmetros adotados nas melhores soluções.**

Parâmetro	Setting
Modelos	
Multifásico	Euleriana
Fase 1	Fluido hipersalino
Fase 2	Água do mar
Viscosidade	Realizable k-ε
Turbulência	Mistura
Métodos de solução	
Esquema	Acoplado (solução da fração volumétrica das 'n' fases)
Gradiente	Baseado no nó de Green-Gauss
Pressão	PRESTO!
Momento	Terceira ordem MUSCL
Fração volumétrica	QUICK
Energia cinética turbulenta	Terceira ordem MUSCL
Razão de dissipação turbulenta	Terceira ordem MUSCL
Formulação transiente	Segunda ordem
Controle de solução	
Número de Courant do escoamento	50
Inicialização (híbrida)	
Patch*	Fração volumétrica da Fase 2 = 1
Controle de cálculo	
Número de passos de tempo	200
Tamanho do passo de tempo (s)	0,5
n° máx. de iterações/ passo de tempo	30

\*Opção para indicar a condição inicial do ambiente. Para o caso, o meio estava totalmente preenchido pela Fase 2 (água do mar). MUSCL: Monotonic Upstream-Centered Scheme for Conservation Laws. Fonte: elaborada pelos autores.

Em que:

α = fração volumétrica;

ρ = representa a massa específica;

$\vec{v}$  = velocidade;

$\vec{g}$  = gravidade;

“p” e “q” = fases às quais as variáveis estão associadas;

$\dot{m}_{pq}$  e  $\dot{m}_{qp}$  = transferência de massa da fase “p” para a fase “q” e da fase “q” para a fase “p”, respectivamente.

Entretanto, vale salientar que, neste trabalho, não houve modelagem de partícula e, portanto, não se considerou transferência de massa entre as fases. Logo, os termos lagrangianos das Equações (5) e (6), os quais envolvem a função somatório, são nulos. A velocidade  $\vec{v}_{pq}$  é determinada pelo Ansys Fluent como: se  $\dot{m}_{pq} > 0$ ,  $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p$ ; e se  $\dot{m}_{qp} > 0$ ,  $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_q$ .

O modelo de viscosidade foi selecionado de modo que produza um resultado mais preciso. O modelo *Realizable k-ε*, segundo Gildeh *et al.* (2015), juntamente com o modelo Launder-Reece-Rodi (LRR — Launder, Reece e Rody, 1975) são capazes de produzir resultados mais acurados em detrimento de outros sete modelos analisados em sua pesquisa. Os métodos de solução escolhidos foram os de ordem maior, visando à maior precisão nos resultados, uma vez que o próprio Ansys Fluent os recomenda quando da obtenção de resultados finais.

A seleção do modelo de turbulência Mistura se deu pelo fato de a razão entre as massas específicas das fases ser próximo de 1, uma vez que o uso das propriedades e velocidades da mistura é suficiente para definir o escoamento turbulento. Desse modo, as equações de k e ε estão descritas nas Equações 7 e 8:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m k) = \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \right) \nabla^2 k \right] + G_{k,m} - \rho_m \epsilon + \Pi_{k,m} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \epsilon) = \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla^2 \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) + \Pi_{\epsilon,m} \quad (8)$$

Em que a massa específica da mistura,  $\rho_m$ , a viscosidade molecular,  $\mu_m$ , e a velocidade,  $\vec{v}_m$ , são computadas a partir das Expressões 9, 10 e 11:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \quad (9)$$

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_i \quad (10)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \vec{v}_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i} \quad (11)$$

Em que:

o índice “i” = variável da i-ésima fase.

A viscosidade turbulenta da mistura,  $\mu_{t,m}$ , e a produção de energia cinética turbulenta,  $G_{k,m}$ , são dadas respectivamente pelas Equações 12 e 13:

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (12)$$

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} [\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T] : \nabla \vec{v}_m \quad (13)$$

Para as constantes apresentadas, o Ansys Fluent utiliza como padrão os seguintes valores:  $C_{1\epsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\epsilon} = 1,92$ ; e  $C_\mu = 0,09$ .  $\sigma_k$  e  $\sigma_\epsilon$  são o número de Prandtl turbulento para k e ε, respectivamente, e possuem valores padrões de 1,0 e 1,3.

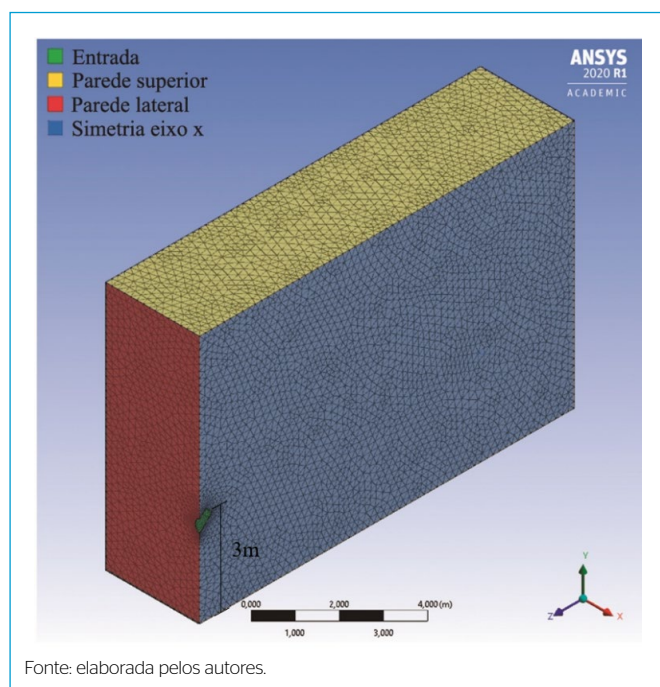
O método de solução para pressão PRESTO!, padrão para o modelo euleriano, utiliza o equilíbrio de continuidade discreta para um volume de controle “escalonado” sobre a face para calcular a pressão “escalonada” (ou seja, na face). Esse procedimento é semelhante aos esquemas de grelha escalonada utilizados com malhas estruturadas.

Encontrados resultados coerentes, foram realizadas simulações modificando a velocidade de entrada do fluido hipersalino para as outras quatro definidas:  $0,07 \text{ m.s}^{-1}$  ( $Fr = 4$ ;  $Re = 368$ );  $0,34 \text{ m.s}^{-1}$  ( $Fr = 18$ ;  $Re = 1.656$ );  $0,86 \text{ m.s}^{-1}$  ( $Fr = 46$ ,  $Re = 4.234$ ); e  $1,12 \text{ m.s}^{-1}$  ( $Fr = 60$ ,  $Re = 5.522$ ). Da resolução destas, foi efetuada a análise numérica baseada em equação por ajuste que relaciona a altura alcançada pela fonte ( $Z_m$ ) com o diâmetro do difusor ( $D$ ) e o  $Fr$  do escoamento. Os resultados foram comparados aos obtidos por Turner (1966), Abraham (1967), Cederwall (1968), Zeitoun e McIlhenny (1971), Tong e Stolzenbach (1979), James, Vergara e Kim (1983), McLellan e Randall (1986) e Zhang e Baddour (1998).

### Situação Companhia de Água e Esgoto do Ceará

Os modelos e métodos definidos na etapa anterior foram aplicados em simulação com condições de contorno baseadas nas características da futura planta de dessalinização de Fortaleza. Assim como é praticado em usinas de dessalinização no mundo, o projeto da CAGECE (CAGECE, 2019) sugere que o despejo da solução hipersalina seja feito através de um emissário submarino localizado distante (1.200 m) da costa. No projeto, o trecho final do emissário contém oito difusores com diâmetro de 280 mm, formando um ângulo de  $45^\circ$  com a horizontal.

Devido ao custo computacional elevado em se simularem os oito difusores em funcionamento, optou-se pela simulação de apenas um. Respeitando as suas características, o domínio do sistema foi adotado como um paralelogramo de 15 m de comprimento, 5 m de largura e 8 m de altura, com o difusor localizado em uma extremidade, de modo que o eixo do bocal ficasse a 3 m em relação ao fundo, como mostrado na Figura 2. Para melhorar a visualização e



Fonte: elaborada pelos autores.

**Figura 2** - Geometria/malha para a situação da Companhia de Água e Esgoto do Ceará.

diminuir o número de nós e elementos da malha, foi usado um contorno de simetria, dividindo o domínio na metade. A adoção dessa simplificação geométrica na modelagem tem como base os resultados experimentais, teóricos e numéricos obtidos pelos autores em escoamentos monofásicos/multifásicos gerados pela descarga horizontal ou oblíqua de jatos, plumas e fontes em tanques de laboratório e no oceano (LIMA NETO; ZHU; RAJARATNAM, 2008b; PEREIRA *et al.*, 2015; 2021). Foram testados quatro tipos de malhas para o referido modelo, com dimensões médias dos elementos de 0,1; 0,2; 0,3; e 0,5 m. As malhas de 0,1 e 0,2 m forneceram convergência numérica e padrões semelhantes de escoamento médio e turbulento. Desse modo, selecionou-se a malha de 0,2 m, uma vez que o tempo de processamento foi cerca de duas vezes menor que o da malha de 0,1 m.

Na Tabela 2, são indicadas as propriedades do escoamento e dos fluidos que serviram de base para a simulação.

Com o intuito de avaliar a altura e trajetória de jatos para diferentes ângulos de descarga, realizaram-se outras simulações com difusores a  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  e  $90^\circ$ . Foi executada também para o ângulo de  $90^\circ$  outras duas simulações variando a massa específica ( $\rho$ ) e viscosidade ( $\mu$ ) do fluido hipersalino:  $\rho = 1.056 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $\mu = 1,15 \text{ cP}$ ;  $\rho = 1.043 \text{ kg.m}^{-3}$  e  $\mu = 1,11 \text{ cP}$ . Estas foram feitas para que fossem comparadas diretamente com o modelo desenvolvido na etapa anterior, tendo em vista as mudanças de geometria e malha.

### Comparação com o Visual Plumes

A CAGECE realizou simulações utilizando o *software* Visual Plumes (FRICK, 2004). Os resultados dessas simulações serviram de base para uso no Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA), um sistema profissional de modelos computacionais, conforme equacionamento detalhado em Pereira *et al.* (2021), que pode ser aplicado em simulações de cenários em baías, estuários, rios, canais, reservatórios, lagos ou lagoas e, sobretudo, em águas costeiras, como realizado por Pereira *et al.* (2015) e Dalazen, Cunha e Almeida (2020), visando ao estudo da dinâmica de processos nesses complexos sistemas ambientais. Entretanto, é preciso salientar que, no sistema, a CAGECE reproduziu as condições de projeto (oito difusores) e hidrodinâmicas da região para simular o comportamento da pluma salina, o que difere da geometria (um difusor) e condição ambiente utilizada no Ansys Fluent (ambiente estagnado). Portanto, para justa comparação, optou-se por realizar simulação no *software* Visual Plumes aplicando essas mesmas características e avaliando também os diferentes ângulos de descarga, permitindo, assim, comparação de resultados que utilizam diferentes modelos: o Ansys Fluent com modelos CFD e o Visual Plumes com modelos integrais.

**Tabela 2** - Características do escoamento e propriedades dos fluidos água do mar e solução hipersalina.

Parâmetro	Água do mar	Solução hipersalina
Massa específica ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	1,023	1,046
Viscosidade (cP)	1,06	1,12
Vazão ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ )	-	0,15
Velocidade ( $\text{m.s}^{-1}$ )	-	2,5
Nº de Froude	-	10

Fonte: elaborada pelos autores.

A comparação entre os resultados foi feita através da avaliação da altura máxima obtida para os diferentes ângulos de descarga entre os *softwares*, normalizada por uma escala de comprimento ( $L_m$ ) referente à quantidade de movimento, dada pelas variáveis de fluxo relativas a volume ( $Q_0$ ), momento ( $M_0$ ), empuxo ( $J_0$ ) e aceleração devido ao empuxo ( $g'$ ) — Equações 14 a 18:

$$L_m = M_0^{3/4} / |J_0|^{1/2} \tag{14}$$

$$Q_0 = V_0 D^2 \pi / 4 \tag{15}$$

$$M_0 = V_0 Q_0 \tag{16}$$

$$J_0 = g' Q_0 \tag{17}$$

$$g' = g(\rho - \rho_0) / \rho_0 \tag{18}$$

Em que:

$V_0$  = velocidade de descarga do fluido hipersalino;

$D$  = diâmetro do tubo;

$\rho$  = massa específica desse fluido;

$\rho_0$  = massa específica do fluido ambiente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados aqui apresentados foram divididos em duas partes: a primeira compreende o modelo das simulações em escala de laboratório, bem como sua

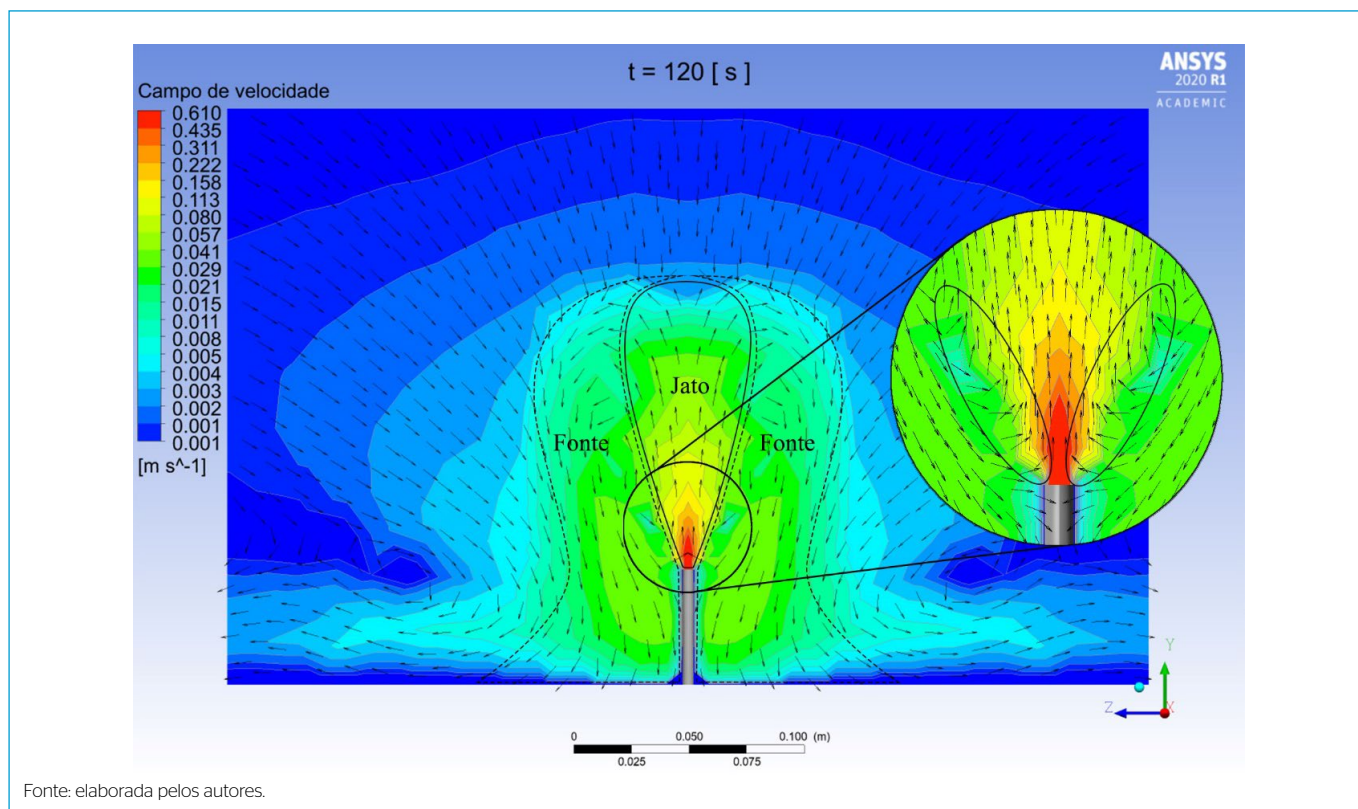
validação; a segunda parte contém o modelo para a situação da planta de des-salinização da CAGECE e a comparação com os resultados do Visual Plumes.

### Validação do modelo

Os modelos de viscosidade, turbulência e métodos de solução selecionados foram capazes de gerar resultados compatíveis com as definições de Hunt e Burridge (2015) citadas na introdução deste trabalho, através dos contornos bem definidos do escoamento na área definida por jato e na área caracterizada como fonte, mostradas na Figura 3. Outra característica que se percebe na imagem é o processo de recirculação do fluxo, ou seja, a entrada do fluxo descendente (região de fonte) no fluxo ascendente (região de jato), conforme discutido por Bloomfield e Kerr (2000) e Williamson, Armfield e Lin (2011).

Analisando a Figura 4, notadamente as alturas da fonte e sua variação ao longo do tempo, duas variáveis podem ser obtidas:  $Z_p$ , como a altura alcançada na partida do jato, antes de se estabelecer o fluxo de retorno (região de fonte), sendo o maior valor alcançado analisando as variações no tempo; e  $Z_m$ , uma altura média de elevação após o estabelecimento de um regime de escoamento estatisticamente independente. Padrões de escoamento semelhantes também foram observados experimentalmente por Turner (1966) e em estudos subsequentes.

A Figura 5 apresenta a altura máxima instantânea da fonte para cada uma das velocidades simuladas. Nela é possível perceber um comportamento oscilatório do escoamento, semelhante aos relatados por Turner (1966) e Clanet (1998). Este último autor afirma que o fluido em movimento ascendente transforma a energia cinética em energia potencial até atingir uma altura máxima, no momento em que uma porção fluida começa a acumular-se na



Fonte: elaborada pelos autores.

**Figura 3** - Campo de velocidade com áreas de jato e fonte representadas e detalhamento da região de recirculação do fluxo.

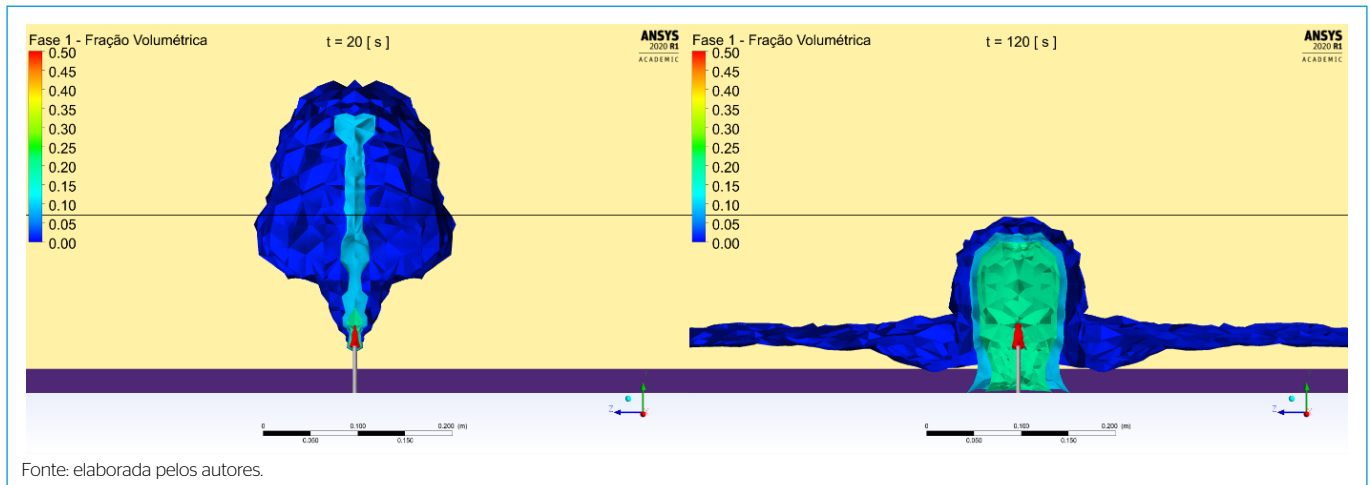


Figura 4 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade de 0,6 m.s<sup>-1</sup>.

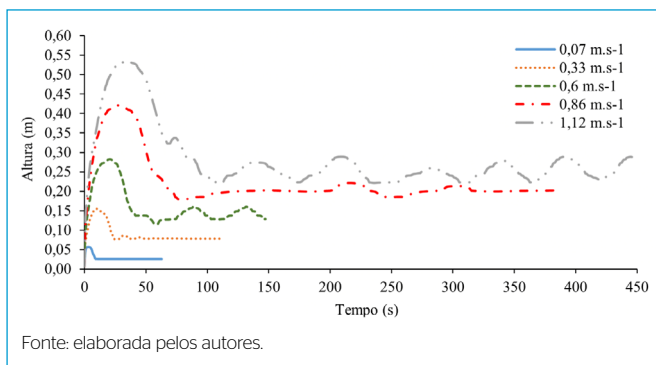


Figura 5 - Altura instantânea para cada uma das velocidades simuladas.

ponta da fonte e, ganhando massa, a atração da gravidade eventualmente supera o impulso do jato e a massa de fluido começa a colapsar, como também indicado na Figura 4.

Para cada velocidade, extraiu-se a altura máxima e, através desses valores, obteve-se a Equação 19, que relaciona o Fr da fonte com sua altura por ajuste linear dos dados (coeficiente de determinação  $R^2 = 0,996$ ):

$$Z_i/D = 1,8 Fr \quad (19)$$

Os valores e a equação apresentados estão na Figura 6 juntamente com as equações propostas por diversos autores. A equação encontrada é do tipo linear, da mesma forma que as obtidas por Turner (1966), Zeitoun e McIlhenny (1971), James, Vergara e Kim (1983), McLellan e Randall (1986) e Zhang e Baddour (1998), e com valores muito próximos aos três primeiros trabalhos, o que sugere que esta pode ser utilizada como referência para estimar a altura alcançada pela descarga de soluções hipersalinas no oceano. Outra informação relevante que servirá de comparativo dessa simulação com o modelo com as características da planta de dessalinização é a razão  $Z_i/Z_m$ . Dentre as cinco velocidades adotadas, a média obtida foi de 2,08, com coeficiente de variação (CV) = 0,042. Essa relação está intimamente ligada à interação entre as regiões de jato e de fonte, conforme relatado anteriormente.

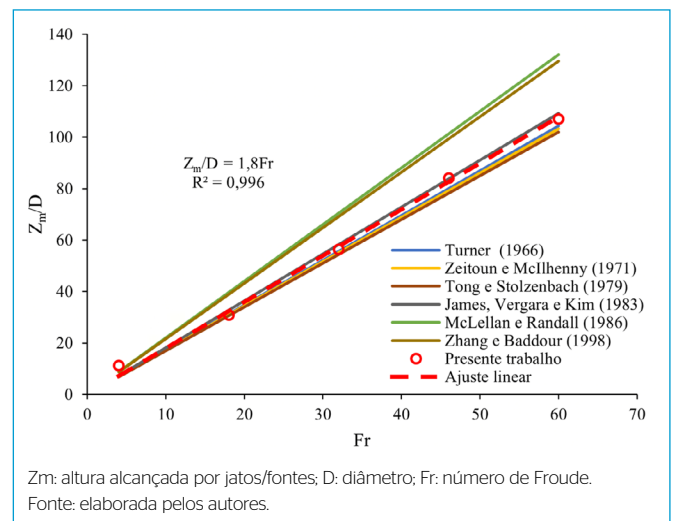


Figura 6 - Comparativo entre a relação  $Z_m/D$  e Fr de diversos autores e os obtidos neste trabalho.

## Modelo Companhia de Água e Esgoto do Ceará

A simulação realizada com as características da planta de dessalinização também apresentou as características próprias de fontes observadas no modelo validado. Entretanto, avaliando a razão  $Z_i/Z_m$ , observa-se que, para essa simulação, o valor foi inferior ao apresentado no modelo validado (ângulo de descarga de 90°), ficando na faixa de  $1,02 < Z_i/Z_m < 1,12$ . A explicação está na geometria do escoamento: observando a Figura 7, vê-se pouca ou nenhuma interferência da região de jato na região de fonte, diferentemente dos padrões apresentados nas Figuras 3 e 4. A mesma observação foi reportada por Bloomfield e Kerr (2002).

Como mencionado anteriormente, este artigo também avaliou outros ângulos de descarga, a saber: 30°, 45°, 60° e 90°. O ângulo de 60° alcançou a maior altura estável, seguido dos ângulos de 45°, 90° e 30°, como evidencia a Figura 8. Cabe salientar que, embora a literatura em geral também sugira o mesmo ângulo de 60° como o mais eficiente do ponto de vista de máxima diluição do efluente (PALOMAR; LARA; LOSADA, 2012; PALOMAR *et al.*, 2012), há trabalhos que recomendam a adoção de ângulos menores (Bleninger; Jirka, 2008).

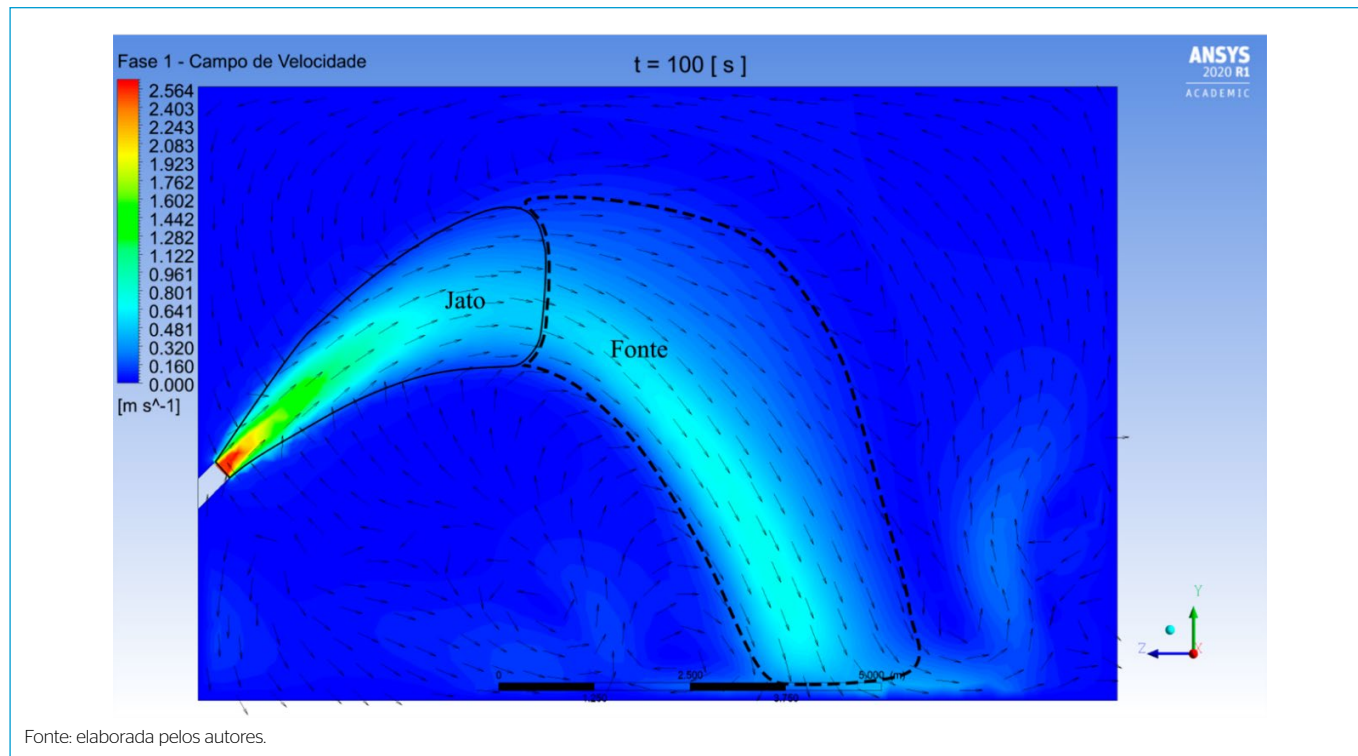


Figura 7 - Campo de velocidade para o modelo Companhia de Água e Esgoto do Ceará (ângulo de descarga de 45°), mostrando as regiões de jato e fonte do escoamento.

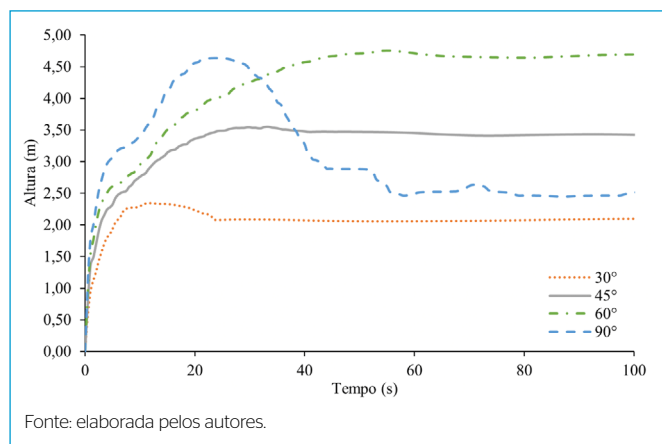


Figura 8 - Altura versus tempo para o modelo Companhia de Água e Esgoto do Ceará (ângulo de descarga de 30°, 45°, 60° e 90°).

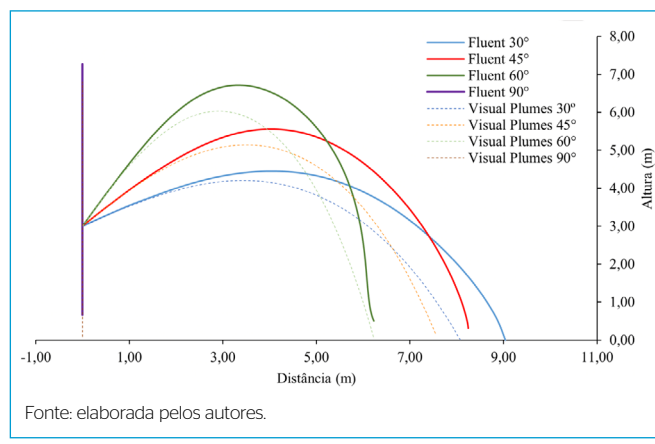


Figura 9 - Sobreposição das trajetórias dos jatos calculadas pelo Ansys Fluent e o Visual Plumes.

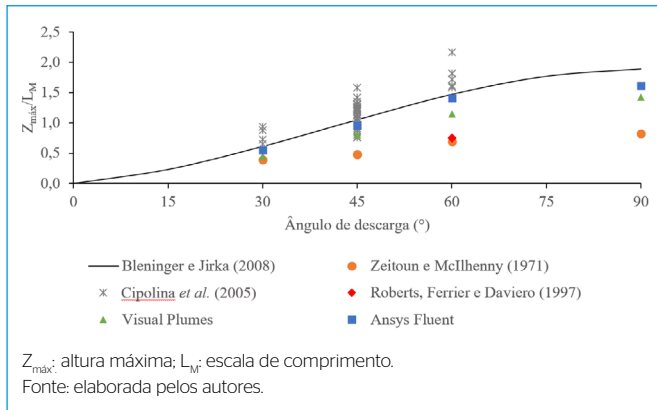
Expondo conjuntamente os resultados das simulações das linhas de corrente centrais do escoamento obtidas com o Ansys Fluent (para o tempo de 60 s) e o Visual Plumes, pode-se observar, na Figura 9, que o primeiro apresentou valores acima dos resultados desse último, mantendo consistência desse comportamento em todos os ângulos avaliados. Resultados semelhantes foram obtidos por Palomar, Lara e Losada (2012) e Palomar *et al.* (2012), em que os modelos CORMIX e VISJET forneceram valores mais elevados para a altura do escoamento que o Visual Plumes. Portanto, pode-se inferir que os resultados do presente estudo são coerentes com as observações de trabalhos anteriores e que a modelagem CFD (Ansys Fluent) pode fornecer simulações da trajetória do escoamento semelhantes às dos modelos integrais. Contudo, a modelagem CFD pode fornecer

informações adicionais quanto ao escoamento turbulento e oscilatório no campo próximo, subsidiando, assim, o seu acoplamento a modelos hidrodinâmicos como o SisBaHiA para a simulação mais precisa do escoamento no campo distante.

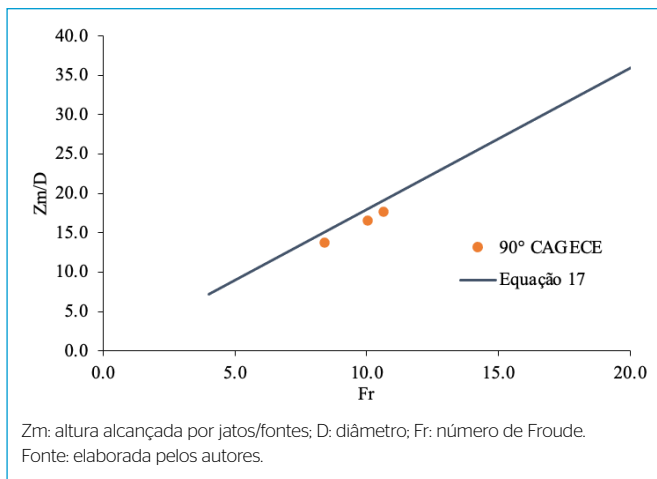
Extraindo a altura máxima na trajetória dos jatos de cada ângulo para ambos os *softwares*, foi efetuado, na Figura 10, um comparativo com o trabalho de diversos autores. Essa altura foi normalizada pela escala de comprimento referente à quantidade de movimento ( $L_M$ ) (Equação 14).

Na Figura 11, é apresentada uma comparação entre as alturas médias simuladas com o Ansys Fluent para o ângulo de 90°, variando a massa específica e a viscosidade do fluido hipersalino, e os resultados obtidos a partir da Equação 19. Pode-se observar boa aderência entre os modelos, o que indica





**Figura 10** - Comparativo da altura máxima calculadas pelo Ansys Fluent e pelo Visual Plumes com o trabalho de outros autores.



**Figura 11** - Comparativo da equação obtida ( $Z_m/D = 1,8 Fr$ ) com os valores da simulação no Ansys Fluent da situação da Companhia de Água e Esgoto do Ceará.

a capacidade deles de estimar a altura alcançada pela descarga de soluções hipersalinas no oceano.

A consistência dos resultados do Ansys Fluent em comparação aos do Visual Plumes (Figura 9), bem como a proximidade com os dados de Bleninger e Jirka (2008), mantendo-se ainda dentro do intervalo de valores dos demais autores (Figura 10), assim como a conformidade com a equação previamente

determinada (Figura 11), são argumentos que sugerem a validade do modelo proposto para a previsão da trajetória de jatos hipersalinos.

## CONCLUSÕES

As simulações computacionais realizadas nesta pesquisa com o *software* de CFD Ansys Fluent foram conduzidas para avaliar o comportamento de jatos e fontes hipersalinas. Os resultados obtidos apresentaram boa concordância com trabalhos publicados na literatura, gerando uma equação capaz de estimar a altura média alcançada por esses escoamentos complexos.

A simulação baseada nas características indicadas pela CAGECE para a planta de dessalinização a ser implantada em Fortaleza (CE) apresentou-se coerente quanto às características de fontes definidas na literatura. As simulações adicionais no *software* Visual Plumes mostraram semelhança com as realizadas no Ansys Fluent, sugerindo que o modelo CFD tem validade para a simulação de jatos e fontes hipersalinas.

Em síntese, além de fornecer informações relevantes com relação aos escoamentos médio e transiente gerados por jatos e fontes, o presente estudo sugere que o modelo CFD Ansys Fluent pode ser usado para auxiliar na otimização dos processos de descarga e dispersão de soluções hipersalinas no oceano, notadamente na região de campo próximo, complementando potencialmente modelos capazes de simular a dinâmica desses escoamentos na região de campo distante, como o SisBaHiA.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro concedido (Processo n.º. 441115/2016-0/BRICS-CNPq) e à CAGECE pela disponibilização de dados e informações para a realização da pesquisa.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Ximenes, L.B.: Conceituação, Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Validação, Escrita – Primeira Redação. Pereira, S.P.: Conceituação, Curadoria de Dados, Metodologia, Investigação, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição. Lima Neto, I.E.: Conceituação, Análise Formal, Metodologia, Obtenção de Financiamento, Administração do Projeto, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição.

## REFERÊNCIAS

- ABOU-ELHAGGAG, M.E.; EL-GAMAL, M.H.; FAROUK, M.I. Experimental and Numerical Investigation of Desalination Plant Outfalls in Limited Disposal Areas. *Journal of Environmental Protection*, v. 2, n. 6, p. 828-839, 2011. <http://dx.doi.org/10.4236/jep.2011.26094>
- ABRAHAM, G. Jets with negative buoyancy in homogeneous fluid. *Journal of Hydraulic Research*, v. 5, n. 4, p. 235-248, 1967. <https://doi.org/10.1080/00221686709500209>
- AKAR, P.J.; JIRKA, G.H. CORMIX2: An expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged multiport diffuser discharges. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency (EPA)/Office of Research and Development, 1991.
- ALMEIDA, J.P.; KUMMER, A.C.B.; CARRANZA, G.; CAMPOS, L.C.; SZÉLIGA, M.R.; ACEVEDO, M.; GERVASONI, R.; WIECHETECK, G.K. Eficiência de um sistema piloto de dessalinização de água salobra. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 1, p. 107-114, jan.-fev. 2020. <https://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020181646>
- ANSONG, J.K.; ANDERSON-FREY, A.; SUTHERLAND, B.R. Turbulent fountains in one- and two-layer crossflows. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 689, p. 254-278, 2011. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.413>

- ANSONG, J.K.; KIBA, P.J.; SUTHERLAND, B.R. Fountains imping on a density interface. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 595, p. 115-139, 2008. <https://doi.org/10.1017/S0022112007009093>
- ANSYS. *Fluent 2020 R1: Theory Guide*. Canonsburg, PA, USA: ANSYS, 2020.
- BLNINGER, T.; JIRKA, G.H. Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants. *Desalination*, v. 221, n. 1-2, p. 585 a 597, mar. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.059>
- BLOOMFIELD, L.J.; KERR, R.C. A theoretical model of a turbulent fountain. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 424, p. 197-216, 2000. <https://doi.org/10.1017/S0022112000001907>
- BLOOMFIELD, L.J.; KERR, R.C. Inclined turbulent fountains. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 451, p. 283-294, 2002. <https://doi.org/10.1017/S0022112001006528>
- BLOOMFIELD, L.J.; KERR, R.C. Turbulent fountains in a stratified fluid. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 358, p. 335-356, 1998. <https://doi.org/10.1017/S0022112097008252>
- BURRIDGE, H.C.; HUNT, G.R. The rise heights of low- and high-Froude-number turbulent axisymmetric fountains. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 691, p. 392-416, 2012. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.480>
- ÇENGEL, Y.A.; CIMBALA, J.M. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York: McGraw-Hill, 2017.
- CEDERWALL, K. *Hydraulics of marine wastewater disposal*. 1968. PhD thesis – Chalmers Institute of Technology, Gutenberg, Sweden, 1968.
- CIPOLLINA, A.; BRUCATO, A.; GRISAFI, F.; NICOSIA, S. Bench-scale investigation of inclined dense jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, Reston, v. 131, n. 11, p. 1017-1022, nov. 2005. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2005\)131:11\(1017\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2005)131:11(1017))
- CLANET, C. On large-amplitude pulsating fountains. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 366, p. 333-350, 1998. <https://doi.org/10.1017/S0022112098001451>
- COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ (CAGECE). *Projeto de Dessalinização de Água Marinha: Projeto Referencial*. Fortaleza: Diretoria de Engenharia (DEN)/Gerência de Projetos de Engenharia (GPROJ), 2019. Disponível em: [https://www.cagece.com.br/wp-content/uploads/PDF/EditaisContratacoes/PPP1/DocumentosdeLicita%C3%A7%C3%A3o/AnexosdoTermoderRefer%C3%A7%C3%A3o/ANEXO-2B-PROJETO-REFERENCIAL-Ver\\_Licita%C3%A7%C3%A3o.pdf](https://www.cagece.com.br/wp-content/uploads/PDF/EditaisContratacoes/PPP1/DocumentosdeLicita%C3%A7%C3%A3o/AnexosdoTermoderRefer%C3%A7%C3%A3o/ANEXO-2B-PROJETO-REFERENCIAL-Ver_Licita%C3%A7%C3%A3o.pdf). Acesso em: 27 jun. 2020.
- DALAZEN, J.P.; CUNHA, C.L.N.; ALMEIDA, R.C. Determinação das taxas de renovação das águas no complexo estuarino de Paranaguá. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 25, n. 6, p. 887-899, 2020. <https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020180019>
- DONEKER, R.L.; JIRKA, G.H. CORMIX-GI systems for mixing zone analysis of brine wastewater disposal. *Desalination*, v. 139, n. 1-3, p. 263-274, set. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00318-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00318-6)
- DONEKER, R.L.; JIRKA, G.H. Expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged single port discharges (CORMIX1). Springfield (VA): U.S. Department of Commerce/National Technical Information Service, 1990.
- EINAV, R.; HARUSSI, K.; PERRY, D. The footprint of the desalination processes on the environment. *Desalination*, v. 152, n. 1-3, p. 141-154, fev. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)01057-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)01057-3)
- FRICK, W.E. Visual Plumes mixing zone modelling software. *Environmental Modelling & Software*, v. 19, n. 7-8, p. 645-654, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.08.018>
- GARCIA, E.; INVERS, O.; MANZANERA, M.; BALLESTEROS, E.; ROMERO, J. Impact of the brine from a desalination plant on shallow seagrass (*Posidonia Oceanica*) meadow. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 72, n. 4, p. 579-590, maio 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.11.021>
- GILDEH, H.K.; MOHAMMADIAN, A.; NISTOR, I.; QIBLAWEY, H. Numerical modeling of 30° and 45° inclined dense turbulent jets in stationary ambient. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 15, p. 537-562, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9372-1>
- HUNT, G.R.; BURRIDGE, H.C. Fountains in industry and nature. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 47, p. 195-220, 2015. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-010313-141311>
- JAMES, W.P.; VERGARA, I.; KIM, K. Dilution of a dense vertical jet. *Journal of Environmental Engineering*, v. 109, n. 6, p. 1273-1283, dez. 1983. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1983\)109:6\(1273\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1983)109:6(1273))
- JIRKA, G.H. Integral model for turbulent buoyant jets in un-bounded stratified flows. Part 1: The single round jet. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 4, p. 1-56, 2004. <https://doi.org/10.1023/A:1025583110842>
- JIRKA, G.H. Integral model for turbulent buoyant jets in un-bounded stratified flows. 2. plane jet dynamics resulting from multi-port diffuser jets. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 6, p. 43-100, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10652-005-4656-0>
- JONES, B. Overview of Coastal Discharges for Brine, Heat and Wastewater. In: MISSIMER, T.M.; JONES, B.; MALIVA, R.G. (ed.). *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities: innovations and environmental impacts*. Austin, TX, USA: Springer, 2015. p. 363-367.
- KIKKERT, G.A.; DAVIDSON, M.J.; NOKES, R.I. Inclined negatively buoyant discharges. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 133, n. 5, p. 545-554, maio 2007. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:5\(545\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:5(545))
- LAUNDER, B.E.; REECE, G.J.; RODI, W. Progress in the development of a Reynolds-stress turbulence closure. *Journal of fluid mechanics*, v. 68, n. 3, p. 537-566, 1975.
- LEE, J.H.W.; CHEUNG, V. Generalized Lagrangian model for buoyant jets in current. *Journal of Environmental Engineering*, v. 116, n. 6, p. 1085-1106, out. 1990. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1990\)116:6\(1085\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1990)116:6(1085))
- LIMA, D.D., LIMA NETO, I.E. Effect of nozzle design on bubbly jet entrainment and oxygen transfer efficiency. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 144, n. 8, 06018010, ago. 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001493](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001493)
- LIMA NETO, I.E. Bubble plume modeling with new functional relationships. *Journal of Hydraulic Research*, v. 50, n. 1, p. 134-137, 2012. <https://doi.org/10.1080/00221686.2011.651278>
- LIMA NETO, I.E. Desestratificação de reservatórios por meio de aeração artificial. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 327-334, 2019a. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019184389>
- LIMA NETO, I.E. Plumas em escoamento uniforme com estratificação de duas camadas. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 383-390, 2019b. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019177928>
- LIMA NETO, I.E.; CARDOSO, S.S.S.; WOODS, A.W. On mixing a density interface by a bubble plume. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 802, 2016. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.454>

- LIMA NETO, I.E.; ZHU, D.Z.; RAJARATNAM, N. Effect of tank size and geometry on the flow induced by circular bubble plumes and water jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 6, p. 833-842, 2008a. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:6\(833\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:6(833))
- LIMA NETO, I.E., ZHU, D. Z., RAJARATNAM, N. Horizontal injection of gas-liquid mixtures in a water tank. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 12, p. 1722-1731, 2008b. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:12\(1722\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:12(1722))
- MABROOK, M. Environmental impact of waste brine disposal of desalination plants, Red Sea, Egypt. *Desalination*, v. 97, n. 1-3, p. 453-465, ago. 1994. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(94\)00108-1](https://doi.org/10.1016/0011-9164(94)00108-1)
- MATSUMOTO, J.K.; MARTIN, K.L.M. Lethal and sub lethal effects of altered sand salinity on embryos of beach-spawning California Grunion. *Copeia*, v. 2, p. 484-491, 2008. <https://doi.org/10.1643/CP-07-097>
- MCLELLAN, T.N.; RANDALL, R.E. Measurement of brine jet height and dilution. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, v. 112, n. 2, p. 200-216, mar. 1986. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1986\)112:2\(200\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1986)112:2(200))
- MEHADDI, R.; VAUQUELIN, O.; CANDELIER, F. Analytical solutions for turbulent Boussinesq fountains in a linearly stratified environment. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 691, p. 487-497, 2012. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.487>
- MEHADDI, R.; VAUQUELIN, O.; CANDELIER, F. Naturally bounded plumes. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 717, p. 472-483, 2013. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.587>
- MULLER, J.; SEIL, G.; HUBBERT, G. Three modelling techniques used in Australia to model desalination plant brine dispersal in both the near-field and far-field. In: *International Symposium on Outfall Systems*, May 15-18, 2011. *Anais...* Mar del Plata, Argentina: The International Association for Hydro-Environment Engineering and Research (IAHR), 2011.
- NEMLIOGLU, S.; ROBERTS, P.J.W. Experiments on Dense Jets Using Three-Dimensional Laser-Induced Fluorescence (3DLIF). In: *International Conference on Marine Waste Water*, 4., 2006. *Anais...* Antalya: WWD-IEMES, 2006.
- OLIVER, C.J.; DAVIDSON, M.J.; NOKES, R.I. k-ε Predictions of the initial mixing of desalination discharges. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 8, p. 617-625, 2008. <https://doi.org/10.1007/S10652-008-9108-1>
- PALOMAR, P.; LARA, J.L.; LOSADA, I.J. Near field brine discharge modelling part 2: Validation of commercial tools. *Desalination*, v. 290, p. 28-42, mar. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.10.021>
- PALOMAR, P.; LARA, J.L.; LOSADA, I.J.; RODRIGO, M.; ALVÁREZ, A. Near field brine discharge modelling part 1: Analysis of commercial tools. *Desalination*, v. 290, p. 14-27, mar. 2012. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.037>
- PEREIRA, S.P.; ROSMAN, P.C.C.; ALVAREZ, C.; SCHETINI, C.A.F.; SOUZA, R.O.; VIEIRA, R.H.S.F. Modeling of coastal water contamination in Fortaleza (Northeastern Brazil). *Water Science and Technology*, v. 72, n. 6, p. 928-936, 2015. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.292>
- PEREIRA, S.P.; ROSMAN, P.C.C.; SÁNCHEZ-LIZASO, J.L.; LIMA NETO, I.E.; SILVA, R.A.G.; RODRIGUES, M. Brine outfall modeling of the proposed desalination plant of Fortaleza, Brazil. *Desalination and Water Treatment*, v. 234, p. 22-30, set. 2021. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27557>
- PLUM, B.R. *Modelling of desalination plant outfalls sedimentation*. 2008. 157 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Mecânica) – School of Aeronautical, Civil and Mechanical Engineering, University of New South Wales, Sidney, 2008.
- ROBERTS, P.J.W. Near Field Flow Dynamics of Concentrate Discharges and Diffuser Design. In: MISSIMER, T. M.; JONES, B.; MALIVA, R. G. (ed.). *Intakes and Outfalls for Seawater Reverse-Osmosis Desalination Facilities: innovations and environmental impacts*. Austin, TX, USA: Springer, 2015. p. 369-396.
- ROBERTS, P.J.W.; FERRIER, A.; DAVIERO, G. Mixing in Inclined Dense Jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 123, n. 8, p. 693-699, ago. 1997. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:8\(693\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:8(693))
- Shao, D.; Law A.W-K. Mixing of 30° and 45° inclined dense jets. *Environmental Fluid Mechanics*, v. 10, p. 521-553, 2010. <https://doi.org/10.1007/s10652-010-9171-2>
- TANG, H.S.; PAIK, J.; SOTIROPOULOS, F.; KHANGAONKAR, T. Three-dimensional numerical modeling of initial mixing of thermal discharges at real-life configurations. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 9, p. 1210-1224, set. 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:9\(1210\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:9(1210))
- TONG, S.S.; STOLZENBACH, K.D. *Submerged discharges of dense effluent*. Cambridge, Massachusetts: School of Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT), 1979. Report No. 243. 115 p.
- TURNER, J.S. Jets and Plumes with negative or reversing buoyancy. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 26, n. 4, p. 779-792, 1966. <https://doi.org/10.1017/S0022112066001526>
- WILLIAMSON, N.; ARMFIELD, S.W.; LIN, W. Forced turbulent fountain flow behaviour. *Journal of Fluid Mechanics*, v. 671, p. 535-558, 2011. <https://doi.org/10.1017/S0022112010005872>
- XIMENES, L.B. *Fluidodinâmica computacional da descarga marinha de solução hipersalina*. 2021. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021.
- ZEIUTON, M.A.; McILHENNY, W.F. Conceptual designs of outfall systems for desalination plants. *Offshore Technology Conference*, n. 1370, 1971. <https://doi.org/10.4043/1370-MS>
- ZHANG, H.; BADDOUR, R.E. Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large Froude numbers. *Journal Hydraulic Engineering*, v. 124, n. 5, p. 550-553, maio 1998. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1998\)124:5\(550\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1998)124:5(550))