



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

LEVI DE BRITO XIMENES

**FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DA DESCARGA MARINHA DE
SOLUÇÃO HIPERSALINA**

FORTALEZA

2021

LEVI DE BRITO XIMENES

FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DA DESCARGA MARINHA DE SOLUÇÃO
HIPERSALINA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto
Co-orientador: Dr. Silvano Porto Pereira

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

X34f Ximenes, Levi de Brito.
Fluidodinâmica computacional da descarga marinha de solução hipersalina / Levi de Brito Ximenes. – 2021.
76 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

Coorientação: Prof. Dr. Silvano Porto Pereira.

1. FLUENT. 2. Fontes. 3. Jatos. 4. Salmoura. 5. VISUAL PLUMES. I. Título.

CDD 628

LEVI DE BRITO XIMENES

FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL DA DESCARGA MARINHA DE SOLUÇÃO
HIPERSALINA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 18 / 02 / 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Iran Eduardo Lima Neto, PhD (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Silvano Porto Pereira (Co-orientador)
Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE)

Profª. Dra. Maria Gorethe de Sousa Lima Brito (Membro externo)
Universidade Federal do Cariri (UFCA)

Prof. Marco Aurélio Holanda de Castro, PhD (Membro interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por mais um desafio conquistado com as suas graças e bênçãos.

Aos meus pais e minha namorada, pelo apoio incondicional e encorajamento que me deram quando me vi perante os percalços da vida

Ao Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto, pela maestria orientação, encorajamento nas horas difíceis, e valiosas contribuições e sugestões.

Ao Dr. Silvano Porto Pereira, especialista da Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE), pela valorosa contribuição nesta pesquisa, atenção e disponibilidade.

Ao Prof. Dr. Marco Aurélio Holanda de Castro, por aceitar prontamente o convite à banca e sugestões fornecidas na mesma.

Aos professores do Programa de Mestrado e Doutorado em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará.

A Prof^ª. Dra. Maria Gorethe de Sousa Lima Brito, que me acompanha desde a graduação, por participar de mais este importante momento em minha vida, fornecendo valiosas contribuições ao trabalho.

Aos grandes amigos que fiz durante o mestrado, pelo apoio, sugestões, críticas e reflexões.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez”. (George Bernard Shaw)

RESUMO

A crescente demanda de água potável no planeta gera a necessidade do desenvolvimento de tecnologias capazes de converter água impróprias para consumo, como a água do mar, em água adequada ao abastecimento. A dessalinização é uma dessas tecnologias. Visando uma alternativa ao abastecimento público, a Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE) lançou edital para implantação de uma planta de dessalinização. Com o processo de dessalinização é gerado como rejeito uma solução hipersalina, que é despejada no mar através de difusores. 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. Dada a escassez de simulações numéricas para a descarga e dispersão de soluções hipersalinas a presente pesquisa apresenta uma modelagem da dinâmica dos fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) de jatos e fontes, através do software 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 CAGECE, considerando um único difusor em ambiente estagnado. 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 $Z_m/r_0 = 1,71(Fr)$, capaz de prever a altura alcançada por jatos/fontes (Z_m), dados o raio do difusor (r_0) e o número de Froude (Fr). As simulações do tipo CFD foram semelhantes às obtidas com o VISUAL PLUMES.

Palavras-chave: CFD. FLUENT. Fontes. Jatos. Salmoura. VISUAL PLUMES.

ABSTRACT

The growing demand for drinking water on the planet generates the need for the development of technologies capable of converting water unsuitable for distribution, such as sea water, into water suitable for supply. Desalination is one of these technologies. Aiming an alternative to the public supply, the Water and Sewage Company of the State of Ceará (CAGECE) launched a public notice for the implementation of a desalination plant. With the desalination process, a hypersaline solution is generated as waste, which is dumped into the sea through diffusers. 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. Given the scarcity of numerical simulations for the discharge and dispersion of hypersaline solutions, this research presents a computational fluid dynamics (CFD) modeling of jets and fountains, through the 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 CAGECE desalination plant, considering a single diffuser in stagnant environment. 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 showed good agreement with published works, generating the equation $Z_m/r_0 = 1.71(Fr)$, which is able to predict the height reached by the jets/fountains (Z_m), informing the diffuser radius (r_0) and the Froude number (Fr) The CFD simulations were similar to those obtained with VISUAL PLUMES.

Keywords: CFD. FLUENT. Fountains. Jets. Brine. VISUAL PLUMES.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa geológico simplificado do Ceará	16
Figura 2 - Localização da área sugerida na Praia do Futuro, a ser instalada a planta de dessalinização	17
Figura 3 - Ilustração esquemática de fontes	19
Figura 4 - Altura alcançada por (a) um jato salino e, (b) uma pluma de mistura de água e álcool, em função do tempo produzidas por um bico de 4cm de diâmetro.....	21
Figura 5 - Trajetória do contorno mais elevado para jatos densos de (a) 30°, (b) 45° e (c)60°	22
Figura 6 – Adimensional das alturas das fontes inclinadas em função do ângulo de inclinação. a)Altura inicial; b)Altura final.....	23
Figura 7 - Efeito da densidade na (a) diluição mínima do fluido retornado e (b) na altura máxima do jato	25
Figura 8 - Mínima diluição na linha central do jato em função do ângulo de descarga.....	28
Figura 9 - Geometria criada no ANSYS DESIGNMODELER.....	33
Figura 10 - Malha criada no ANSYS MESHING e detalhamento das regiões de interesse.	35
Figura 11 - Projeto referencial do trecho final do emissário, contendo os difusores	42
Figura 12 - Geometria/Malha para a situação na CAGECE.....	42
Figura 13 - Geometria/Malha para a situação na CAGECE, com diferentes ângulos de descarga	44
Figura 14 - Domínio da modelagem realizada com o SisBaHiA, pela CAGECE.....	46
Figura 15 - Resultado gerado pelo software VISUAL PLUMES para o mês de abril.....	47
Figura 16 - Resultado gerado pelo software VISUAL PLUMES para o mês de novembro.	47
Figura 17 - Superfícies de fração volumétrica para velocidade inicial de teste $V_3 = 0,6$ m/s.	49
Figura 18 - Superfícies de fração volumétrica gerados na pesquisa de Elhaggag, Gamal e Farouk (2011) para velocidade de 0,58 m/s.....	50
Figura 19 - Campo de velocidade com áreas de jato e fonte representadas.	50
Figura 20 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_1	51
Figura 21 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_2	52

Figura 22 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_3	52
Figura 23 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_4	52
Figura 24 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_5	53
Figura 25 - Campo de velocidade mostrando as regiões de jato e fonte do escoamento.	55
Figura 26 - Campo de velocidade na região de saída do fluido hipersalino.....	56
Figura 27 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para o ângulo de descarga de 30°	57
Figura 28 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para o ângulo de descarga de 45°	57
Figura 29 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para o ângulo de descarga de 60°	58
Figura 30 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para o ângulo de descarga de 90°	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo entre processo de dessalinização por osmose reversa e por processos térmicos	18
Tabela 2 – Equações de altura dos jatos e seus respectivos autores.....	34
Tabela 3 - Características da malha gerada no ANSYS MESHING	34
Tabela 4 - Propriedades físicas dos materiais.....	36
Tabela 5 - Condição de fronteira especificada sobre o domínio computacional.....	37
Tabela 6 - Modelos, variações e métodos adotados nas melhores soluções.....	38
Tabela 7 - Demais velocidades simuladas e características do escoamento.....	41
Tabela 8 - Características do escoamento e propriedades dos fluidos água do mar e solução hipersalina.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Altura vs Tempo para a velocidade V_3	51
Gráfico 2 - Altura vs Tempo para as simulações das velocidades V_1, V_2, V_3, V_4 e V_5	53
Gráfico 3 - Comparativo entre a relação Z_m/r_0 e Fr de diversos autores e os obtidos neste trabalho.	54
Gráfico 4 - Altura vs Tempo para o modelo CAGECE (ângulo de descarga de $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ e 90°).	59
Gráfico 5 - Sobreposição das trajetórias dos jatos calculadas pelo FLUENT e o VISUAL PLUMES	60
Gráfico 6 - Comparativo da altura máxima calculadas pelo FLUENT, pelo VISUAL PLUMES com o trabalho de Bleninger e Jirka (2008).	60
Gráfico 7 - Comparativo da Equação 17 com os resultados gerados para a geometria da CAGECE, dado o ângulo de descarga de 90° , variando a densidade do fluido hipersalino. ...	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
FAC	Fluxo do ambiente circundante
FED	Fluxo Externo Descendente
FIA	Fluxo Interno Ascendente
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
HPC	<i>High-Performance Computing</i>
IPECE	Instituto de Pesquisas e Estratégia Econômica do Ceará
LES	<i>Large Eddy Simulation</i>
LIF	<i>Laser-Induced Fluorescence</i>
PAE	<i>Projected Area Entrainment</i>
RANS	<i>Reynolds-Averaged Navier-Stokes</i>
SisBahia	Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental
VOF	<i>Volume of Fluid</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Área interfacial
A_0	Área da seção transversal
\vec{F}	Soma de vetores força
G_k	Produção de energia cinética turbulenta
\dot{m}	Transferência de massa
\vec{v}	Velocidade da fase
μ_m	Viscosidade molecular
μ_t	Viscosidade turbulenta
$\bar{\tau}$	Tensor tensão-deformação
τ_p	Termo de relaxamento de tempo para particulados
D	Diâmetro do difusor
d	Diâmetro das bolhas/gotas
E_0	Empuxo
Fr	Número de Froude
g, \vec{g}	Gravidade
g'	Aceleração devido ao empuxo
K	Coefficiente de troca de momento entre fases
L_M	Escala de momento
L_Q	Escala de comprimento

M_0	Momento
Q_0	Vazão
r	Raio do difusor
Re	Número de Reynolds
S_{min}	Diluição mínima
V_0	Velocidade de descarga
W_0	Velocidade característica
X	Distância horizontal
Z_i	Altura máxima na partida do jato
Z_m	Altura média (regime estacionário)
α	Fração volumétrica
θ	Ângulo de inclinação do difusor
λ	Viscosidade cinemática
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Densidade
f	Coefficiente de arraste

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
	2.1 Experimentação	21
	2.2 CFD.....	25
3	OBJETIVOS.....	31
	3.1 Objetivo Geral.....	31
	3.2 Objetivos Específicos	31
4	METODOLOGIA	32
	4.1 ANSYS FLUENT 2020R1	32
	4.2 Criação da Geometria, Malha e Parâmetros de entrada.....	33
	4.3 Modelo matemático	35
	4.4 Situação CAGECE.....	41
	4.5 Comparação com o VISUAL PLUMES	45
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
	5.1 Modelo validado	49
	5.2 Modelo CAGECE.....	55
6	CONCLUSÃO.....	62
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICE A - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A VELOCIDADE $V1 = 0,07M.S^{-1}$	68
	APÊNDICE B - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A VELOCIDADE $V1 = 0,34M.S^{-1}$	69
	APÊNDICE C - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A VELOCIDADE $V1 = 0,6M.S^{-1}$	70
	APÊNDICE D - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A VELOCIDADE $V1 = 0,86M.S^{-1}$	71

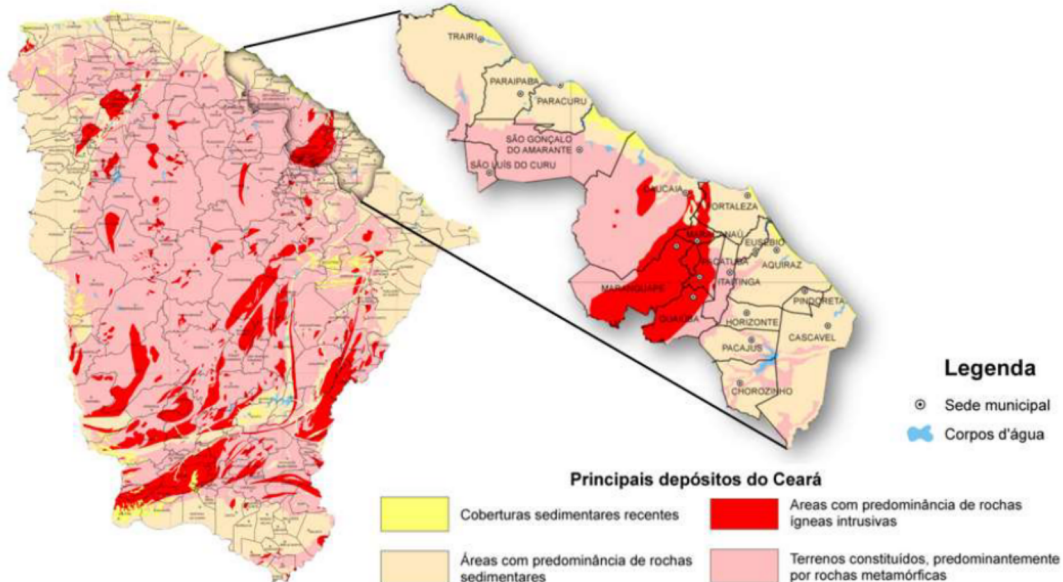
APÊNDICE E - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A VELOCIDADE $V_1 = 1,12\text{M.S}^{-1}$	72
APÊNDICE F - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A SITUAÇÃO CAGECE COM ÂNGULO DE DESCARGA A 30°	73
APÊNDICE G - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A SITUAÇÃO CAGECE COM ÂNGULO DE DESCARGA A 45°	74
APÊNDICE H - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A SITUAÇÃO CAGECE COM ÂNGULO DE DESCARGA A 60°	75
APÊNDICE I - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A SITUAÇÃO CAGECE COM ÂNGULO DE DESCARGA A 90°	76

1 INTRODUÇÃO

Localizado em região semiárida, o Nordeste brasileiro é submetido frequentemente a restrições de água, resultantes em grande parte do déficit hídrico (balanço entre precipitações e evapotranspiração). Em apenas poucos meses do ano (em geral, dois meses) as precipitações excedem a evapotranspiração potencial. Desse modo, durante as estações secas, as atividades consumidoras de água se concentram nos locais onde a mesma permanece armazenada (DAMBRÓS, SILVA E FILHO, 2010). Onde não ocorre armazenamento ou este é insuficiente para atender todas as demandas, a água é transportada de grandes reservatórios, como é o caso da capital cearense: Fortaleza.

Situados em zona de costa, a capital e outros 18 municípios formam a região metropolitana de Fortaleza, fundados em grande parte sobre formações rochosas, como mostra a Figura 1, em que o armazenamento de água subterrânea é inexpressivo. Nas regiões de terreno sedimentar onde poderia haver água subterrânea, a proximidade com o mar faz com que possuam grandes concentrações de sais. O abastecimento, então, é feito através de um sistema de reservatórios cujo principal fornecedor é o reservatório Castanhão. Por sua vez, este não ultrapassou 10% de sua capacidade total desde fevereiro de 2016, estando atualmente com um volume inferior a 5% (FUNCEME, 2019).

Figura 1 - Mapa geológico simplificado do Ceará



FONTE: Adaptado de IPECE (2015)

O aumento populacional com conseqüente avanço no consumo de água, além dos efeitos das mudanças climáticas na escassez de água doce, tem levado diversas cidades pelo mundo ao uso da dessalinização de água salgada ou água salobra (AS) como alternativa no abastecimento humano (ALMEIDA et al., 2020). Tal opção também foi adotada em Fortaleza pela Companhia de Água e Esgoto do Estado do Ceará (CAGECE), que lançou edital para implantação de uma planta de dessalinização, objetivando atender aproximadamente 300 mil pessoas, com expectativa de produção de 1 m³ de água potável por segundo.

Em consulta pública realizada em 2019, a companhia apresentou projeto referencial levantando e sugerindo localização da planta, tipo de sistema de dessalinização, e diversos outros critérios de projeto, como forma de nortear as empresas concorrentes ao edital. Dentre 11 localidades apresentadas, a CAGECE sugere a instalação na área denominada Praia do Futuro I-A, situada em terreno de 2,3 ha na região da Praia do Futuro. A Figura 2 apresenta a localidade citada, sendo próxima aos reservatórios Mucuripe (Morro de Santa Terezinha) e Aldeota (Praça da Imprensa Chanceler Edson Queiroz) que receberão a água dessalinizada produzida pela planta.

Figura 2 - Localização da área sugerida na Praia do Futuro, a ser instalada a planta de dessalinização



FONTE: CAGECE, 2019

O processo de dessalinização objetiva a remoção de sais dissolvidos para obtenção de água com qualidade aceitável para uso nos processos industriais e/ou de abastecimento humano. Para alcançar tal objetivo, várias tecnologias podem ser empregadas, dentre elas se destaca a

osmose reversa (ou osmose inversa), que com os avanços tecnológicos vem sendo cada vez mais utilizada pela redução dos custos de implantação e operação (AHMAD E BADDOUR, 2014). Na Tabela 1 é apresentado um comparativo da osmose reversa com alguns processos térmicos de dessalinização.

Tabela 1 - Comparativo entre processo de dessalinização por osmose reversa e por processos térmicos

Parâmetro	Processos Térmicos			Osmose reversa
	Múltiplos estágios com expansão de vapor	Múltiplos efeitos	Compressão de vapor	
Fator de conversão (Água potável/Alimentação)	0,1 - 0,2	0,2 - 0,35	0,4	0,45 - 0,55
Consumo de energia térmica equivalente (kWh/m ³)	9,5 - 11,0	4,5 - 6,0	NA	NA 2,5 - 4,0
Consumo de energia elétrica (kWh/m ³)	3,2 - 4,0	1,2 - 1,8	8,0 - 12,0	
Consumo total de energia (kWh/m ³)	12,7 - 15,0	5,7 - 7,8	8,0 - 12,0	2,5 - 4,0
Custo de produção de água (R\$/m ³)	3,6 - 15,8	2,8 - 13,8	3,9 - 13,8	2,0 - 11,8

FONTE: Adaptado de CAGECE (2019)

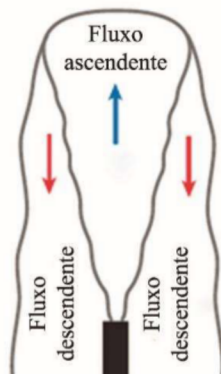
Como é perceptível, o processo de osmose reversa se destaca entre aqueles com maior capacidade produtiva de água potável e com os menores custos energéticos e de produção, sendo a tecnologia sugerida pela CAGECE para produção hídrica na planta de dessalinização.

Apesar dos benefícios da dessalinização como um processo capaz de gerar água potável, este processo gera como rejeito uma solução hipersalina (salmoura) que, decorrente da salinidade, temperatura (no caso dos processos térmicos de dessalinização), pH, e presença de metais pesados e resíduos químicos usados em etapas de pré-tratamento da água, pode ser prejudicial ao ambiente e ecossistema local ao ser descartada (ELSAID et al, 2020). Diferente dos efluentes urbanos, este rejeito normalmente não pode ser descartado em corpos d'água doce, sendo usualmente lançado no mar. Em pequenas quantidades essa solução não afeta a vida marinha em curto prazo, mas seus efeitos locais a longo prazo são reconhecidos pela

comunidade científica (MABROOK, 1994; PILLARD et al., 1999; EINAV, HARUSSI E PERRY, 2002; GARCIA et al., 2007; MATSUMOTO E MARTIN, 2008).

Visando a 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), minimizando ou suprimindo, assim, eventuais impactos ao ecossistema (BELATOUI et al., 2017, FERNÁNDEZ-TORQUEMADA et al., 2019, 2013, SOLA ET AL., 2020). Os difusores expulsam a solução em fluxo ascendente, caracterizado por escoamento com grande quantidade de movimento, 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 qual a força de flutuação está em uma direção que se opõe ao fluxo da fonte (HUNT E BURRIDGE, 2015). Na Figura 3 pode-se perceber a situação descrita.

Figura 3 - Ilustração esquemática de fontes



FONTE: HUNT e BURRIDGE, 2015

Em uma situação prática, porém, diversos fatores interferem no fluxo e conseqüentemente na diluição da solução hipersalina na água do mar. Citando os mais relevantes temos as correntes marinhas como agente externo/do ambiente, e as características de escoamento e dos difusores e propriedades dos fluidos (solução hipersalina e água do mar) como agentes internos.

Realizando uma análise do agente externo tem-se três cenários distintos: quando há a presença de correntes marinhas em várias direções; quando ocorrem correntes marinhas preferencialmente em uma direção; e quando estas estão ausentes ou com velocidades muito baixas (AHMAD E BADDOUR, 2012). Sabendo-se que a presença de correntes provoca um

aumento de turbulência e consequente aumento na taxa de diluição da solução, a última situação apresentada torna-se a situação crítica, aplicada no presente trabalho.

Quando o foco é dado as características de escoamento e propriedades dos fluidos, é usual a investigação acerca da altura alcançada pelas fontes hipersalinas. Uma primeira relação que pode ser abordada é com o número de Reynolds: quando em faixa laminar, a fonte alcança uma altura inicial máxima e decai para uma intermediária, em que permanece com pouca ou nenhuma variação; quando em faixa turbulenta, ocorre uma oscilação considerável da altura intermediária no decorrer do escoamento. A segunda relação é com o número de Froude, que por sua vez relaciona a velocidade de saída da solução com o raio de descarga e as densidades dos fluidos envolvidos. Em termos práticos, ele avalia a influência do empuxo no escoamento.

A literatura dispõe de diversos trabalhos experimentais sobre o assunto como os de Turner (1966), Bloomfield e Kerr (1998, 2002), Ahmad e Baddour (2012, 2015), e diversos outros autores citados no Tópico 2 (Revisão Bibliográfica) da presente pesquisa, os quais obtiveram equações preditivas da altura alcançada por fontes em diferentes situações, utilizando distintos métodos e 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.

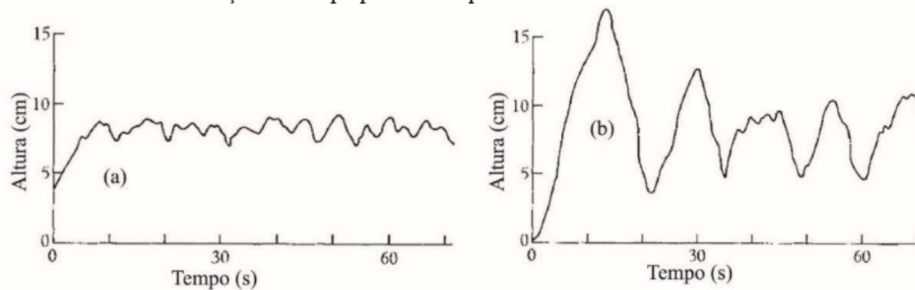
Modelos matemáticos também são utilizados como ferramenta de simulação de jatos hipersalinos, mas dada a escassez de estudos envolvendo simulações do tipo CFD para a descarga e dispersão de soluções hipersalinas e a falta de orientações gerais visando a máxima diluição dos efluentes, é que a presente pesquisa visa investigar a fluidodinâmica computacional de jatos e fontes. Utilizando a versão mais atual de 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, software adotado pela companhia para simulações do tipo. 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.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Experimentação

Diversos trabalhos realizaram estudos experimentais acerca de fontes, com o objetivo de quantificar e qualificar esses escoamentos. Em pesquisa pioneira, Turner (1966) realizou um estudo comparativo entre jatos e plumas turbulentos. Os resultados experimentais demonstraram comportamentos distintos entre eles, como explicita a Figura 4. As plumas, inicialmente flutuantes, tornam-se pesadas ao se misturar com o ambiente gerando uma amplitude de oscilação maior da altura comparada aos jatos. Equações teóricas geradas na mesma pesquisa, caracterizando ambos os escoamentos, foram reiteradas pelos experimentos.

Figura 4 - Altura alcançada por (a) um jato salino e, (b) uma pluma de mistura de água e álcool, em função do tempo produzidas por um bico de 4cm de diâmetro.

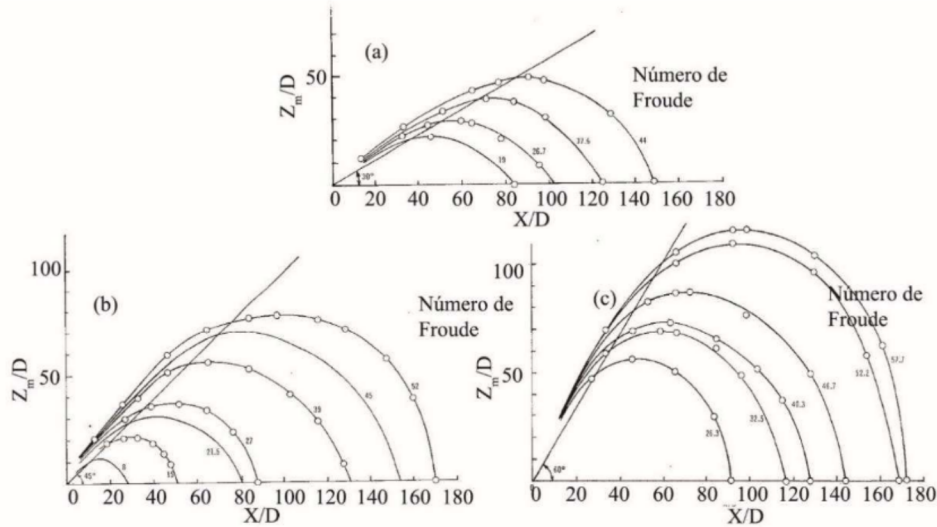


FONTE: Turner, 1966.

Abraham (1967) determinou matematicamente a altura média de jatos, considerando empuxo contrário a direção dos mesmos, em fluido ambiente homogêneo. A equação resultante relaciona a altura média do jato com o diâmetro do orifício de saída do fluido com o número de Froude densimétrico do escoamento, também objetivo do presente trabalho. A solução se aproxima da obtida por autores anteriores, inclusive Turner (1966).

Realizando um estudo direcionado a designs conceituais de plantas de dessalinização, Zeitoun e McIlhenny (1971) analisaram quantitativamente jatos produzidos por difusores a 30°, 45° e 60°, demonstrando que este último ângulo produziu a trajetória mais longa e, portanto, a maior diluição, como mostra a Figura 5. Determinaram, porém, os custos para construção de plantas de dessalinização utilizando as 3 configurações de difusores para diferentes capacidades de produção hídrica.

Figura 5 - Trajetória do contorno mais elevado para jatos densos de (a) 30°, (b) 45° e (c) 60°



NOTA: Z_m – Altura média do jato; D – Diâmetro do difusor; X – Distância horizontal

FONTE: Zeiuton e McIlhenny, 1971.

Utilizando um canal de laboratório com 17 m de comprimento, Tong e Stolzenbach (1979) concentraram seus estudos na avaliação da diluição no campo próximo a saída do jato denso, obtida por uma estrutura difusora de multiporta localizada na parte inferior do canal e consistindo em orifícios verticais que se estendem acima do fundo e espaçados igualmente ao longo de uma linha perpendicular à corrente de água constante. Foram obtidas equações empíricas para diluição e geometria do jato com base em análise dimensional. Ainda, verificou-se que o comportamento observado da cunha a montante correspondeu à teoria de escoamento de duas camadas por atrito.

Visando estabelecer critérios de projeto para difusores, especificamente com a finalidade do descarte de soluções hipersalinas em corpos d'água estáticos, James, Vergara e Kim (1983) conduziram experimento em tanque utilizando configurações distintas, variando entre 3 diâmetros de orifício, 3 velocidades do jato e 3 alturas (distância entre o fundo do tanque e o bocal de saída do fluido hipersalino). Obtiveram equação de diluição baseado na altura do difusor com relação ao fundo do corpo receptor, o número de Froude e a fração volumétrica da solução hipersalina. Os resultados foram corroborados com resultados obtidos em estudo de campo em emissário de solução hipersalina em Freeport, Texas.

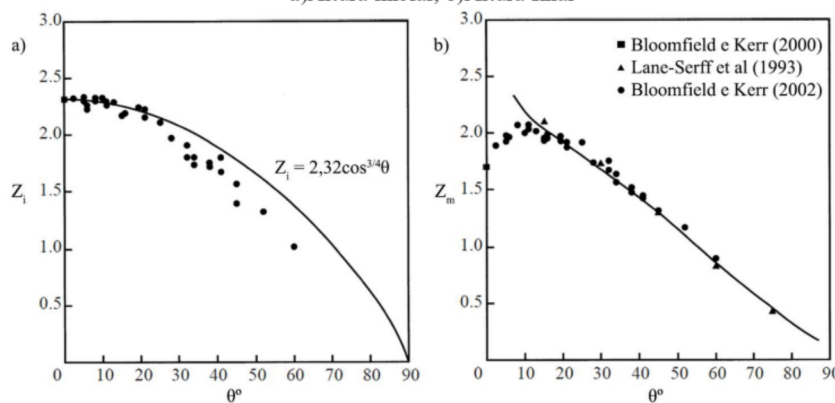
Outro estudo conduzido no mesmo emissário, realizando medição com instrumentos de métodos acústicos e sensores de temperatura, condutividade e profundidade foi realizado por

McLellan e Randall (1986). Dentre os estudos que foram apresentados e os que ainda serão, é o único baseado exclusivamente em dados de campo. Os dados de campo foram analisados usando técnicas de regressão linear e equações empíricas foram obtidas para prever a extensão e a diluição verticais. A equação para a extensão vertical dos jatos de salmoura predisse alturas maiores do que as obtidas de equações semelhantes com base em estudos de laboratório. Em contrapartida, os dados de diluição resultam em uma equação empírica que concorda bem com os resultados do laboratório, mas prevê valores mais altos do que as medições de campo.

Através de fluorescência induzida por laser (*Laser-Induced Fluorescence* - LIF) e uma sonda de micro condutividade, Roberts, Ferrier e Daviero (1997) realizaram experimentos em jatos densos inclinados em 60° em ambiente estacionário e não estratificado. Definiram expressões normalizadas para determinação da diluição em distintos pontos, apesar do estudo concentrar-se na zona de impacto do jato. Essa zona de mistura, como também é chamada, foi estabelecida como local onde as flutuações de concentração caem para 5% do valor médio. Determinaram também expressão para altura do jato.

Blommfield e Kerr (1998, 2002) apresentaram equações para altura de fontes verticais em ambiente estratificado, e fontes inclinadas em ambientes homogêneos e estratificados. Para a primeira situação observaram que, a depender da força de estratificação e do momento e empuxo da fonte, o fluxo descendente após alcance da altura máxima se espalha ao longo da base do tanque ou permanece em uma altura intermediária no ambiente. Em fontes inclinadas, constataram a diminuição da altura inicial da fonte com o aumento do ângulo de inclinação. Em contraste, a altura final aumenta e depois diminui, com a altura máxima ocorrendo em um ângulo de inclinação de cerca de 10° com a vertical, como mostra a Figura 6.

Figura 6 Adimensional das alturas das fontes inclinadas em função do ângulo de inclinação.
a) Altura inicial; b) Altura final



NOTA: Z_i – Altura inicial do jato; Z_m – Altura média do jato; θ° - Inclinação do difusor
FONTE: Blommfield e Kerr, 2002.

Avaliando experimentalmente o comportamento de um jato turbulento flutuante a partir de uma fonte pontual ideal em um ambiente calmo e homogêneo, Zhang e Baddour (1998) mostraram que a altura máxima inicial do jato (Z_i), normalizado por uma escala de comprimento (L_m) é constante para jatos com grandes números de Froude densimétricos ($Fr > 7,0$), confirmando que nesse regime o fluxo de massa da fonte tem um efeito desprezível na penetração máxima do jato. O experimento também mostrou que Z_i / L_m sempre foi menor que a solução assintótica da fonte pontual para jatos com pequenos números de Froude densimétricos ($Fr < 7,0$) devido ao efeito do fluxo de massa da fonte.

Utilizando a aproximação de Boussinesq (aplicada quando a diferença de densidade entre os fluidos pode ser desprezada), Ansong, Kyba e Sutherland (2008) observaram em seu experimento com fontes em ambiente estratificado com duas camadas, a ocorrência de três regimes de escoamentos: o fluido poderia penetrar a interface das camadas do ambiente e retornar a fonte, se espalhando radialmente governada pela gravidade; o fluido retornado poderia ficar preso na interface e também se espalhar radialmente; ou ambas as situações poderiam ocorrer. Desenvolveram ainda uma teoria para análise das velocidades iniciais das correntes radiais resultantes.

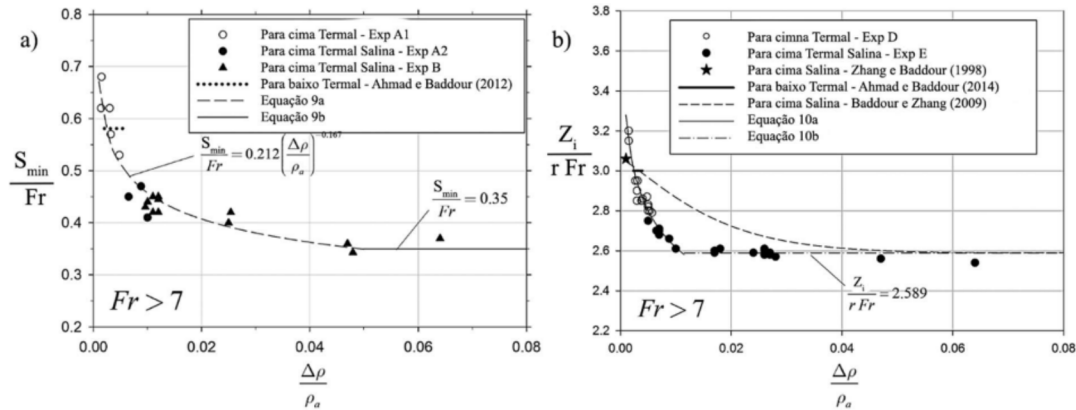
Baddour e Zhang (2009) de forma experimental, através da descarga de fluido hipersalino verticalmente para cima em um tanque de 1 m^3 contendo água, avaliaram o comportamento do jato a variações de densidade entre os fluidos. Obtiveram que a altura máxima da fonte era uma função da diferença da densidade relativa entre os fluidos e concluíram também que a simplificação de Boussinesq, em que a diferença de densidade relativa é desprezada, é válida apenas quando essa é menor que 0,003.

Ahmad e Baddour (2012) realizaram um estudo das propriedades de penetração e diluição de fontes verticais termais com empuxo negativo através da descarga vertical para baixo de água quente em um tanque contendo água com temperatura superior a $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Com esse experimento conseguiram determinar equações baseadas no número de Froude do escoamento e no raio do bocal de descarga para a penetração horizontal do jato próximo à fonte, e no número de Froude para a diluição mínima do fluido retornado na altura da fonte.

Três anos depois, os mesmos autores avaliaram os efeitos da diferença de densidade entre os fluidos, na altura e diluição de fontes verticais. Os resultados presentes na Figura 7 mostraram que um aumento na diferença de densidade relativa reduziu tanto a diluição mínima

do fluido retornado como a altura máxima das fontes, e ainda, que as fontes de fluxo ascendente são dinamicamente semelhantes às de fluxo descendente.

Figura 7 - Efeito da densidade na (a) diluição mínima do fluido retornado e (b) na altura máxima do jato



NOTA: S_{\min} – Diluição mínima; Fr – Número de Froude; $\Delta\rho = \rho - \rho_a$ em que ρ é a densidade do fluido da fonte, e ρ_a a densidade do fluido ambiente; Z_i – Altura inicial máxima do jato; r – raio do difusor.

FONTE: Ahmad e Baddour, 2015.

Analisando também ambientes estratificados, Lima Neto, Cardoso e Woods (2016) realizaram experimento com pluma de bolhas, em ambiente com duas camadas de fluidos: água salina e água fresca. Variando a vazão de ar e a densidade do fluido salino, observaram a transformação da pluma em fonte quando esta atingia a interface de densidades, na condição de o fluido da camada superior possuir densidade aparente inferior ao fluido da fonte. Demonstraram então a proporcionalidade entre a taxa de mistura entre os fluidos que formam as duas camadas e o quadrado do número de Froude.

2.2 CFD

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 computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) (PALOMAR et al. 2012; PALOMAR, LARA e LOSADA, 2012). Dentre os modelos que utilizam análise dimensional e integração das equações do movimento, destacam-se o CORMIX (DONEKER e JIRKA, 1990; AKAR e JIRKA, 1991; DONEKER e JIRKA, 2001), o CORJET (JIRKA, 2004; JIRKA 2006; BLENINGER e JIRKA, 2008), o VISJET (LEE e 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 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 Nukes (2008), Plum (2008), Muller, Seil e Hubbert (2011) e Elhaggag, Gamal e Farouk (2011). Embora demandem maior esforço computacional 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.

Antes restrita aos grandes centros científicos, a modelagem CFD cada vez se populariza mais no mundo da microinformática. Muitos pacotes comerciais, como os já citados, cada vez mais ficam acessíveis comercialmente, e assim, ao mundo das pesquisas científicas.

Para resolver os problemas de fluidodinâmica é preciso utilizar as equações dos fenômenos de transporte (BIRD, 1960). Equações estas que governam os fenômenos da fluidodinâmica, também chamadas de equações constitutivas, são aplicadas, por exemplo, em modelos ou protótipos, para fazer previsões sobre o comportamento das grandes variáveis termodinâmicas como temperaturas, pressões, concentrações e também velocidades na região de escoamento (FRANKFURT, 2008).

O processo de modelagem e simulação consiste em considerar hipóteses a respeito dos fenômenos físicos, químicos e comportamentos matemáticos, que por sua vez são inseridas nas equações diferenciais constitutivas fundamentais, que trazem os balanços de massa (Lei de Lavoisier), quantidade de movimento (segunda Lei de Newton) e de energia (primeira Lei da Termodinâmica). A solução destas equações gera dados que podem ser comparados com os dados experimentais para a sua validação.

Após definida a geometria e as equações constitutivas do fenômeno, faz-se necessário definir as condições de contorno para que o problema tenha uma solução.

Feito isto, o volume geométrico do modelo e as equações constitutivas são discretizadas. O volume é subdividido em volumes menores (uma grande quantidade) chamado de elementos ou células, e cada célula possui células vizinhas e estão interconectadas por faces comuns e pontos de intersecção chamados de nós. Este conjunto de células interconectadas é denominado *mesh* ou *grid*.

Estas células podem ter formatos de pirâmides, tetraedros, prismas e hexaedros. Se forem ordenadas são chamadas de *grid* estruturado, do contrário, são chamados de não

estruturado. Existem hoje, muitos módulos especialistas que lidam somente com a geração do *grid*. No caso do FLUENT, este módulo é o ANSYS MESHING.

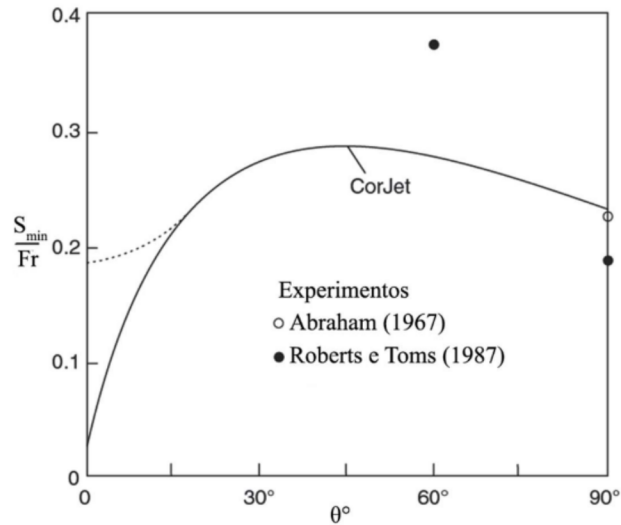
De base dessas informações são apresentados estudos que utilizam dos diversos softwares e modelos apresentados para avaliar qualitativamente e quantitativamente o escoamento em jatos e fontes em variadas situações.

Estudo numérico através de *Direct Numerical Simulation* (DNS) foi realizado por Lin e Armfield (2000) em fontes axissimétricas fracas. Avaliando a evolução do fluxo transiente de fontes identificaram dois estágios distintos (estável e instável), em que o fluxo da fonte possui padrões significativamente diferentes. Determinaram também equações baseadas no número de Froude para as alturas características inicial, temporária e final das fontes. No estado estacionário, obtiveram correlações entre a escala de altura com a altura final da fonte, a velocidade vertical e a temperatura no eixo de simetria. Além, as distribuições radiais das velocidades vertical e horizontal na zona de auto-similaridade no núcleo da fonte, também no estado estacionário, foram dimensionadas com as duas escalas de comprimento (altura e largura) e foram obtidas correlações empíricas.

Conduzido estudo em fontes com números de Froude e Reynolds intermediários, os mesmos autores três anos depois utilizaram novamente de DNS para avaliação dessas fontes específicas. Observaram que quando $Re \leq 200$, há pouca mistura entre o fluxo da fonte e o ambiente, mesmo para $Fr = 8$. No entanto, quando $Re \geq 400$, a mistura entre a fonte e o ambiente fica mais forte, indicando que o arraste e a turbulência se devem principalmente a Re , sendo a contribuição de Fr muito menor. Denotaram ainda uma flutuação na altura máxima de penetração da fonte (Z_m), mesmo quando o fluxo atingia o estado quase estável, devido à interação entre o fluxo descendente e o limite inferior e / ou o arrastamento entre o fluxo descendente e o ambiente. Por fim, encontraram relação entre a média de Z_m com $Fr*Re^{1/4}$ para $1 < Fr \leq 8$ e $100 \leq Re \leq 800$.

Avaliando jatos inclinados, Bleninger e Jirka (2008), mostraram vantagens consideráveis dos jatos de 30° a 45° , em contrapartida dos jatos a 60° largamente utilizados em projetos de plantas de dessalinização. Através da aplicação paramétrica do CorJet, um modelo integral de jato no sistema CORMIX, mostraram que ângulos de descarga mais planos de 30° a 45° se relacionam: a melhores níveis de diluição no local do impacto, mostrados na Figura 8, principalmente quando este possui inclinação em relação ao ponto de lançamento ; a um melhor transporte marítimo do efluente misto em condições de fracas correntes ambiente e; a capacidade de poder ser instalado mais próximo da costa, em águas rasas.

Figura 8 - Mínima diluição na linha central do jato em função do ângulo de descarga.



NOTA: S_{\min} – Diluição mínima; Fr – Número de Froude; θ° - Ângulo de inclinação do difusor
 FONTE: Bleninger e Jirka, 2008.

Williamson, Armfield e Lin (2010), também se munindo de DNS, mostraram evidências que sugerem que as duas partes, relacionadas aos mecanismos (aceleração radial a partir da origem da fonte e, caso ocorra, a contrapressão devido a intrusão do fluido em fluxo descendente), para o dimensionamento de Z_m é proporcional a $Fr^{2/3}$. Revelaram que o comportamento da intrusão varia com o número de Reynolds (Re), mas não havendo efeitos na altura de penetração da fonte. Para $Re < 250$, o fluxo de intrusão radial seria subcrítico e teria um comportamento diferente. Para Fr entre 0,4 e 2,1, o efeito do momento no fluxo da fonte aumentaria e a estrutura do fluxo mudaria para uma onde existiria um fluxo ascendente coerente e uma região limite em que o fluxo iria estagnar e depois reverter. As duas regiões teriam um comportamento separado, de modo que, através desse intervalo de transição dos números de Froude, Z_m poderia ser descrita por $Z_m/r = C_1 Fr^{2/3} + C_2 Fr^2$, onde C_1 e C_2 são constantes. Nessa faixa de transição, o efeito do perfil de velocidade da fonte seria mais significativo que o número de Reynolds, e o efeito da turbulência de entrada seria menor.

Complementando sua pesquisa, no ano seguinte publicaram estudo relativo a fluxos forçados de fontes para $Fr=4$ e 7 , com $Re = 3.350$. Caracterizaram o escoamento em 3 zonas: fluxo interno ascendente (FIA); fluxo externo descendente (FED); e fluido do ambiente circundante (FAC). O resultado das simulações foi concordante com a equação de altura da

fonte apresentada por Tuner (1966), porém, não houve suporte com as suposições por trás das derivações analíticas da relação. Os resultados sugeriram que o FED pode ser relativamente bem descrito pela dinâmica de uma pluma de linha pura em torno do FIA, mas com maior arraste devido ao comportamento pulsante instável do fluxo que entra no FED a partir do FIA. Comparações com resultados anteriores sugeriram que o FIA não está totalmente desenvolvido em $Fr = 7$ e a intrusão do FED no FIA pode não ocorrer até $Fr > 15$.

Através de experimentação sustentada por simulação no FLUENT, Elhaggag, Gamal e Farouk (2011) derivaram um novo modelo para a altura de jatos densos e mostraram a existência de curvas de avanço (ruptura do fluido hipersalino) de múltiplos pontos para os pontos mais distantes da costa, porém mais próximo da superfície livre de água. Foi considerado ambiente sem correntes ou fluxos anteriores a descarga hipersalina; velocidades de descarga entre $0,22$ e $1,14 \text{ m.s}^{-1}$ com densidade relativa do fluido hipersalino variando entre 1.00346 e 1.00736 .

Trazendo uma revisão dos trabalhos de quase meio século, Hunt e Burridge (2015) apresentaram as diversas equações para determinação da altura de fontes, demonstrando suas flutuações para cada tipo de fonte classificada apresentada. Destacaram a capacidade preditiva das equações à medida que mostrava conjuntos de dados experimentais detalhados, considerações dimensionais, estudos numéricos recentes e inúmeras extensões bem-sucedidas ao modelo teórico original de fontes. Discutiram também o arraste turbulento do fluido ambiente, os efeitos da estratificação ambiental e o papel do confinamento no comportamento de fontes.

Diante das pesquisas apresentadas, o presente estudo traz como contribuição científica uma apresentação detalhada dos modelos utilizados para simulação de jatos densos, bem como, através da utilização de software CFD de última geração, validar esses modelos. Será apresentado também os modelos e métodos de solução utilizados para gerar os resultados, visto que os estudos com modelagem CFD expostos não continham tais dados. Com eles, será possível que futuros trabalhos e simulações desses sistemas sejam feitas de maneira mais prática, para que o foco principal seja tão somente as condições de contorno para adequação a situação desejada.

Outra contribuição relevante é de cunho tecnológico, visto que a modelagem também será feita considerando o projeto e parâmetros operacionais da futura planta de dessalinização a ser instalada na capital Fortaleza. Pode ser usada como base para a CAGECE como ferramenta de gerenciamento do sistema ou expansão do mesmo, uma vez que permite avaliação acurada

e detalhada acerca do escoamento de campo próximo, refletindo também na análise de campo distante quando utilizado os resultados como referência para simulação em outros software. A pesquisa ainda se propõe a comparar os resultados do software CFD FLUENT com o software integral VISUAL PLUMES , avaliando qualitativamente e quantitativamente.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Realizar um estudo computacional da dissolução de fluido hipersalino, rejeito de plantas de dessalinização, em água marinha, bem como dos mecanismos fluidodinâmicos envolvidos.

3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos:

- Desenvolver modelo usando ferramenta CFD para avaliar a descarga de soluções hipersalinas em meio marinho;
- Validar o modelo com resultados numéricos e experimentais disponíveis na literatura;
- Realizar simulação de cenários para diferentes configurações de descargas hipersalinas, com foco no sistema a ser implantado em Fortaleza;
- Realizar comparação dos resultados com simulação no VISUAL PLUMES.

4 METODOLOGIA

A metodologia será dividida em três partes: a primeira é referente aos modelos e métodos de solução disponíveis no 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.

4.1 ANSYS FLUENT 2020R1

Atualmente em sua versão 2020, o software ANSYS FLUENT (<https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>) 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 dinâmica dos fluidos computacional (CFD) este software permite ao usuário escolher entre uma gama de técnicas para simulações, das quais se pode destacar a LES (*Large Eddy Simulation*) e a RANS (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*). Esta última foi escolhida para uso nesta pesquisa, uma vez que apresenta menor custo computacional na modelagem de fluxos turbulentos complexos. O modelo de fechamento de turbulência adotado foi o k- ϵ . Conhecido por sua precisão, o FLUENT se utiliza do Método dos Volumes Finitos (*Finite Volume Method* – FVM) e computação de alto desempenho (*High-Performance Computing* - HPC) altamente escalável para resolução rápida de modelos complexos, sendo validado para ampla gama de aplicações industriais e ambientais.

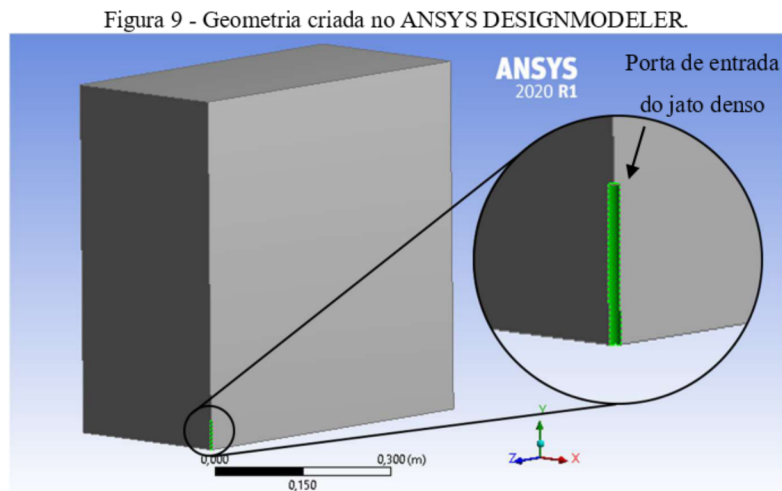
O FVM possui vantagem da simplicidade matemática (principalmente quando comparado a algumas versões do método dos elementos finitos), e particularmente, sua solução resultante satisfaz a conservação de quantidades como massa, quantidade de movimento, energia e espécies, tornando-se vital e muito versátil na solução de escoamentos de fluidos (REZENDE, 2009).

O FLUENT conta com alguns subprogramas que dão suporte à criação das simulações. No ANSYS DESIGNMODELER é possível elaborar a geometria do modelo, através de formas geométricas conhecidas e disponíveis no programa, ou com uso de ferramentas que permitem ao usuário a criação de formas mais orgânicas. O ANSYS MESHING é responsável pela malha

gerada por sobre a geometria definida. Nele, pode-se definir tamanho dos elementos, formato, e vários outros parâmetros desenvolvidos para auxiliar quem o utiliza. As duas etapas apresentadas, a geometria e a malha, são cruciais na precisão do modelo a ser criado, e o FLUENT com seus subprogramas fornecendo liberdade de criação, conduz a obtenção de um modelo com melhores resultados.

4.2 Criação da Geometria, Malha e Parâmetros de entrada

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. 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, em que 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 9, aplicando contornos de simetria.



FONTE: Autor, 2021.

O objetivo desta etapa é determinar os modelos de viscosidade, turbulência e multifásico, como também o solver, condições de contorno e os métodos de solução capazes de produzir resultados consistentes ao observado na literatura disponível, e com comportamento válido baseado nas equações relacionadas na Tabela 2, desenvolvidas por autores apresentados na Revisão Bibliográfica deste trabalho.

Tabela 2 – Equações de altura dos jatos e seus respectivos autores.

Autor(es)	Equação
Turner (1966)	$Z_m/r = 2,46.Fr$
Abraham (1967)	$Z_m/r = 3,48.Fr^{1/2}$
Cederwall (1968)	$Z_m/r = 4,59.Fr^{0,67}$
Zeitoun e McIlhenny (1971)	$Z_m/r = 2,43.Fr$
Tong e Stolzenbach (1979)	$Z_m/r = 3,4.V_0/g'$
James, Vergara e Kim (1983)	$Z_m/r = 2,57.Fr$
McLellan e Randall (1986)	$Z_m/r = 3,11.Fr$
Zhang e Baddour (1998)	$Z_m/r = 3,06.Fr$
Elhaggag, Gamal e Farouk (2011)	$Z_m/r = 2,63.Fr$
Ahmad e Baddour (2012)	$Z_m/r = 2,67.Fr$

NOTA: Z_m – Altura média do jato; r – Raio do difusor; Fr – Número de Froude; V_0 – Velocidade de descarga do jato; g' – Aceleração devido ao empuxo.

FONTE: Autor, 2021.

Na Tabela 3 constam as características da malha criada no ANSYS MESHING (para a geometria criada no ANSYS DESIGNMODELER), que gerou o *mesh* automaticamente com o uso de parâmetros-padrão (tamanho da célula e sua angulação).

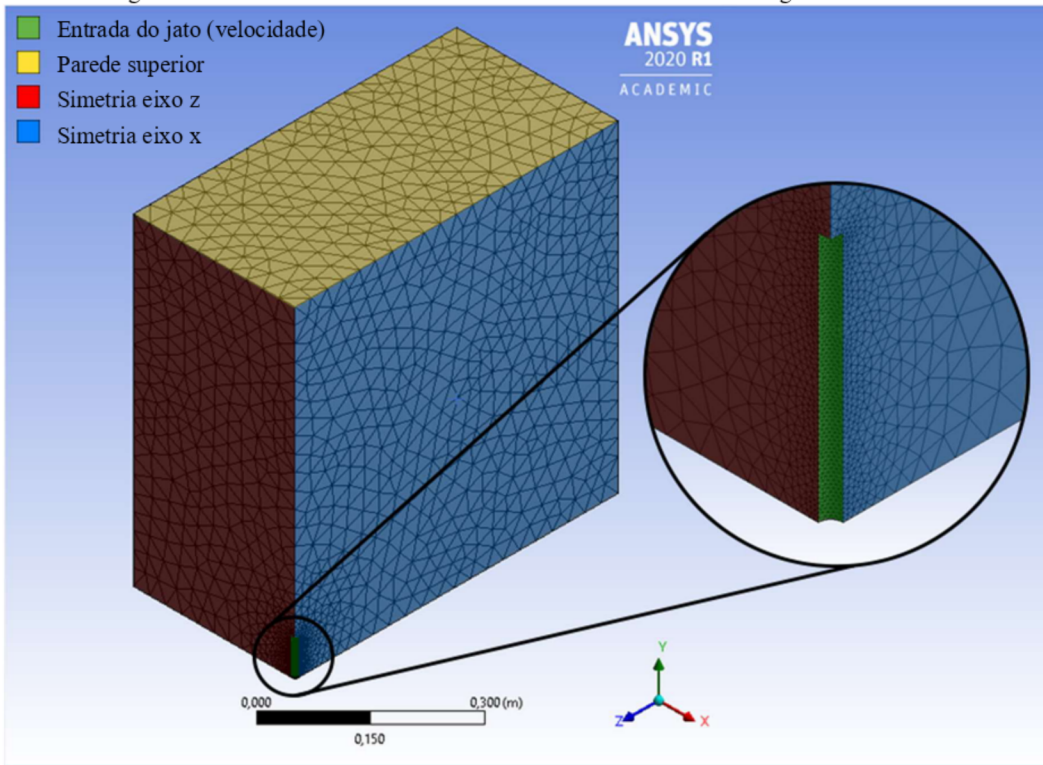
Tabela 3 - Características da malha gerada no ANSYS MESHING

Nº de nós	9.395
Nº de elementos hexaédricos	46.683
Dimensão média dos elementos (m)	0,03
Dimensão máxima dos elementos (m)	0,06

FONTE: Autor, 2021.

Como é possível perceber na Figura 10, o ANSYS MESHING refina automaticamente a malha ao redor das superfícies de entrada do fluido diminuindo a dimensão dos elementos. Tendo em vista que nesses pontos de descarga ocorrem os maiores gradientes de velocidade, o refinamento da malha nesses pontos torna-se necessário.

Figura 10 - Malha criada no ANSYS MESHING e detalhamento das regiões de interesse.



FONTE: Autor, 2021.

4.3 Modelo matemático

Considerando as fontes turbulentas ou jatos como o fenômeno hidrodinâmico aqui estudado, sabe-se que o movimento dos fluidos durante esses escoamentos é controlado principalmente pela quantidade de movimento fornecida e pela ação do empuxo, efeito devido a diferença de densidades entre o fluido lançado e o fluido ambiente. Dito isto, o presente trabalho concentrará a modelagem em torno desses dois efeitos.

O escoamento de fontes turbulentas é caracterizado pelo número de Froude:

$$Fr = ((M_0.W_0)/(R_0.E_0))^{1/2} \quad (1)$$

Onde r é o raio do tubo de descarga, M_0 é o momento e E_0 o empuxo, definidos respectivamente por:

$$M_0 = \int_0^r 2\pi.V_0^2.dr, \quad E_0 = \int_0^r 2\pi.g'.r.V_0.dr \quad (2)$$

Onde V_0 é a velocidade média de descarga da fonte, g' é a aceleração devido ao empuxo dada por $g' = g(\rho - \rho_0)/\rho_0$, em que ρ é a densidade do fluido da fonte e ρ_0 a densidade do

fluido ambiente. Têm-se ainda que W_0 é a velocidade característica dada pela razão entre a vazão (Q_0) e a área de seção transversal (A_0).

Segundo Burridge e Hunt (2012), as fontes podem ser classificadas pelo número de Froude em 4 categorias: forçadas e altamente forçadas, $Fr > 4$; intermediárias, $2 < Fr < 4$; fracas, $1 < Fr < 2$; e muito fracas, $0,3 < Fr < 1$. Cada um desses tipos possui características e comportamentos distintos.

Utilizando os conceitos apresentados até aqui, é que as simulações numéricas do escoamento realizadas consideraram um sistema bifásico constituído por um único fluido, água, mas com densidades diferentes, ambas em regime transiente e turbulento. Do 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. O regime turbulento considerado, permite que o próprio programa calcule o número de Reynolds e determine o regime de escoamento. Na Tabela 4 encontram-se as propriedades físicas de cada fluido.

Tabela 4 - Propriedades físicas dos materiais

Parâmetro	Água do mar	Fluido hipersalino
Densidade (kg.m^{-3})	998	1005,3
Massa molar (g.mol^{-1})	18,02	18,02
Capacidade de Calor Específico ($\text{J}.\text{(kg.K)}^{-1}$)	4181,7	4181,7
Viscosidade Dinâmica ($\text{kg}.\text{(m.s)}^{-1}$)	$8,889 \times 10^{-4}$	$8,889 \times 10^{-4}$

FONTE: Autor, 2021

Visando facilitar a compreensão, nomeou-se os fluidos como “Água do mar” e “Fluido hipersalino” considerando as distintas densidades, sem, contudo, representar valores reais em campo. Uma vez que as pesquisas apresentadas na revisão deste trabalho se utilizam nos aparatos experimentais de “água de torneira” ou água pura, para a validação deste modelo optou-se por utilizar para o fluido “Água do mar” as características padrões presentes na biblioteca do programa para a água em estado líquido. Já para o “Fluido hipersalino”, as mesmas características foram aplicadas, com exceção da densidade, cujo valor foi de 1,00736

da densidade da “Água do mar”. Valor semelhante foi adotado por Elhaggag, Gamal e Farouk (2011) por não se enquadrar na aproximação de Boussinesq

Para definir as condições de fluxo, as fronteiras foram detalhadas. São ao todo em 5: entrada, em que foi especificada a fração volumétrica da água do mar e da solução hipersalina, além da velocidade desta última; paredes, especificando a condição de cisalhamento; fluido interior; simetria z; e simetria x. Apenas na primeira fronteira foram modificados os valores padrões do programa, como apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Condição de fronteira especificada sobre o domínio computacional

Fronteira	Tipo	Settings
Entrada	<i>velocity-inlet</i>	Fração volumétrica da água do mar
		Fração volumétrica da solução hipersalina
		Velocidade normal (Darcy)
Paredes	<i>wall</i>	Condição de cisalhamento
Fluido interior	<i>interior</i>	-
Simetria z	<i>symmetry</i>	-
Simetria x	<i>symmetry</i>	-

FONTE: Autor, 2021.

As velocidades inseridas na fronteira de entrada, para testes iniciais, foram tais que produzissem números de Froude na faixa $4 < Fr < 60$, intervalo esse que abrange as condições de projeto da planta de dessalinização da CAGECE e está classificado segundo Burrige e Hunt (2012) como a faixa para fontes forçadas e altamente forçadas. Também foram escolhidas de modo a contemplar escoamentos em regimes laminares, de transição e turbulento. Assim, escolheu-se a velocidade de $0,6 \text{ m.s}^{-1}$ para início dos testes.

Até este ponto, o problema era bem definido pela literatura e pelas condições próprias. Entretanto, para definir completamente a simulação, faltava a definição do modelo de viscosidade e de turbulência, bem como os métodos de solução apropriados. Decorrente 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 e o próprio manual do software afirmavam serem os mais coerentes para o problema.

Na Tabela 6 são apresentados aqueles que melhor se adequaram a situação. Os demais parâmetros e modelos que não foram apresentados, foram utilizados os valores padrões do programa.

Tabela 6 - Modelos, variações e métodos adotados nas melhores soluções

Parâmetro	Setting
Modelos	
Multifásico	Euleriana
Fase-1	fluido-hipersalino
Fase-2	agua-do-mar
Viscosidade	<i>Realizable</i> 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

NOTA: *Opção para indicar a condição inicial do ambiente. Para o caso, o meio estava totalmente preenchido pela Fase 2 (água do mar).

FONTE: Autor, 2021.

O modelo Euleriano multifásico foi escolhido tendo em vista a possibilidade de se modelar múltiplas fases e a interação entre elas, em contrapartida dos modelos VOF (*Volume of Fluid* – Volume de Fluido), usado para fluidos imiscíveis, e Mistura, usado em casos

multifásicos com interação mais simples. O 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 por:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla P + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (K_{pq}(\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + \vec{F} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\rho_r} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (4)$$

Onde α é a fração volumétrica, ρ representa a densidade, \vec{v} é a velocidade, \vec{g} a gravidade, e os índices “p” e “q” são as fases as quais as variáveis estão associadas. Tem-se ainda que \dot{m}_{pq} e \dot{m}_{qp} caracterizam a 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 há transferência de massa entre as fases. A velocidade \vec{v}_{pq} é determinada pelo 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 coeficiente de troca de momento entre as fases ($K_{pq} = K_{qp}$) é determinado partindo do princípio que a fase secundária forma gotas ou bolhas na fase primária, e sua equação depende do diâmetro dessas gotas ou bolhas (d_p) determinadas pelo usuário. Uma vez que foi usado o valor padrão (10^{-5} m) o FLUENT calcula o coeficiente pela equação:

$$K_{pq} = \frac{\rho_p f}{6\tau_p} d_p A_i \quad (5)$$

Onde f é o coeficiente de arraste (modelo de Schiller e Naumann), A_i é a área interfacial e τ_p é um termo de relaxamento de tempo para particulados, e são definidos respectivamente pelas equações:

$$f = \frac{C_d Re}{24}, \quad C_d = \begin{cases} 24(1 + 0,15Re^{0,687})/Re & Re \leq 1000 \\ 0,44 & Re > 1000 \end{cases} \quad (6)$$

$$A_i = \frac{6\alpha_p}{d_p} \quad (7)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (8)$$

O vetor \vec{F} da Equação 3 é dado pela soma dos vetores de força externa, força de elevação, força de “lubrificação” das paredes (nula para a condição adotada), força de massa

virtual e força da dispersão turbulenta. O tensor de tensão-deformação da fase “q” ($\bar{\tau}_q$) é dado ainda pela equação:

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{I} \quad (9)$$

Em que μ_q e λ_q são as viscosidades dinâmica e cinemática, respectivamente.

O modelo de viscosidade foi selecionado de modo a produzir um resultado mais preciso. O modelo *Realizable* k- ϵ , segundo Gildeh et al (2014), juntamente com o modelo LRR são capazes de produzir resultados mais acurados em detrimento de outros 7 modelos analisados em sua pesquisa. Os métodos de solução escolhidos foram os de ordem maior, visando precisão nos resultados, uma vez que o próprio FLUENT recomenda quando na obtenção de resultados finais.

A seleção do modelo de turbulência Mistura se deu pelo fato da razão entre as densidades das fases ser próximo de 1, que no caso, 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 a seguir:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m k) = \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \epsilon + \Pi_{k,m} \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \epsilon) = \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_{k,m} - C_{2\epsilon} \rho_m \epsilon) + \Pi_{\epsilon,m} \quad (11)$$

Onde a densidade da mistura, ρ_m , a viscosidade molecular, μ_m , e a velocidade, \vec{v}_m , são computadas como:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \quad (12)$$

$$\mu_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_i \quad (13)$$

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \vec{v}_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i} \quad (14)$$

Em que o índice “i” representa a 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 por:

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (15)$$

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} (\nabla \vec{v}_m + (\nabla \vec{v}_m)^T) : \nabla \vec{v}_m \quad (16)$$

Encontrados resultados coerentes, foram realizadas simulações modificando a velocidade de entrada do fluido hipersalino para as outras quatro definidas: $0,07 \text{ m.s}^{-1}$; $0,34 \text{ m.s}^{-1}$; $0,86 \text{ m.s}^{-1}$; e $1,12 \text{ m.s}^{-1}$. Da resolução destas, foi efetuada a análise numérica baseada em equação por ajuste que relaciona a altura alcançada pela fonte (Z_m) com o raio do difusor (r) e o número de Froude (Fr) do escoamento, comparando assim com as equações listadas na Tabela 2. Abaixo consta a Tabela 7 com as velocidades simuladas e as características do escoamento, que como mencionado anteriormente englobam escoamento laminar, de transição e turbulento, com número de Froude variando linearmente entre 4 e 60.

Tabela 7 - Demais velocidades simuladas e características do escoamento

NOME	VELOCIDADE (m.s^{-1})	Nº REYNOLDS	Nº FROUDE
V1	0,07	368,18 (LAMINAR)	4
V2	0,34	1656,83 (LAMINAR)	18
V3	0,60	2945,48 (TRANSIÇÃO)	32
V4	0,86	4234,12 (TURBULENTO)	46
V5	1,12	5522,77 (TURBULENTO)	60

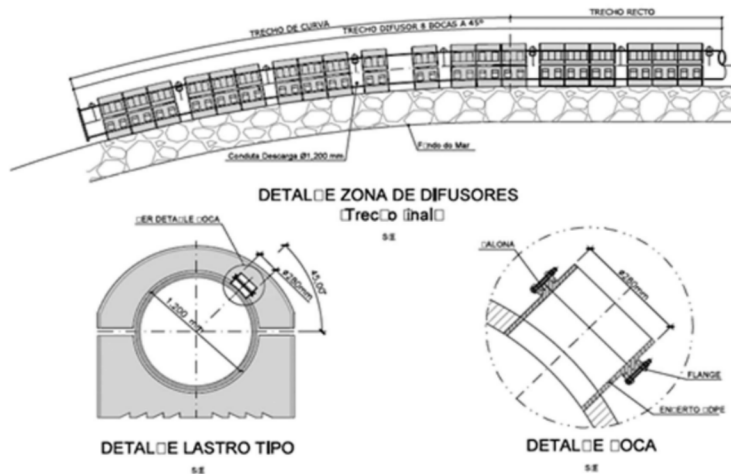
FONTE: Autor, 2021.

4.4 Situação CAGECE

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, no que concerne diâmetro e configuração dos difusores a serem utilizados para despejo da solução hipersalina no mar, bem como as condições de fronteira, definidas pela velocidade de saída do rejeito, e as características dos fluidos, principalmente viscosidade e densidade, que definem momento e empuxo.

Assim como é praticado em usinas de dessalinização no mundo, o projeto da CAGECE (CAGECE, 2019) sugere que o despejo da solução hipersalina fosse feito através de um emissário submarino localizado distante (1.200 m) da costa. No projeto, como mostra a Figura 11, o trecho final do emissário contém oito difusores com diâmetro de 280 mm, formando um ângulo de 45° com a horizontal.

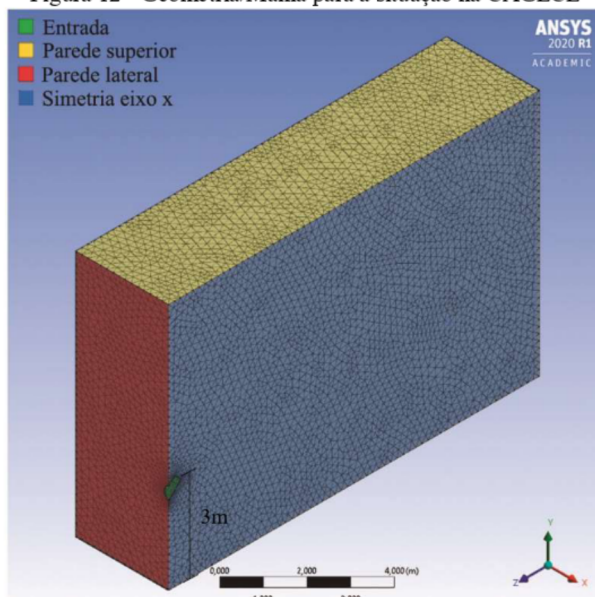
Figura 11 - Projeto referencial do trecho final do emissário, contendo os difusores



FONTE: CAGECE, 2019.

Devido ao custo computacional elevado em se simular os 8 difusores em funcionamento, optou-se pela simulação de apenas um. Respeitando as características do mesmo, o domínio do sistema foi adotado como um paralelogramo de 15m de comprimento, 5m de largura e 8m de altura, com o difusor localizado em uma extremidade, de modo que o eixo do bocal ficasse a 3m em relação ao fundo, como mostrado na Figura 12. Para melhorar a visualização e diminuir o número de nós e elementos da malha, foi usado um contorno de simetria, dividindo o domínio na metade.

Figura 12 - Geometria/Malha para a situação na CAGECE



FONTE: Autor, 2021.

Na determinação da velocidade de despejo do fluido hipersalino, bem como sua densidade e a densidade da água do mar, algumas informações foram consideradas. A vazão de captação prevista em projeto da planta de dessalinização é de $192.576 \text{ m}^3 \cdot \text{dia}^{-1}$ ($2,22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) com uma conversão de 44,86%. O fator de conversão especifica a porcentagem de vazão (ou volume) de água do mar que é convertida para água tratada, portanto, a vazão de despejo, dado pela porcentagem complementar, é de $1,2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De base da geometria e da quantidade dos difusores obtém-se a velocidade de $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ para uso na simulação.

A salinidade da água do mar na localidade tem um valor médio de 37psu, que com o fator de conversão, indica também a salinidade do fluido hipersalino em torno de 67,3psu. Utilizando tabela de conversão com base na temperatura desenvolvida por Millero e Poison (1981) têm-se as densidades dos fluidos, apresentados na Tabela 8 com os parâmetros já determinados e o número de Froude do escoamento.

Tabela 8 - Características do escoamento e propriedades dos fluidos água do mar e solução hipersalina

Parâmetro	Água do mar	Solução Hipersalina
Densidade ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1023	1046
Viscosidade (cP)	1,06	1,12
Vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	-	0,15
Velocidade ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	-	2,5
Nº de Froude	-	10

Observação: Os dados de vazão, velocidade e número de Froude referem-se ao encontrado em um difusor.

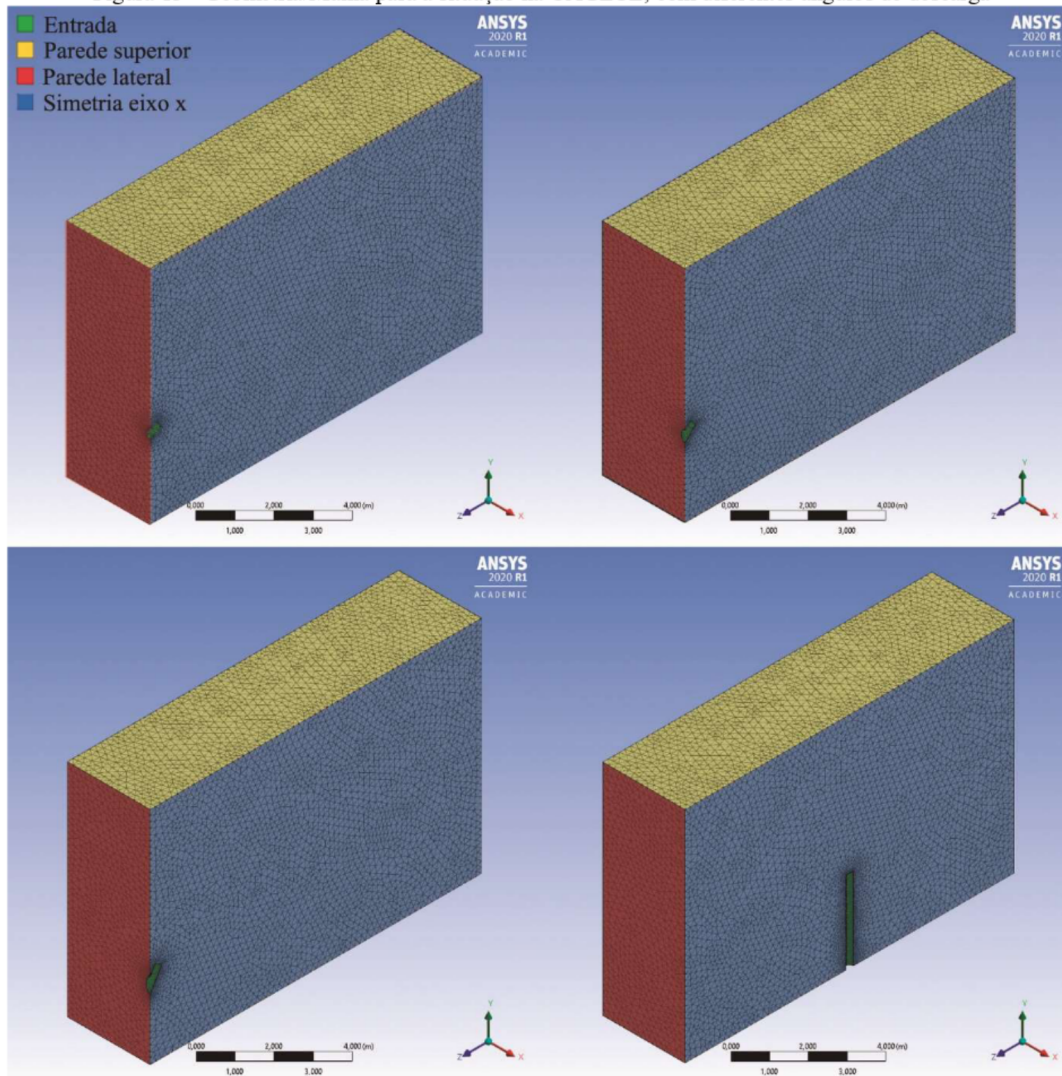
FONTE: Autor, 2021.

A viscosidade foi determinada por interpolação dos dados apresentados por Lide (2005), que traz uma tabela relacionando propriedades da mistura de água com NaCl. A tabela em questão foi usada visto que esses dois elementos representam cerca de 83,32% dos sais presentes na água do mar local (CAGECE, 2019).

Com o intuito de avaliar a altura e trajetória de jatos para diferentes ângulos de descarga, realizou-se outras simulações com difusores a 30° , 60° e 90° . Foi executada também para o ângulo de 90° outras duas simulações variando a densidade (ρ) e viscosidade (μ) do fluido hipersalino: $\rho=1056 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e $\mu=1,15 \text{ cP}$; $\rho=1043 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e $\mu=1,11 \text{ cP}$. Essas foram feitas de modo a comparar diretamente com o modelo desenvolvido na etapa anterior, tendo em vista a mudança de geometria e malha ocorrida.

Mantendo o eixo do bocal do difusor na mesma cota, e utilizando o mesmo domínio já mencionado, foram geradas as geometrias e malhas mostradas na Figura 13 (consta a malha mostrada anteriormente para efeito de comparação).

Figura 13 - Geometria/Malha para a situação na CAGECE, com diferentes ângulos de descarga



FONTE: Autor, 2021.

A geometria e malha com ângulo de 90° se difere das demais pelo difusor localizado no centro da geometria, com o intuito de permitir livre movimentação do fluido sem interferência das paredes do domínio. Apesar da possibilidade de se utilizar mais um contorno de simetria, optou-se por não o fazer, a fim de preservar ao máximo as características de malha utilizada nos diferentes ângulos, possibilitando uma comparação fidedigna.

4.5 Comparação com o VISUAL PLUMES

O VISUAL PLUMES é um aplicativo de modelagem de zonas de mistura baseado em Windows projetado para substituir o programa PLUMES baseado em DOS. Assim como seu antecessor, o software suporta modelos de diluição inicial que simulam plumas submersas simples e combinadas em fluxo ambiente arbitrariamente estratificado. Os modelos permitem prever diluição, altura, diâmetro e outras variáveis de plumas. A retenção do algoritmo TheBrooks permite ainda prever a diluição da linha central do campo distante e a largura do campo de resíduos. Novas características incluem o modelo de descarga superficial (PDS), o modelo de decomposição bacteriana *multisstress*, saída gráfica, entrada em série temporal, capacidade de análise de sensibilidade, unidades especificadas pelo usuário e uma capacidade conservadora de formação de poluentes de fundo de maré.

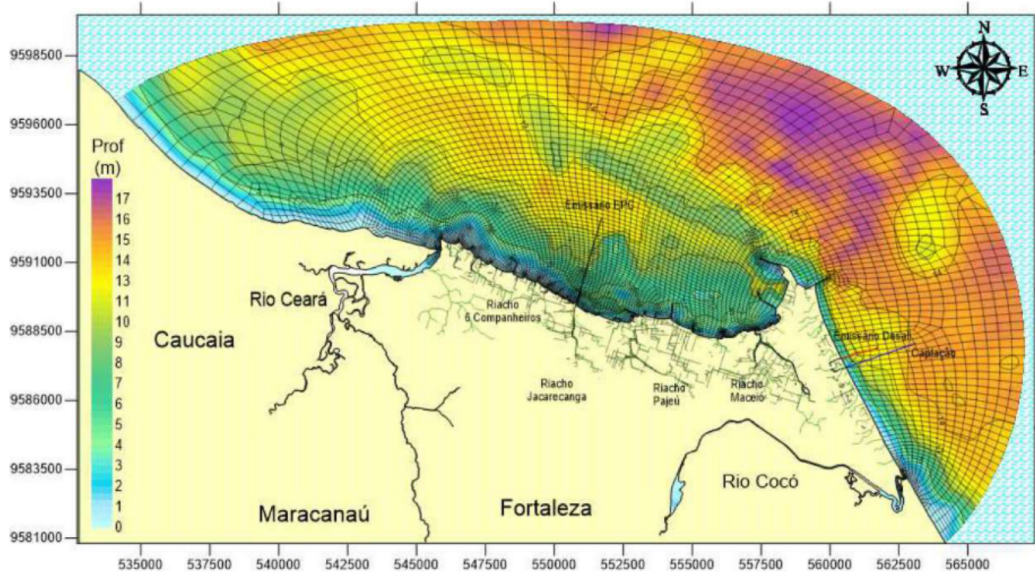
Dentre os modelos disponíveis no VISUAL PLUMES, está o UM3, cujas características que se destacam são a formulação Lagrangiana e a hipótese de arraste de área projetada (Projected Area Entrainment - PAE). Este modelo de fluxo integral fornece apenas uma estimativa da trajetória do elemento, isto é, o caminho do centro de massa do elemento pluma, de modo que a distribuição dessa massa ao longo da trajetória é feita assumindo a forma do elemento. Presume ainda que a pluma esteja em estado estável. Na formulação Lagrangiana, isso implica que elementos sucessivos seguem a mesma trajetória. O contorno da pluma permanece invariante enquanto os elementos que se movem através dele mudam de forma e posição com o tempo (FRICK et al., 2003).

A suposição de estabilidade é usada para derivar o comprimento do elemento de pluma em função da velocidade média instantânea, seu comprimento inicial e a velocidade inicial do efluente. Assim, o comprimento do elemento não permanece em geral constante, mas muda com o tempo devido às diferentes velocidades das faces de condução e de fuga. Segue-se que o raio do elemento deve responder a esta convergência ou divergência de velocidade, bem como ao arraste, pois, o fluido é praticamente incompressível, embora a incompressibilidade e as aproximações Boussinesq não sejam incorporadas ao UM3.

A CAGECE realizou simulações utilizando o software VISUAL PLUMES. Os resultados serviram de base para uso no Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental (SisBaHiA), um sistema profissional de modelos computacionais que pode ser aplicado em simulações de cenários em baías, estuários, rios, canais, reservatórios, lagos ou lagoas, e também em águas costeiras, como Dalazen, Cunha e Almeida (2020) realizaram, visando o estudo da dinâmica de processos nestes complexos sistemas ambientais.

No SisBaHiA foram reproduzidas as condições hidrodinâmicas da região para determinar o comportamento da pluma salina em dezenas de quilômetros ao longo da costa de Fortaleza, como mostra a Figura 14 com o domínio da modelagem realizada.

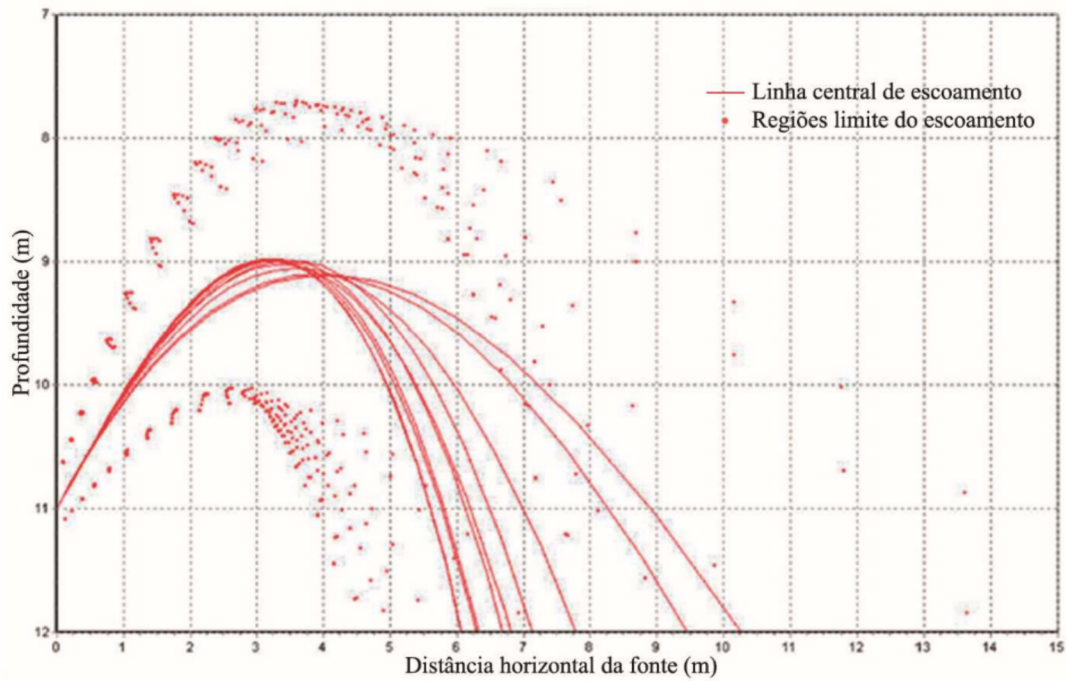
Figura 14 - Domínio da modelagem realizada com o SisBaHiA, pela CAGECE.



FONTE: CAGECE, 2019.

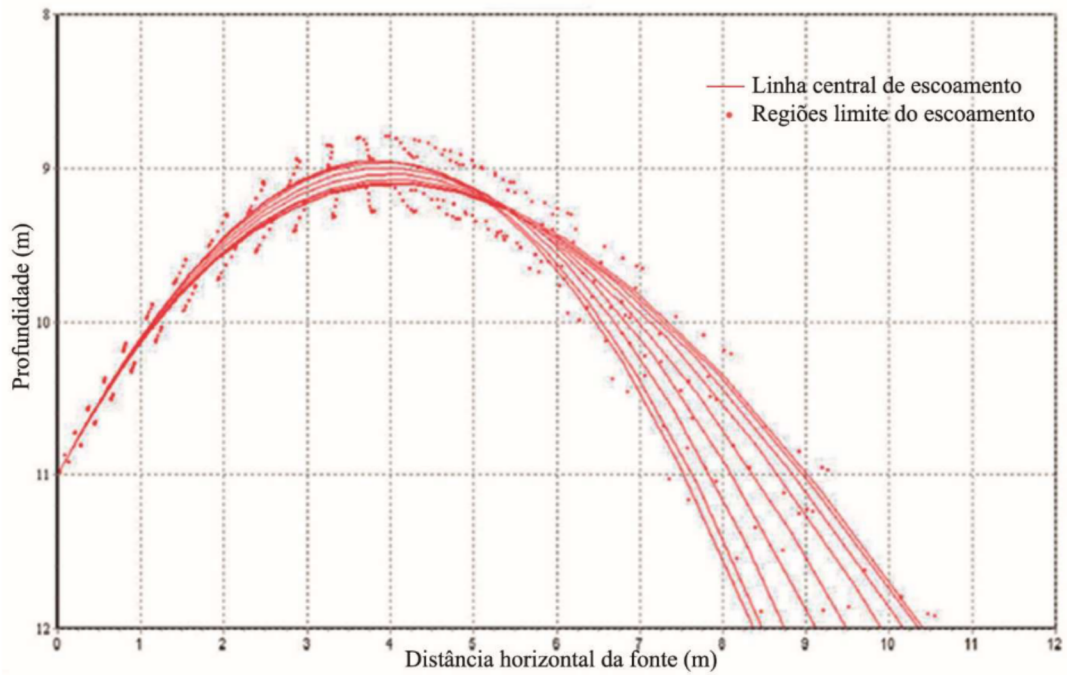
As simulações de campo próximo que serviram para avaliação das diluições iniciais para os meses de abril e novembro são apresentadas nas Figuras 15 e 16, e contêm as trajetórias do centro de massa do fluido hipersalino (linha contínua) considerando as correntes marinhas dos respectivos meses. Os pontos representam as trajetórias de linhas de corrente de extremidade.

Figura 15 - Resultado gerado pelo software VISUAL PLUMES para o mês de abril.



FONTE: CAGECE, 2019

Figura 16 - Resultado gerado pelo software VISUAL PLUMES para o mês de novembro.



FONTE: CAGECE, 2019

Entretanto, é preciso salientar que no sistema a CAGECE reproduziu as condições de projeto (8 difusores) e hidrodinâmicas da região para simular o comportamento da pluma salina, o que difere da geometria (1 difusor) e condição ambiente utilizada no 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 FLUENT com modelos CFD, e o VISUAL PLUMES com modelos integrais.

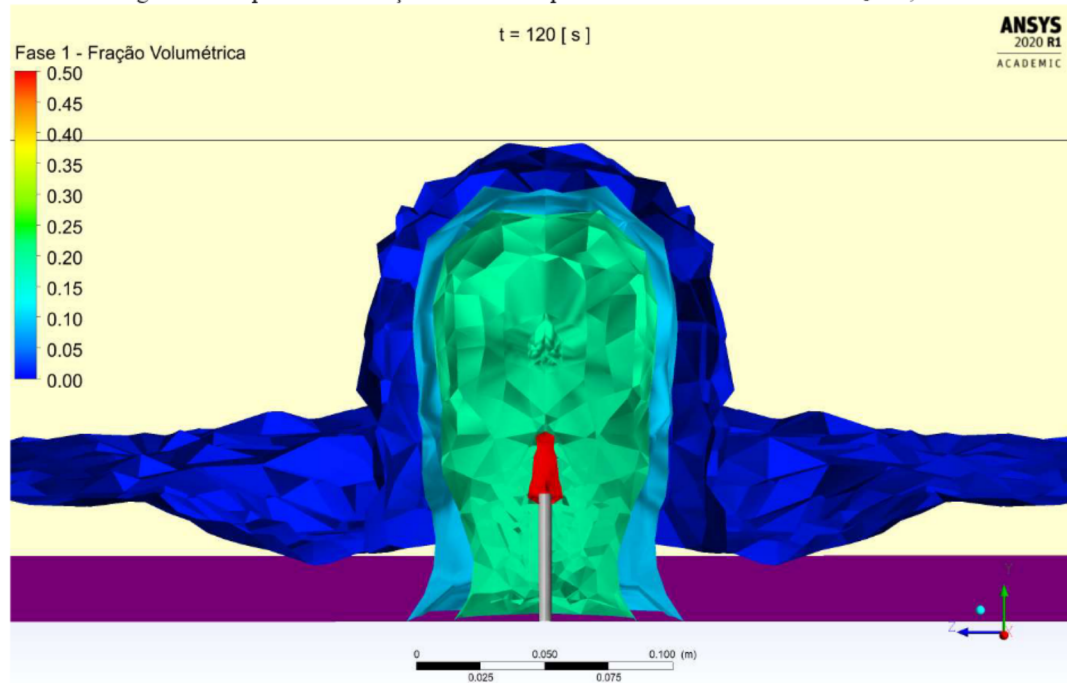
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados aqui apresentados foram divididos em duas partes: a primeira compreende o modelo de simulações tipo, bem como sua validação; a segunda parte contém a aplicação do modelo validado para a situação da planta de dessalinização da CAGECE e a comparação com os resultados do VISUAL PLUMES.

5.1 Modelo validado

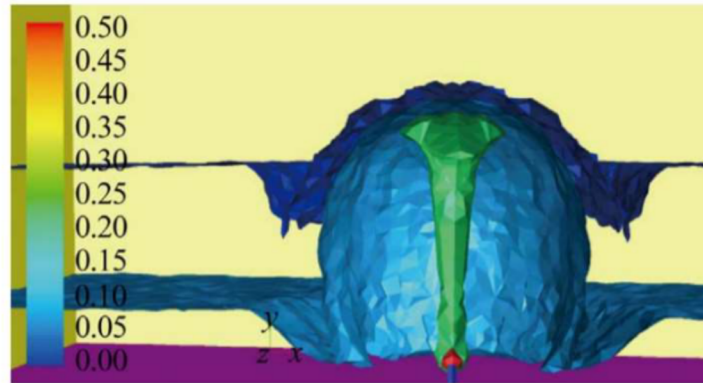
Os resultados gerados a partir dos modelos e métodos de solução apresentados na metodologia estão na Figura 17 na forma de superfícies de fração volumétrica da fase 1 (solução hipersalina), para valores de 1%, 10%, 20% e 50%, semelhante ao apresentado por Elhaggag, Gamal e Farouk (2011), na Figura 18.

Figura 17 - Superfícies de fração volumétrica para velocidade inicial de teste $V_3 = 0,6$ m/s.



FONTE: Autor, 2021.

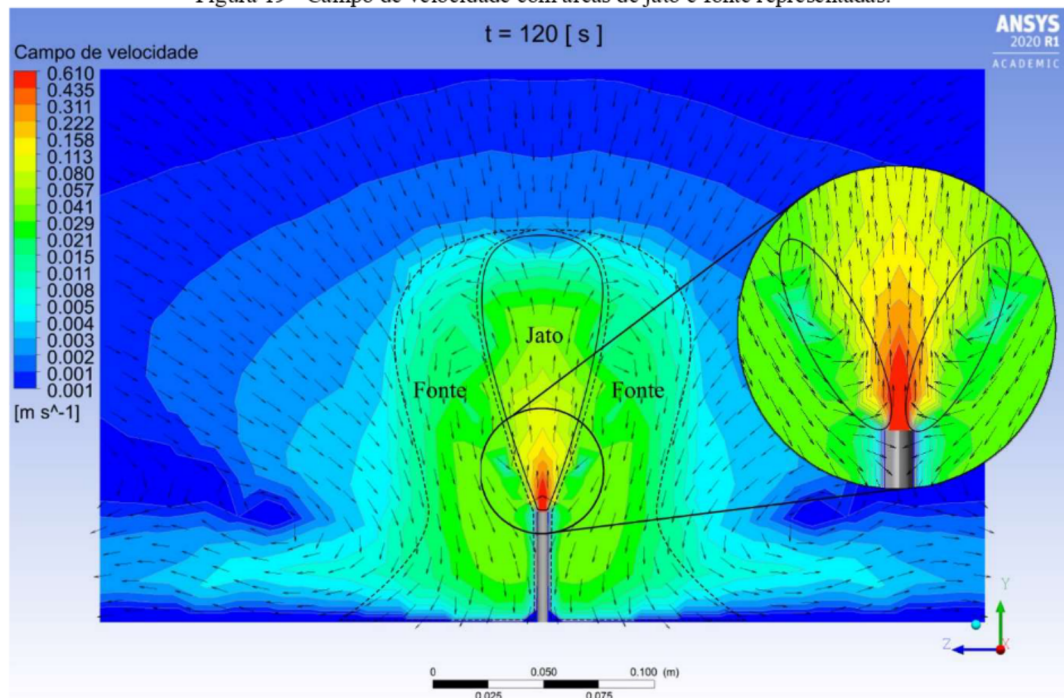
Figura 18 - Superfícies de fração volumétrica gerados na pesquisa de Elhaggag, Gamal e Farouk (2011) para velocidade de 0,58 m/s.



FONTE: Elhaggag, Gamal e Farouk, 2011.

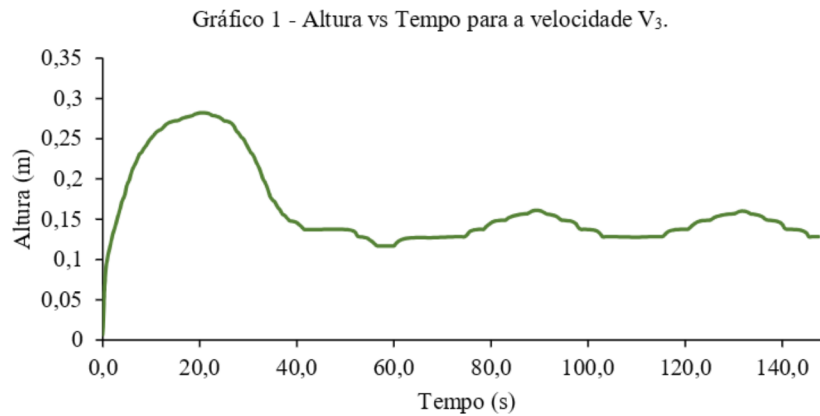
Os modelos de viscosidade, turbulência e métodos de solução selecionados foram capazes de gerar resultados compatíveis com as definições de Hunt e Burridge (2015) citadas na introdução deste trabalho, através dos contornos bem definidos do escoamento na área definida por jato e na área caracterizada como fonte, mostradas na Figura 19. Nota-se ainda a entrada turbulenta do fluxo descendente (região de fonte) no fluxo ascendente (região de jato), conforme discutido por Bloomfield e Kerr (2000) e Williamson, Armfield e Lin (2010).

Figura 19 - Campo de velocidade com áreas de jato e fonte representadas.



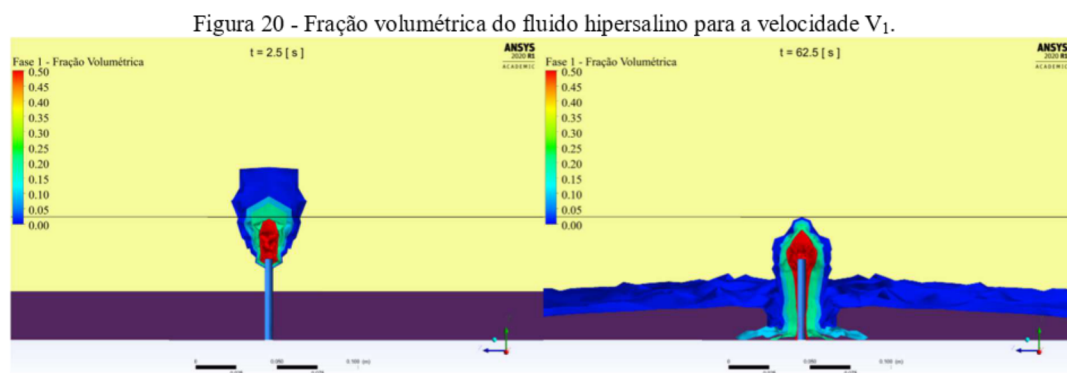
FONTE: Autor, 2021.

Analisando o Gráfico 1, notadamente a altura da fonte e sua variação ao longo do tempo, duas variáveis podem ser obtidas: Z_i , 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 estabelecimento de um regime estacionário do escoamento. Padrões de escoamento semelhantes também foram observados experimentalmente por Turner (1966) e em estudos subsequentes.



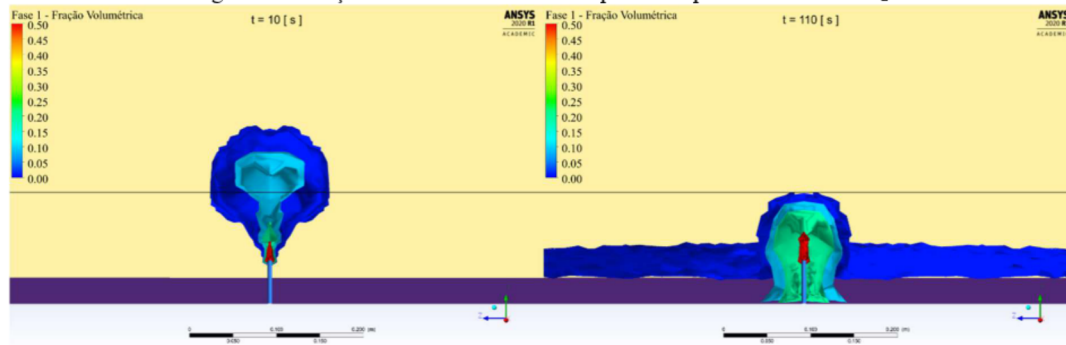
FONTE: Autor, 2021.

Os contornos de fração volumétrica para os instantes de altura máxima (Z_i) e altura média (Z_m) são apresentados nas Figuras 20 a 24 para as velocidades apresentadas. Esses resultados encontram-se de forma detalhada nos Apêndices A a E. A linha horizontal representada nas imagens corresponde a altura média alcançada pela fonte.



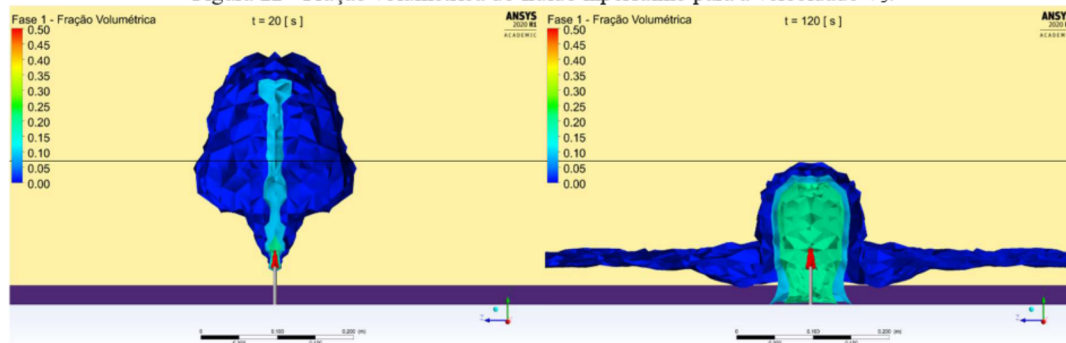
FONTE: Autor, 2021.

Figura 21 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_2 .



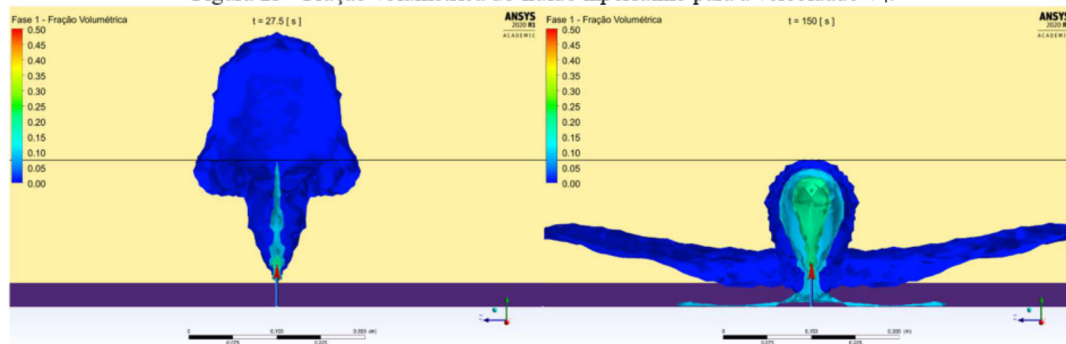
FONTE: Autor, 2021.

Figura 22 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_3 .



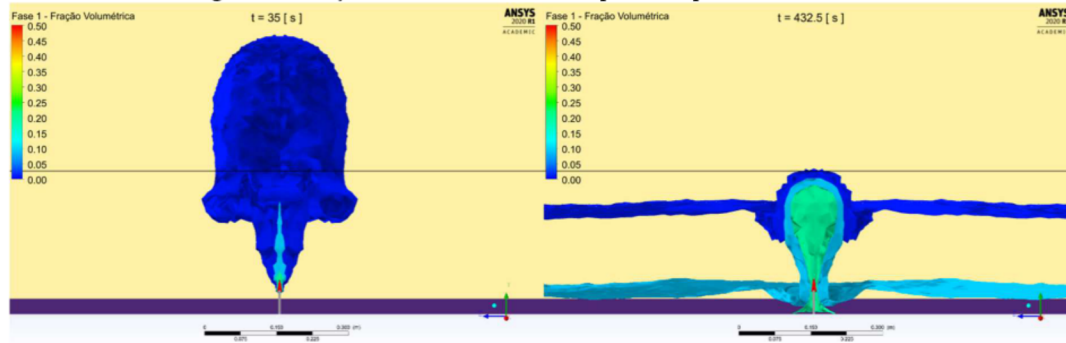
FONTE: Autor, 2021.

Figura 23 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_4 .



FONTE: Autor, 2021.

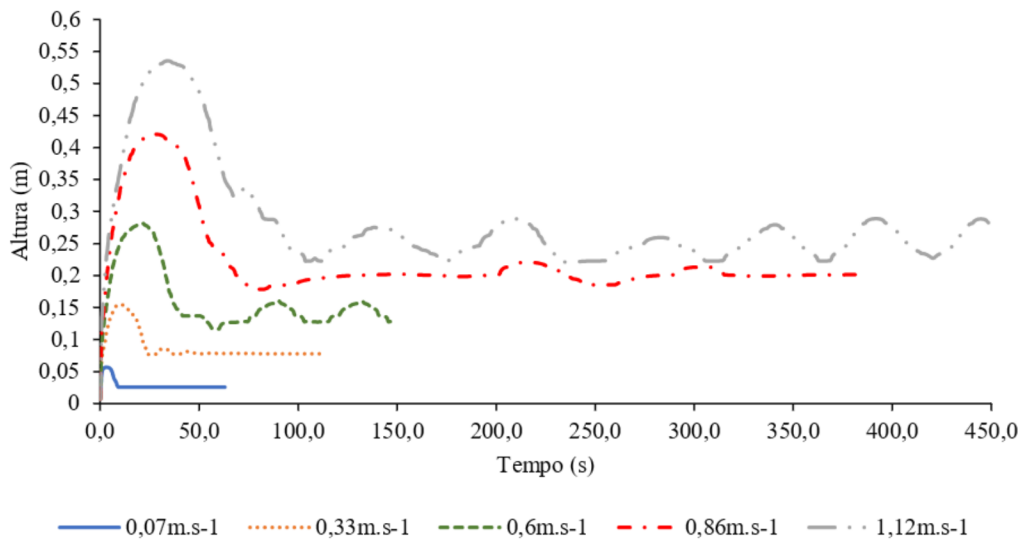
Figura 24 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para a velocidade V_3 .



FONTE: Autor, 2021.

O Gráfico 2 apresenta a altura máxima instantânea da fonte para cada uma das velocidades simuladas. Da mesma forma ocorrida na velocidade V_3 , as demais apresentaram uma altura inicial superior a altura em estado estacionário, e ainda, velocidades maiores exibiram maiores oscilações. Esse comportamento oscilatório foi semelhante aos observados 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 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 nas Figuras 20 a 24.

Gráfico 2 - Altura vs Tempo para as simulações das velocidades V_1 , V_2 , V_3 , V_4 e V_5 .

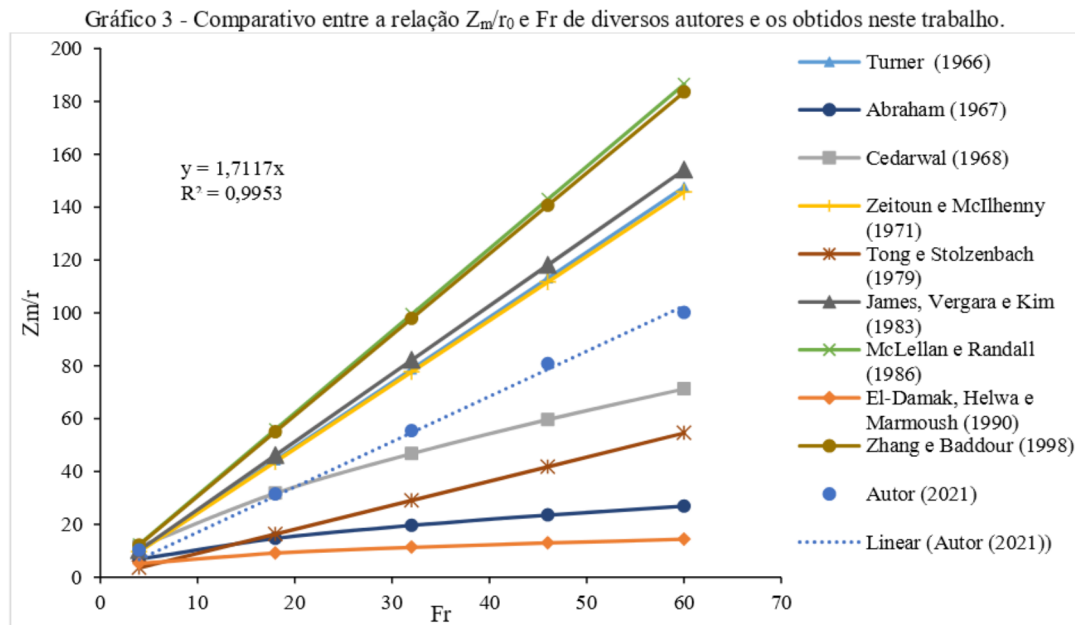


FONTE: Autor, 2021.

Para cada velocidade extraiu-se a altura média, e através desses valores obteve-se a equação que relaciona o número de Froude da fonte com sua altura por ajuste linear dos dados (coeficiente de determinação $R^2 = 0,995$):

$$Z_m/r = 1,71(Fr) \quad (17)$$

Os valores e a equação apresentada estão no Gráfico 3 juntamente com as equações propostas por diversos autores. A função 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). Observa-se ainda que a mesma se encontra dentro dos limites apresentados na literatura, o que sugere que esta pode ser utilizada como referência para prever a altura alcançada pela descarga de soluções hipersalinas no oceano. Outra informação relevante que servirá de comparativo desta 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 $CV = 0,042$. Esta relação está intimamente ligada à interação entre a região de jato e a região de fonte, conforme relatado anteriormente.

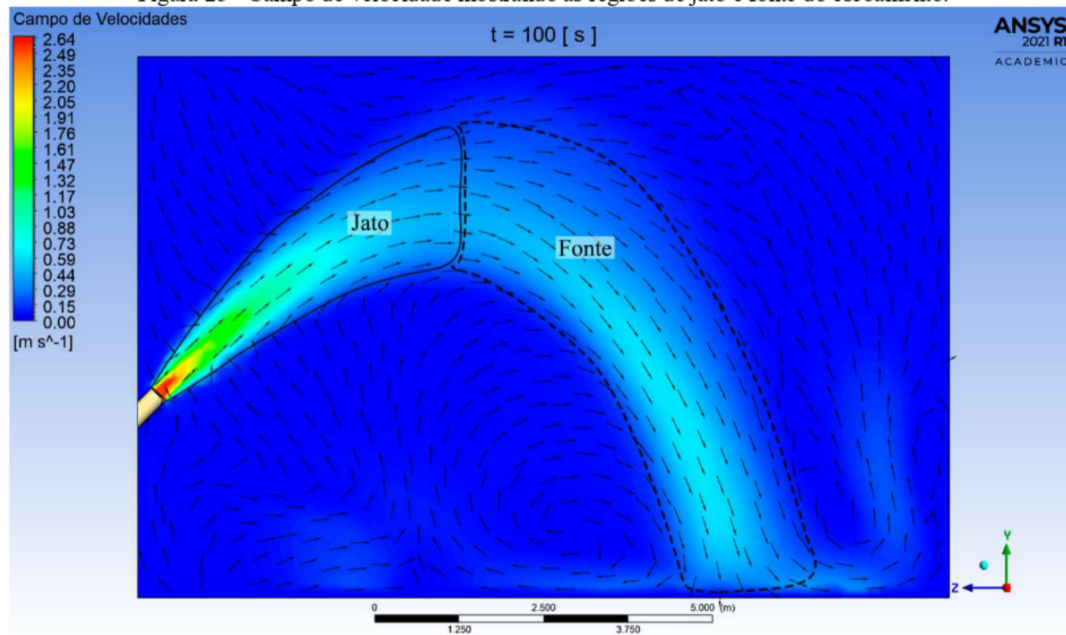


FONTE: Autor, 2021.

5.2 Modelo CAGECE

Os contornos de fração volumétrica foram obtidos a partir do ajuste das informações do modelo, apresentado na Tabela 6, com a geometria e malha gerada, mostrada na Figura 12. Como esperado, o escoamento também apresentou as características próprias de fontes como no modelo validado, entretanto a razão entre a altura máxima (Z_i) e a altura média (Z_m) foi inferior aquelas apontadas anteriormente, ficando na faixa de $1,02 < Z_i/Z_m < 1,12$. A explicação está na geometria do escoamento: observando a Figura 25, vê-se pouca ou nenhuma interferência da região de jato na região de fonte, diferentemente dos padrões mostrados na Figuras 19. A mesma observação foi reportada por Bloomfield e Kerr (2002).

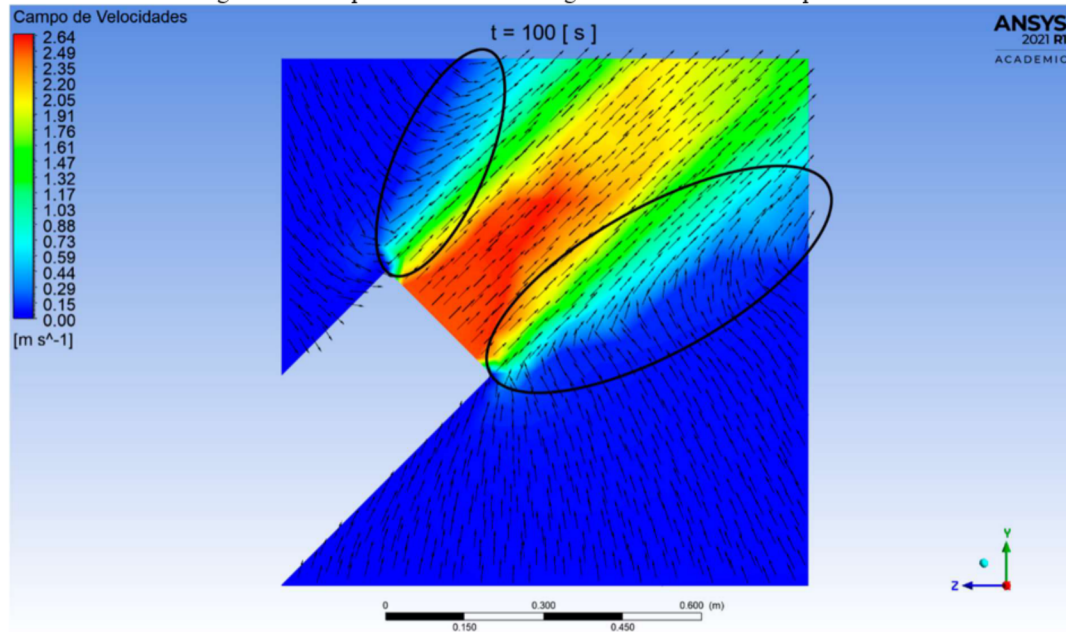
Figura 25 - Campo de velocidade mostrando as regiões de jato e fonte do escoamento.



FONTE: Autor, 2021.

Apesar do fato anterior, a análise da Figura 26, uma aproximação da Figura 25 na região de entrada do fluido hipersalino, também confirma a presença da entrada do fluido circundante na região de jato. Por se tratar do fluido ambiente cujos vetores velocidades são inicialmente nulos, não exercem muita influência na região de jato como observado na Figura 19.

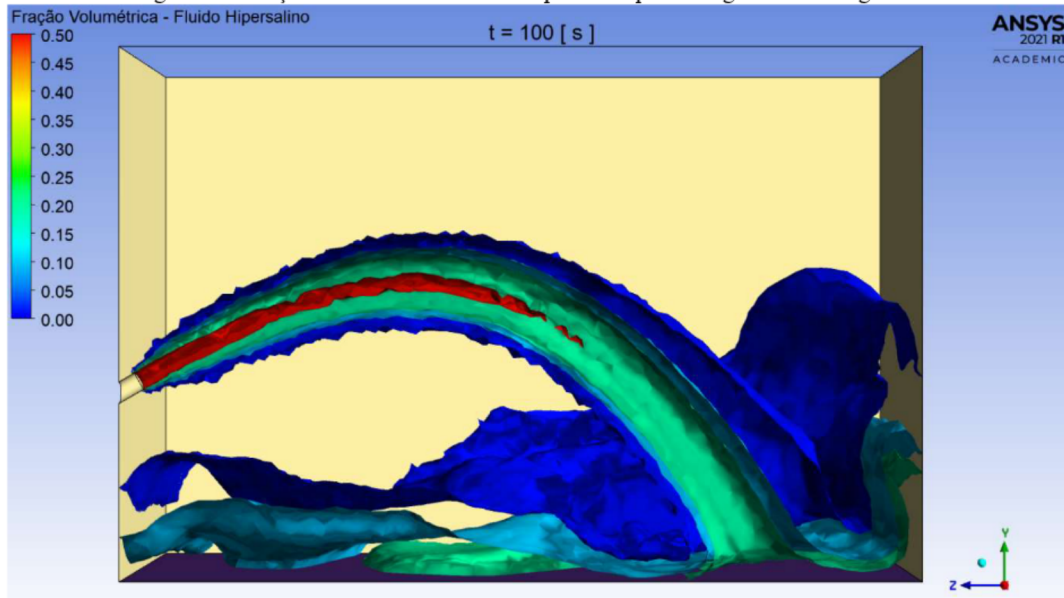
Figura 26 - Campo de velocidade na região de saída do fluido hipersalino



FONTE: Autor, 2021.

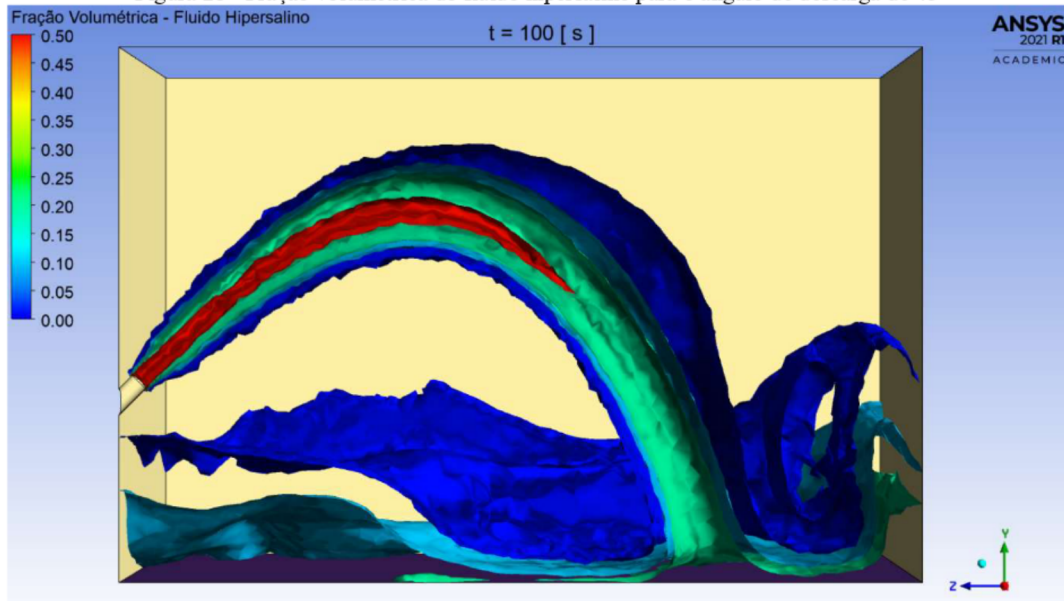
Como mencionado anteriormente, esta pesquisa também avaliou outros ângulos de descarga, a saber: 30° , 60° e 90° . O ângulo de 60° alcançou a maior altura estável, seguido dos ângulos de 45° , 90° e 30° , como evidenciam as Figuras 27 a 30, bem como o Gráfico 4. Igualmente como no modelo validado, pode-se observar a evolução da fonte com o tempo nos Apêndices F a I. 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 et al., 2012a,b), há trabalhos que recomendam a adoção de ângulos menores (BLENINGER e JIRKA, 2008).

Figura 27 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para o ângulo de descarga de 30°



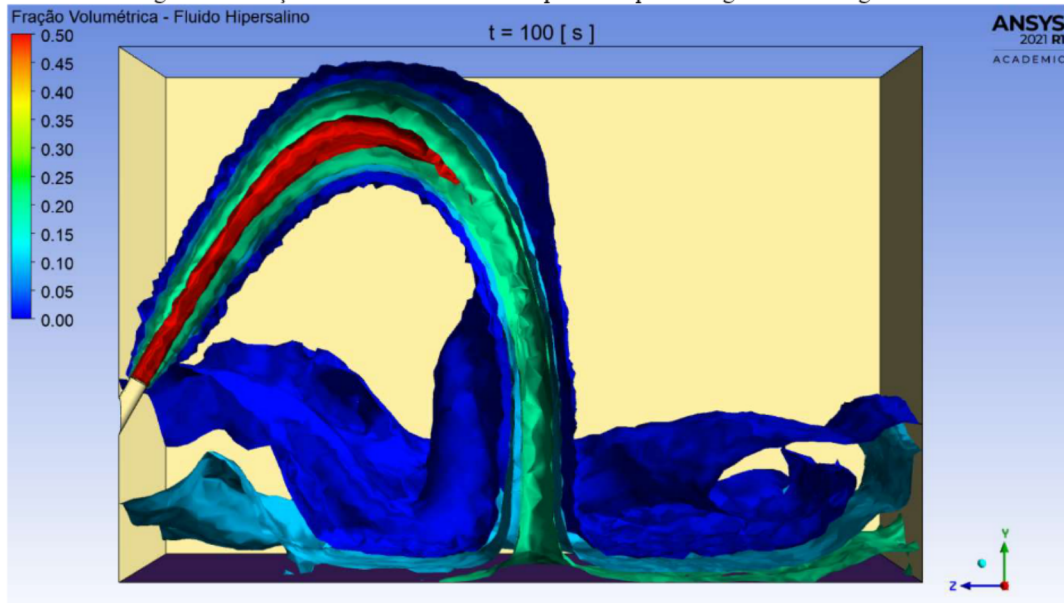
FONTE: Autor, 2021.

Figura 28 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para o ângulo de descarga de 45°



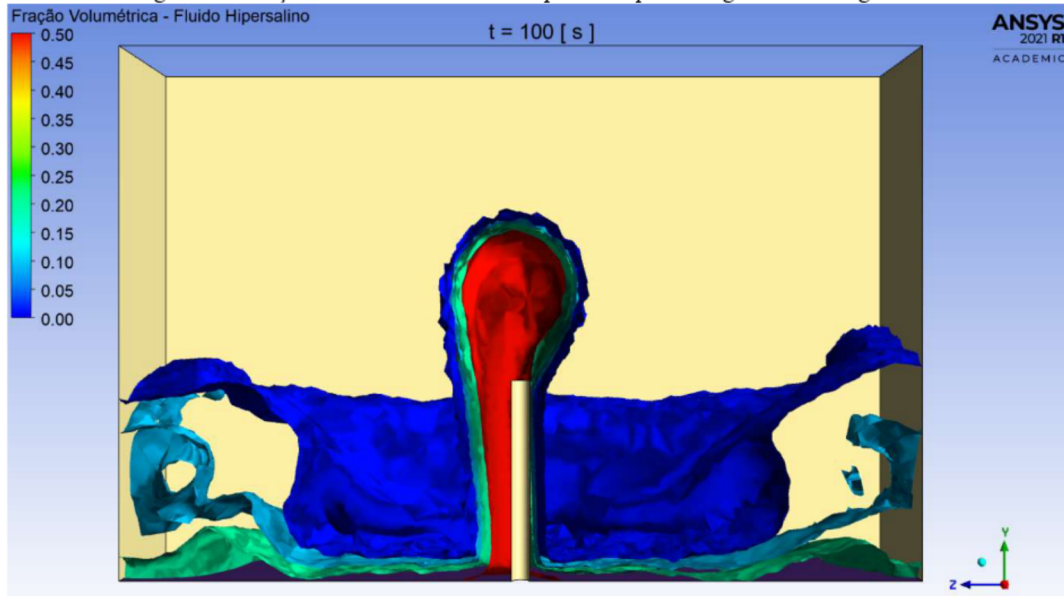
FONTE: Autor, 2021.

Figura 29 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para o ângulo de descarga de 60°



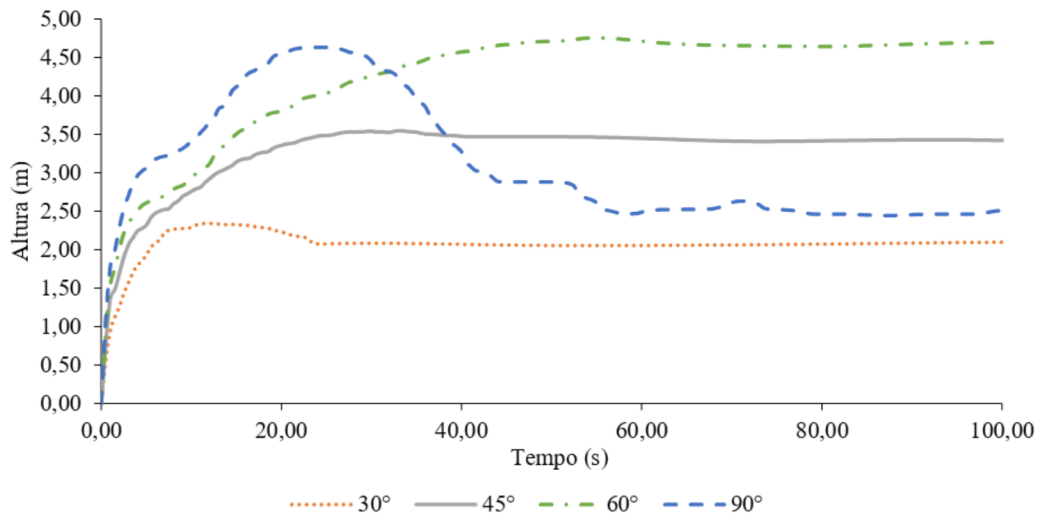
FONTE: Autor, 2021.

Figura 30 - Fração volumétrica do fluido hipersalino para o ângulo de descarga de 90°



FONTE: Autor, 2021.

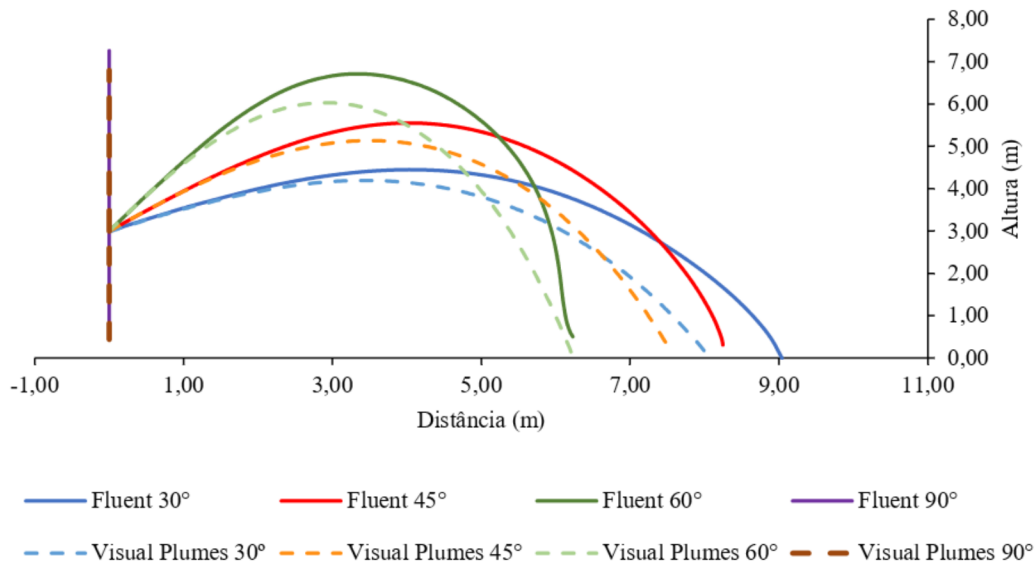
Gráfico 4 - Altura vs Tempo para o modelo CAGECE (ângulo de descarga de 30°, 45°, 60° e 90°).



FONTE: Autor, 2021.

Expondo conjuntamente os resultados das simulações das linhas de corrente centrais do escoamento obtidas com o FLUENT e o VISUAL PLUMES, pode-se observar no Gráfico 5 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 et al. (2012a,b), 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 (FLUENT) pode fornecer simulações da trajetória do escoamento semelhantes às dos modelos integrais. Contudo, a modelagem CFD pode fornecer ainda 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.

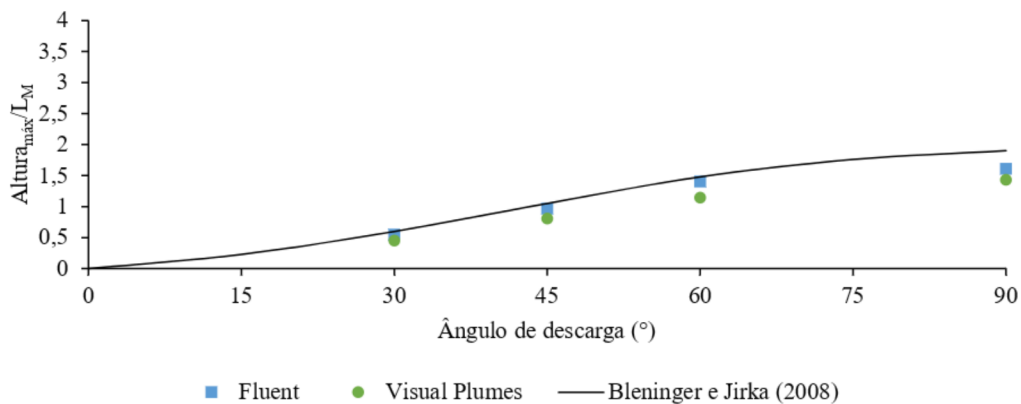
Gráfico 5 - Sobreposição das trajetórias dos jatos calculadas pelo FLUENT e o VISUAL PLUMES



FONTE: Autor, 2021.

Extraindo a altura máxima na trajetória dos jatos de cada ângulo para ambos os softwares, foi efetuado no Gráfico 6 um comparativo com o trabalho de Bleninger e Jirka (2008). Essa altura foi normalizada por uma escala de comprimento referente à quantidade de movimento (L_M). O VISUAL PLUMES apresentou valores em média 15% abaixo do FLUENT, enquanto os resultados de Bleninger e Jirka manteve-se na ordem de 10% acima.

Gráfico 6 - Comparativo da altura máxima calculadas pelo FLUENT, pelo VISUAL PLUMES com o trabalho de Bleninger e Jirka (2008).

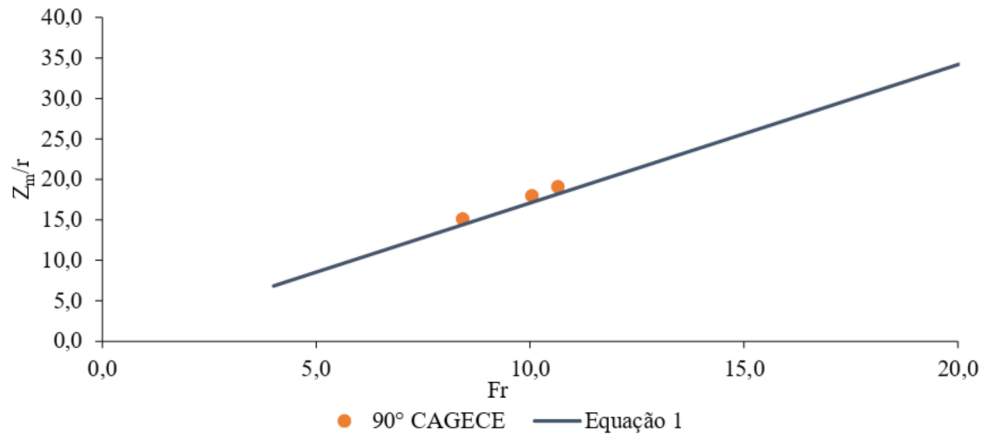


FONTE: Autor, 2021.

No Gráfico 7 são apresentadas as alturas médias para o ângulo de 90° variando a densidade e viscosidade do fluido hipersalino juntamente com a reta da Equação 17 do modelo

validado. O desvio dos resultados em relação à equação foi da ordem de 5%, indicando uma leve sensibilidade do modelo à mudança de geometria e malha.

Gráfico 7 - Comparativo da Equação 17 com os resultados gerados para a geometria da CAGECE, dado o ângulo de descarga de 90°, variando a densidade do fluido hipersalino.



FONTE: Autor, 2021.

Por fim, é importante a distinta situação entre o Modelo Validado e o Modelo CAGECE, uma vez que no primeiro foram utilizadas condições de contorno e geometria para escala de laboratório, principalmente no que concerne à razão entre as densidades dos fluidos utilizados, e no segundo simulou-se com velocidades e escala real da geometria com razão de densidades dos fluidos obtidas em campo através da CAGECE. Apesar dessa diferença, os modelos utilizados foram capazes de reproduzir resultados consistentes. Desse modo, dada a constância no comportamento dos resultados do FLUENT comparado ao VISUAL PLUMES, a semelhança com os dados de Bleninger e Jirka (2008) e a conformidade com a equação previamente determinada sugerem a validade do modelo para a predição da trajetória de jatos hipersalinos.

6 CONCLUSÃO

As simulações computacionais realizadas nessa pesquisa foram conduzidas para avaliar o comportamento de jatos e fontes salinas. Despejos hipersalinos realizados por plantas de dessalinização através de difusores são exemplos práticos da ocorrência desses tipos de fenômenos hidrodinâmicos. Um programa de modelagem CFD foi empregado através do software FLUENT, avaliando inicialmente através de geometria pré-definida e condições de contorno variáveis, os melhores modelos, condições e os métodos capazes de produzir resultados consistentes, comparando com dados numéricos e experimentais disponível na literatura. Os resultados iniciais obtidos apresentaram boa concordância com trabalhos publicados, gerando a equação capaz de prever 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 FLUENT, sugerindo que o modelo CFD têm validade para a simulação de jatos e fontes hipersalinas.

Em síntese, além de fornecer informações relevantes com relação ao escoamento médio e transiente gerado por jatos e fontes, o presente estudo sugere que o modelo CFD 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.

REFERÊNCIAS

- ABRAHAM, G. **Jets With Negative Buoyancy In Homogeneous Fluid.** *Journal of Hydraulic Research*, 1967, vol. 5, n°4, p. 235 a 248.
- AHMAD, N.; BADDOUR, R. E. **A review of sources, effects, disposal methods, and regulations of brine into marine environments.** *Ocean and Coastal Management*, 2014, vol. 87, p. 1 a 7.
- AHMAD, N.; BADDOUR, R. E. **Density Effects on Dilution and Height of Vertical Fountains.** *Journal Hydraulic Engineering*, 2015, vol. 141, n°11.
- AHMAD, N.; BADDOUR, R. E. **Dilution and penetration of vertical negatively buoyant thermal jets.** *Journal Hydraulic Engineering*, 2012, p. 850 a 857.
- AKAR, P. J.; JIRKA, G. H. **CORMIX2: An expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged multiport diffuser discharges.** *U.S.Environmental Protection Agency (EPA), Office of Research and Development*, 1991.
- ALMEIDA, J. P. DE; 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*, 2020, vol. 25, n° 1, p. 107 a 114. <https://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020181646>
- ANSONG, J. K.; KYBA, P. J.; SUTHERLAND, B. R. **Fountains impinging on a density interface.** *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, vol. 595, p. 115 a 139.
- BADDOUR, R. E.; ZHANG, H. **Density Effects on Dilution and Height of Vertical Fountains.** *Journal Hydraulic Engineering*, 2009, vol. 135, n° 01, p. 57 a 59.
- BELATOUI, A.; BOUABESSALAM, H.; HACENE, O.R.; DE-LA-OSSA-CARRETERO, J.A.; MARTINEZ- GARCIA, E.; SANCHEZ-LIZASO, J.L. **Environmental effects of brine discharge from two desalinations plants in Algeria (South Western Mediterranean).** *Desalination Water Treatment*, 2017, vol. 76, p. 311 a 318. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.20812>.
- BIRD, B; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena.** *Jonh Wiley and Sons, Inc., Nova York*, 1960. 780p.
- BLENINGER, T.; JIRKA, G. H. **Modelling and environmentally sound management of brine discharges from desalination plants.** *Desalination*, 2008, vol. 221, p.585 a 597.
- BLOOMFIELD, L. J.; KERR, R. C. **A theoretical model of a turbulent fountain.** *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, vol. 424, p. 197 a 216. <https://doi.org/10.1017/S0022112000001907>
- BLOOMFIELD, L. J.; KERR, R. C. **Inclined turbulent fountains.** *Journal of Fluid Mechanics*, 2002, vol. 451, p. 283 a 294. <https://doi.org/10.1017/S0022112001006528>
- BLOOMFIELD, L. J.; KERR, R. C. **Turbulent fountains in a stratified fluid.** *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, vol. 358, p. 335 a 356. <https://doi.org/10.1017/S0022112097008252>

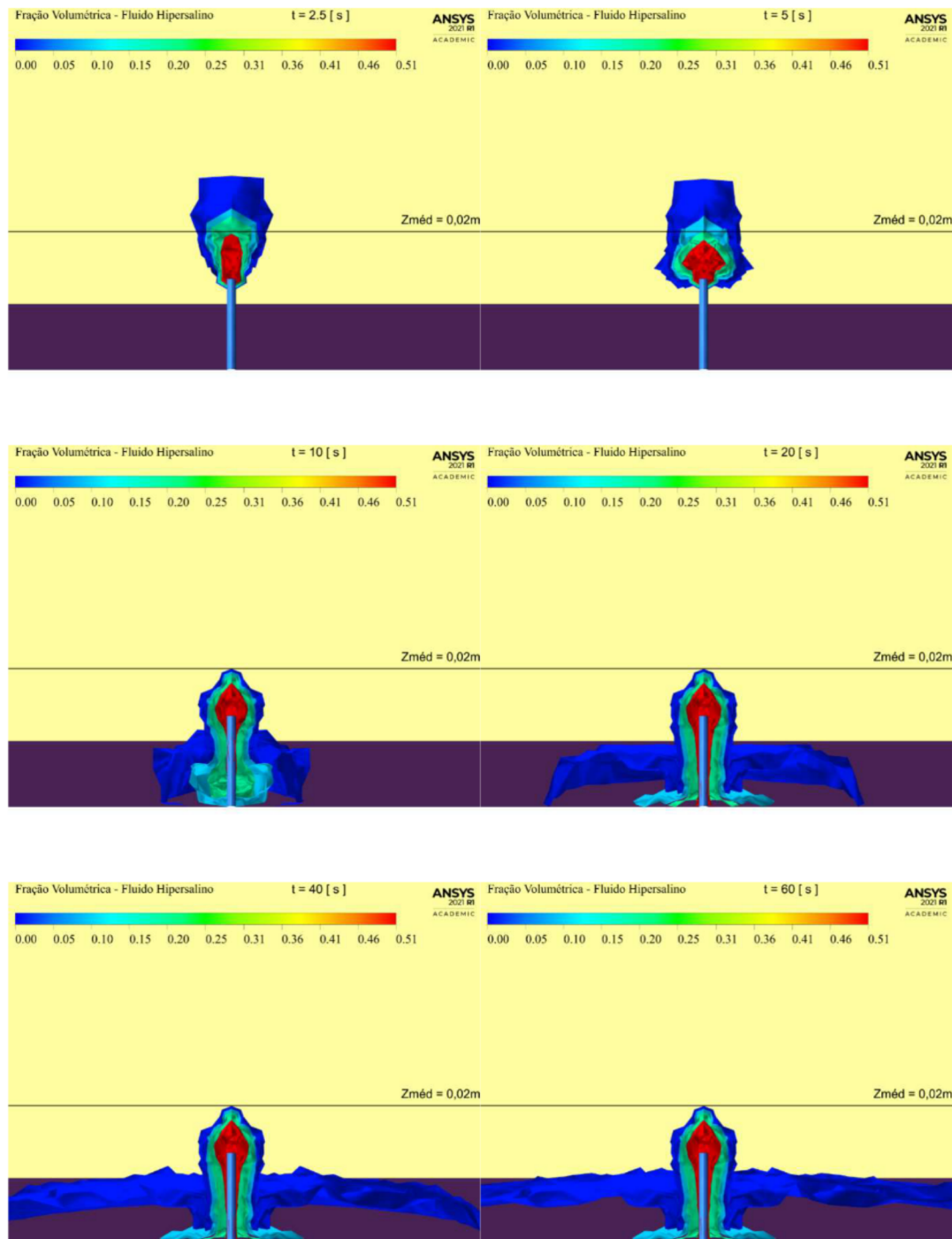
- BURRIDGE, H. C.; HUNT, G. R. **The rise heights of low- and high-Froude-number turbulent axisymmetric fountains.** *Journal of Fluid Mechanics*, 2012, vol. 691, p.392 a 416.
- CEDERWALL, K. **Hydraulics of marine wastewater disposal.** *Hydraulic Division, Chalmers Institute of Technology*, Gutenberg, Sweden, 1968, report n° 42.
- CLANET, C. **On large-amplitude pulsating fountains.** *Journal of Fluid Mechanics*, 1998, vol. 366, p. 333 a 350. <https://doi.org/10.1017/S0022112098001451>
- **COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO ESTADO DO CEARÁ.** Planta de dessalinização de fortaleza, projeto referencial. 2020b. Acessado em 27 de junho de 2020. Disponível em: https://www.cagece.com.br/wp-content/uploads/PDF/Editais/Contratacoes/PPP1/SegundaConsulta/MinutadeEdital/Anexos/CONSULTA-P%C3%9ABLICA-2-2019-ANEXO-2B-PROJETO-REFERENCIAL_watermark.pdf
- DALAZEN, J. P.; CUNHA, C. de L. da N.; ALMEIDA, R. C. de. **Determinação das taxas de renovação das águas no complexo estuarino de Paranaguá.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2020, vol. 25, n° 6, p. 887 a 899. <https://doi.org/10.1590/s1413-4152202020180019>.
- DAMBRÓS, C; SILVA, J. L. S. da; FILHO, L. L. V. D. **Aproximando ideias e construindo reflexões na busca da sustentabilidade das águas subterrâneas.** *In: XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS.* Santa Maria, 2010.
- DONEKER, L.; JIRKA, G. H. **CORMIX-GI systems for mixing zone analysis of brine wastewater disposal.** *Desalination*, 2001, vol. 139, p. 263 a 274. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00318-6](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00318-6)
- DONEKER, L.; JIRKA, G. H. **Expert system for hydrodynamic mixing zone analysis of conventional and toxic submerged single port discharges (CORMIX1).** *Technical Report EPA 600-3-90-012, U.S. Environmental Protection Agency (EPA)*, 1990.
- EINAV, R.; HARUSSI, K.; PERRY, D. **The foot prints of the desalination processes on the environment.** *Desalination*, 2002, vol. 152, p.141 a 154.
- ELHAGGAG, M. E., GAMAL, M. H. E FAROUK, M. I. **Experimental and Numerical Investigation of Desalination Plant Outfalls in Limited Disposal Areas.** *Journal of Environmental Protection*, 2011, vol. 2, n° 6, p. 828 a 839.
- ELSAID, K.; KAMIL, M.; SAYED, E. T.; ABDELKAREEM, M. A.; WILBERFORCE, T.; OLABI, A. **Environmental impact of desalination technologies: A review.** *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 720. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.141528
- FERNÁNDEZ-TORQUEMADA, Y.; CARRATALÁ, A.; SÁNCHEZ-LIZASO, J.L. **Impact of brine on the marine environment and how it can be reduced.** *Desalination Water Treatment*, 2019, vol. 16, p. 27 a 37. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24615>.

- FRANKFURT, Ricardo. **Simulação de transporte de massa de um soluto em meio poroso com auxílio do CFD (*Computer Fluid Dynamics*)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- FRICK, W. E.; ROBERTS, P. J. W.; DAVIS, L. R.; KEYES, J.; BAUMGARTNER, D. J.; GEORGE, K. P. **Dilution models for effluent discharges**. *U.S. Environmental Protection Agency*, 2003, 4ª ed.
- FRICK, W. E. **Visual Plumes mixing zone modelling software**. *Environmental & Modelling Software*. Elsevier, 2004, vol. 19, p. 645 a 654. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2003.08.018>
- **FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME)**. Portal Hidrológico do Ceará. Disponível em: <<http://www.hidro.ce.gov.br/>>. Acesso em: agosto de 2019.
- GACIA, E.; INVERS, O.; MANZANERA, M.; BALLESTEROS, E.; ROMERO, J. **Impact of the brine from a desalination plant on shallow seagrass (*Posidonia Oceanica*) meadow**. *Coastal Shelf Sci*, 2007, vol. 72, p.579 a 590.
- 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*, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10652-014-9372-1>
- HUNT, G. R.; BURRIDGE, H. C. **Fountains in Industry and Nature**. *Annual Reviews of Fluid Mechanics*, 2015, vol. 47, p. 195 a 220.
- **INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO ESTADO DO CEARÁ (IPECE)**. Mapa Geológico Simplificado do Ceará. Ceará em Mapas. Disponível em: < <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/142x.htm>>. Acesso em: agosto de 2019.
- JAMES, W. P.; VERGARA, I.; KIM, K. **Dilution of a dense vertical jet**. *Journal of Environmental Engineering*, 1983, vol. 109, nº 3, p. 1273 a 1283.
- LIDE, D. R. **Handbook of Chemistry and Physics (86th ed.)**. Boca Raton: CRC Press, p. 8 a 116, 1990.
- LIMA NETO, I. E.; CARDOSO, S. S. S.; WOODS, A. W. **On mixing a density interface by a bubble plume**. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, vol. 802, R3, 13 p.
- LIN, W.; ARMFIELD, S. W. **Direct simulation of fountains with intermediate Froude and Reynolds numbers**. *Anziam Journal*, 2004, vol. 45, p. 66 a 77.
- LIN, W.; ARMFIELD, S. W. **Direct simulation of weak axisymmetric fountains in a homogeneous fluid**. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000, vol. 403, p. 67 a 88.
- MABROOK, M. **Environmental impact of waste brine disposal of desalination plants, Red Sea, Egypt**. *Desalination*, 1994, vol. 97, p. 453 a 465.

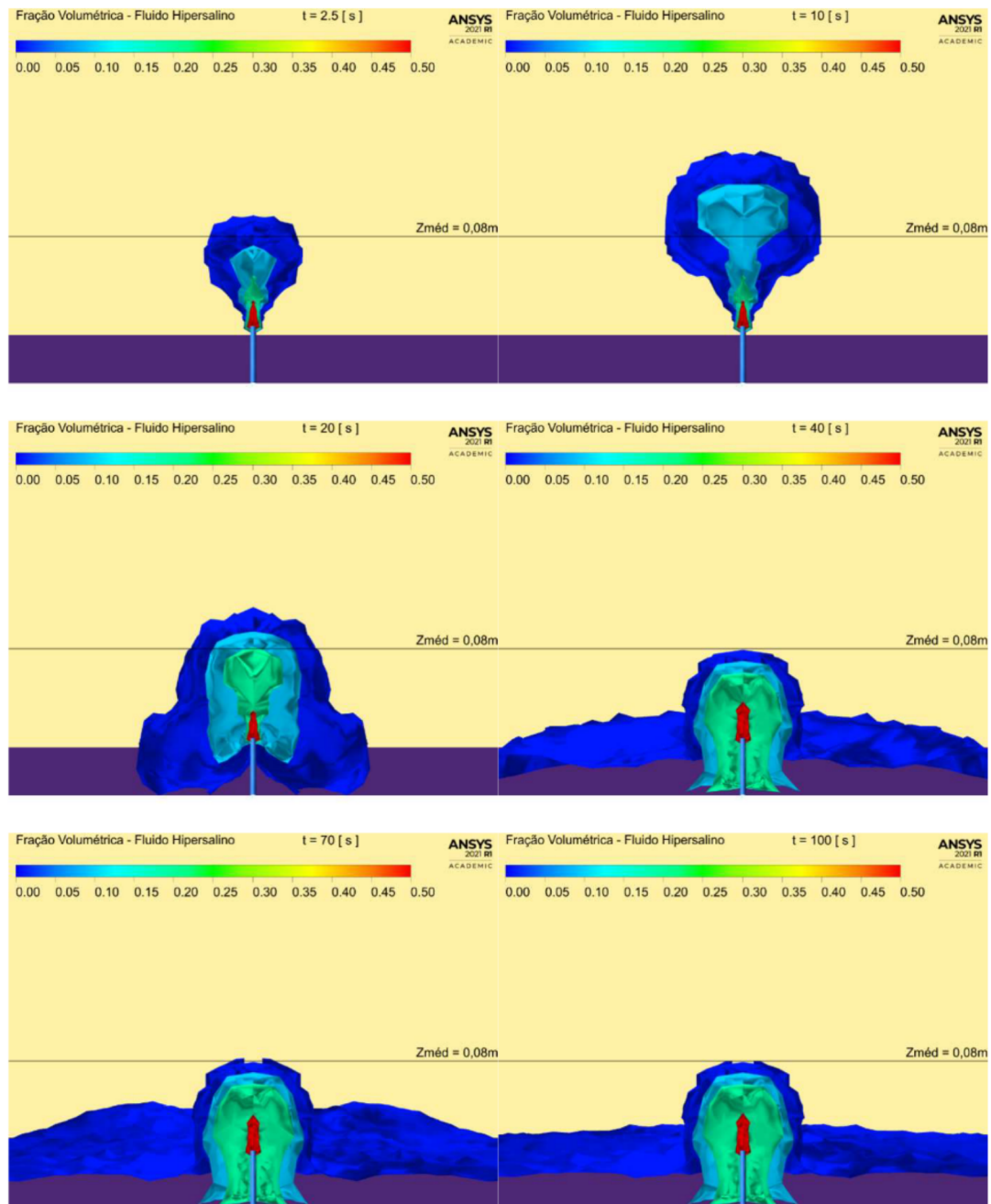
- MATSUMOTO, J.K.; MARTIN, K.L.M. **Lethal and sub lethal effects of altered sand salinity on embryos of beach-spawning California Grunion.** *Copeia*, 2008, n° 2, p.484 a 491.
- MCLELLAN, T. N.; RANDALL, R. E. **Measurement of brine jet height and dilution.** *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 1986, vol. 112, n° 2, p. 200 a 216. [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*, 2012, vol. 691, p. 487 a 497. <https://doi.org/10.1017/jfm.2011.487>
- MEHADDI, R.; VAUQUELIN, O.; CANDELIER, F. **Naturally bounded plumes.** *Journal of Fluid Mechanics*, 2013, vol. 717, p. 472 a 483. <https://doi.org/10.1017/jfm.2012.587>
- MILLERO, F. J.; POISSON, A. **International one-atmosphere equation of state of seawater.** *Deep Sea Research*, 1981, vol. 28A, n°6, p. 625 a 629.
- 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.** *International Symposium on Marine Outfall Systems*, Mar del Plata, Argentina, 2011.
- OLIVER, C. J.; DAVIDSON, M. J.; NOKES, R. I. **k-ε Predictions of the initial mixing of desalination discharges.** *Environmental Fluid Mechanics*, 2008, vol. 8, p. 617 a 625. <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*, 2012a, vol. 290, p. 28 a 42. <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*, 2012b, vol. 290, p. 14 a 27. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.037>
- PILLARD, D.A.; DUFRESNE, D.L.; TIETGE, J.E.; EVANS, J. **Response of mysid shrimp (mysidopsis bahia), sheepshead minnow (cyprinodon variegatus), and inland silverside minnow (menidia beryllina) to changes in artificial seawater salinity.** *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, vol. 18, n° 3, p. 430 a 435.
- PLUM, B. R. **Modelling desalination plant outfalls.** Tese, School of Aeronautical, Civil and Mechanical Engineering, University of New South Wales at the Australia, Defence Force Academy, 2008.
- REZENDE, A. L. T. **Análise numérica da bolha de separação do escoamento turbulento sobre placa plana fina inclinada.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009
- 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.* Saudi Arabia: Springer, 2015. Cap. 18. p. 369 a 396.

- ROBERTS, P. J. W.; FERRIER, A.; DAVIERO, G. **Mixing in Inclined Dense Jets**. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997, vol. 123, n° 8, p. 693 a 699. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1997\)123:8\(693\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1997)123:8(693))
- 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, Division of the American Society of Civil Engineers*, 2008, vol. 134, n° 9, p. 1210 a 1224. [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**. *School of Engineering, Massachusetts Institute of Technology (MIT)*, Cambridge, Massachusetts, 1979, report n° 243, 115 p.
- TURNER, J. S. **Jets and Plumes with negative or reversing buoyancy**. *Journal of Fluid Mechanics*, 1966, vol. 26, p. 779 a 792. <https://doi.org/10.1017/S0022112066001526>
- WILLIAMSON, N.; ARMFIELD, S. W.; LIN, W. **Forced turbulent fountain flow behaviour**. *Journal of Fluid Mechanics*, 2011, vol. 671, p. 535 a 558.
- WILLIAMSON, N.; ARMFIELD, S. W.; LIN, W. **Transition behavior of weak turbulent fountains**. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010, vol. 655, p. 306 a 326.
- ZEITON, M. A.; MCILHENNY, W. F. **Conceptual designs of outfall systems for desalination plants**. Offshore Technology Conference, 1971, n° 1370.
- ZHANG, H.; BADDOUR, R. E. **Maximum penetration of vertical round dense jets at small and large froude numbers**. *Journal Hydraulic Engineering*, 1998, vol. 124, n° 05, p. 550 a 553.

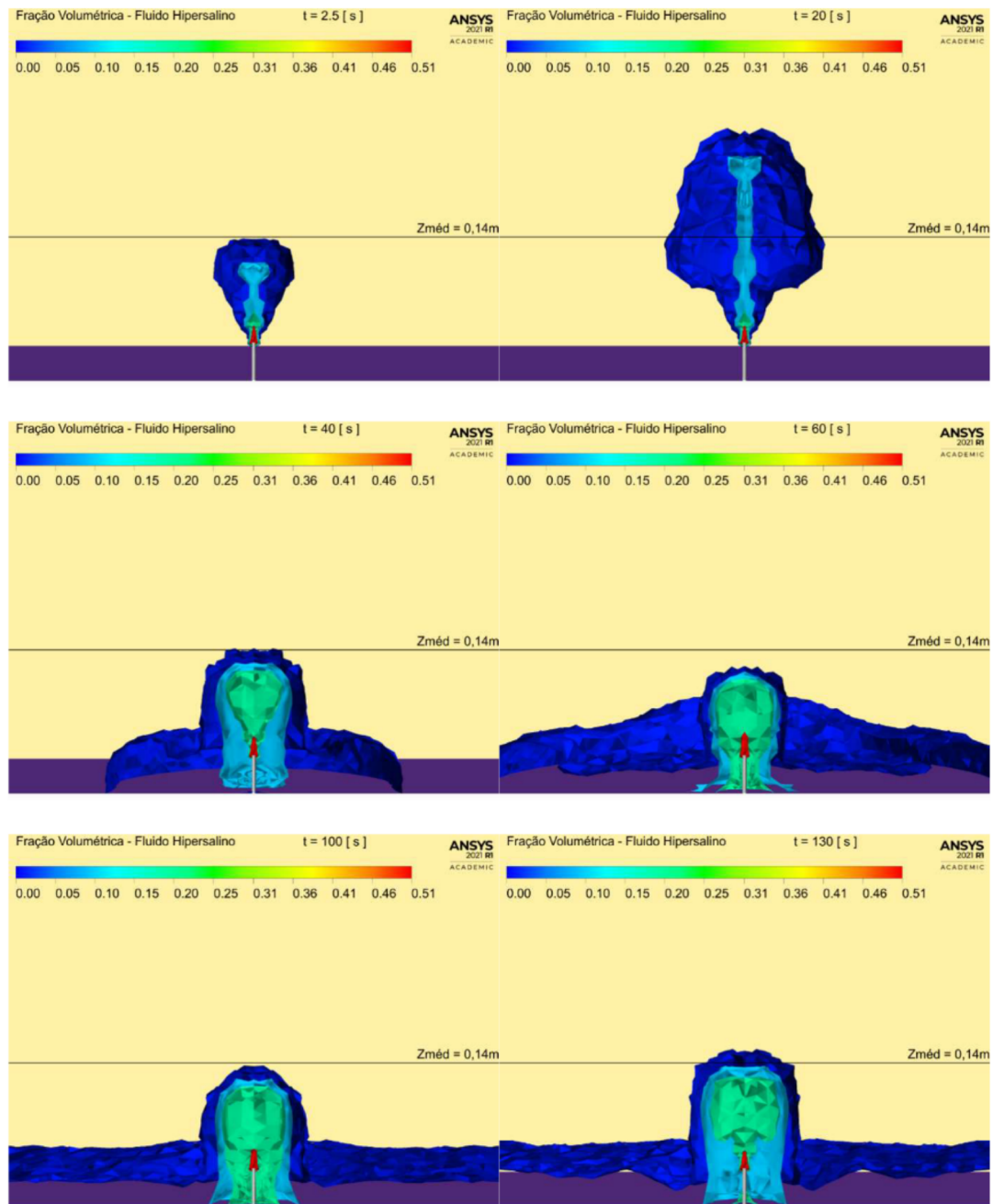
APÊNDICE A - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
VELOCIDADE $V_1 = 0,07 \text{M.S}^{-1}$.



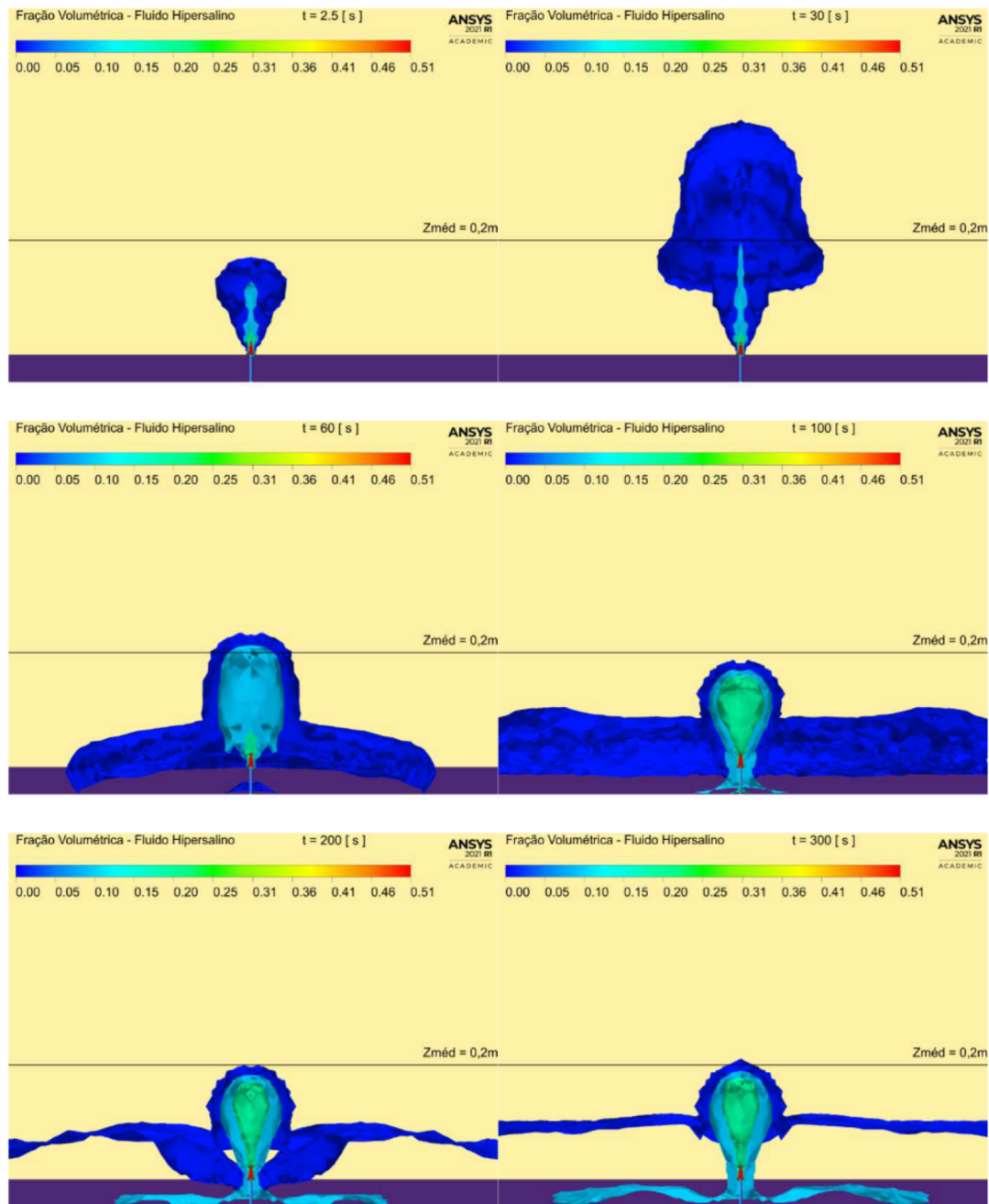
APÊNDICE B - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
VELOCIDADE $V1 = 0,34M.S^{-1}$.



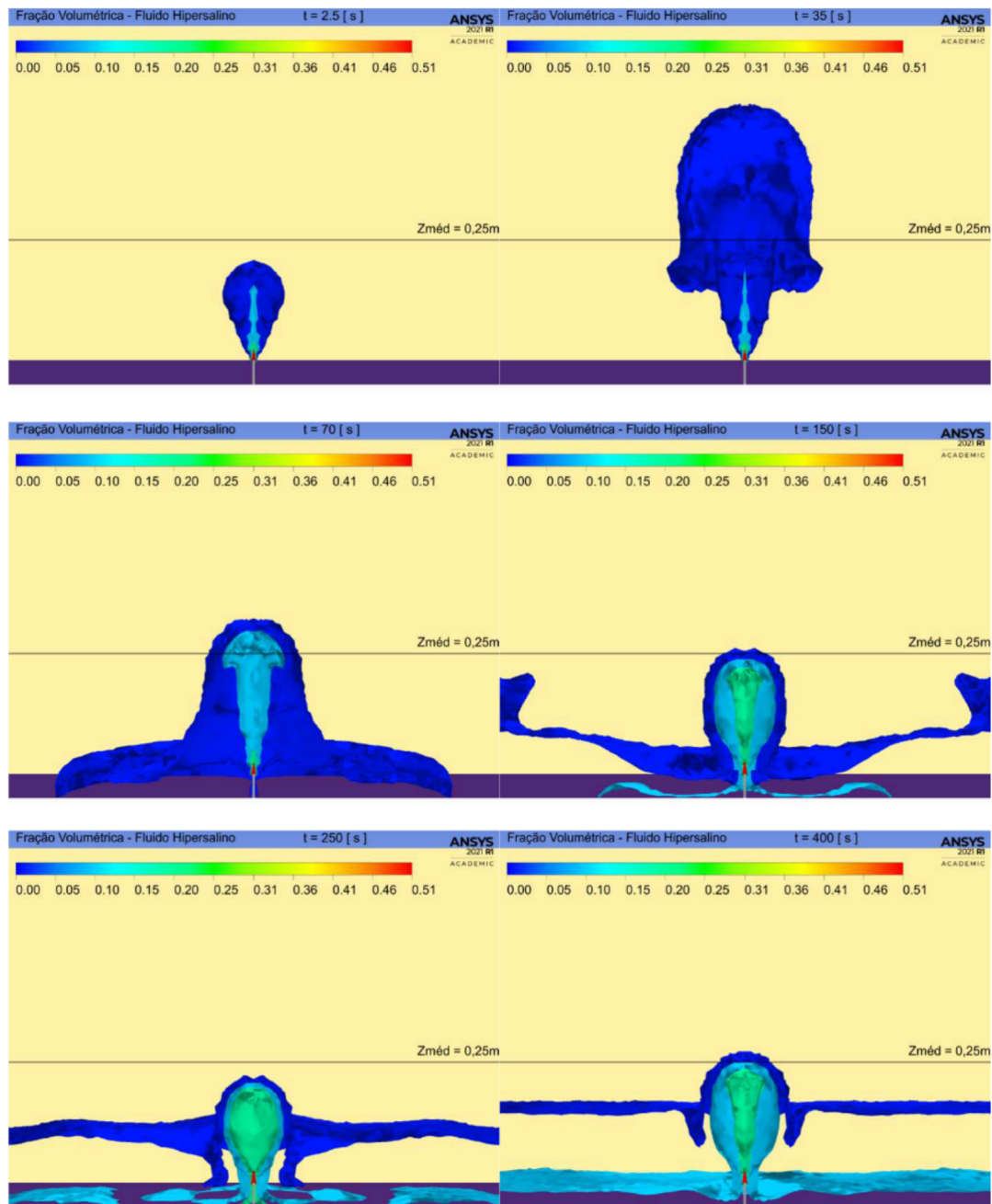
APÊNDICE C - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
VELOCIDADE $V1 = 0,6M.S^{-1}$.



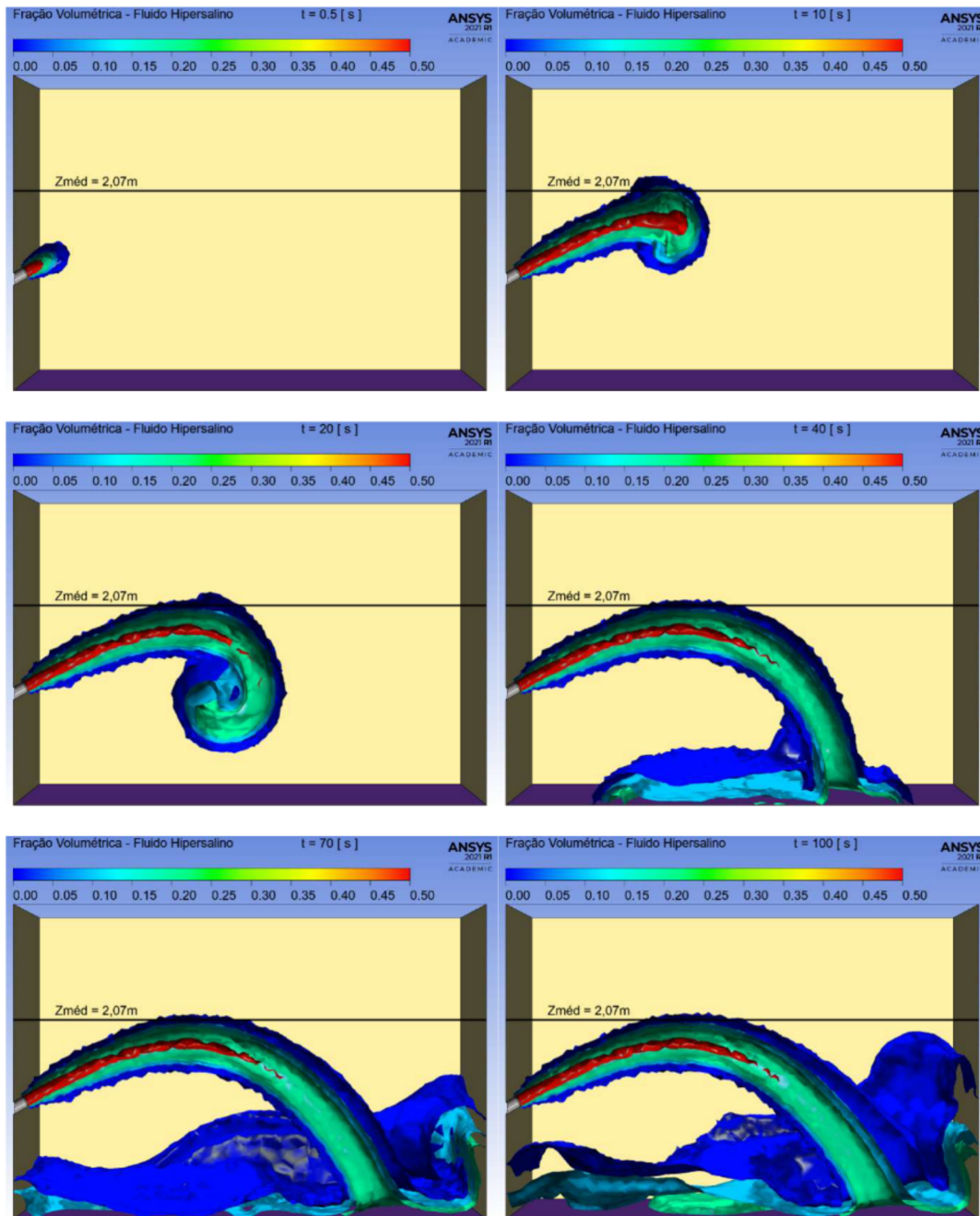
APÊNDICE D - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
VELOCIDADE $V1 = 0,86M.S^{-1}$.



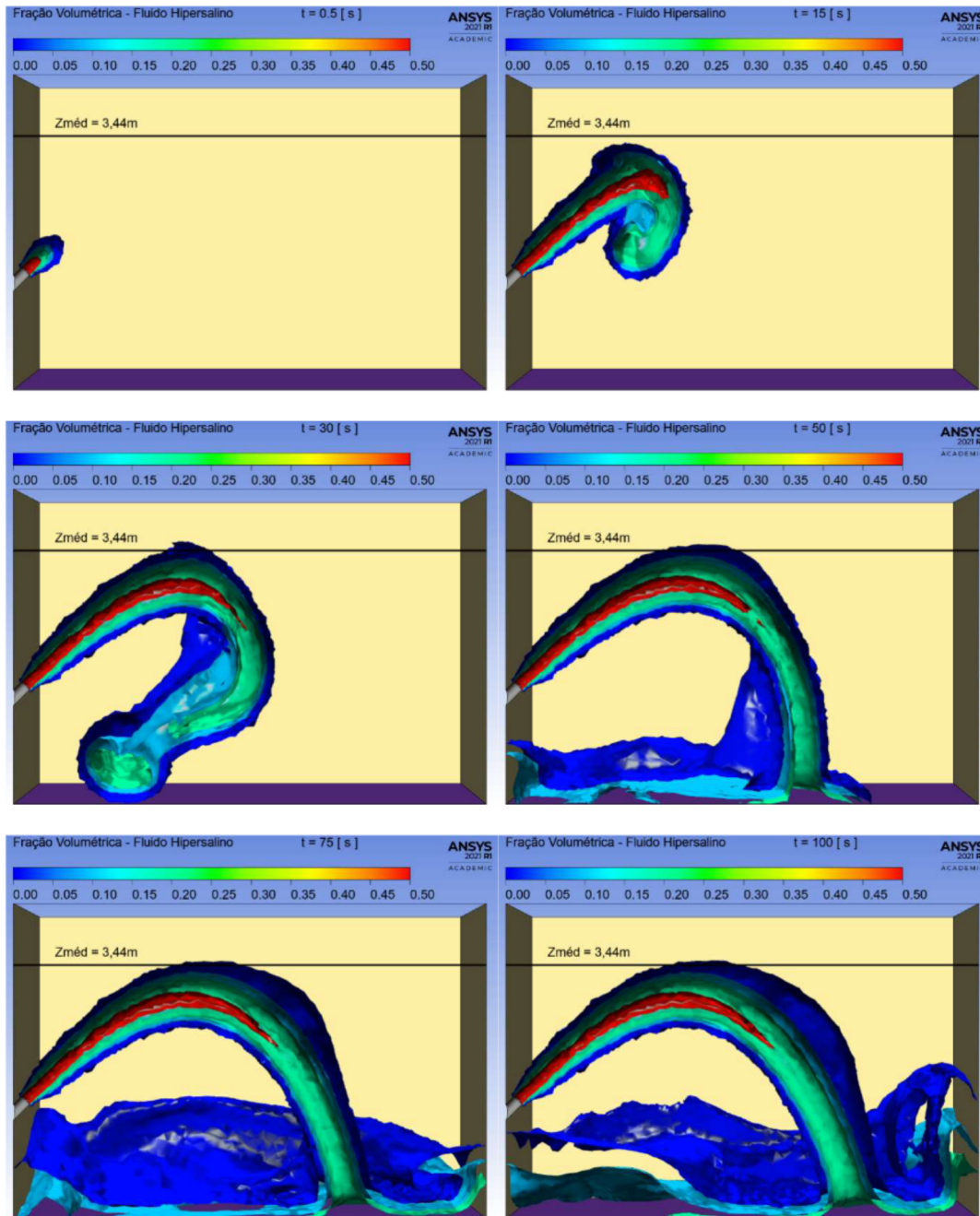
APÊNDICE E - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
VELOCIDADE $V1 = 1,12M.S^{-1}$.



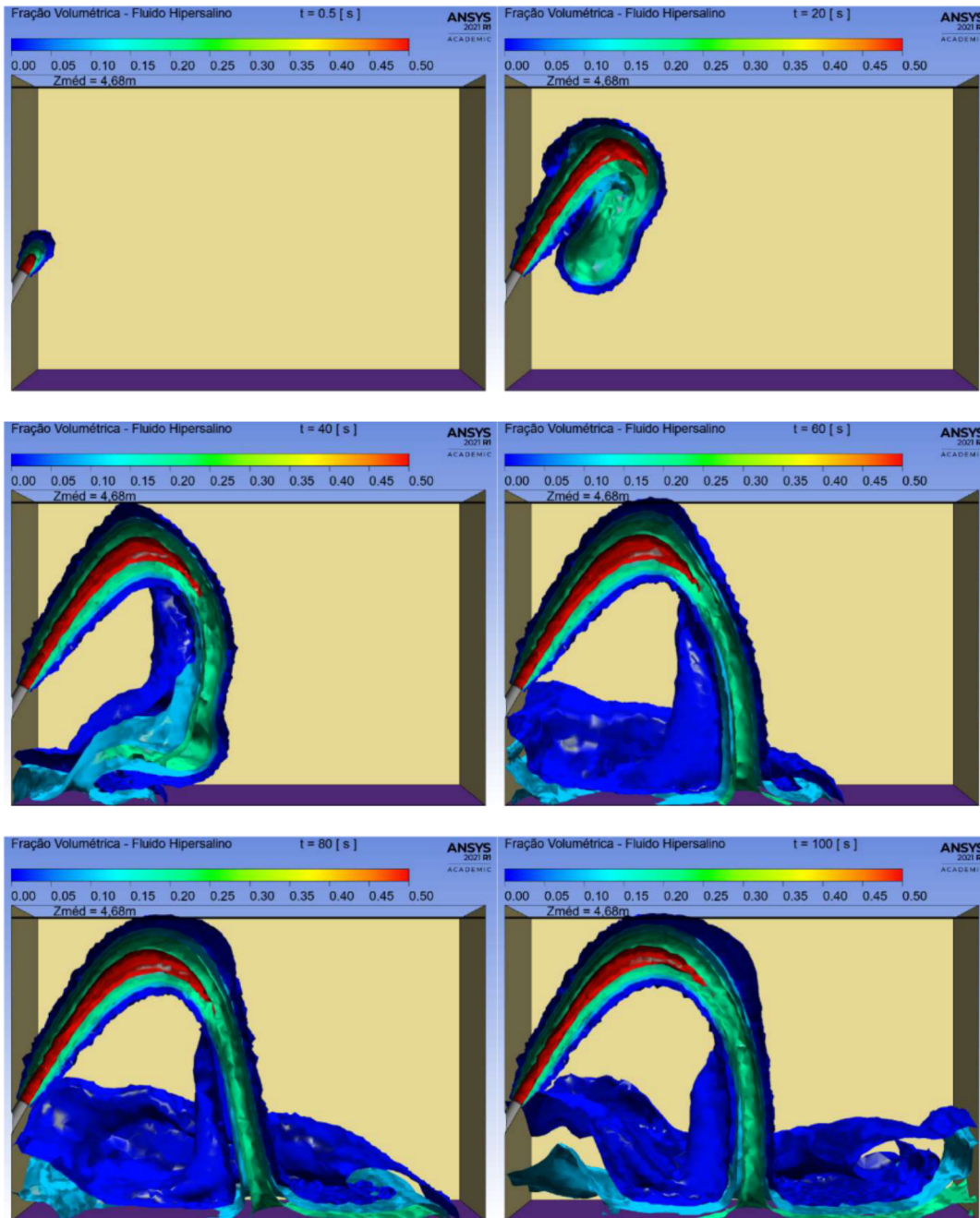
APÊNDICE F - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
SITUAÇÃO CAGECE COM ÂNGULO DE DESCARGA A 30°.



APÊNDICE G - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
SITUAÇÃO CAGECE COM ÂNGULO DE DESCARGA A 45°.



APÊNDICE H - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
SITUAÇÃO CAGECE COM ÂNGULO DE DESCARGA A 60°.



APÊNDICE I - ISO-SUPERFÍCIES DE FRAÇÃO VOLUMÉTRICA PARA A
SITUAÇÃO CAGECE COM ÂNGULO DE DESCARGA A 90°.

