



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

CURSO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DE EJETORES INSTALADOS EM POÇOS DE
PETRÓLEO**

KAIO CÉSAR MEDEIROS ÁLVARES

NATAL/RN

DEZEMBRO/2015

KAIO CÉSAR MEDEIROS ÁLVARES

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DE EJETORES INSTALADOS EM POÇOS DE
PETRÓLEO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado na
Universidade Federal do Rio Grande do Norte
como requisito parcial para a obtenção do título de
engenheiro de petróleo.

Orientador: Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

Coorientador: Eng. Leonardo Asfora de Oliveira

NATAL/RN

DEZEMBRO/2015

KAIO CÉSAR MEDEIROS ÁLVARES

**ANÁLISE DA PERFORMANCE DE EJETORES INSTALADOS EM POÇOS DE
PETRÓLEO.**

Este trabalho de conclusão de curso foi avaliado e considerado adequado como requisito parcial na obtenção do título de engenheiro de petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

NATAL, Dezembro de 2015.

Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte

Orientador – UFRN

Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues

Membro Examinador – UFRN

Eng. Leonardo Asfora de Oliveira

Membro Examinador - UFRN

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por minha vida.

A toda a minha família, por respeitar e apoiar todas as minhas decisões.

Ao meu orientador Prof. Dr. Lindemberg de Jesus Nogueira Duarte, por suas sugestões, conselhos, materiais cedidos, e disponibilidade para sanar dúvidas. Agradeço também pela oportunidade e confiança cedida a minha pessoa para realização deste trabalho.

A Prof.^a Dra. Carla Wilza Souza de Paula Maitelli, pelas sugestões, materiais cedidos à melhoria dos resultados finais. Agradeço também por permitir a minha presença no Laboratório de Automação em Petróleo (LAUT/UFRN) a qualquer momento para sanar dúvidas cruciais que surgiram no início do projeto.

Ao Eng. Leonardo Asfora de Oliveira, por suas sugestões, materiais, informações e por ceder sua ferramenta computacional para a realização das atividades.

Ao Eng. Gabriel Bessa de Freitas Fuezi Oliva, por todos os materiais cedidos e ensinamentos fundamentais sobre o CFX.

A Kael Chagas, por suas sugestões, pelo apoio, e materiais cedidos.

A minha mãe Izôlda Medeiros, pelo apoio, carinho e dedicação por mim.

A minha namorada Viviane Grangeiro, por sempre me ajudar nos momentos difíceis.

A Petrobras e a UFRN pelo apoio financeiro.

Enfim, a todas as pessoas que tiveram direta ou indiretamente algo a acrescentar neste trabalho, meu muito obrigado.

RESUMO

Os ejetores são dispositivos capazes de succionar um fluido utilizando a energia cinética de outro fluido. Com a crescente preocupação de produzir cada vez mais utilizando menos recursos financeiros, esses dispositivos surgem como possíveis soluções para poços de petróleo que apresentam grande quantidade de gás acumulado no anular, seja devido à alta razão gás-líquido (RGL) ou como consequência de um projeto de injeção de vapor. Devido essa pressão extra exercida pelo gás no anular, ocorre um aumento na pressão de fluxo do reservatório, implicando em poços com produção aquém de seu potencial. O que se faz na prática para mitigar esses problemas é conectar o revestimento à linha, juntamente com a instalação de uma válvula de retenção que permite apenas a passagem do gás do revestimento para a linha. Porém, em alguns casos a pressão da linha é igual ou superior a pressão do anular, fazendo com que a válvula não abra, impedindo a passagem do gás. Outro fator é que esse gás não pode ser simplesmente liberado para a atmosfera (por questões ambientais). Para solucionar esses problemas, pode-se acoplar um ejetor à cabeça do poço com o objetivo de reduzir a pressão de revestimento e, conseqüentemente, aspirar o gás aprisionado no anular. Através de uma ferramenta computacional que está sendo desenvolvida, *Well Head Ejector* (WHE), para dimensionamento de ejetores petróleo-gás, buscou-se analisar a performance deste tipo de equipamento utilizando a geometria sugerida pelo WHE no simulador CFX, e através da mudança de alguns outros parâmetros do ejetor. Observou-se que as mudanças de tais parâmetros do ejetor influenciaram de forma significativa na eficiência do mesmo.

Palavras-chave: Ejetor, CFX, aumento da vazão de produção.

ABSTRACT

The ejectors are devices capable of sucking a fluid utilizing the kinetic energy of another fluid. With the growing concern to produce more and more utilizing less financial resources, these devices come as possible solutions for oil wells that present large amounts of accumulated gas in the annulus, either because of the high gas/liquid ratio (GLR) or as consequences of an steam injection project. Due to the extra pressure exerted by the annulus gas, there is an increase in the reservoir flow pressure, implying in wells with production bellow its potential. What is done in practice to mitigate these problems is to connect the casing to the flowline, together with the installation of a check valve that only allows the flowing of gas from the annulus to the flowline. However, in some cases the pressure in the flowline is equal or higher than the annulus pressure, causing the valve to not be opened, blocking the gas flow. Another factor is that this gas cannot be simply released to the atmosphere (for environmental reasons). To solve these problems, it is possible to attach an ejector to the wellhead aiming a casing pressure reduction and consequently aspirate the trapped gas in the annulus. Through a computational tool that is being developed, Well Head Ejector (WHE), to designing oil-gas ejectors, it was analyzed the performance of this kind of equipment utilizing the geometry suggested by WHE in the CFX simulator, and through changes in some other ejector parameters. It was observed that the changes on ejector's parameters influenced significantly its efficiency.

Keywords: Ejector, CFX, production flow rate increase.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ejetores com diversos tamanhos	15
Figura 2: Estruturas componentes de um ejedor	16
Figura 3: Componentes de um ejedor	17
Figura 4: Perfil de pressão longitudinal no ejedor	18
Figura 5: Configuração de um poço sem o ejedor e outro com o ejedor instalado	19
Figura 6: Tela inicial do dimensionador	21
Figura 7: Tela inicial do módulo de performance	22
Figura 8: Tela inicial do ANSYS Workbench.....	24
Figura 9: Explicação sobre desenhos no CFX.....	25
Figura 10: Ênfase no refinamento das paredes.....	26
Figura 11: Ênfase no refinamento das curvaturas e pequenos diâmetros	26
Figura 12: Primeiro ejedor projetado	33
Figura 13: Segundo ejedor projetado	33
Figura 14: Terceiro ejedor projetado	34
Figura 15: Quarto ejedor projetado	34
Figura 16: Fluxograma.....	35
Figura 17: Fração volumétrica de gás no caso 25x25 cm.....	37
Figura 18: Fração volumétrica de gás no caso 20x15 cm.....	38
Figura 19: Fração volumétrica de gás no caso 14x15 cm.....	38
Figura 20: Fração volumétrica de gás no caso 20x10 cm.....	39
Figura 21: Vetores velocidade.....	40
Figura 22: Fração volumétrica de gás	43
Figura 23: Vetores velocidade.....	45
Figura 24: Fração volumétrica de gás	47
Figura 25: Fração volumétrica de gás	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados de entrada e saída do dimensionador	23
Tabela 2: Dados do fluido <i>mistura</i>	29
Tabela 3: Dados utilizados nas simulações	30
Tabela 4: Dimensões utilizadas nas simulações	31
Tabela 5: Condições operacionais esperadas	32
Tabela 6: Fração volumétrica de gás ao longo do ejetor para todos os casos	36
Tabela 7: Valores das pressões obtidas	42
Tabela 8: Fração volumétrica de gás para diferentes distâncias	43
Tabela 9: Valores das pressões para várias distâncias	46
Tabela 10: Fração volumétrica de gás para vários casos	47
Tabela 11: Valores das pressões para vários casos	50

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{API}$ – Grau API (*American Petroleum institute gravity*).

BSW – *Basic Sediments and water*.

RGO – Razão gás/óleo instantânea.

$\rho_{\text{óleo}}$ – massa específica do óleo.

$\rho_{\text{água}}$ – massa específica da água.

ρ_{mistura} – massa específica da mistura (água + óleo).

$\mu_{\text{óleo}}$ – Viscosidade do óleo.

$\mu_{\text{água}}$ – Viscosidade da água.

μ_{mistura} – Viscosidade da mistura.

ID – Diâmetro interno.

P_i – Pressão na entrada do bocal.

P_o – Pressão na saída do bocal ou entrada da garganta.

P_t – Pressão na garganta.

P_d – Pressão de descarga.

P_{rev} – Pressão de revestimento.

P_{wh} – Pressão na cabeça do poço.

P_{wf} – Pressão de fluxo no fundo do poço.

P_e – Pressão estática da formação.

C_p – Capacidade calorífica a pressão constante.

L – Altura da coluna de líquido do anular.

i – índice representativo da entrada do bocal.

s – índice representativo da sucção.

o – índice representativo da saída do bocal ou entrada da garganta.

t – índice representativo da saída da garganta ou entrada do difusor.

d – índice representativo da saída do difusor.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. Objetivos gerais.....	14
2. ASPECTOS TEÓRICOS	15
2.1. Definição de Ejetores.....	15
2.2. Partes de um Ejetor	16
2.3. Princípio de Funcionamento.....	17
2.4. Aplicação do ejeter na cabeça de poço.....	19
3. METODOLOGIA.....	21
3.1. Geometria do ejeter	21
3.2. Utilizando o <i>CFX</i>	23
3.2.1. Introdução sobre o programa	23
3.2.2. Desenhando o ejeter	24
3.2.3. Refinamento/MESH	25
3.2.4. Condições de contorno/SETUP	27
3.2.5. Inicialização das iterações/SOLUTION	28
3.2.6. Visualização dos resultados/RESULTS.....	29
3.3. Informações sobre o caso estudado.....	29
3.3.1. Dados utilizados	29
3.3.1.1. Dados utilizados para a criação do fluido	29
3.3.1.2. Dados utilizados como condições de contorno	30
3.3.2. Dimensões utilizadas.....	30
3.3.3. Resultados esperados	31
3.4. Mudanças na geometria	32
3.4.1. Distância do bocal	32
3.4.2. Tamanho da câmara de sucção	32
3.4.2.1. Primeiro ejeter (25x25 cm)	33

3.4.2.2.	Segundo ejetor (20x15 cm)	33
3.4.2.3.	Terceiro ejetor (14x15 cm).....	34
3.4.2.4.	Quarto ejetor (20x10 cm)	34
3.5.	Mudanças na fração volumétrica de gás no fluido primário	35
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1.	Comparação dos resultados	36
4.1.1.	Mudanças no tamanho da câmara de sucção	36
4.1.1.1.	Comportamento da fração volumétrica de gás.....	36
4.1.1.1.1.	Primeiro ejetor (25x25 cm)	37
4.1.1.1.2.	Segundo ejetor (20x15 cm)	37
4.1.1.1.3.	Terceiro ejetor (14x15 cm)	38
4.1.1.1.4.	Quarto ejetor (20x10 cm)	39
4.1.1.2.	Comportamento dos vetores velocidade.....	40
4.1.1.3.	Comportamento da pressão	42
4.1.2.	Mudanças na distância do bocal	42
4.1.2.1.	Comportamento da fração volumétrica de gás.....	42
4.1.2.2.	Comportamento dos vetores velocidade.....	44
4.1.2.3.	Comportamento da pressão	46
4.1.3.	Mudança na fração de gás do fluido primário	46
4.1.3.1.	Comportamento da fração volumétrica de gás.....	47
4.1.3.2.	Comportamento dos vetores velocidade.....	48
4.1.3.3.	Comportamento da pressão	50
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	51
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

A elevação artificial se utiliza de técnicas e ferramentas para viabilizar a produção de poços não surgentes, assim como aumentar a produção de poços que produzem por elevação natural. Dentre os métodos existentes, estão incluídos os que se utilizam de algum sistema de bombeio, tais quais: Bombeio Mecânico por Hastes (BM), Bombeio Centrífugo Submerso (BCS) e Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP). Nesses três métodos, a presença de gás na sucção da bomba faz com que haja uma redução na eficiência da mesma, tornando-se necessário a utilizações de equipamentos que impeçam a entrada do gás em sua sucção. Esses equipamentos fazem com que o gás seja separado para o anular. (BROWN, 1982)

As possíveis origens para esse gás podem ser do próprio petróleo (gás dissolvido) e/ou proveniente de projetos de injeção de vapor. Devido à impossibilidade de liberar diretamente o gás para a atmosfera (por questões ambientais), o mesmo acaba ficando comprimido no anular. Essa compressão faz com que a pressão de fluxo aumente, acarretando a diminuição da produção. Uma solução seria conectar o revestimento a linha de produção do poço, enviando assim o gás comprimido às facilidades do separador, porém, em algumas situações a pressão na linha é igual ou superior à do revestimento, impossibilitando o fluxo do gás.

Diante desse problema, o ejetor surge como uma solução de baixo custo, sem partes móveis, e capaz de reduzir a pressão de revestimento através da sucção do gás do anular utilizando a energia cinética da própria produção do poço.

Através de uma ferramenta computacional que está sendo desenvolvida, *Well Head Ejector* (WHE), para dimensionamento de ejetores petróleo-gás, buscou-se analisar a performance deste tipo de equipamento utilizando a geometria sugerida pelo WHE no simulador CFX, e através da mudança de alguns outros parâmetros do ejetor.

Este trabalho está dividido em cinco seções. A primeira, pertinente a introdução, traz ao leitor uma visão abrangente da problemática e os principais objetivos. A segunda seção, denominada de aspectos teóricos, discute os principais conceitos necessários ao entendimento do tema abordado. A terceira seção, diz respeito à metodologia utilizada para desenvolver a análise de performance do ejetor. Depois vêm os resultados e

discussões, mostrando os principais resultados, seguidos das conclusões a respeito do que foi desenvolvido e recomendações para trabalhos futuros são expostas.

1.1.Objetivos gerais

O objetivo principal deste trabalho é avaliar as variáveis geométricas e operacionais que interferem na eficiência de ejetores em poços de petróleo através do programa *CFX*. Adicionalmente, será feita uma análise detalhada do desempenho do ejetor e indicar a melhor geometria para o caso estudado.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

Nesta seção, será abordada toda a teoria necessária ao entendimento do trabalho desenvolvido.

2.1. Definição de Ejetores

Ejetores são dispositivos que utilizam a energia cinética proveniente de um fluido primário para succionar outro, denominado de fluido secundário. Os fluidos podem ser compressíveis ou incompressíveis e o fluido secundário não será necessariamente igual ao fluido primário. Em alguns casos, por exemplo, pode haver também partículas dispersas nos fluidos. Assim, a abordagem matemática para determinar sua performance dependerá do tipo de fluido que escoará em seu interior, porém o princípio de funcionamento será sempre o mesmo, independentemente do tipo de fluido utilizado. (ESDU, 1985)

A figura 1 mostra um exemplo de ejtores com diversos tamanhos e diâmetros.

Figura 1: Ejetores com diversos tamanhos



Fonte: <http://www.nitech-vac.com>

Além da flexibilidade alcançada por operarem tanto com fluidos compressíveis como também fluidos incompressíveis, os ejtores são bastante utilizados devido a sua

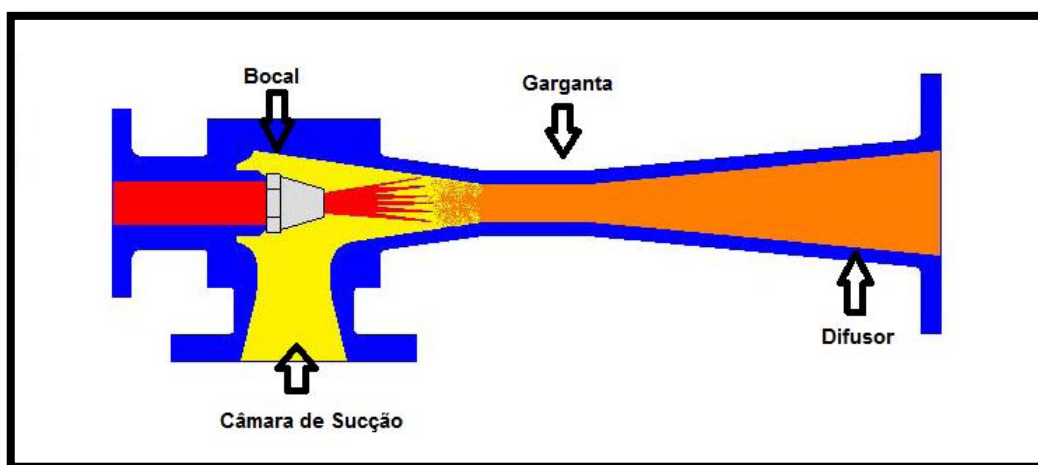
alta confiabilidade, uma vez que não apresentam partes móveis em sua estrutura, e também devido à possibilidade de instalações em áreas remotas ou inacessíveis. O fato de não possuir partes móveis é importante, pois permite a passagem de fluidos com partículas. Caso contrário, as partes móveis seriam rapidamente degradadas ou erodidas. Outro aspecto positivo e não menos importante da utilização de ejetores reside no quesito custo, dado que os mesmos possuem pequenas dimensões em sua maioria das vezes. Adicionalmente, a ativação do dispositivo é feita a partir de um fluido, o que dispensa a presença de conexões elétricas ou mecânicas. (CUNNINGHAM, 1974)

As desvantagens do ejetor estão relacionadas às perdas por fricção e pelo processo de mistura dos fluidos, fazendo como que a eficiência seja prejudicada. Um ejetor projetado criteriosamente alcança eficiência na ordem de 30 a 40%. Outro exemplo de desvantagem, mencionada na literatura, é com relação a sua sensibilidade as variações das condições as quais ele foi projetado e à complexidade de equações na modelagem de determinados tipos de fluidos. (ESDU, 1985; CUNNINGHAM, 1974)

2.2.Partes de um Ejetor

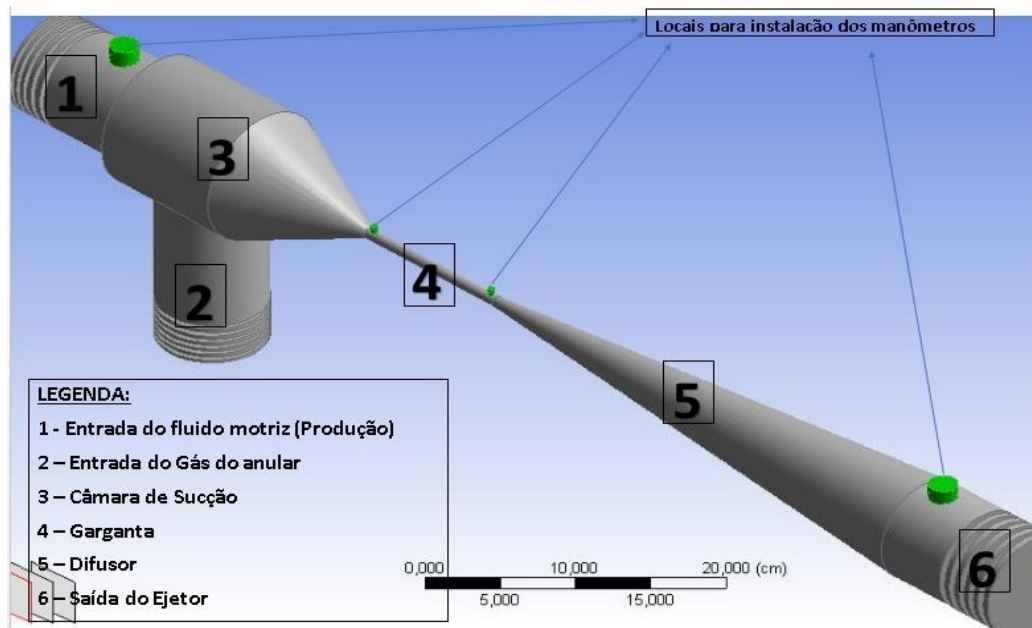
O ejetor é composto por quatro seções principais, são elas: Bocal, câmara de sucção, garganta e difusor. As figuras 2 e 3 ilustram o esquema de um ejetor.

Figura 2: Estruturas componentes de um ejetor



Fonte: <http://www.enggcyclopedia.com/2012/03/steam-ejectors/>

Figura 3: Componentes de um ejedor



Fonte: Autor

O bocal é a região por onde o fluido primário entra no ejedor. Ele é caracterizado pela redução da sua área transversal até sua saída, fazendo com que ocorra um aumento na velocidade do fluido motriz e consequentemente uma queda de pressão.

A câmara de sucção é a região responsável por promover a entrada do fluido secundário no ejedor, para que ocorra a mistura posteriormente. (QUEIRÓZ, 2015)

A garganta é a região, de área constante, responsável pela mistura dos fluidos oriundos do bocal e da câmara de sucção. (QUEIRÓZ, 2015)

Na saída do ejedor tem-se o difusor, que é caracterizado por uma área de seção transversal crescente, cuja função é desacelerar a mistura, composta pelos fluidos primário e secundário, gerando um consequente aumento de pressão. (QUEIRÓZ, 2015)

2.3.Princípio de Funcionamento

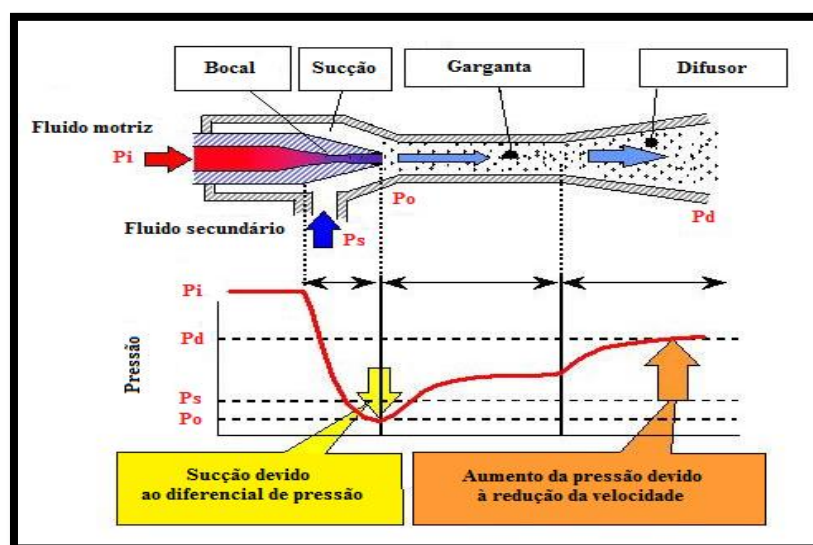
O funcionamento do ejedor começa a partir do momento em que o fluido primário entra no equipamento com uma pressão inicial P_i , em seguida, devido a redução de área causada pelo bocal, o fluido primário sofre um aumento de velocidade,

deixando o bocal com uma pressão P_o , onde $P_i > P_o$. Esse aumento da velocidade acarreta uma queda de pressão, fazendo com que o fluido secundário, que se encontra em uma condição de estagnação, possa ser succionado a uma pressão de sucção P_s . É esse diferencial de pressão entre a sucção e a saída do bocal o responsável por succionar o fluido secundário para o interior do ejetor. (CUNNINGHAM, 1974)

Após entrar na câmara de sucção, o fluido secundário entra em contato com o fluido motriz, que o arrasta para o interior da garganta, onde passam a se misturar através de um processo que envolve a transferência da quantidade de movimento. É nessa hora que ocorre algumas das perdas de energia presentes no ejetor, onde parte é utilizada para arrastar o fluido secundário da câmara de sucção para dentro da garganta, e outra parcela de energia é perdida através da fricção. Portanto, é necessária a utilização de um comprimento ótimo da garganta para que o ejetor consiga alcançar o melhor desempenho possível, pois com um comprimento pequeno a mistura não ocorre completamente, e com um comprimento maior há uma adição de perda de carga no sistema. (CUNNINGHAM, 1974)

Por último, a mistura passa pelo difusor. Ele é responsável pelo aumento da área de fluxo, fazendo com que ocorra uma redução da velocidade da mistura, sendo possível converter a energia cinética em energia de pressão, pressão essa chamada de pressão de descarga P_d . Toda a explicação do tópico 2.3 é facilmente observada na figura 4.

Figura 4: Perfil de pressão longitudinal no ejetor



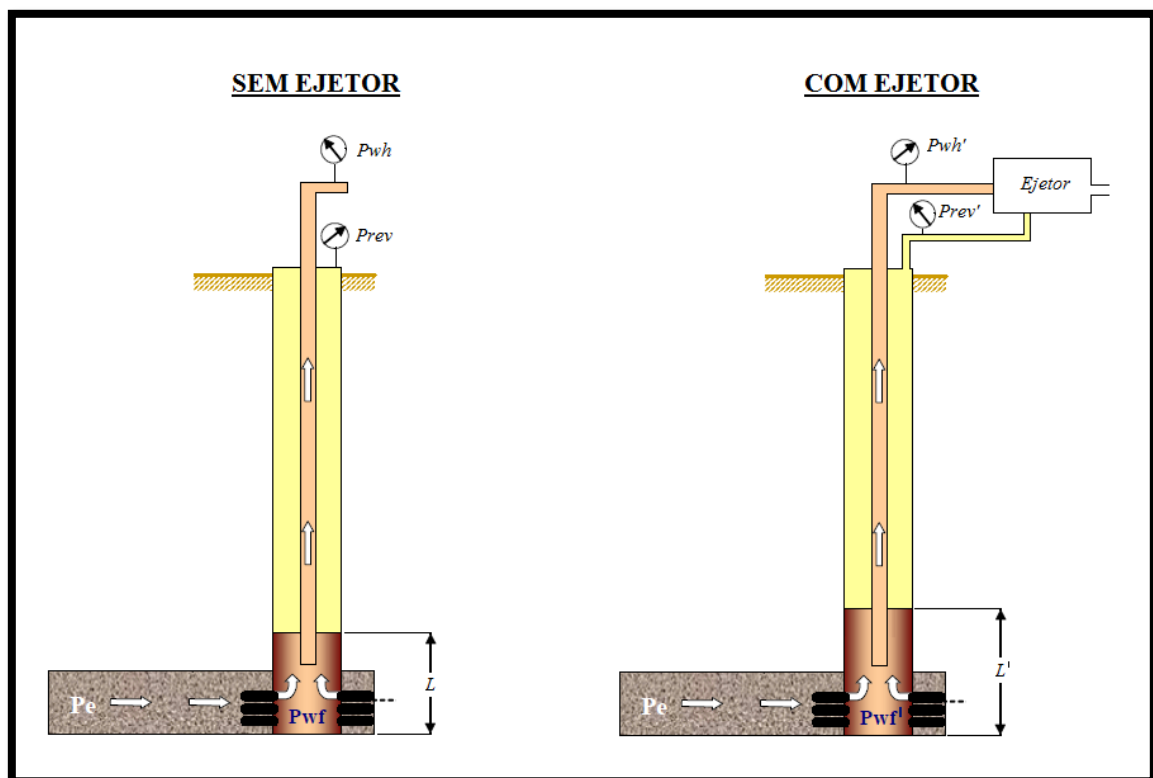
Fonte: <http://aboutyourrefrigeration.blogspot.com.br/2014/05/refrigeration-ejectors.html>

A figura 4 reflete o comportamento dos fluidos ao se encontrarem na garganta. Dá-se o nome de *choque da mistura* ao processo que ocorre quando os dois fluidos se encontram completamente misturados. Após determinado comprimento da garganta ocorre a transição do escoamento do tipo *jato* para o tipo *em bolhas*, onde os fluidos primário e secundário passam a constituir um meio contínuo. O escoamento tipo *jato* é caracterizado por apresentar um baixo gradiente de pressão e quando ocorre o choque da mistura nota-se uma variação brusca da pressão (NORONHA, 1995).

2.4. Aplicação do ejetor na cabeça de poço

Para o caso em questão, o ejetor deverá ser instalado o mais próximo possível da cabeça do poço. A figura 5 mostra duas situações, uma sem o ejetor instalado na cabeça do poço e outra com o dispositivo instalado.

Figura 5: Configuração de um poço sem o ejetor e outro com o ejetor instalado



Fonte: Queiróz (2015)

A figura 5 mostra as mudanças esperadas no poço após a instalação do ejetor. Espera-se que o mesmo consiga succionar o gás do anular, diminuindo a contrapressão no reservatório ($P_{rev} > P_{rev}'$). Essa diminuição irá gerar um aumento de vazão do reservatório, fazendo com que ocorra o aumento do nível dinâmico do poço ($L < L'$). No entanto, o nível dinâmico pode permanecer constante ($L = L'$) se o sistema de bombeio tiver capacidade para produzir todo o excedente de fluido. Outra consequência é o aumento da pressão da cabeça ($P_{wh} < P_{wh}'$), devido à restrição causada pelo bocal.

Na figura 5, nota-se que a pressão de entrada do fluido motriz será a própria pressão da cabeça do poço, e a pressão da câmara de sucção será a do revestimento. Nos ejetores convencionais, controla-se a vazão do fluido motriz e conhecem-se suas propriedades. No caso em questão têm-se tais fatores como variáveis.

3. METODOLOGIA

Nesta seção, serão discutidos os principais tópicos pertinentes ao desenvolvimento da análise da performance do ejetor.

3.1. Geometria do ejetor

Para dimensionar o ejetor, utilizou-se uma ferramenta computacional para determinar as áreas e comprimentos das suas principais partes. A ferramenta faz o uso de equações para cada seção do ejetor (bocal, câmara de sucção, garganta e difusor), e recebem como entradas variáveis que representam condições as quais o ejetor será submetido, e a partir de processos iterativos, retorna as dimensões do ejetor e sua eficiência como resultados finais.

O software *Well Head Ejector* (WHE) foi desenvolvido na plataforma *Visual Basic* (VB). As figuras 6 e 7 ilustram a interface do programa:

Figura 6: Tela inicial do dimensionador

Dados dos Fluidos

Peso do Líquido	1000	kg/m³
Densidade do gás	0,6	

Coefficientes de Atrito do Ejetor

Bocal	0,1	Sucção	0
Garganta	0,2	Difusor	0,3

Restrições de Design

Restrição mínima	0,2	pol	Comprimento Máximo	100	cm
------------------	-----	-----	--------------------	-----	----

Condições de Contorno

ENTRADA		SUCÇÃO			
Pressão de Cabeça	15	kgf/cm²	Pressão Desejada	8	kgf/cm²
Vazão Bruta	60	m³/d	Vazão Mássica Separada	20	kg/hr
Fração de Vazios	0,2		Temperatura	50	Celsius

DESCARGA		FATORES GEOMÉTRICOS			
Pressão de Linha	10	kgf/cm²	Ângulo Incluso do Bocal	25	graus
Diâmetro da Linha	3	pol	Ângulo Incluso do Difusor	10	graus

Resultados Geométricos

	Diâmetro 1 (pol)	Diâmetro 2 (pol)	Comprimento (cm)
Bocal Convergente	3,000	0,220	15,9
Garganta	0,439	0,439	24,9
Difusor	0,439	3,000	37,2

Buttons: Dimensionar, Realizar Análise de Performance

Fonte: Autor

Figura 7: Tela inicial do módulo de performance



Fonte: Autor

Como é possível observar, o *WHE* possui dois módulos: O primeiro (figura 6) age como dimensionador, e o segundo (figura 7) é o módulo de performance dos ejetores. É no módulo de performance (figura 7) que o programa retorna a eficiência energética e as demais condições de contorno do ejetor.

Neste trabalho foram utilizados ambos os módulos do *WHE*. O dimensionador foi utilizado para gerar a geometria base do ejetor, e o módulo de performance para comparação dos resultados com o CFX.

As variáveis de entrada e saída do módulo dimensionador são mostradas na tabela 1.

Tabela 1: Dados de entrada e saída do dimensionador

Informações de entrada		Informações de saída
Peso do líquido	Coeficiente de atrito no difusor	Diâmetro do bocal
Densidade do Gás	Pressão de entrada	Diâmetro da garganta
Densidade do Gás Aspirado	Vazão de líquidos	Diâmetro do difusor
Coeficiente de atrito no Bocal	Fração de vazios	Comprimento da garganta
Coeficiente de atrito na sucção	Temperatura	Comprimento do difusor
Coeficiente de atrito na garganta	Informações do design	-

Fonte: Autor

3.2.Utilizando o CFX

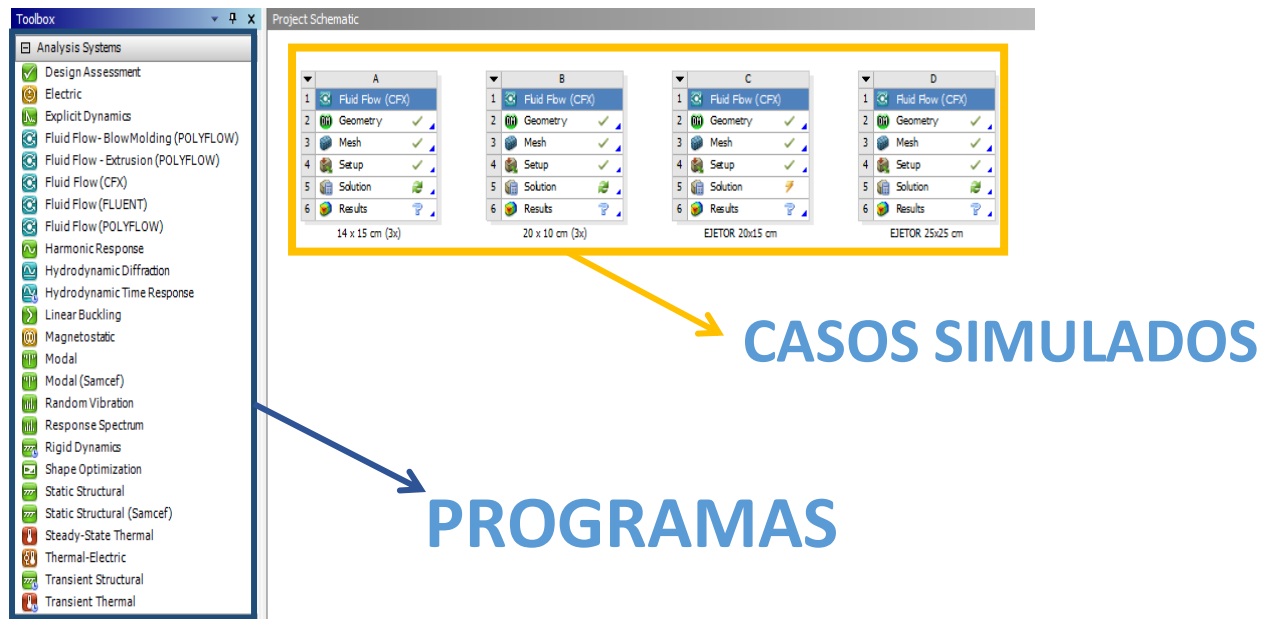
A seguir serão apresentadas todas as informações computacionais referentes ao programa CFX.

3.2.1. Introdução sobre o programa

O CFX é um programa de simulação para engenharia pertencente à ANSYS, Inc. Ele faz parte do programa ANSYS Workbench, que reúne todos os simuladores pertencentes à empresa. Os simuladores disponíveis são capazes de modelar as mais diversas situações possíveis, exemplo: vibrações, análise térmica, análise elétrica, escoamento de fluidos, análises permanente e transiente, dentre outros. (ANSYS, 2009)

Para a análise, utilizou-se apenas o CFX. A figura 8 ilustra a tela inicial do ANSYS Workbench:

Figura 8: Tela inicial do ANSYS Workbench



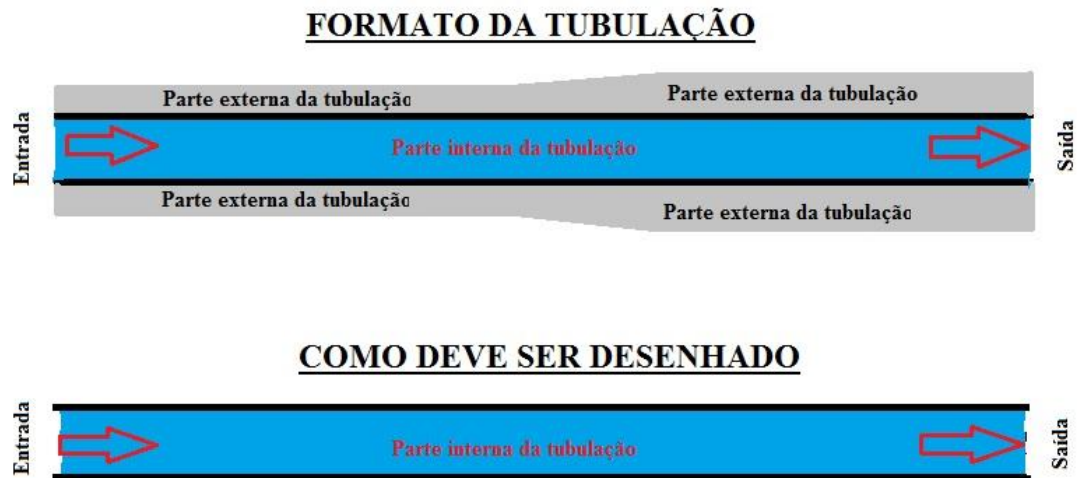
Fonte: Autor

3.2.2. Desenhando o ejetor

Para realizar o desenho, o CFX disponibiliza o *design modeler*. Ele fornece diversas ferramentas para auxiliar o desenvolvimento do desenho, desde a disponibilização de figuras pré-desenhadas até ferramentas capazes de informar todas as medidas possíveis da peça em questão.

Para um funcionamento sem erros na simulação, ao desenhar a peça, deve-se utilizar apenas a parte interna da tubulação, ou seja, por onde o fluido irá escoar. As modificações externas da tubulação não devem ser representadas no desenho, para a simplificação do problema. A figura 9 ilustra um exemplo:

Figura 9: Explicação sobre desenhos no CFX



Fonte: Autor

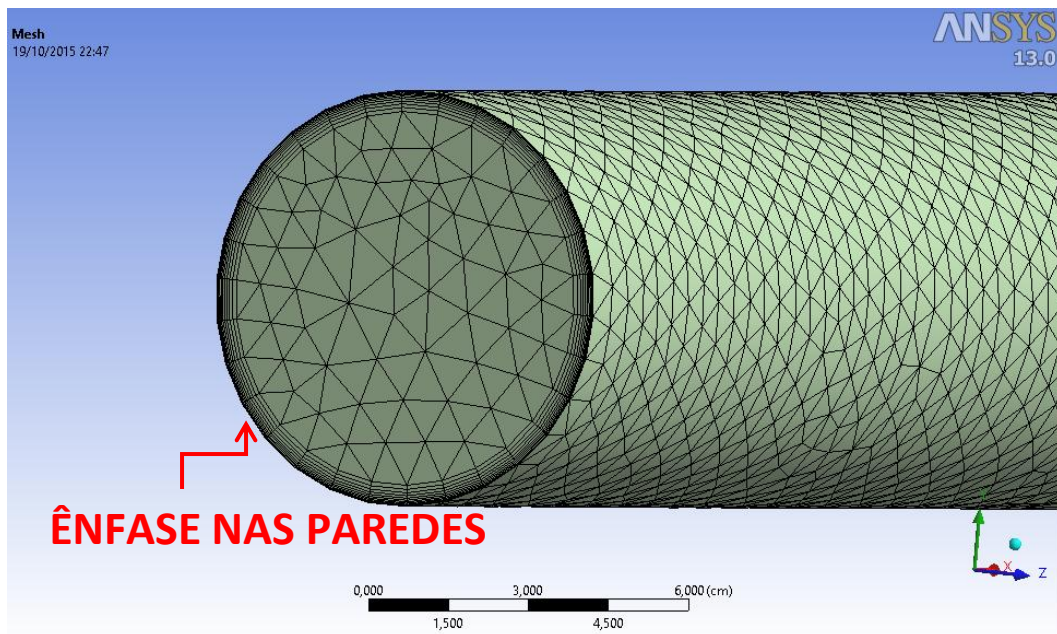
3.2.3. Refinamento/MESH

Avançando na modelagem, chega-se ao refinamento. O *CFX* possui um programa responsável pela criação desse refinamento. Ele faz o uso de tetraedros, prismas e pirâmides, para gerar uma malha interconectada por nós, que abrangem todo o ejetor. A malha gerada não possui um limite máximo de elementos e nós, cabendo ao usuário escolher se é de sua preferência uma peça bem refinada ou não.

Antes de tomar a decisão, o usuário deve estar atento ao tempo computacional e ao erro atrelado aos resultados. Sabe-se que ao aumentar o refinamento, o tempo computacional irá aumentar, porém, o erro irá diminuir. Se o caso estudado não necessitar de resultados bem apurados, deve-se optar por um grande refinamento, já caso necessite-se de resultados confiáveis, deve-se refinar o máximo possível o equipamento.

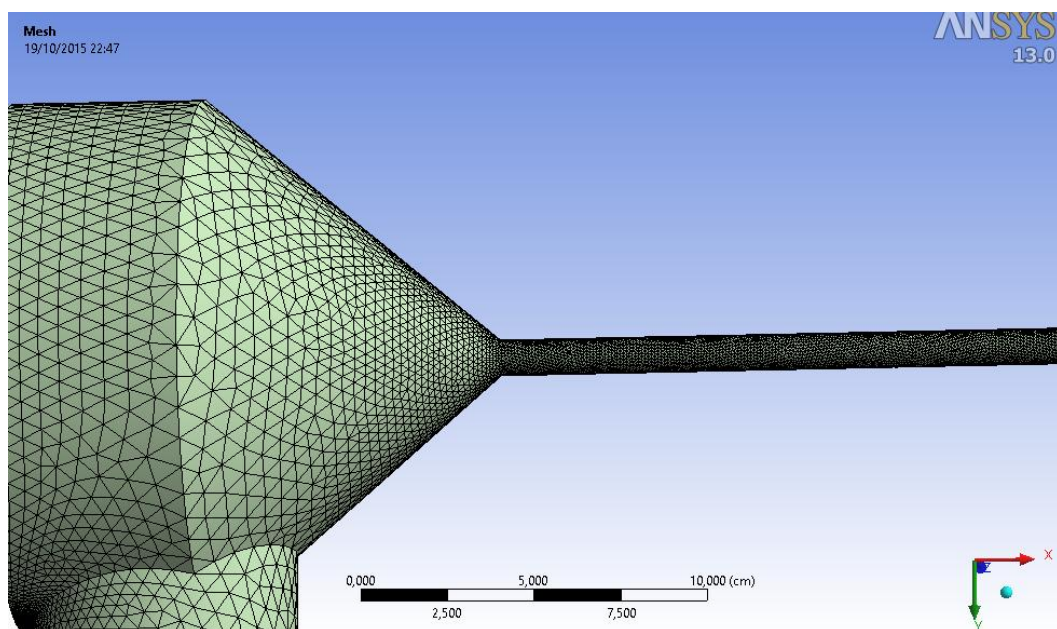
Para realizar as análises que serão mostradas posteriormente neste texto, optou-se por um refinamento bastante denso, dando ênfase a regiões próximas das paredes, com curvaturas, e de pequeno diâmetro, para a obtenção de bons resultados. As figuras 10 e 11 mostram o exemplo do refinamento utilizado:

Figura 10: Ênfase no refinamento das paredes



Fonte: Autor

Figura 11: Ênfase no refinamento das curvaturas e pequenos diâmetros



Fonte: Autor

3.2.4. Condições de contorno/SETUP

Avançando na modelagem, chega-se à etapa em que o *CFX* solicita ao usuário a inserção das condições de contorno do projeto. Essa é a parte mais importante, pois um erro pode comprometer a avaliação do caso estudado.

Ao abrir o *SETUP* (programa responsável pela inserção das condições de contorno), ele fornece uma vista em 3D do equipamento e uma aba com a condição de contorno padrão. Essa condição faz com que todas as partes do equipamento sejam consideradas paredes. Ao criar uma condição de contorno, o programa solicita a indicação de uma região, e automaticamente retira a mesma da condição inicial (parede).

O ejetor possui duas entradas e uma saída, tornando-se necessário apenas a criação de três condições de contorno. A primeira entrada será referente ao fluido primário, a segunda entrada ao fluido secundário, e uma saída para a mistura. Ao criar essas condições, deve-se escolher por informar o valor de pressão, ou de vazão mássica referente a cada região. Neste trabalho tinha-se conhecimento das duas informações (serão mostradas no tópico 3.3.1.2), onde, em alguns casos utilizaram-se as vazões mássicas e em outros as pressões.

Outra informação importante é a escolha dos fluidos que irão escoar no ejetor. Como se trata de um ejetor petróleo-gás, os fluidos atuantes podem ser três: Petróleo, gás e água. Como fluido principal podemos ter os três atuando ao mesmo tempo, e como fluido secundário apenas o gás.

Visando simplificar o processo, criou-se um fluido chamado mistura, onde, o mesmo era composto por petróleo e água, e, caso o poço produzisse gás, adicionava-se uma fração volumétrica de gás ao mesmo.

Para criar um fluido, é preciso saber as propriedades do mesmo. Para isso, algumas fórmulas foram utilizadas. Para calcular a massa específica do óleo utilizou-se a equação 1 (°API calculado nas condições standard):

$$\rho_{\text{óleo}} = 1000 \left(\frac{141,5}{131,5 + {}^{\circ}\text{API}} \right) \quad (1)$$

Em seguida, para o cálculo da massa específica da mistura, utilizou-se a equação 2 (BSW calculado nas condições standard):

$$\rho_{\text{mistura}} = \rho_{\text{óleo}} (1 - \text{BSW}) + \rho_{\text{água}} \text{BSW} \quad (2)$$

Por último, para o cálculo da viscosidade da mistura, utilizou-se a equação 3, onde estimou-se a viscosidade do óleo através de uma correlação.

$$\mu_{\text{mistura}} = \mu_{\text{óleo}} (1 - \text{BSW}) + \mu_{\text{água}} \text{BSW} \quad (3)$$

Outra informação importante, necessária para a criação do fluido, é em relação ao seu peso molecular. Para isso, como não se tinha posse de tal informação, utilizou-se um peso molecular médio do petróleo produzido no Rio Grande do Norte. O valor utilizado será discutido em um tópico 3.3.1.1.

O programa também proporciona ao usuário a chance de informar o critério de parada desejado. Existem três critérios de parada a serem escolhidos: o primeiro se refere ao número de iterações máximo que o programa pode fazer, o segundo se refere ao erro médio em todos os volumes de controle, e o último se refere ao erro máximo permitido em todos os volumes de controle. Para este trabalho, utilizou-se o que se refere ao erro médio em todos os volumes de controle, onde, foi estipulado um valor de 0,0001 (10^{-4}).

3.2.5. Inicialização das iterações/SOLUTION

Nesta parte é preciso apenas informar quantos núcleos do processador do computador o programa deve usar (quanto mais núcleos, menor o tempo

computacional), e informar se o usuário quer ativar uma função chamada *Double precision*. Se marcada, essa função indica ao programa que o range de algumas variáveis são grandes, e que pequenas variações fazem importância na análise final. Na análise realizada, optou-se por não utilizar essa função.

3.2.6. Visualização dos resultados/RESULTS

Por último, chega-se a parte do programa onde é possível visualizar os resultados obtidos nas simulações, assim como tirar conclusões com base nos mesmos. É possível criar animações, gráficos, vetores velocidade, planos, cortes na peça, visualizar regiões com presença de vórtices, a distribuição da pressão ao longo do equipamento, dentre outras inúmeras funções disponíveis no programa.

3.3. Informações sobre o caso estudado

Nesta seção serão apresentados os principais dados e geometrias utilizados para a construção da análise.

3.3.1. Dados utilizados

3.3.1.1. Dados utilizados para a criação do fluido

Os dados utilizados para a criação do fluido chamado *mistura* (petróleo + água), são mostrados na tabela 2:

Tabela 2: Dados do fluido *mistura*

Dados necessários para criação do fluido	
Massa molar (Kg/Kmol) =	428
Massa específica (Kg/m ³) =	997
C _p (J Kg ⁻¹ K ⁻¹) =	4181,7
Temp. de referência (°C) =	25
Pressão de referência (atm) =	1
Viscosidade cinemática (cp) =	3

Fonte: Autor

As informações sobre o óleo considerado nas simulações foram baseadas no óleo produzido no estado do Rio Grande do Norte, onde se calculou uma média de tais fatores.

3.3.1.2.Dados utilizados como condições de contorno

Para realizar a análise da performance do ejetor, utilizou-se dados reais de um poço ainda em atividade. O intuito de utilizar dados de um poço ativo é que gera a possibilidade de futuramente comparar os resultados obtidos na simulação, com os resultados obtidos em campo. Os principais dados utilizados são:

- Pressão na cabeça
- Vazão mássica aspirada de gás
- Pressão na saída do difusor

A tabela 3 mostra os valores de cada um deles:

Tabela 3: Dados utilizados nas simulações

Principais dados	
Pressão na cabeça (psi) =	207,612
Pressão na saída do difusor (psi) =	142,2
Vazão mássica aspirada de gás (kg/h) =	20
Temperatura de superfície (°C) =	35
Densidade do gás =	0,65

Fonte: Autor

Dos dados mostrados na tabela 3, apenas a pressão na cabeça é um dado de saída do *WHE*, todos os outros são dados reais de campo.

3.3.2. Dimensões utilizadas

A geometria utilizada foi obtida através do uso do *software Well Head Ejector* (WHE). A tabela 4 mostra os valores obtidos:

Tabela 4: Dimensões utilizadas nas simulações

Principais dimensões	
Diâmetro do bocal (mm) =	5,08
Diâmetro da garganta (mm) =	8,128
Comprimento da garganta (mm) =	120
Comprimento do difusor (mm) =	400

Fonte: Autor

Em relação às dimensões, nota-se que não existem correlações para calcular as inclinações da câmara de sucção e do difusor. O que se vê na prática é a utilização de valores tabelados, cabendo ao projetista escolher o que melhor se encaixa em seu projeto. São eles:

- **Câmara de sucção:** Utilizam-se valores que variam de 20° a 45° com a horizontal.
- **Difusor:** De acordo com a *Engineering Sciences Data Unit* (ESDU), o ganho de ângulo tem que estar dentro de um intervalo de 3° a 5° com a horizontal, para que a recuperação de pressão ocorra de maneira eficiente.

Neste trabalho foram utilizados os seguintes valores:

- **Câmara de sucção:** Aproximadamente 25° com a horizontal.
- **Difusor:** Aproximadamente 5° com a horizontal.

3.3.3. Resultados esperados

As condições operacionais esperadas ao longo do ejedor foram obtidas através do uso do *software Well Head Ejector* (WHE). A tabela 5 mostra os valores calculados:

Tabela 5: Condições operacionais esperadas

Condições operacionais	
Pressão na cabeça (psi) =	207,612
Pressão no bocal (psi) =	112,338
Pressão na saída da garganta (psi) =	125,136
Pressão na saída do difusor (psi) =	142,2
Vazão mássica de gás aspirada (kg/h) =	20

Fonte: Autor

3.4.Mudanças na geometria

Nesta seção serão apresentadas todas as mudanças feitas na geometria, com o objetivo de se entender melhor o funcionamento do ejetor.

3.4.1. Distância do bocal

Ao observar as dimensões fornecidas na Tabela 4, percebe-se que não contém a distância entre o bocal e a entrada da garganta. As bibliografias não informam correlações e nem relatam qual a distância ideal. Devido a isso, optou-se por alterar esse comprimento para ver o comportamento do ejetor.

As distâncias utilizadas foram baseadas no diâmetro interno da garganta (ID), onde se utilizou valores múltiplos do mesmo.

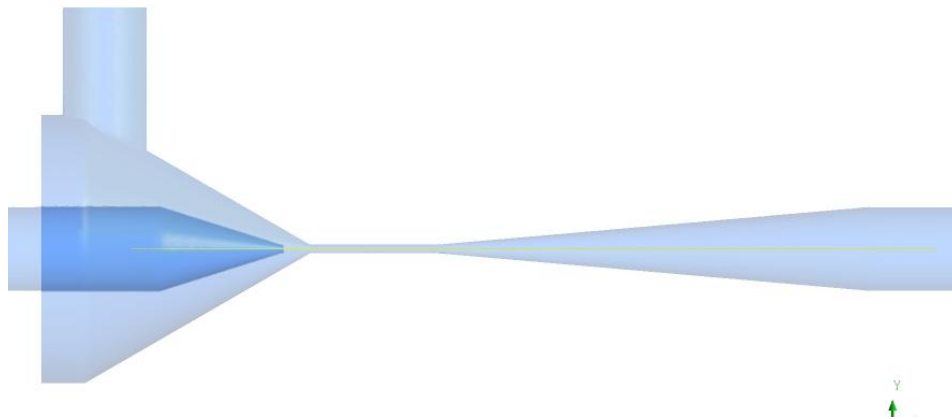
3.4.2. Tamanho da câmara de sucção

Outra medida que também não é mencionada na Tabela 4 é o tamanho da câmara de sucção (tanto em comprimento, quanto no seu diâmetro interno de entrada). Assim como a distância do bocal para a garganta, também não há correlações para o cálculo da geometria da sucção. Percebendo isso, para uma análise mais profunda sobre o ejetor, alteraram-se essas dimensões, e observaram-se os resultados.

3.4.2.1.Primeiro ejeter (25x25 cm)

Inicialmente, pensava-se que quanto maior a câmara de sucção, melhor seria para o desempenho do ejeter. Pensando nisso, optou-se por projetar um ejeter comum a câmara de sucção com 25 centímetros de comprimento, por 25 centímetros de diâmetro interno. A figura 12 ilustra um esquema desse ejeter:

Figura 12: Primeiro ejeter projetado

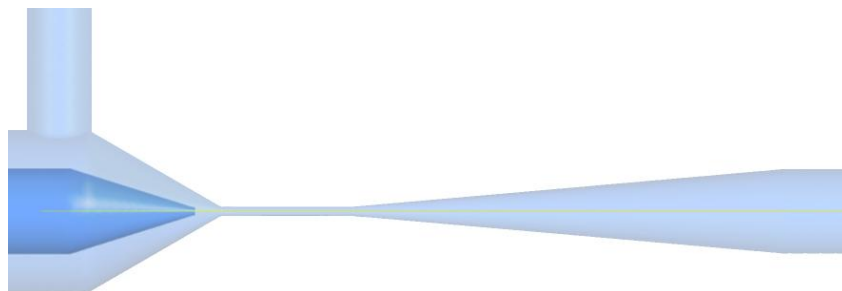


Fonte: Autor

3.4.2.2.Segundo ejeter (20x15 cm)

O segundo ejeter projetado possui uma câmara de sucção com 20 centímetros de comprimento, por 15 centímetros de diâmetro interno. A figura 13 ilustra um esquema desse ejeter:

Figura 13: Segundo ejeter projetado

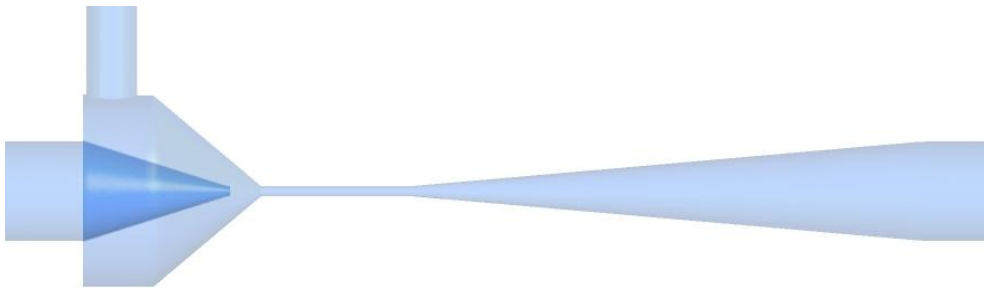


Fonte: Autor

3.4.2.3. Terceiro ejedor (14x15 cm)

O terceiro ejedor projetado possui uma câmara de sucção com 14 centímetros de comprimento, por 15 centímetros de diâmetro interno. Neste caso, manteve-se o diâmetro interno da câmara de sucção e alterou-se apenas seu comprimento. Com isso, torna-se possível analisar a relação do desempenho do ejedor com o comprimento da câmara de sucção. A figura 14 ilustra um esquema desse ejedor:

Figura 14: Terceiro ejedor projetado

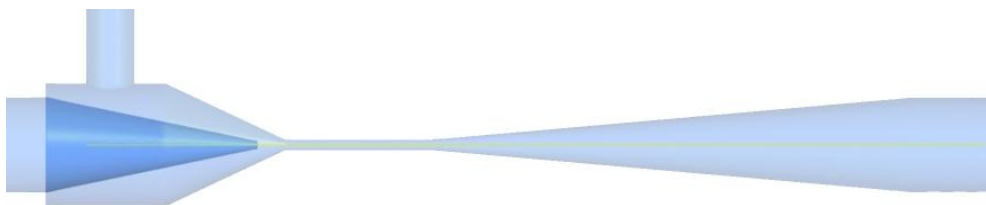


Fonte: Autor

3.4.2.4. Quarto ejedor (20x10 cm)

O quarto, e último, ejedor projetado possui uma câmara de sucção com 20 centímetros de comprimento, por 10 centímetros de diâmetro interno. Neste caso manteve-se o comprimento da câmara igual ao do caso 20x15 cm, e alterou-se apenas o diâmetro interno. Com isso, torna-se possível analisar a relação do desempenho do ejedor com o diâmetro interno da câmara de sucção. A figura 15 ilustra um esquema desse ejedor:

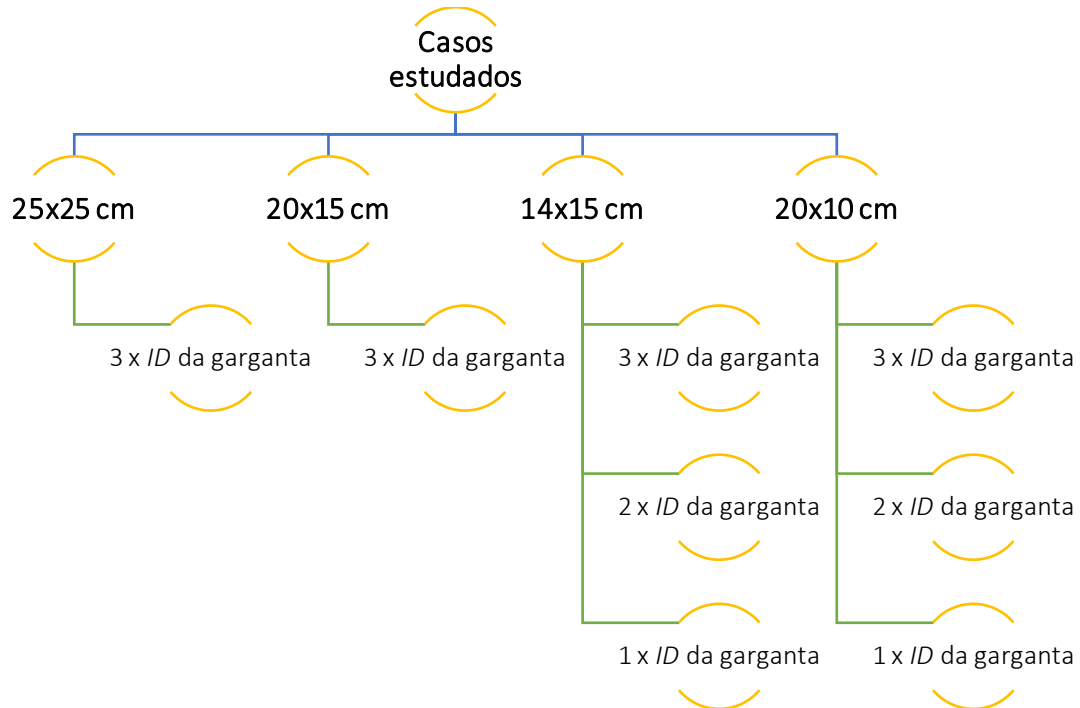
Figura 15: Quarto ejedor projetado



Fonte: Autor

Todas as mudanças geométricas no ejetor são facilmente explicadas na figura 16:

Figura 16: Fluxograma



Fonte: Autor

3.5. Mudanças na fração volumétrica de gás no fluido primário

A eficiência do ejetor também está ligada a quantidade de gás presente no fluido primário. A fim de verificar esse comportamento, variou-se a fração volumétrica de gás no fluido motriz.

- Na primeira modificação, o fluido primário ficou composto por uma fração volumétrica de 70% do fluido *mistura* e 30% de gás;
- Na segunda modificação, o fluido primário ficou composto por uma fração volumétrica de 59% do fluido *mistura* e 41% de gás (estimativa real do poço);
- Na terceira modificação, o fluido primário ficou composto por uma fração volumétrica de 100% do fluido *mistura* e 0% de gás.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Comparação dos resultados

Nesse tópico serão feitas comparações entre os resultados obtidos nas simulações, através da utilização de imagens e gráficos.

4.1.1. Mudanças no tamanho da câmara de sucção

Nesse tópico, manteve-se constante a distância entre o bocal e a garganta (distância igual a três vezes o ID da garganta), diante das mudanças realizadas na câmara de sucção. Utilizou-se, também, uma fração volumétrica de gás no fluido primário igual a 30%.

4.1.1.1. Comportamento da fração volumétrica de gás

Para avaliar como a fração volumétrica de gás se comporta com as mudanças feitas no tamanho da câmara de sucção, gerou-se a tabela 6:

Tabela 6: Fração volumétrica de gás ao longo do ejetor para todos os casos

-	25x25 cm	20x15 cm	14x15 cm	20x10 cm
Saída bocal	36,0%	36,5%	36,7%	38,1%
Entrada garganta	49,0%	59,0%	55,1%	50,7%
Saída garganta	60,0%	68,6%	64,7%	63,3%
Difusor	64,0%	70,9%	67,6%	64,1%

Fonte: Autor

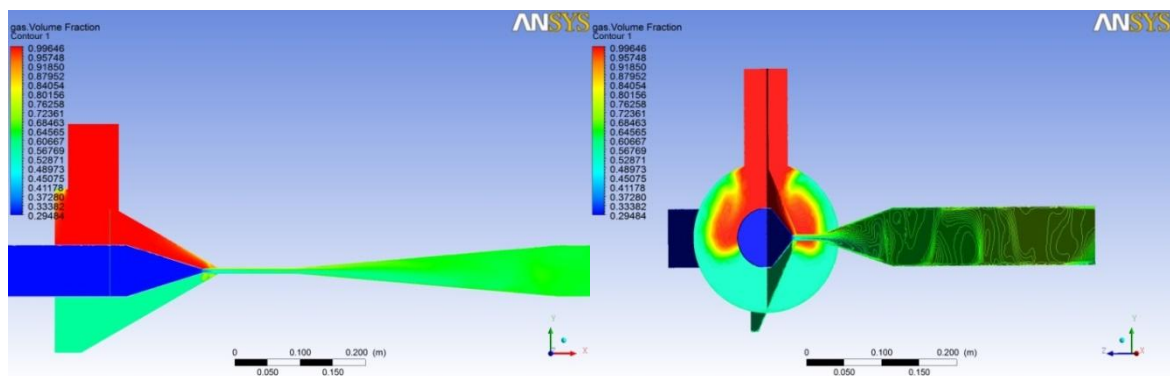
Analisando a Tabela 6, percebe-se que em locais onde ocorre aumento da pressão também há aumento da fração volumétrica de gás (valores em vermelho), porém, os mesmos deveriam ser inversamente proporcionais. Uma das causas pode estar atrelada a modelagem utilizada nas simulações, pois, ao inserir os tipos de fluidos no

simulador, houve a necessidade de se criar um fluido gasoso. Posteriormente, descobriu-se que o simulador não aceita a criação de tal fluido, e sim apenas a utilização dos mesmos presentes em seu banco de dados. Para se observar com mais detalhes o comportamento do gás dentro do ejeter, foram discutidos nas seções seguintes:

4.1.1.1.1. Primeiro ejeter (25x25 cm)

A figura 17 mostra o comportamento da fração volumétrica de gás ao longo desse ejeter:

Figura 17: Fração volumétrica de gás no caso 25x25 cm



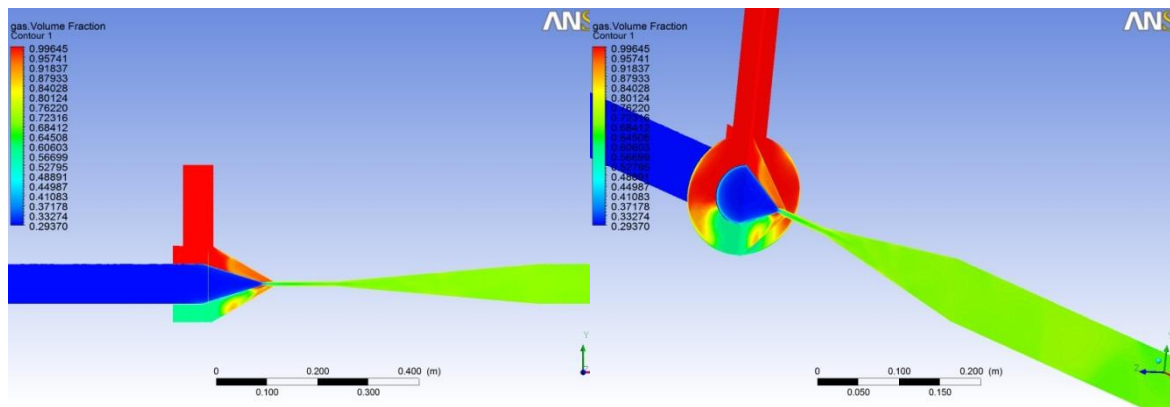
Fonte: Autor

Percebe-se que na figura 17 há a criação de um caminho preferencial por parte do gás aspirado, fazendo com que o mesmo não ocupe toda a câmara de sucção. Isso ocorre devido à acumulação de líquido na câmara de sucção, o que torna esse caso, já de princípio, inviável para utilização no campo.

4.1.1.1.2. Segundo ejeter (20x15 cm)

A figura 18 mostra o comportamento da fração volumétrica de gás ao longo desse ejeter:

Figura 18: Fração volumétrica de gás no caso 20x15 cm



Fonte: Autor

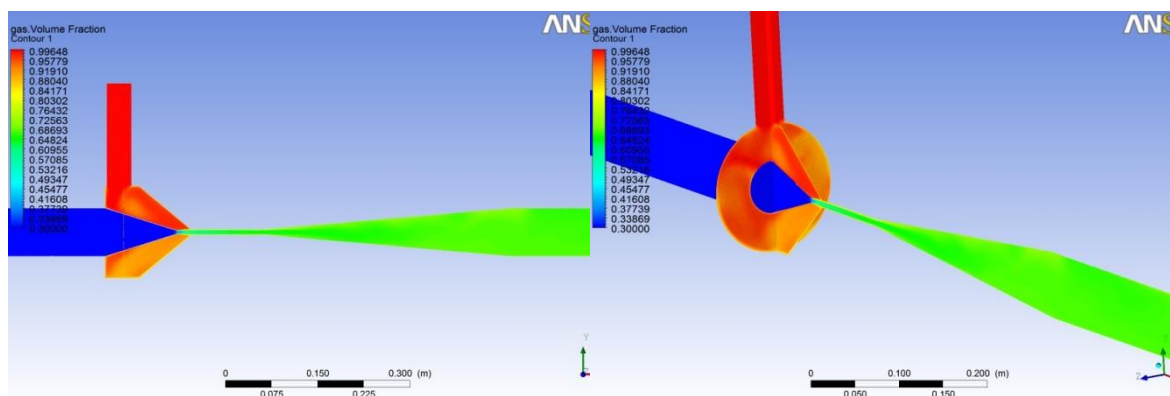
Observando a figura 18 é possível notar que ainda está ocorrendo uma acumulação de líquido na câmara de sucção, porém, acumulação essa, que quando comparada com o caso 25x25 cm, apresenta certa redução no volume de líquido acumulado. Pode-se associar como possível causa dessa redução do volume de líquido acumulado à diminuição do tamanho da câmara de sucção.

Esse caso obteve a maior fração de gás entre todos os outros, porém, o mesmo apresenta acumulação de líquido na câmara de sucção, tornando-o inviável.

4.1.1.1.3. Terceiro ejeter (14x15 cm)

A figura 19 mostra o comportamento da fração volumétrica de gás ao longo desse ejeter:

Figura 19: Fração volumétrica de gás no caso 14x15 cm



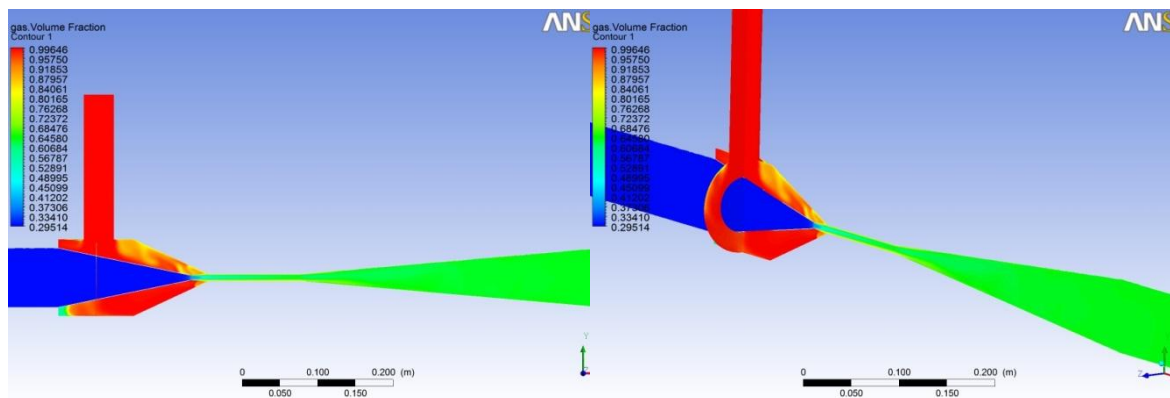
Fonte: Autor

Esse caso manteve o diâmetro interno da câmara de sucção igual ao caso anterior, alterando-se apenas o comprimento da mesma. Ao visualizar a figura 19 se percebe que, levando em consideração o erro da simulação, praticamente não há acúmulo de líquido na câmara de sucção. É necessário ainda realizar outras análises, mas esse fato faz com que, por enquanto, o mesmo seja viável.

4.1.1.1.4. Quarto ejedor (20x10 cm)

A figura 20 mostra o comportamento da fração volumétrica de gás ao longo desse ejedor:

Figura 20: Fração volumétrica de gás no caso 20x10 cm



Fonte: Autor

Nesse caso, voltou-se a utilizar o comprimento da câmara igual a vinte centímetros, e alterou-se apenas o diâmetro interno. Ao analisar a figura 20, nota-se que não há presença de líquido na câmara de sucção. Logo, pode-se afirmar que com a diminuição do diâmetro da câmara, menos líquido está se acumulando na mesma.

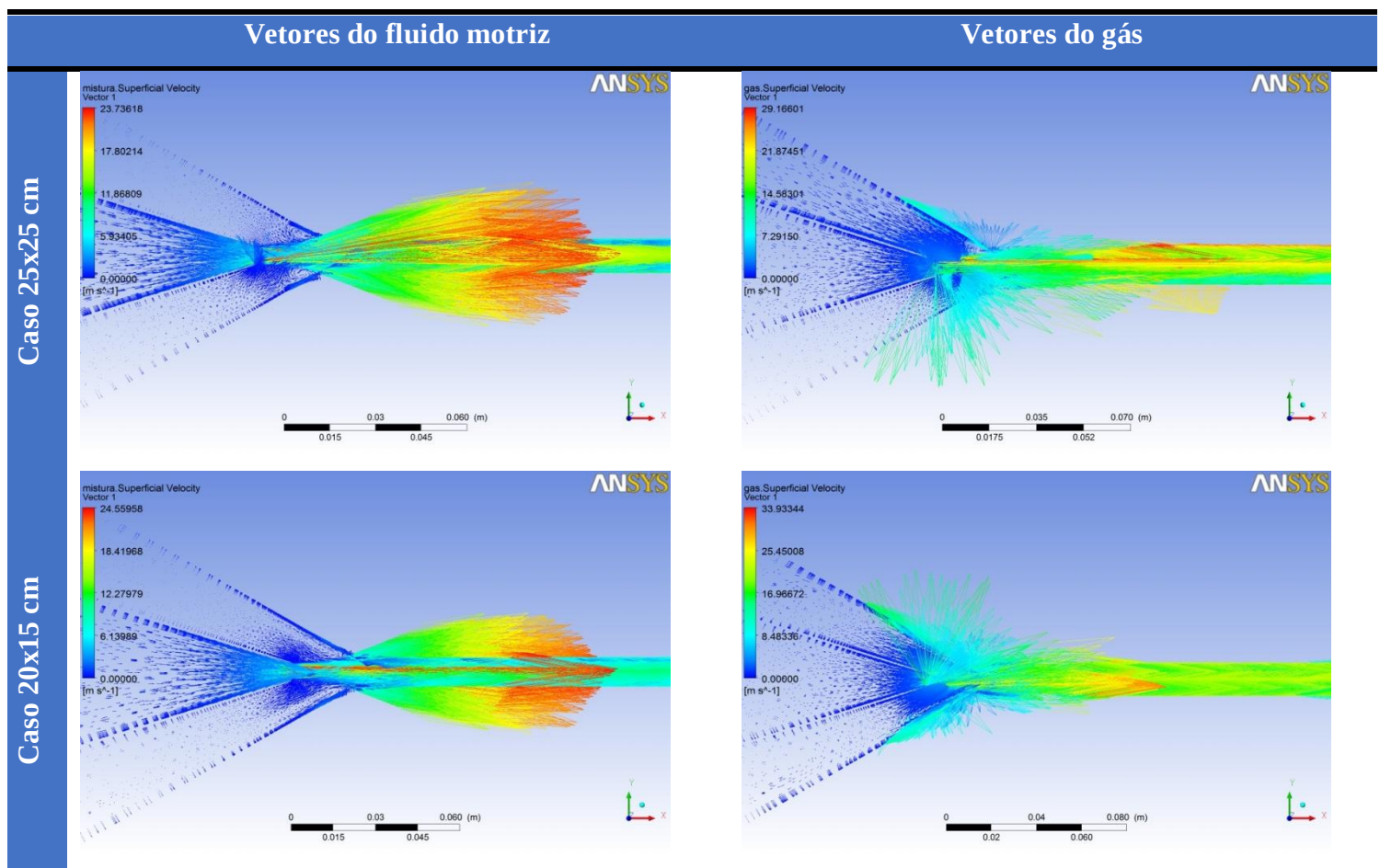
4.1.1.2. Comportamento dos vetores velocidade

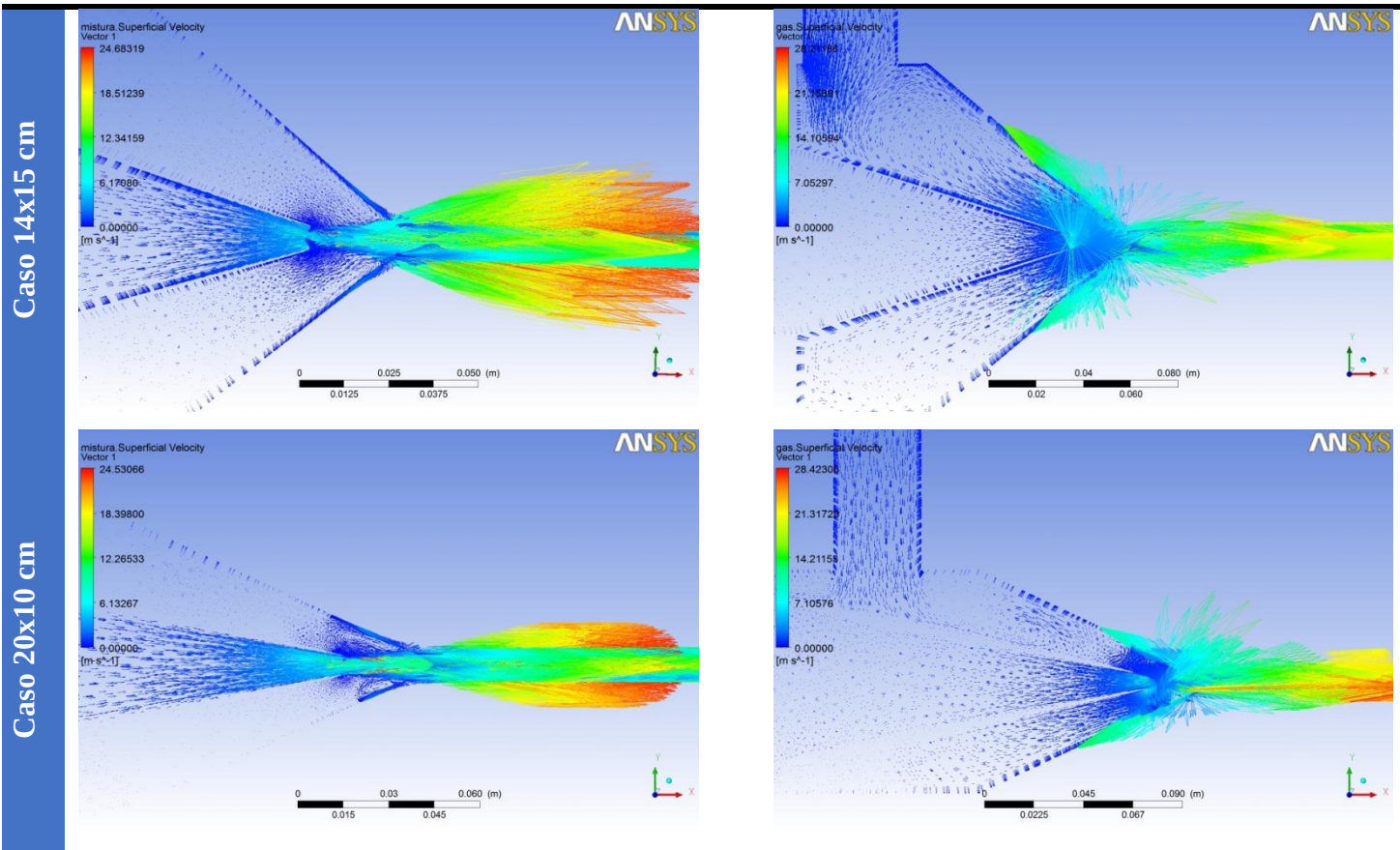
Tendo em vista os resultados apresentados no tópico 4.4.1.1., nesse tópico, tentar-se-á encontrar a(s) possível(eis) resposta(s) para o acúmulo de líquido apresentado pelos casos estudados.

Para tornar possível essa análise, surgiu a necessidade de se criar uma figura que ilustrasse o comportamento dos fluidos dentro do ejetor. Pensando nisso, geraram-se mapas que mostram a disposição dos vetores velocidade superficial de todos os fluidos que passam pelo ejetor.

A figura 21 mostra a disposição desses vetores velocidade superficial para o fluido *mistura* (óleo + água) e para o gás, em todos os casos anteriormente estudados:

Figura 21: Vetores velocidade





Fonte: Autor

Analizando inicialmente os vetores do fluido primário (*mistura*) na figura 21, observa-se que nos casos em que ocorreu acúmulo de líquido (25x25 e 20x15 cm), há um espalhamento do fluido primário antes de o mesmo entrar na garganta do ejetor, fazendo com que ocorra a colisão com as paredes da câmara de sucção, ocasionando o acúmulo de líquido na mesma. Já nos casos em que não houve acúmulo, os vetores também sofrem um espalhamento, porém o líquido não chega a colidir com as paredes da câmara de sucção.

Analizando os vetores do gás, observa-se que a diminuição do diâmetro da câmara de sucção ocasiona um reordenamento na direção dos vetores para a entrada da garganta. Isso possui ligação com a velocidade/força que o gás ganha ao se reduzir o diâmetro da câmara, pois, com uma maior velocidade/força, o gás consegue entrar na garganta de forma mais fácil.

4.1.1.3.Comportamento da pressão

Outra informação importante para a análise é a pressão ao longo do ejetor. Através dela, podem-se comparar as pressões obtidas analiticamente, com as obtidas na simulação. A tabela 7 mostra os valores obtidos:

Tabela 7: Valores das pressões obtidas

-	Valores obtidos no WHE (Psi)	25x25 cm (Psi)	20x15 cm (Psi)	14x15 cm (Psi)	20x10 cm (Psi)
Saída Bocal	112,3	143,0	149,0	153,0	138,4
Entrada garganta	113,0	131,4	131,6	130,2	127,5
Saída garganta	125,1	124,5	127,2	126,4	117,6
Difusor	142,2	142,2	142,2	142,2	142,2

Fonte: Autor

Verificando os valores da tabela 7, percebe-se que o caso que apresentou valores mais próximos dos obtidos no *WHE* foi o caso 20x10 cm. A escolha desse caso como o que mais se aproximou se deu pela visualização dos valores, ou seja, o caso 20x10cm possui três valores coerentes (bocal, entrada garganta e difusor) enquanto que os outros só possuem dois (saída garganta e difusor).

4.1.2. Mudanças na distância do bocal

Nesse tópico, adotou-se o caso 20x10 cm como modelo base, mantendo constantes suas dimensões, exceto a distância entre o bocal e a garganta. Utilizou-se, também, uma fração volumétrica de gás no fluido primário igual a 30%.

4.1.2.1.Comportamento da fração volumétrica de gás

Para avaliar como a fração volumétrica de gás se comporta com as mudanças feitas na distância entre o bocal e a garganta, gerou-se a tabela 8:

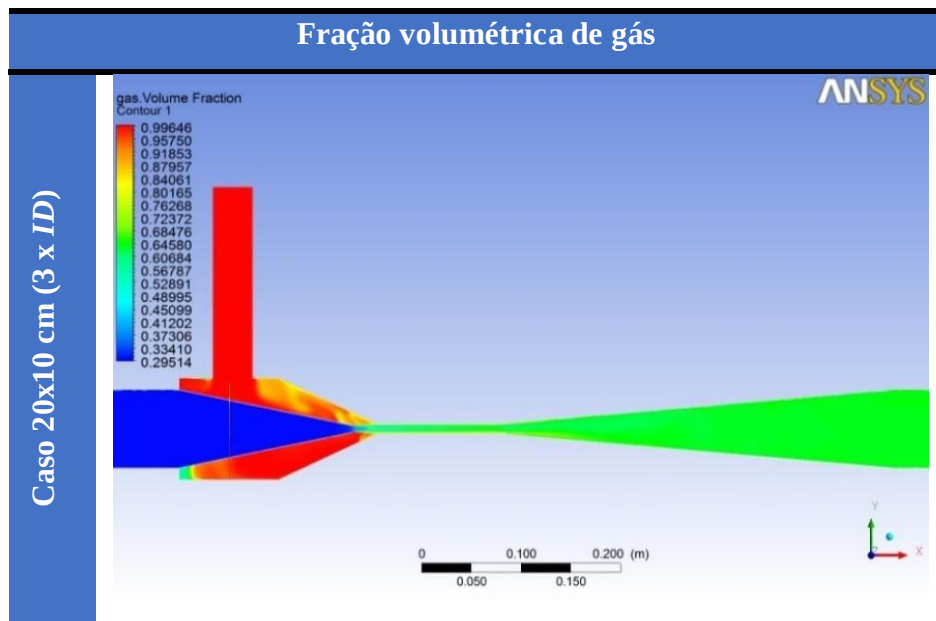
Tabela 8: Fração volumétrica de gás para diferentes distâncias

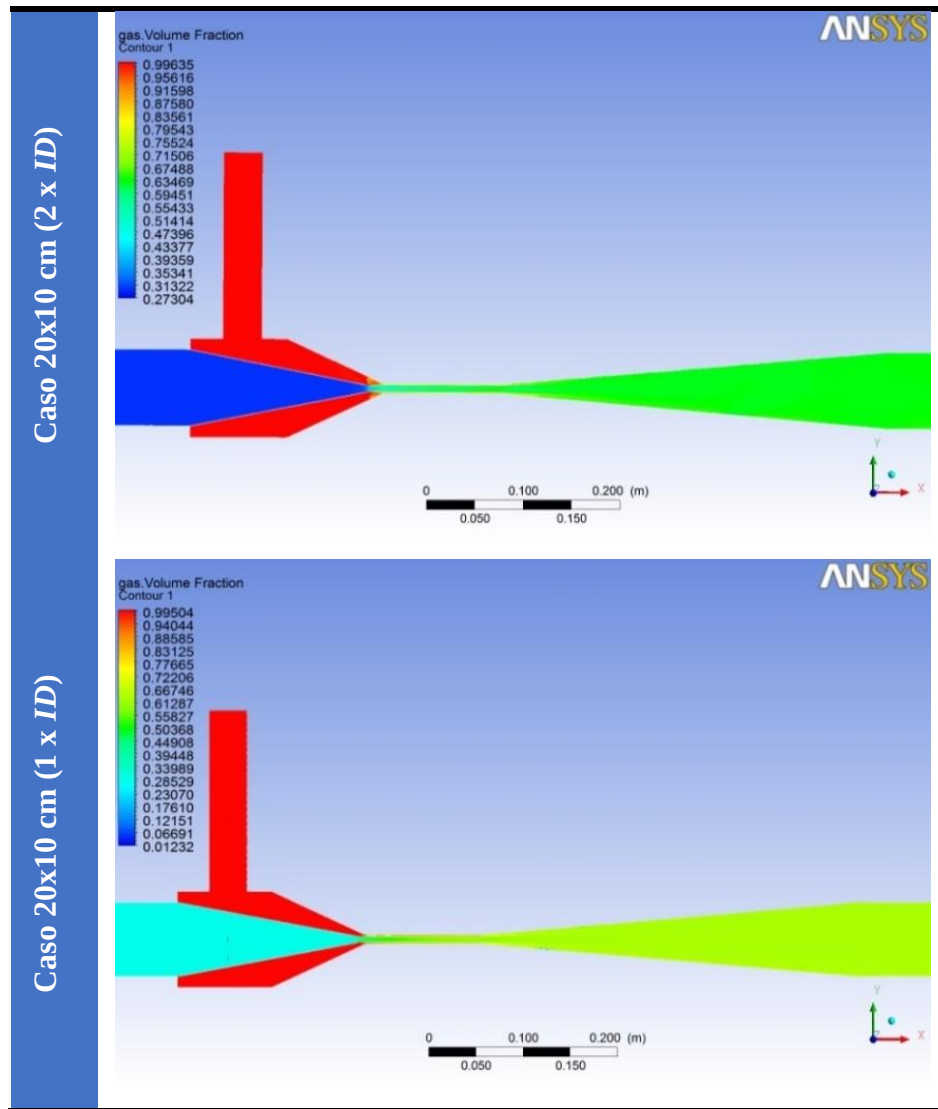
-	3 x ID	2 x ID	1 x ID
Saída bocal	38,1%	39,5%	40,7%
Entrada garganta	50,7%	44,7%	43,3%
Saída garganta	63,3%	61,4%	58,9%
Difusor	64,1%	63,4%	62,5%

Fonte: Autor

Assim como a tabela 6, percebe-se na tabela 8 o mesmo comportamento do gás, onde, em locais de aumento de pressão há, também, aumento da fração de vazios. A figura 22 mostra o comportamento da fração de gás dentro do ejetor:

Figura 22: Fração volumétrica de gás





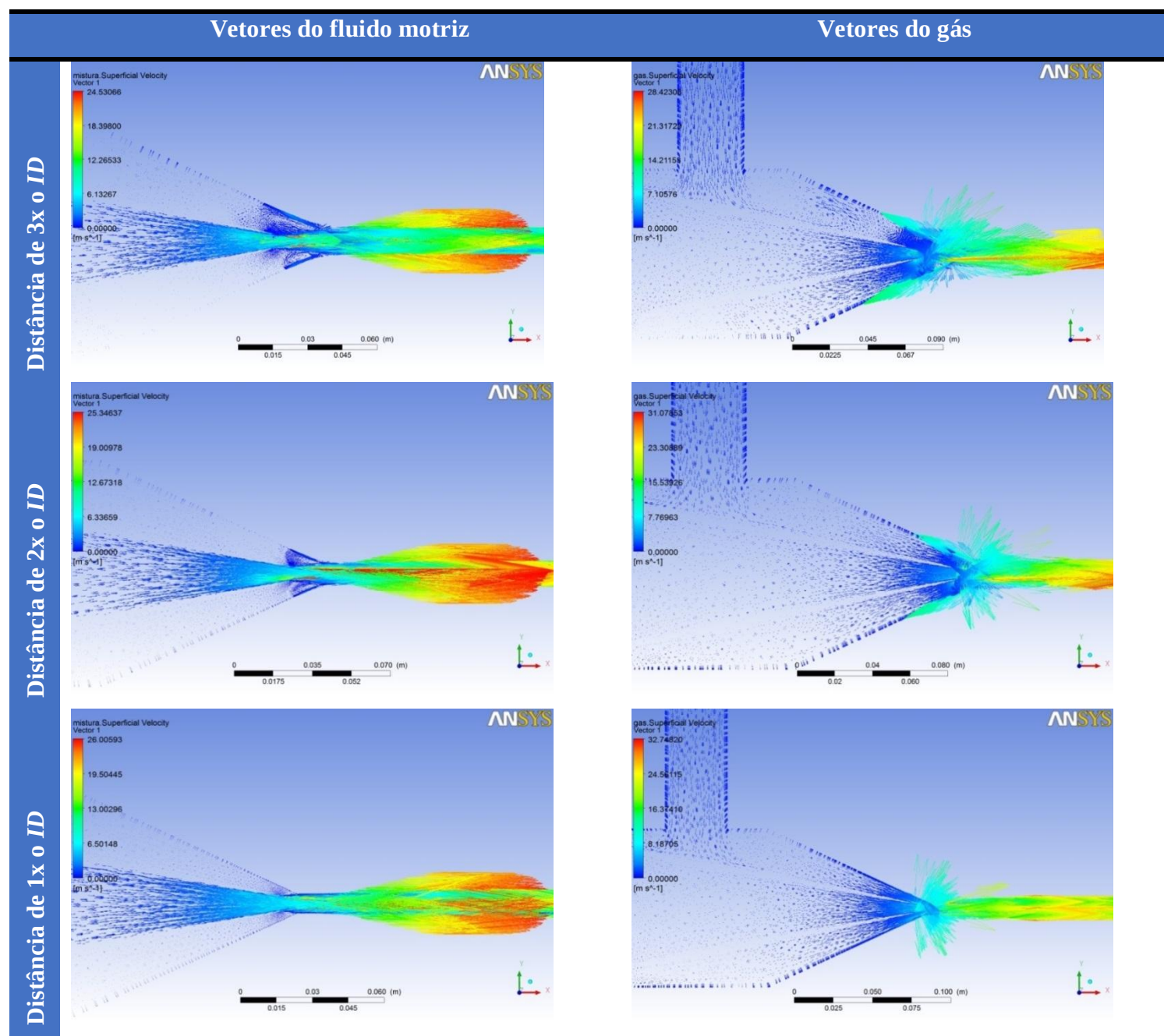
Fonte: Autor

Na figura 22, percebe-se que o pouco de líquido que havia no caso de maior distância, foi eliminado devido à aproximação entre o bocal e a garganta.

4.1.2.2. Comportamento dos vetores velocidade

Esse tópico tem como objetivo mostrar o comportamento dos fluidos ao se aproximar o bocal da garganta. A figura 23 mostra esse comportamento:

Figura 23: Vetores velocidade



Fonte: Autor

Após visualizar a figura 23, percebe-se que a aproximação do bocal é benéfica para o funcionamento do ejetor, pois elimina o espalhamento do fluido primário, evitando, assim, a existência de líquido na câmara de sucção, porém, ao se aproximar demais os dois, reduz-se o espaço aberto ao fluxo de gás próximo a garganta.

Nesse experimento, utilizou-se um material de espessura igual a um milímetro, mas na prática, o material utilizado deve ter uma espessura bem maior para suportar as altas pressões que serão exercidas no equipamento, inviabilizando, assim, uma aproximação maior que duas vezes o *ID* da garganta.

4.1.2.3. Comportamento da pressão

A tabela 9 compara o valor das pressões obtidas analiticamente, com as obtidas na simulação:

Tabela 9: Valores das pressões para várias distâncias

-	Valores obtidos no WHE (Psi)	3 x <i>ID</i> (Psi)	2 x <i>ID</i> (Psi)	1 x <i>ID</i> (Psi)
Saída Bocal	112,3	138,4	129,2	117,2
Entrada garganta	113,0	127,5	121,8	111,5
Saída garganta	125,1	117,6	117,4	119,0
Difusor	142,2	142,2	142,2	142,2

Fonte: Autor

Verificando os valores da tabela 9, percebe-se que o caso que apresentou valores mais próximos dos obtidos no *WHE* foi o caso 1 x *ID*, porém, como já dito anteriormente, ele é inviável.

4.1.3. Mudança na fração de gás do fluido primário

Nesse tópico, adotou-se o caso 20x10 cm como modelo base, mantendo-se uma distância entre o bocal e a garganta de 3x*ID* da garganta, e alterando-se apenas a fração volumétrica de gás no fluido primário entre os valores de 0%, 30% e 41%.

4.1.3.1. Comportamento da fração volumétrica de gás

Para avaliar como a fração volumétrica de gás se comporta com as mudanças feitas na fração volumétrica de gás no fluido primário, gerou-se a tabela 10:

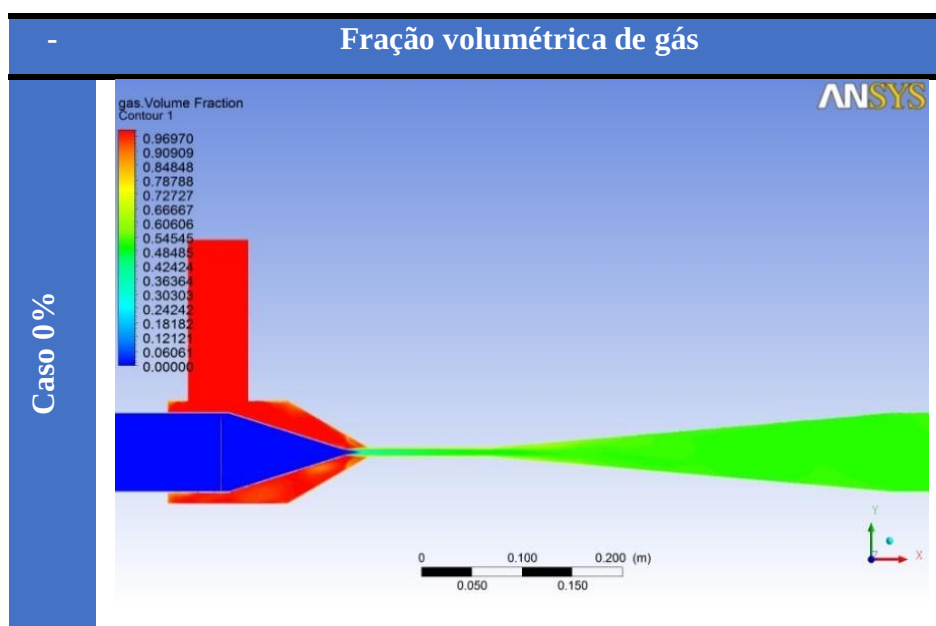
Tabela 10: Fração volumétrica de gás para vários casos

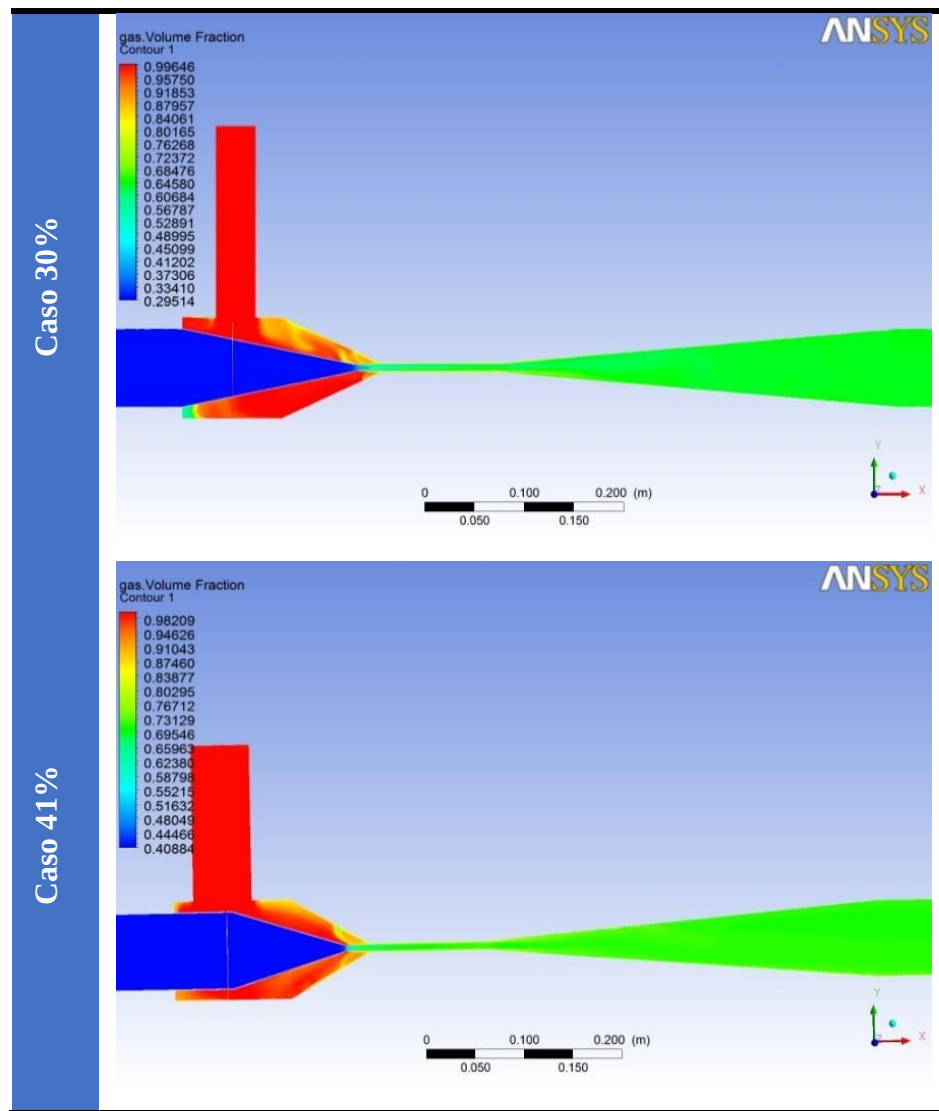
-	0% de gás	30% de gás	41% de gás
Saída bocal	0%	38,1%	47,8%
Entrada garganta	32,6%	50,7%	65,5%
Saída garganta	50,0%	63,3%	72,0%
Difusor	52,3%	64,1%	71,3%

Fonte: Autor

Analisando os valores em vermelho da Tabela 10, novamente percebe-se o mesmo comportamento das Tabelas 6 e 8. A figura 24 ilustra a fração volumétrica de gás no ejetor:

Figura 24: Fração volumétrica de gás





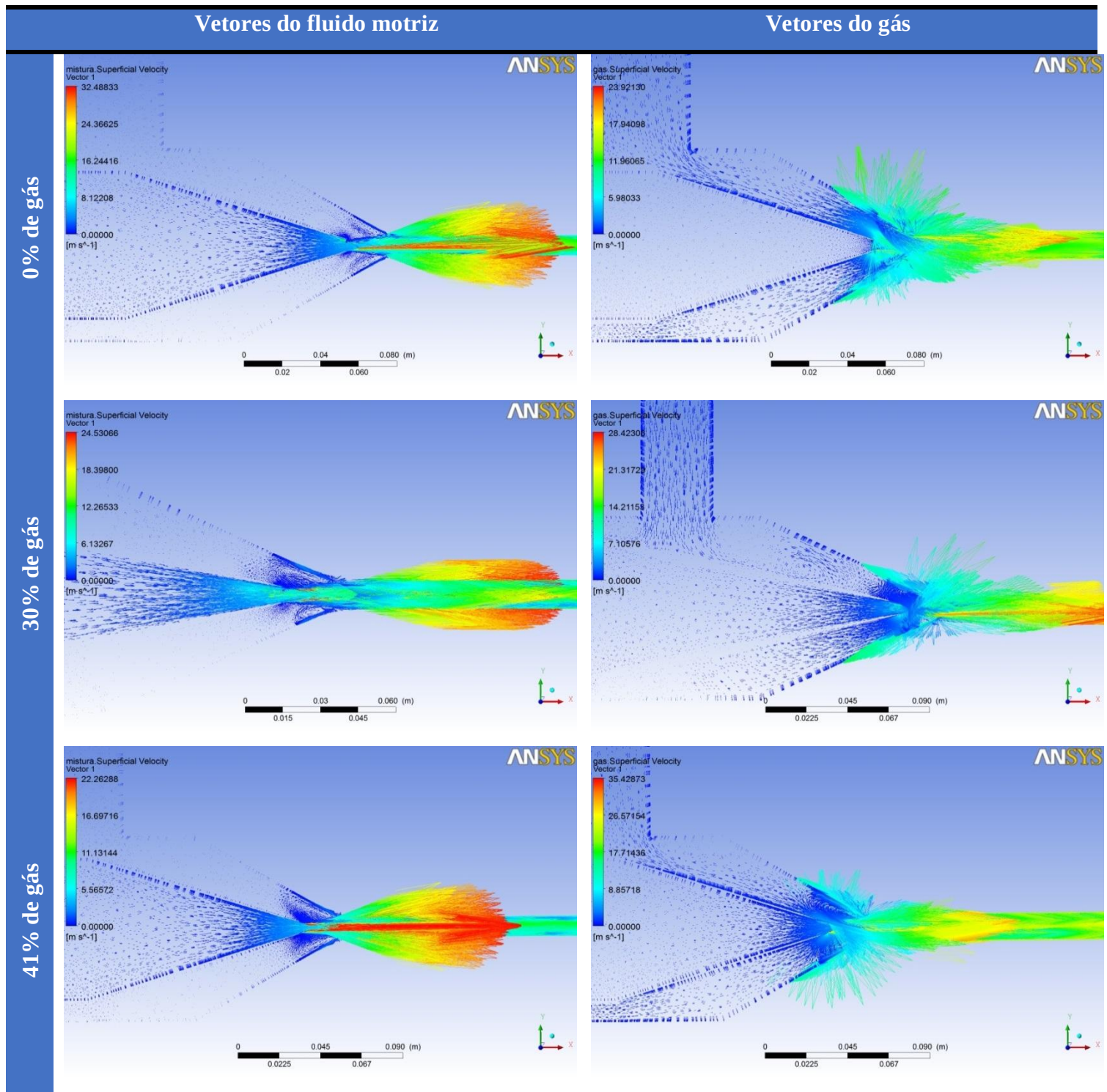
Fonte: Autor

A figura 24 mostra que ao aumentar a fração volumétrica de gás do fluido primário, acaba-se por gerar um pequeno acúmulo de líquido.

4.1.3.2. Comportamento dos vetores velocidade

A figura 25 mostra o comportamento dos vetores velocidade:

Figura 25: Fração volumétrica de gás



Fonte: Autor

Analisando a figura 25 percebe-se que o aumento da fração volumétrica de gás no fluido motriz acaba gerando certa turbulência no sistema, ocasionando o

espalhamento do fluido primário antes do mesmo entrar na câmara de sucção, e o seu consequente acúmulo na câmara de sucção.

4.1.3.3.Comportamento da pressão

A tabela a seguir compara o valor das pressões obtidas analiticamente, com as obtidas na simulação:

Tabela 11: Valores das pressões para vários casos

-	Valores obtidos no WHE (Psi)	0% de gás (Psi)	30% de gás (Psi)	41% de gás (Psi)
Saída Bocal	112,3	150,6	138,4	150,6
Entrada garganta	113,0	130,5	127,5	131,5
Saída garganta	125,1	125,2	117,6	125,6
Difusor	142,2	142,2	142,2	142,2

Fonte: Autor

Ao analisar a disposição da pressão ao longo do ejetor na tabela 11, percebe-se que alguns resultados estão coerentes com os obtidos no *WHE*, e outros não. É possível notar, também, que há uma queda de pressão na região da garganta, região essa que deveria haver recuperação de pressão.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Nesta seção serão apresentadas as principais conclusões obtidas com esse trabalho, juntamente com as recomendações para trabalhos futuros.

Neste trabalho, foi desenvolvida uma análise da performance de ejetores instalados em poços de petróleo. Essa análise foi baseada em resultados obtidos no simulador CFX, comparando com os resultados obtidos analiticamente.

As conclusões obtidas foram:

- O tamanho da câmara de sucção influencia nos resultados finais (quanto menor a câmara, melhor para o desempenho do ejetor);
- A distância entre o bocal e a garganta deve estar entre $3 \times ID$ e $2 \times ID$ da garganta;
- O ejetor alcança seu desempenho máximo em poços com baixa RGL;
- Quanto maior a RGL, maior o espalhamento do fluido primário, ocasionando a colisão do mesmo com as paredes da câmara de sucção e, conseqüentemente, o acúmulo de líquido.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- O estudo mais detalhado da influência da alta RGL no espalhamento do fluido primário;
- Uma análise que quantifique a perda de eficiência do ejetor devido o aumento da RGL, do tamanho da câmara de sucção, e da distância entre o bocal e a garganta;
- Investigar a perda de pressão na garganta;
- Investigar melhor o aumento da fração volumétrica de gás nas áreas de ganho de pressão (saída da garganta e difusor).

A análise realizada produziu resultados satisfatórios, porém, recomenda-se ainda a análise de outras variáveis que resultem em um maior entendimento dos mecanismos que acontecem no ejetor, o que certamente contribuirá para o aperfeiçoamento dos ejetores em poços de petróleo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS, Inc. **ANSYS CFX tutorials**. Disponível em <<http://orange.engr.ucdavis.edu/Documentation12.1/121/CFX/xtutr.pdf>>. Acesso em 01/08/2015.

BROWN, K. E. *The technology of artificial lift methods; electric submersible centrifugal pumps, hydraulic pumping, jet pumping, plunger lift, other methods of artificial lift, planning for and comparison of artificial lift systems (Vol 2b)*. Pennwell Corp, 1982.

CUNNINGHAM, R. G.: *Gas compression with the liquid jet pump*, Journal of Fluids Engineering (Sep. 1974) 203-214.

CUNNINGHAM, R. G. AND DOPKIN, R.J: *Jet breakup and mixing throat lengths for the liquid jet gas pump*. Trans. ASME, J. Fluids Eng., 1974, 96, 216-226

ESDU 85032. (1985) *Ejectors and jet pumps. design and performance for incompressible liquid flow*. Engineering Sciences Data Unit.

FOX, R. W., MCDONALD, ALAN T., PRITCHARD, PHILIP J., **Introdução à mecânica dos fluidos**. 6ª Edição, Livros Técnicos e Científicos – LTC, 2006.

NORONHA, F. A. F.: **Bombeamento hidráulico a jato com sucção bifásica**, MS Thesis, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Brasil (1995).

QUEIRÓZ, C. D. O.: **Desenvolvimento de uma ferramenta computacional para o dimensionamento de ejetores acoplados à cabeça de poço**. 2015. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em engenharia de petróleo). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

WILLIAM, D., MCCAIN, JR., *The properties of petroleum fluids*. 2ª Edition. Pennwell Books, 1990.

WITTE, J. H, *Efficiency and design liquid-gas ejectors*, British Chemical Engineering, Vol. 10, No. 9, 1965, pp. 602-607.