



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIAS RENOVÁVEIS**

**LUIZ ALBERTO FREIRE FILHO**

**PROJETO CONCEPTIVO DE QUEIMADOR TIPO FLARE AUTOASPIRANTE**  
**OPERANDO COM BIOGÁS**

**FORTALEZA**

**2022**

LUIZ ALBERTO FREIRE FILHO

PROJETO BÁSICO DE QUEIMADOR TIPO FLARE AUTOASPIRANTE OPERANDO  
COM BIOGÁS

Trabalho de conclusão de curso apresentado a  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de engenheiro de  
energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. William Magalhães  
Barcellos

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- F933p Freire Filho, Luiz Alberto.  
Projeto básico de queimador tipo flare autoaspirante operando com biogás / Luiz Alberto Freire Filho. – 2022.  
49 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia de Energias Renováveis, Fortaleza, 2022.  
Orientação: Prof. Dr. William Magalhães Barcellos.
1. Razão de equivalência. 2. Biogás. 3. Queimadores atmosféricos. I. Título.

CDD 621.042

---

LUIZ ALBERTO FREIRE FILHO

PROJETO BÁSICO DE QUEIMADOR TIPO FLARE AUTOASPIRANTE OPERANDO  
COM BIOGÁS

Trabalho de conclusão de curso apresentado a  
Universidade Federal do Ceará, como requisito  
parcial à obtenção do título de engenheiro de  
energias renováveis.

Aprovada em: 19/07/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. William Magalhães Barcellos (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Estêvão Rolim Fernandes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Eng. José Welbson Carneiro de Araújo  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus.

Aos meus pais, Lainha e Doutor.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Laboratório de Combustão e Energias Renováveis (LACER) por possibilitar a realização deste trabalho através de sua estrutura.

Ao Prof. Dr. William Magalhães Barcellos, por toda a aprendizagem e acolhimento ao longo desses anos como bolsista do LACER.

Aos integrantes banca examinadora José Welbson, professor Nivaldo e professor Estevão pelo tempo, pelas valiosas colaborações, sugestões e acolhimento.

À todos os meus companheiros de laboratório, em especial aos meus amigos Gabryel Ferreira e João Victor pelo companheirismo e apoio.

Ao minhas amigas Mirella Martins e Eduarda Bezerra por me acompanharem nessa jornada.

Aos meus pais por proporcionar a vida e a estrutura necessária para que eu pudesse seguir até o fim.

Ao banco BNDES e a CAGECE por proporcionar estrutura necessária para realização do projeto.



“O difícil é ser simples” (BARCELLOS, W.  
M. 2019).



## RESUMO

Queimadores atmosféricos são dispositivos que realizam combustão sob baixa pressão manométrica ou pressão atmosférica, podendo ser autoaspirante ou com suprimento de ar ou vapor. As exigências e normas que exigem redução das emissões de gases do efeito estufa estão se tornando cada vez mais rígidas e os queimadores atmosféricos podem ajudar a mitigar esse efeito e proporcionar segurança em diversos casos. O presente estudo realizado através Laboratório de Combustão e Energias Renováveis foi realizado o projeto e simulação de um queimador atmosférico autoaspirado ou *flare* autoaspirado com o fim de analisar a razão de equivalência ( $\Phi$ ) da mistura primária ar combustível, pressão e velocidade ao longo do queimador. O queimador foi projetado para uma pressão de 17 mbar e uma vazão de 0,5 m<sup>3</sup>/h. A análise foi realizada através de cálculos a partir de parâmetros empíricos e simulação computacional utilizando o software COMSOL.

**Palavras-chave:** Razão de equivalência; Biogás; Queimadores atmosféricos.

## **ABSTRACT**

Atmospheric burners are devices that carry out combustion under low gage or atmospheric pressure, and may be self-priming or with air supply. The requirements and regulations that demand the reduction of greenhouse gas emissions are becoming increasingly strict and atmospheric burners can help to mitigate this effect and provide safety in many cases. The present study carried out through the Laboratory of Combustion and Renewable Energies was carried out the design and simulation of this type of burner in order to analyze the equivalence ratio ( $\Phi$ ) of the primary fuel air mixture, pressure and velocity along the burner. The burner is designed for a pressure of 17 mbar and a flow rate of 0.5 m<sup>3</sup>/h. The analysis was performed through calculations from empirical parameters and computer simulation using COMSOL software.

**Keywords:** Equivalence Ratio; Biogas; Atmospheric Burners.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Flare assistido por vapor	8
Figura 2	Flare assistido por ar	8
Figura 3	Flare autoaspirante	9
Figura 4	Velocidade de propagação da mistura ar-metano sob pressão atmosférica	10
Figura 5	Malhas de simulação fluidodinâmica	11
Figura 6	Esquema ilustrativo do flare	13
Figura 7	Gráficos representando diferentes cenários de pressão e coeficiente de descarga.	21
Figura 8	Esquema ilustrativo do flare	23
Figura 9	Desenho do flare com as medidas representadas.	24
Figura 10	Perfil de velocidade do flare	24
Figura 11	Perfil de pressão do flare	25
Figura 12	Perfil de % de ar estequiométrico	25

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 -	Resultados de velocidade obtidos a partir da simulação e do cálculo analítico.	26
Gráfico 2 -	Resultados de pressão obtidos a partir da simulação e do cálculo analítico.	27
Gráfico 3 -	Dissipação de energia no modelo analítico e no modelo numérico.	27
Gráfico 4 -	Numero de Mach ao longo da linha axial de centro.	28
Gráfico 5 -	Velocidade radial ao longo da linha radial da garganta	28

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Composição do efluente	5
Tabela 2	Composição típica do biogás oriundo de ETEs em base volumétrica	5
Tabela 3	Teor de sólidos quanto ao tipo de coleta	6
Tabela 4	Potencial de geração de biogás por substrato.	6
Tabela 5	Razão ar combustível para diferentes combustíveis	10
Tabela 6	Propriedades dos gases relevantes	12

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ASME	Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\%$  Porcentagem
- $\text{\textcircled{R}}$  Marca registrada
- $\beta$  Razão entre diâmetro da garganta e diâmetro da saída
- $\theta$  Razão entre area do bico injetor e área da garganta
- $\mu$  Viscosidade dinâmica do fluido
- $\rho$  Densidade do fluido
- $\Phi$  Razão de equivalência
- $\eta$  Eficiência de pressão

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
3.1	Principais fontes de biogás e suas características.....	4
3.1.1	<i>Biogás resultante de processos industriais e agroindustriais.....</i>	4
3.1.2	<i>Biogás proveniente de aterros sanitários.....</i>	5
3.1.3	<i>Biogás derivado do tratamento de águas residuais.....</i>	5
3.2	Queimadores tipo flare.....	6
3.2.1	<i>Flare assistido por vapor.....</i>	7
3.2.3	<i>Flare assistido por ar.....</i>	8
3.2.3	<i>Flare autoaspirante.....</i>	9
3.3	Métricas para combustão.....	9
3.4	Simulação fluidodinâmica.....	11
4	METODOLOGIA.....	12
4.1	Determinação das condições de contorno.....	12
4.2	Projeto conceutivo.....	13
4.2.1	<i>Dimensionamento do Bico Injetor.....</i>	13
4.2.2	<i>Dimensionamento da Convergente, Garganta e Divergente.....</i>	14
4.2.3	<i>Avaliando Escoamento.....</i>	15
4.3	Simulação	17



	<b>computacional.....</b>	
4.3.1	<i>Seleção do Modelo de Escoamento.....</i>	17
4.3.2	<i>Seleção do Modelo de Transporte de Espécies Químicas.....</i>	17
4.3.3	<i>Formulação de Navier-Stokes.....</i>	18
4.3.4	<i>Formulação de turbulência <math>k-\varepsilon</math>.....</i>	18
4.3.5	<i>Formulação de turbulência <math>k-\omega</math>.....</i>	19
4.3.6	<i>Modelo da placa perfurada.....</i>	20
4.3.7	<i>Malha da simulação.....</i>	20
5	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	22
5.1	<b>Projeto básico.....</b>	22
5.2	<b>Resultado computacional.....</b>	24
5.3	<b>Análise Unidimensional.....</b>	26
6	<b>CONCLUSÃO .....</b>	29
7	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	30

## 1 INTRODUÇÃO

Diante de uma perspectiva de endurecimento das normas ambientais, surge uma pressão para redução da emissão de gases do efeito estufa, dentre eles, dióxido de carbono, hidrocarbonetos e gases sulfurados, cada um com um potencial diferente de absorção de radiação e diferentes tempos de degradação na atmosfera.

Esses gases são gerados de diversas formas, tais como a oxidação de hidrocarbonetos, geração de subprodutos de processos industriais entre outras. Uma das formas que esses gases são apresentados é na forma de biogás. Composto por metano, dióxido de carbono, gases nitrogenados e sulfurados, o biogás pode apresentar composições diferentes dependendo do tipo matéria orgânica que lhe deu origem e suas condições de decomposição.

O biogás pode ser usado como fonte de energia para geração de energia elétrica, ser purificado e usado como combustível para automóveis, processos térmicos em geral. O Brasil em 2018 captou aproximadamente 7,6 bilhões  $\text{Nm}^3$  <sup>[1]</sup>. Entretanto para tais usos existe um custo associado para construção e manutenção desses sistemas de aproveitamento do biogás. Em alguns casos é economicamente inviável sua utilização devido a diversos fatores como rede de distribuição elétrica e escala.

Em diversos casos é inviável economicamente a utilização do biogás, portanto ele seria jogado na atmosfera. O metano, presente de forma majoritária no biogás possui um potencial de aquecimento global de aproximadamente 28 vezes maior que o do dióxido de carbono durante 100 anos, podendo variar com o intervalo de tempo.<sup>[2]</sup>

Lidar com o metano é necessário para desacelerar o processo de mudança climática, e uma das formas de lidar é realizando a sua combustão, o que acelera o ciclo do metano presente no biogás, convertendo-o quase instantaneamente em dióxido de carbono. Existe também a possibilidade de acidentes decorrentes da produção deste gás inflamável, sendo mais vantajoso, por questões ambientais e de segurança, que seja realizada uma queima controlada. Portanto, mesmo que seja viável a construção de um sistema de geração de energia através do biogás, é necessário que haja uma válvula de alívio para evitar acidentes que possam acontecer devido ao aumento de pressão para o caso de uma produção excessiva ou interrupção do funcionamento de sistemas que utilizariam esse biogás.

Os dispositivos *Flares* são responsáveis por realizar a queima de gases. Utilizando estes equipamentos é possível lidar com os problemas apresentados. No presente trabalho foi desenvolvido um equipamento responsável por realizar uma queima controlada deste biogás, sem a necessidade de utilizar energia elétrica para a captação de ar, para que seja possível

contornar o problema mesmo em lugares desconectados da rede elétrica e sejam economicamente inviáveis a implementação de sistemas de geração de energia.

Recentemente, com o aumento da capacidade de processamento computacional, as simulações computacionais tem se tornado cada vez mais comum. É possível reduzir custos com experimentos e elevar a precisão dos cálculos numéricos.

## 2 OBJETIVOS

Dimensionar um protótipo capaz de aspirar a quantidade de ar necessária para realizar a combustão através do vácuo gerado pela injeção de combustível e que seja capaz de suprir as necessidades de uma estação de tratamento de esgoto sem utilizar equipamentos externos para aumentar o suprimento de ar.

Para tal será avaliadas características do escoamento utilizando um modelo unidimensional analítico e um modelo bidimensional numérico simulado através do software COMSOL Multiphysics® afim de observar os efeitos das simplificações utilizadas no modelo unidimensional através observando:

- Velocidade do escoamento
- Pressão do escoamento
- Perdas de carga
- Composição da mistura
- Número de Mach

### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os *Flares* são amplamente utilizados para lidar com o gás gerado pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica e diversos subprodutos de processos químicos industriais. São uma solução para problemas como sobrepessão, odor, risco de explosão e poluição atmosférica [3]. O biogás tem sua composição variando com diversos fatores como o teor de cada macronutriente (lipídios, carboidratos e proteínas) presente no substrato.[8]

#### 3.1 Produção de biogás através da digestão anaeróbia

Através da digestão anaeróbia, a matéria orgânica pode formar metano, dióxido de carbono e traços de gases sulfurados e nitrogenados. O processo bioquímico sob condições especiais, tais como ausência de oxigênio, como o nome sugere, consiste em várias etapas e a composição final do gás dependerá do tipo de substrato utilizado e as condições em que se encontram esses substratos. A temperatura e o potencial hidrogeniônico (pH) também tem grande influencia nesse processo. [4]

A quantidade de biogás gerado por pode ser estimado a partir da sua demanda química de oxigênio (DQO) e sua demanda bioquímica de oxigênio (DBO), parâmetro geralmente utilizado para efluentes com baixa concentração de sólidos, ou pela sua concentração de sólidos voláteis (SV) geralmente utilizado para matéria sólida ou efluentes com alto teor de matéria sólida. [5]

##### 3.1.1 *Biogás resultante de processos agrícolas e agroindustriais*

A grande maioria dos substratos agrários podem ser utilizados para produção de biogás. Este setor da economia também representa a maior produção de biogás no Brasil, principalmente o setor sucroenergético. [8]

O Brasil é um dos maiores exportadores de etanol do mundo e possui a vinhaça, subproduto do processo de produção de álcool a partir da cana de açúcar, como um dos maiores potenciais de geração de biogás. Outro resíduo que é destaque na produção de biogás é o esterco de gado, que corresponde a mais da metade do potencial de biogás do brasil. [8, 9, 10]

Tabela 1: Potencial de geração de biogás por substrato.<sup>[9]</sup>

Substrato	Potencial médio de geração de biogás (Nm <sup>3</sup> /ano)
Aterros sanitários	5956,1
Esgotamento	116,61
Vinhaça	1142,61
Esterco de gado	16856,99

### 3.1.2 Biogás produzido a partir de aterros sanitários

A composição dos resíduos de aterros sanitários pode variar com fatores de como é feito a coleta na região, mudando assim seu potencial de geração de biogás, como por exemplo em lugares que existe separação de lixo orgânico na coleta ou grandes produtores onde se gera muitos alimentos impróprios para o consumo:

Tabela 2: teor de sólidos quanto ao tipo de coleta.<sup>[5]</sup>

Parâmetro	Resíduos misturados	Resíduos separados	Resíduos de grandes produtores
Sólidos totais (ST)	30 – 40%	30 – 40%	15 – 20%
Sólidos voláteis (SV)	50 – 60%	70 – 80%	85 – 95%
Potencial de biogás	450 – 600 Nm <sup>3</sup> /t SV	350 Nm <sup>3</sup> /t SV	850 Nm <sup>3</sup> /t SV
Porcentagem de Metano	60 – 65% CH <sub>4</sub>	60 – 65% CH <sub>4</sub>	55 – 60% CH <sub>4</sub>

### 3.1.3 Biogás derivado da digestão anaeróbia do esgoto

Os efluentes de esgoto no Brasil normalmente possuem mais de 99% de água com baixo teor de resíduos sólidos orgânicos e inorgânicos. A composição do esgoto varia de acordo com a região, dadas as diferenças socioeconômicas e industriais de cada. [6]

A quantidade de biogás gerado pelo efluente depende da quantidade de DQO removida. Reatores anaeróbios normalmente removem entre 60 e 70% da DQO presente em efluentes. A produção de biogás é de 0,35 m<sup>3</sup> de metano para cada quilograma de DQO removida [7]. Na tabela 1 é possível observar a composição aproximada de efluentes urbanos e na tabela 2 a composição do biogás típica oriundo da digestão anaeróbia desse material.

Tabela 3: Composição do efluente. <sup>[6]</sup>.

PARÂMETRO	CONCENTRAÇÃO TÍPICA	FAIXA DE CONCENTRAÇÃO
Sólidos Totais (ST)	1100	700 – 1350 mg/L
Sólidos Voláteis (SV)	320	165 – 350 mg/L
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	300	250 – 400 mg/L
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	600	450 – 800 mg/L
Nitrogênio Total (N)	45	35 – 60 mg/L
Fósforo Total (P)	7	4 – 15 mg/L

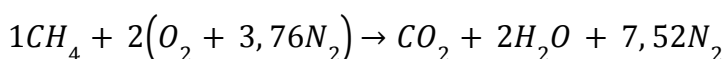
Tabela 4: Composição típica do biogás oriundo de ETEs em base volumétrica. (2011) <sup>[22]</sup>

Parâmetro	Formula	Teor
Metano	CH <sub>4</sub>	65 a 85%
Gás carbônico	CO <sub>2</sub>	5 a 15%
Monóxido de carbono	CO	0 a 0,3%
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	10 a 25%
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	0 a 3%
Sulfeto de hidrogênio	H <sub>2</sub> S	1000 a 2000 ppmv
Oxigênio	O <sub>2</sub>	Traços

### 3.2 Queimadores Flare

Os queimadores *Flare* são dispositivos utilizados para realizar combustão, seja de subprodutos indesejados ou de gases de reservatórios onde a pressão está acima da desejada para o reservatório. Esta pressão excedente pode ser causada por fenômenos como aumento de temperatura ou produção excessiva de gases por exemplo. Existe interesses ambientais e legais em queimar os combustíveis ao invés de simplesmente jogá-los na atmosfera.[3, 11]

A combustão por sua vez é o processo de oxidação do combustível, na qual geralmente o ar é utilizado como oxidante. Existem várias reações responsáveis pelo processo, mas comumente são omitidas as reações intermediárias. Para o caso do metano como combustível a reação ficará expressa de acordo com a equação (1):



(1)

O que quer dizer que para cada mol de metano será necessário 9,52 mols de ar para a mistura estequiométrica.

As chamas geradas no processo podem ser divididas em duas categorias: as chamas pré-misturadas e chamas por difusão. As chamas pré misturadas são aquelas em que o combustível e o ar já estão misturado antes de alcançarem a chama, e nas chamas por difusão, apenas o combustível é fornecido primariamente. Existe um parâmetro para medir a relação entre a quantidade mínima de ar necessária para a combustão completa e a quantidade de ar presente na mistura real chamada razão de equivalência ( $\Phi$ ) que pode ser calculada de acordo com a equação (2) <sup>[12]</sup>:

$$\Phi = \frac{\left(\frac{A}{F}\right)_{estequiométrico}}{\left(\frac{A}{F}\right)_{real}} \quad (2)$$

Onde A é a quantidade de ar em base mássica e F a quantidade de combustível base mássica.

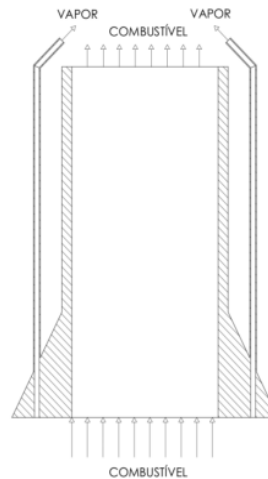
Os *Flares* podem ser divididos de duas formas, quanto a sua elevação ou quanto a assistência recebida, seja de ar, vapor ou outro gás inerte. Os flare podem ser elevados ou terrestres dependendo das necessidades de segurança, e ter assistência de ar, vapor ou gases inertes dependendo do tipo de combustível e disponibilidade. <sup>[13]</sup>

### 3.2.1 *Flares assistidos por vapor*

São geralmente elevados por questões de segurança, e geram chamas por difusão essencialmente. É injetado vapor em alta velocidade na zona de combustão para gerar turbulência (fenômeno que facilita a mistura entre o ar combustível). Além disso, a alta velocidade da injeção de vapor gera uma queda de pressão e naturalmente o ar é aspirado desta forma. É bem comum na indústria petroquímica. Uma das desvantagens é o alto custo envolvido na geração e canalização do vapor. <sup>[13]</sup>

A quantidade de vapor injetado é proporcional a quantidade de ar necessária para realizar a combustão. O vapor pode ser injetado através de um injetor no centro do flare ou na periferia. Além da aspiração de ar e turbulência, é possível reduzir a temperatura da combustão <sup>[14]</sup>. Na figura 1 pode-se observar um desenho ilustrativo de um flare assistido a vapor.





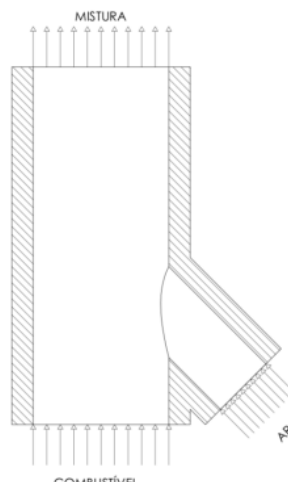
*Figura 1: Flare assistido por vapor. Fonte: o autor*

### **3.2.2 Flares assistido por ar**

A assistência de ar pode ser realizada através de injeção sob alta pressão ou um soprador. A injeção sob alta pressão de ar é consideravelmente menos eficaz que a injeção de vapor, mas pode ser uma boa opção para algumas situações. Normalmente a assistência de ar se dá através de um soprador. <sup>[15]</sup>

O custo em relação ao flare assistido por vapor pode ser vantajoso para escalas menores ou quando não existe vapor a disposição. Usualmente para escalas maiores, quando a vazão de combustível é muito alta ou o combustível requer muito ar torna-se mais vantajoso utilizar o vapor para captação de ar <sup>[16]</sup>. A figura 2 mostra um exemplo de um flare assistido por ar.

*Figura 2: Flare assistido por ar Fonte: o autor*



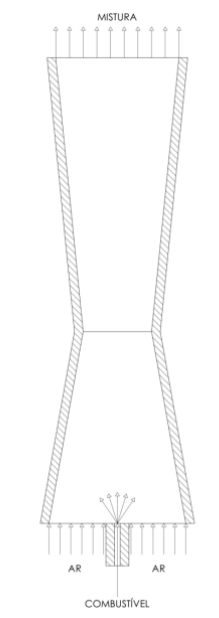
### 3.2.3 Flares autoaspirantes

Utilizado para combustíveis de baixo poder calorífico, consiste em um queimador com geometria para captação de ar a partir da injeção de combustível em alta velocidade. A aceleração de um escoamento resulta numa queda de pressão. Neste caso a queda de pressão gera um escoamento de ar no sentido do centro do jato de combustível em alta velocidade. Este escoamento pode ser modelado a partir das equações de conservação de energia. Desprezando o atrito e a energia potencial, o balanço de energia pode ser expresso de acordo com a equação (3) [17, 18].

$$P_1 + \rho_1 \frac{V_1^2}{2} = P_2 + \rho_2 \frac{V_2^2}{2} \quad (3)$$

Onde P indica pressão, V indica velocidade e  $\rho$  indica a densidade. Graças a este fenômeno o custo é consideravelmente reduzido visto que não existirá necessidade de vapor nem suprimento de ar. Na figura 3 é apresentado um esquema de um flare autoaspirante.

Figura 3: Flare autoaspirante. Fonte: O autor

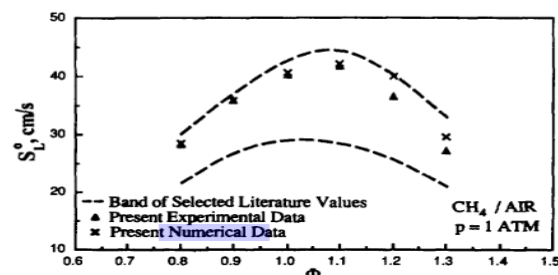


### 3.3 Métricas para combustão

Para mitigar a emissão de gases como monóxido de carbono ou hidrocarbonetos durante a combustão, é necessário que a combustão ocorra de forma completa. O oxigênio necessário para a combustão, na prática, vem do ar. São raros os casos em que se utiliza oxigênio puro.

A chama se propaga de forma diferente para cada combustível e teor de ar em sua mistura ar-combustível. Portanto para manter a chama controlada seria necessário uma velocidade de escoamento ideal, ajustado para a velocidade da propagação da chama, por exemplo, a mistura ar-metano na proporção  $\Phi = 1$  possui uma velocidade de propagação de aproximadamente 0,4 m/s na pressão atmosférica. [19, 20] na figura 4 podemos ver o comportamento da velocidade de propagação de chama do metano.

Figura 4: Velocidade de propagação da mistura ar-metano sob pressão atmosférica<sup>[19]</sup>



É possível observar uma correlação entre o teor de carbono de um combustível e a quantidade de ar necessária. Na tabela a seguir é possível observar esta correlação, que é negativa para a razão ar-combustível na base mássica e positiva na base molar devido ao fato de que combustíveis com maior teor de carbono são mais densos:

Tipo de combustível	Formula	Massa molar (kg/kmol)	Razão ar combustível estequiométrico (base mássica)	Razão ar combustível estequiométrico (base molar)
Metano	CH <sub>4</sub>	16,04	17,23	9,54
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	44,1	15,67	23,86
Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86,18	15,24	45,35
Isotano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,2	15,14	59,7
Metanol	CH <sub>3</sub> OH	32,04	6,47	7,16
Etanol	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> O	46,07	9	14,32

---

*Tabela 5: razão ar combustível para diferentes combustíveis. [21]*

---

Dois trabalhos semelhantes utilizam venturis operando com gás propano e gás liquefeito de petróleo [27, 18]. Em ambos os trabalhos foram modeladas formas de otimizar a aquisição de ar e reduzir perdas. O biogás por sua vez possui gases que não participam diretamente das reações de combustão. A quantidade de ar necessária para completude da reação portanto depende da fração de metano. Outro parâmetro que foi utilizado para mensurar a o teor de ar na mistura é o parâmetro de aeração PA, que pode ser descrito como na equação (4):

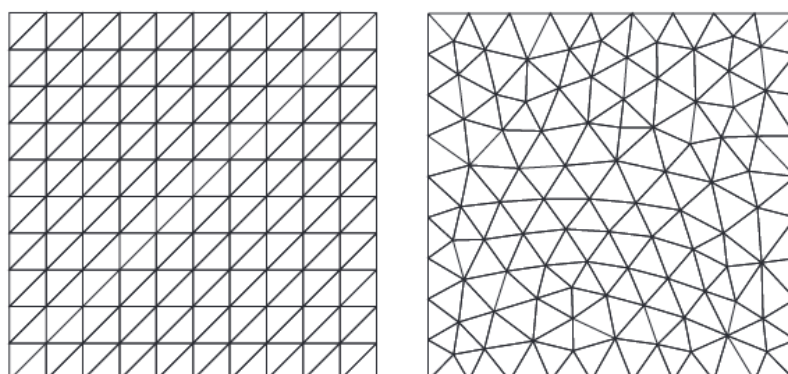
$$PA = \frac{n_{estqeuimetria}}{n_{real}} \quad (4)$$

onde n é o numero de mols.

### 3.4 Fluidodinâmica computacional

Popularmente chamado pela sigla CFD (Computational Fluid Dynamics), a fluidodinâmica computacional tem papel fundamental na industria e no meio academico. Se trata de uma forma de discretizar determinada geometria para realizar cálculos complexos de forma rápida e precisa.

Essa discretização ocorre através da construção de uma malha na geometria que pode ocorrer de forma estruturada ou não estruturada. Chama-se de malha estruturada quando todos os elementos da malha possuem geometrias uniformes, já na malha não estruturada, cada elemento pode possuir formas diferentes. Geralmente são realizados os cálculos baseados nas equações de Navier-Stokes como modelo fluidodinâmico [35]. Na figura 5 é possível observar a diferença entre malhas estruturadas e não estruturadas.



(a)

(b)

Figura 5: (a) Malha estruturada, (b) Malha não estruturada [36]

## 4 METODOLOGIA

O estudo será realizado para atender a necessidade de uma estação de tratamento de esgoto. Inicialmente três parâmetro devem ser observados para iniciar a definição da geometria, são esses a pressão, a vazão e o tipo de combustível. O combustível em questão será simulado como uma mistura de dióxido de carbono e metano com valores típicos do biogás oriundos de digestão anaeróbia do esgoto. A pressão e a vazão utilizadas para o calculo serão referentes a um estudo de caso de uma estação de tratamento de esgoto com geração de energia.

### 4.1 Estimativa das condições de contorno

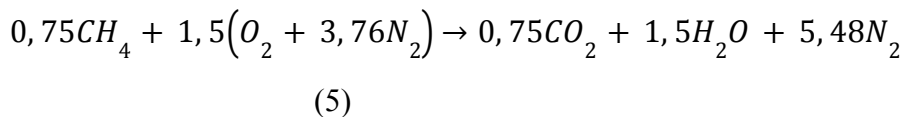
Inicialmente é necessário obter as propriedades do combustível. Na literatura se encontram as propriedades dos gases que compõe o biogás e podemos calcular sua densidade média. Utilizando a tabela 2 serão utilizados os valores médios dos gases com maior relevância que no caso são dióxido de carbono, nitrogênio e metano.

Tabela 6: propriedades dos gases relevantes. [21]

Gás	Fração	Massa molar (kg/kmol)	Densidade absoluta (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade relativa (ar)
Metano	0,75	16,04	0,66	0,59
Dióxido de Carbono	0,1	44,01	1,79	1,6
Nitrogênio	0,15	28	1,14	1,02

Mistura	1	19,53	0,85	0,69
---------	---	-------	------	------

Com os dados da tabela é possível também calcular a quantidade mínima necessária para que a combustão completa aconteça. Já que o único gás passível de sofrer oxidação dentro da composição que estamos levando em consideração é o metano, a reação química simplificada pode ser expressa na forma da equação (5):

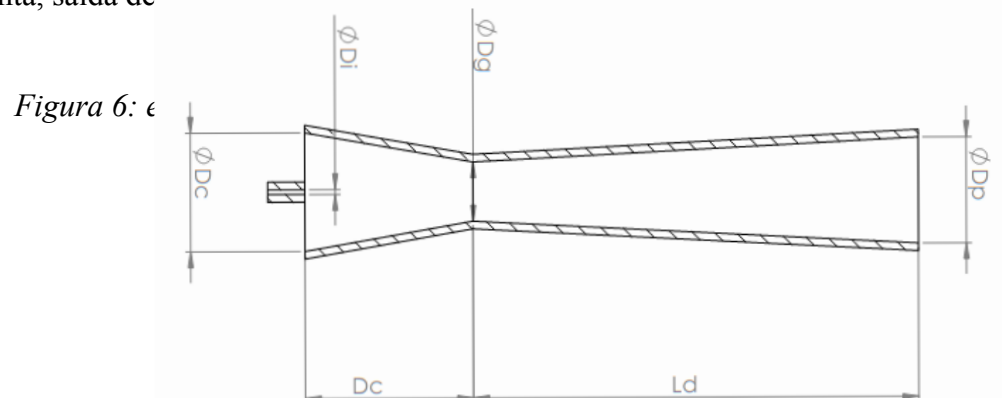


É possível observar que é necessário aproximadamente 7,14 mols de ar para que a combustão completa de um mol de biogás ocorra. Duas coisas devem ser levadas em consideração com esse fato, primeiro que se assumirmos o pressuposto de gases ideais, a proporção para volume se mantém igual a proporção molar, segundo é a que mesmo que a densidade seja maior que a do metano, é necessário uma proporção menor de ar para combustão.

Para este projeto, a vazão de biogás será de 0,5 m<sup>3</sup>/h. A pressão disponível em biodigestores varia entre 0 e 37 milibar <sup>[23]</sup> e o Cd depende da geometria.

#### 4.2 Projeto conceitual

Após obter os dados necessários foi definido a geometria, que tem papel importante em otimizar ou regular a entrada primária de ar. As principais seções do flare são: Bico injetor, garganta, saída de



#### 4.2.1 Dimensionamento do bico injetor

O escoamento através de um bico injetor depende de seu coeficiente de descarga  $C_d$ , da área de saída do bico injetor e da densidade do gás em questão. Coeficiente de descarga por sua vez é a razão entre o vazão do escoamento real e a vazão do escoamento ideal, portanto quanto mais próximo de 1 menor será a perda de energia do escoamento. O  $C_d$  pode ser definido de acordo com a equação (6) [17]:

$$C_d = \frac{m}{\sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (6)$$

onde  $m$  é a vazão mássica,  $\rho$  é a densidade do gás e  $\Delta P$  é a diferença de pressão entre a entrada e a saída. Rearranjando a equação obtém-se a equação (7):

$$Q = 0,0467 \times C_d \times A_i \times \frac{\sqrt{\Delta P}}{\sqrt{s}} \quad (7)$$

onde  $Q$  é a vazão volumétrica em  $\text{m}^3/\text{h}$ ,  $\Delta P$  é a diferença entre a pressão antes e depois do orifício em milibar,  $s$  é a densidade relativa do gás tendo ar como fluido referência e  $A_i$  é a área do bico injetor. Quando se trata de bicos injetores com a parte interna cônica o  $C_d$  pode variar de 0,75 até 0,95 [24]. Com essas informações é possível criar cenários para diferentes  $C_d$ .

#### 4.2.2 Dimensionamento da Garganta e difusor

Na garganta passa a mistura ar-combustível, ou seja, a velocidade do escoamento depende também da entrada de ar. Para calcular iremos chamar de  $\eta$  a eficiência de pressão, que pode ser expressa como na equação (8) [18]:

$$\eta = \frac{P - P_o}{\frac{\rho_g V_g^2}{2A_i}} \quad (8)$$

Onde  $P_p$  é a pressão brevemente antes da saída,  $P_o$  é a pressão atmosférica  $\rho_g$  é a densidade do combustível,  $V_i$  é a velocidade do combustível na injeção e  $A_i$  é a área do bico injetor. Se o valor for 1 quer dizer que toda a energia cinética do combustível na injeção foi convertida em em pressão próximo a saída do flare.

Se chamarmos de  $\theta$  a razão entre a área do bico injetor e a área da garganta e derivarmos  $\eta$  em relação a  $\theta$  para obter a máxima eficiência de pressão obtem-se a equação (9):

$$\theta_{(\eta_{m\acute{a}x})} = \frac{A_g}{A_t} = \frac{s}{(s+r) \times (1+r) \times (1+K)} \quad (9)$$

onde  $s$  é a densidade relativa do gás,  $r$  é a razão entre a vazão de ar e a vazão de combustível e  $K$  é o coeficiente de perda de carga ao longo do difusor. De acordo com a American Society of Mechanical Engenieers, citado por Feitosa Filho <sup>[25]</sup>, o difusor deverá ter entre 5 e 7 graus. O coeficiente de perda de carga é dada pela equação (10) <sup>[26]</sup>:

$$K = \frac{2,6 \times \text{sen}(0,5\alpha) \times (1-\beta^2)^2}{\beta^4} \quad (10)$$

onde  $\beta$  é a razão entre o diâmetro do começo do divergente e o diâmetro do final do divergente e  $\alpha$  é o ângulo formado pelas paredes do divergente. O comprimento do divergente para otimizar a entrada de ar deve estar entre 6 e 9 vezes o diâmetro da garganta e a distancia entre o bico e a garganta do venturi deverá ser de acordo com a equação (11) proposta por Salvi (1975) citado por Carrillo Ibañez <sup>[27]</sup>:

$$L_{it} = 2,22D_g + 15 \quad (11)$$

#### 4.2.3 Avaliação do Escoamento

A velocidade de escoamento tem o papel de evitar a propagação da chama no



sentido indesejado. Vimos que a propagação de chama para o metano é de aproximadamente 0,4 m/s dependendo das condições. A velocidade de propagação de chama depende também da condição do escoamento (se é turbulento ou laminar). O número de Reynolds é um número adimensional que serve de parâmetro para estimar as condições do escoamento e pode ser escrito da como na equação (11):

$$Re = \frac{DV\rho}{\mu} \quad (12)$$

Onde D é o diâmetro de onde acontece o escoamento, V é a velocidade do escoamento,  $\rho$  é a densidade do fluido e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do fluido. Utilizando identidades trigonométricas é possível conseguir escrever o diâmetro e a velocidade em função da posição no divergente de acordo com as equações (13) e (14):

$$D(x) = D_t + x2tg(0,5\alpha) \quad (13)$$

$$V(x) = \frac{4Q_g(1+r)}{\pi(D_t+x2tg(0,5\alpha))^2 \times 10^{-6} \times 3600} \quad (14)$$

Onde Q é a vazão volumétrica de combustível em m<sup>3</sup>/h e x é a posição no divergente em relação a garganta em milímetros. Utilizando uma média ponderada das viscosidades dos 3 gases que compõe o biogás simulado de  $\mu = 11,84 \mu\text{Pa/s}$  [28, 29, 30] e substituindo os valores e as equações 13 e 14 na equação 12, obtemos um Reynolds de aproximadamente 1146,8. Isso representa um escoamento laminar [17]. Nestas condições a velocidade de propagação para uma concentração de metano de 72,5% é de aproximadamente 0,25 m/s [31]. Na prática podem existir situações em que a alimentação seja menor do que aquela para qual o flare foi projetado, fazendo com que o escoamento possa ter uma velocidade menor que a velocidade de propagação de chama, portanto, para evitar o retrocesso da chama será necessário a utilização de uma placa perfurada para acelerar o escoamento.

A placa perfurada por sua vez possui um  $C_d$  que pode alterar o escoamento, utilizaremos o coeficiente de descarga da placa perfurada  $C_{dp} = 0,9$  com base no trabalho de Kolodzie [32]. Com isso teremos uma diminuição da entrada de ar, visto que a vazão de

combustível permanecerá a mesma. Assumindo  $Q_{mi}$  como a vazão da mistura desconsiderando a placa perfurada e  $Q_m$  a nova vazão obtemos a equação (15):

$$Q_m = Q_{mi} \times C_{dp} = Q(1 + r) \quad (15)$$

Para obter a pressão ao longo do divergente chamaremos a velocidade de entrada do ar de  $V_a$  e alguns pressupostos serão assumidos:  $A_i \ll A_t$  e  $V_a^2 \ll V_g^2$ . A partir da equação (3) e esses pressupostos podemos obter o balanço de energia descrito na equação (16):

$$P = \frac{\rho_g Q^2}{A_i A_t} - \frac{\rho_m Q_m^2}{2A_t^2} \times (1 - K) \quad (16)$$

Escrevendo  $K$  em termos de  $x$  e chamando o primeiro termo de  $C_1$  e o coeficiente que multiplica  $(1-K)$  de  $C_2$  obtemos a equação (18):

$$P(x) = C_1 - C_2 \cdot \left( 1 - \frac{\left( 2,6 \operatorname{sen}(0,5\alpha) \cdot \left( 1 - \left( x \cdot \tan \frac{(0,5\alpha)}{D_t} + 1 \right)^{-2} \right)^2 \right)}{\left( x \cdot \tan \frac{(0,5\alpha)}{D_t} + 1 \right)^{-4}} \right) \quad (17)$$

Assim é possível descrever a pressão em cada posição do divergente.

### 4.3 Simulação computacional

Uma simulação computacional será realizada para visualizar de forma mais clara o perfil do escoamento. Visto que será acoplado a mistura de espécies químicas e o escoamento, o software COMSOL Multiphysics 5.3a será utilizado, pois ele tem a capacidade de acoplar diferentes físicas de forma simples.

#### 4.3.1 Seleção do Modelo de Escoamento

A primeira coisa a ser levada em consideração é que se trata de uma injeção de combustível em alta velocidade, o que quer dizer que mesmo obtendo um valor de número de Reynolds baixo devemos considerar o modelo turbulento.

Existem diversos modelos de turbulência presentes no software e todos eles utilizam as equações de Navier-Stokes com o termo de turbulência por conta da viscosidade. Estes modelos se diferem entre si pela forma em que esse termo de turbulência é calculado. Este conjunto de modelos de turbulência se chama *Reynolds Averaged Navier-Stokes* (RANS) presente em diversos softwares de simulação.

Os dois modelos utilizados são: k-ε e k-ω. O modelo k-ε possui uma precisão inferior ao modelo k-ω principalmente quando se trata de jatos, como é o caso do bico injetor. Entretanto, o modelo k-ω possui maior custo computacional e para acelerar a convergência, utilizaremos o modelo k-ε para obter valores razoáveis para um chute inicial no modelo k-ω. [33].

Em ambos os modelos k representa a energia cinética de turbulência enquanto a ε e ω formas de dissipação de energia, ε como taxa de dissipação de energia cinética turbulenta e ω a dissipação de energia específica. São modelos já consolidados e validados, possuem ampla aplicação em projetos de engenharia. [34]

#### ***4.3.2 Modelo de Transporte de Espécies Químicas***

Os dois modelos de transporte de espécies químicas a serem levados em consideração serão o transporte de espécies diluídas ou transporte de espécies concentradas. Os modelos utilizam mecanismos de convecção e difusão, cujas concentrações são calculadas a partir das equações de conservação de massa, entretanto o modelo de espécies concentradas é utilizado quando a quantidade de cada componente possuem ordem de grandeza parecidos, portanto será utilizado o modelo de espécies concentradas.

#### ***4.3.3 Formulação de Navier-Stokes***

Os modelos de turbulência são baseados nas equações de Navier-Stokes que formulam a conservação de massa, momento e energia. A equação (18) diz respeito a conservação de massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\rho u_j) = 0$$

(18)

O primeiro termo representa a variação temporal de massa e o segundo termo representa a variação advectiva.

A conservação de momento além dos termos temporal e advectivo possui também os termos de difusão e fonte (que pode ser negativa, o que caracteriza difusão) mostradas na equação (19):

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j u_j)}{\partial x_j} = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot \mu \cdot \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + S_m$$

(19)

os termos do lado direito representam a variação de pressão, o efeito da viscosidade e as forças externas de campo, como a gravidade ou campo magnético <sup>[17]</sup>.

#### 4.3.4 Formulação de turbulência k-ε

Os modelos de turbulência k-ε e k-ω são baseados no conceito de viscosidade turbulenta, entretanto ela é formulada de formas diferentes em cada modelo. Essa viscosidade, para o caso do modelo k-ε pode ser descrito de acordo com a equação (20):

$$\mu_t = \frac{\rho C_\mu k^2}{\epsilon}$$

(20)

onde k é a energia cinética de turbulência, ε é a dissipação e C<sub>μ</sub> é uma constante do modelo. Assim a equação (19) pode ser reescrita na forma da equação (21) se considerarmos regime permanente:

$$\frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial x_j} = \frac{-\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\mu + \mu_t) \cdot \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\mu + \mu_t) \cdot \left( \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \right) + S_m$$

(21)

Por sua vez, o valor de k pode ser calculado diretamente através da equação (22):

$$U_j \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon$$

(22)

e o valor da taxa de dissipação  $\epsilon$  é dada pela equação (21):

$$U_j \frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} \left( P_k c_{\epsilon_1} - c_{\epsilon_2} \rho \epsilon \right)$$

(23)

onde  $c_{\epsilon_1}$ ,  $c_{\epsilon_2}$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\epsilon$  são constantes do modelo e  $P_k$  é a taxa de produção de energia cinética turbulenta que pode ser escrita como na equação (22):

$$P_k = \mu_t \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

(24)

#### 4.3.5 Formulação de turbulência $k-\omega$

Para a o modelo  $k-\omega$ , a viscosidade turbulenta é escrita conforme a equação (23):

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega}$$

(25)

Onde  $\omega$  representa a taxa de dissipação específica. A energia cinética turbulenta  $k$  neste modelo, por sua vez pode ser modelada como na equação (24):

$$U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t \sigma_w}{\rho} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta * k \omega$$

(26)

e a taxa de dissipação específica pode ser expressa de acordo com a equação (25):

$$U_j \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t \sigma}{\rho} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] - \beta \omega^2 + \frac{\sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} + P_k \frac{\alpha \rho}{\mu_t} \quad (27)$$

onde  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta^*$ ,  $\sigma$  e  $\sigma_w$  são constantes do modelo.

#### 4.3.6 Modelo de placa perfurada

Para modelar a placa perfurada o utiliza-se o coeficiente de resistência que diz respeito a perda de pressão causada pelo anteparo. Solidez é uma característica que serve como parâmetro para calcular este coeficiente conforme as equações (27) e (28):

$$\sigma_s = \frac{A_{solida}}{A_{total}} \quad (27)$$

$$K = 0.94 \left( (1 - \sigma_s)^{-2} - 1 \right)^{1.28} \quad (28)$$

Onde  $\sigma_s$  é a solidez e  $K$  é o coeficiente de resistência. Entretanto este modelo possui validade apenas para a faixas de  $0,72 < \sigma_s < 0,9$ . Portanto outro modelo que contempla uma faixa mais ampla ( $0,05 < \sigma_s < 0,95$ ) de aplicação foi usado, como se observa na equação (29) [38]:

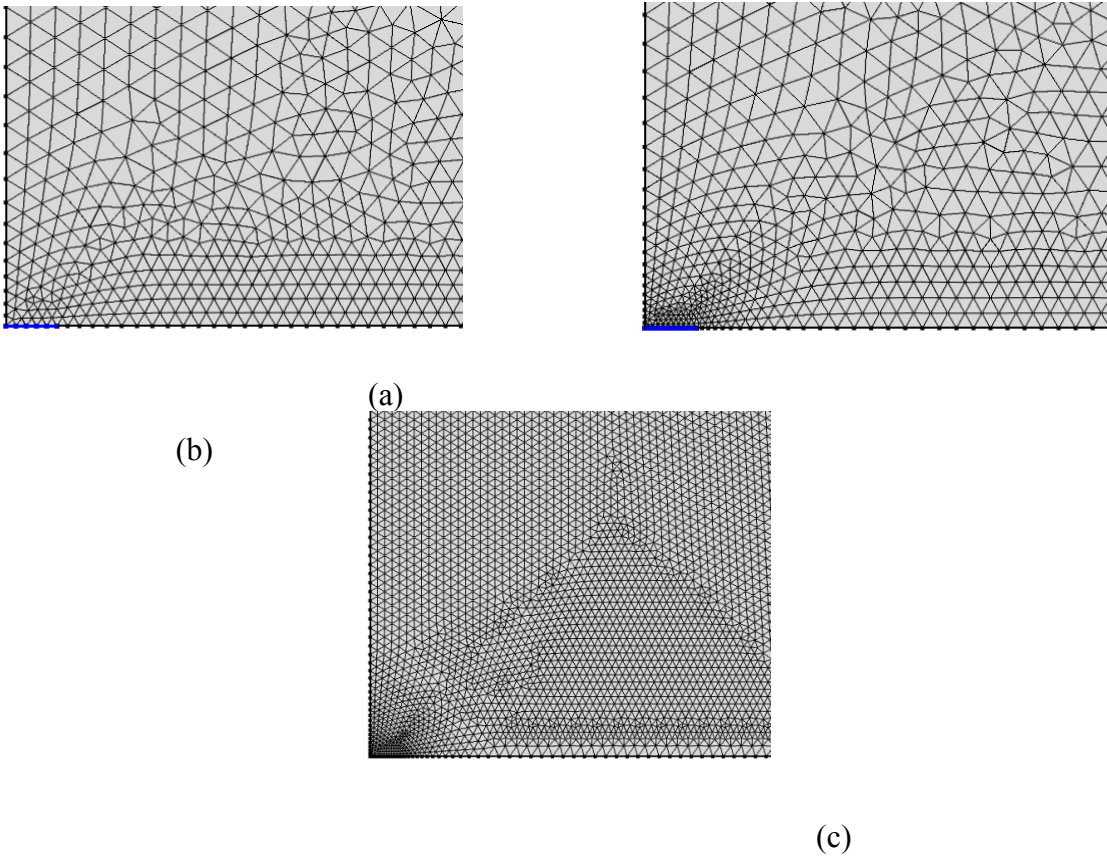
$$K = \frac{0,94}{\left( 1 + 3 \left( \frac{t}{D_{furo}} \right)^4 \right)} \quad (29)$$

#### 4.3.7 Malha da simulação

Diversas malhas foram construídas afim de diminuir o custo computacional. Além de utilizar um modelo com menos complexo como o k- $\epsilon$  para obter um bom chute inicial, foram construídas duas malhas diferentes com diferentes níveis de refinamento. Modelos de turbulência exigem uma malha mais refinada para bons resultados devido as pequenas oscilações de velocidade onde seriam os vórtices.

As malhas podem ser geradas automaticamente utilizando a malha padrão para o modelo no COMSOL Multiphysics, entretanto é possível alterar o refinamento da malha em regiões específicas cujo os gradientes das variáveis a serem calculadas possam ser mais significativos, como por exemplo na região do bico injetor, onde um jato em alta velocidade é submetida a pressão atmosférica ocasionando num gradiente de pressão e velocidade importantes para o resultado do modelo. Na figura 7 pode-se observar a diferença entre as malhas utilizadas.

*Figura 7: (a) Malha com 5 elementos no bico injetor, (b) Malha com 10 elementos no bico injetor (c) Malha refinada com 10 elementos no bico injetor. Fonte: o autor*



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

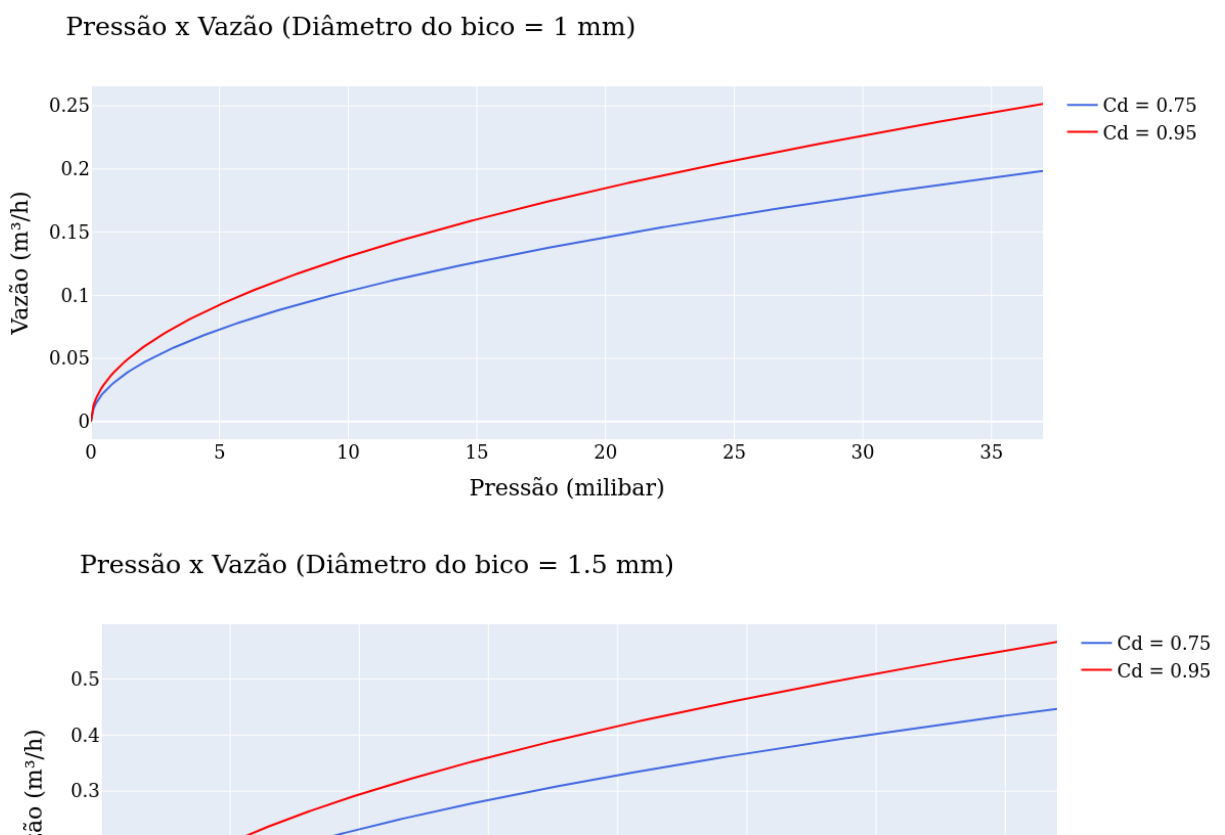
Os perfis de pressão e velocidade obtidos através do projeto básico e da simulação são ligeiramente diferentes. O projeto básico se trata de uma modelagem unidimensional e algumas premissas mais significativas do que o modelo RANS, portanto essa diferença é esperada.

### 5.1 Resultado Analítico

A partir da utilização de bicos injetores com diâmetros comerciais próximos do esperado a partir do encontrado pela literatura e da equação 6 pode-se observar os gráficos presentes na figura 8:

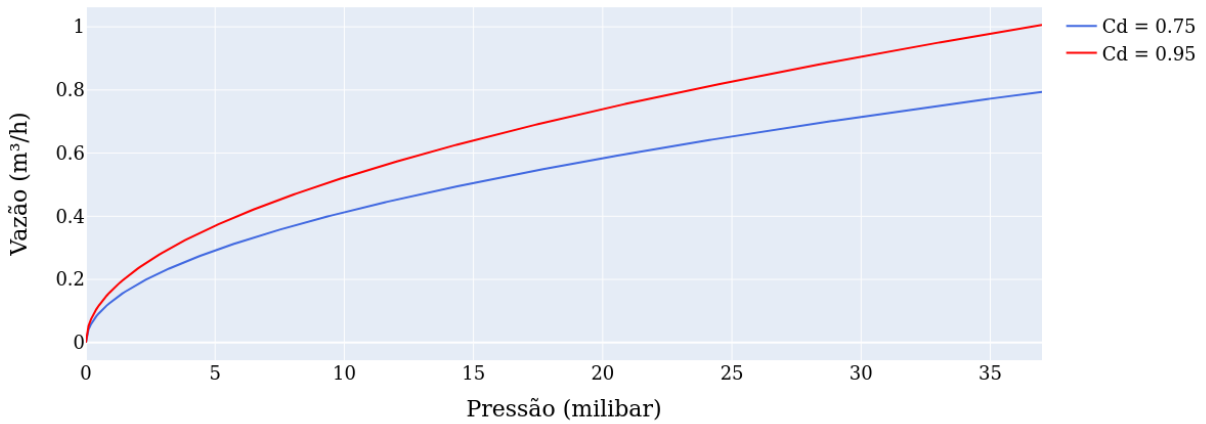
Figura 8 – gráficos representando diferentes cenários de pressão e coeficiente de descarga.

Fonte: o autor.

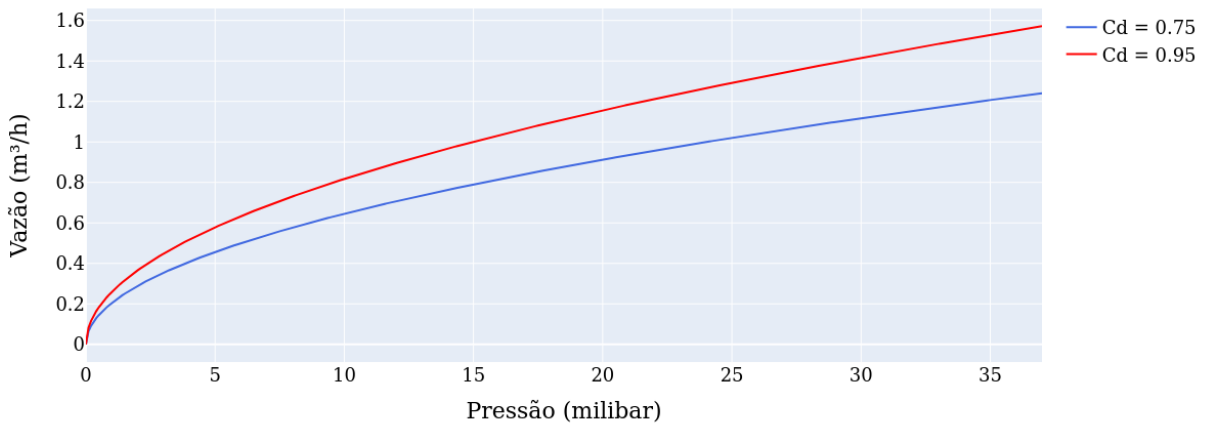




Pressão x Vazão (Diâmetro do bico = 2 mm)



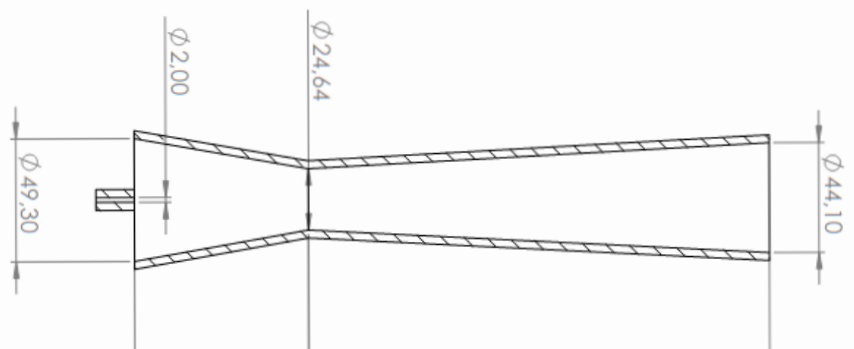
Pressão x Vazão (Diâmetro do bico = 2.5 mm)



Utilizando o  $C_d$  mínimo para o bico injetor, a pressão media de 17 milibar como disponível e o bico injetor de 2 milímetros, a vazão obtida foi de 0,53 m³/h. É um valor satisfatoriamente próximo de 0,5 m³/h. Um ajuste mais fino é possível, mas o fato de 2 milímetros ser um diâmetro mais comercial pode tornar o projeto mais viável.

Utilizando o valor médio para o comprimento do divergente sugerido pela ASME de 7,5 vezes o diâmetro da garganta e o ângulo médio para o divergente de 6 graus é possível encontrar o coeficiente de perda aproximado de  $K = 0,65$  através da equação 9. Se utilizarmos a vazão de ar suficiente para 70% mistura estequiométrica do biogás sugerido na tabela 6 e substituirmos na equação 8 obtemos  $A_t = 478,82 \text{ mm}^2$ , que equivale a um diâmetro  $D_t = 24,69 \text{ mm}$  e um comprimento de difusor de  $L_d = 185,17 \text{ mm}$  de acordo com a equação 10. Já o comprimento do converge geometria mostrada na figura

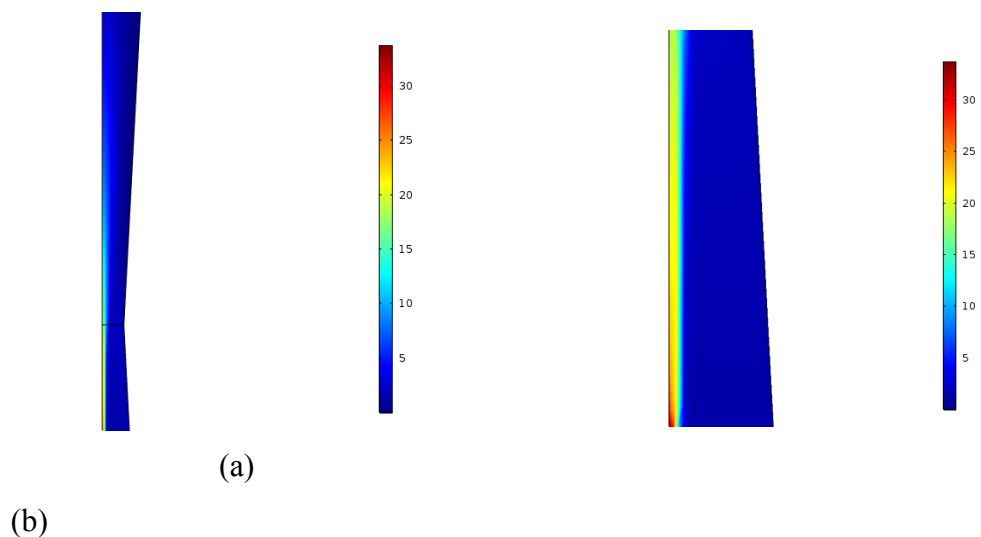
Figura 9: De



## 5.2 Resultado Computacional

Na imagem 5 observa-se o perfil de velocidade. Na linha de centro próximo da posição do bico injetor a velocidade atinge valores superiores a 30 m/s e em sua periferia a velocidade está abaixo de 5m/s. A alta velocidade da linha de centro se dissipa ao longo do divergente uniformizando a velocidade do escoamento no sentido radial. Conforme mostra a figura 10:

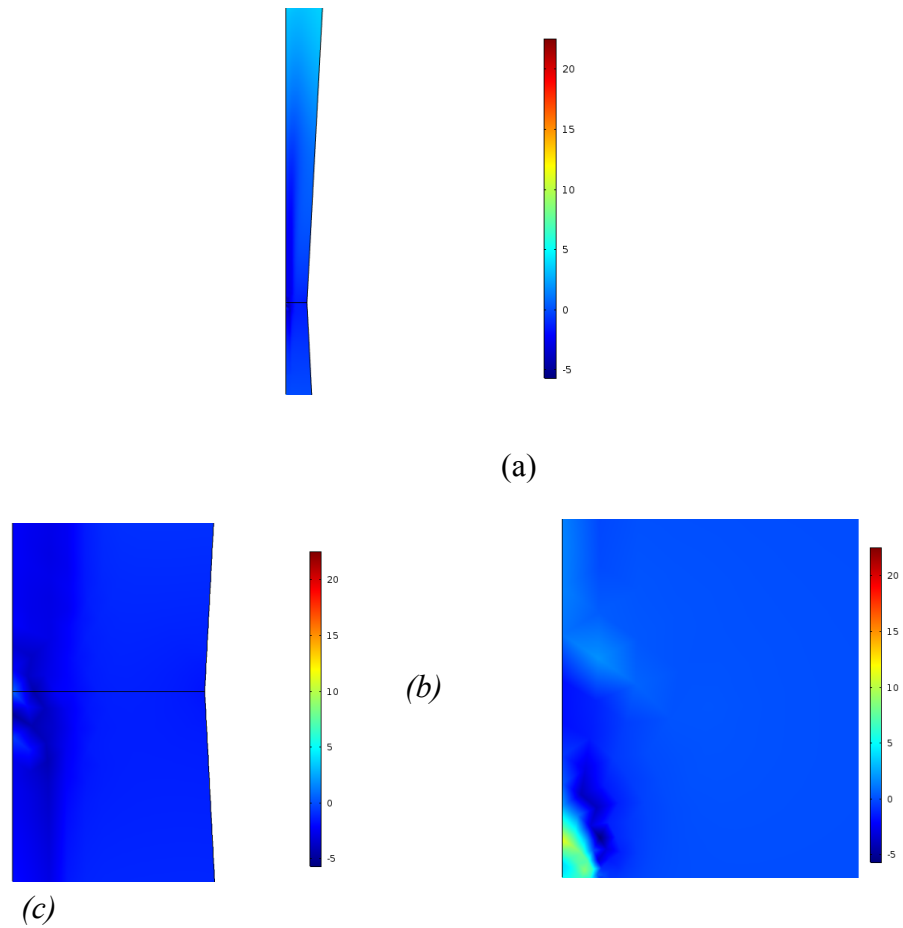
*Figura 10: (a) Perfil de velocidade em m/s do flare obtido a partir de simulação computacional; (b) Perfil de velocidade próximo do bico injetor.*



O perfil de pressão mostra a pressão negativa gerada pela alta velocidade de linha de centro e pela aceleração da mistura na garganta. É notável o aumento de pressão gradual após

a garganta conforme apresentado na figura 11. Isso se deve a conversão gradativa de pressão dinâmica em pressão estática, já que o escoamento passa a desacelerar a partir deste ponto.

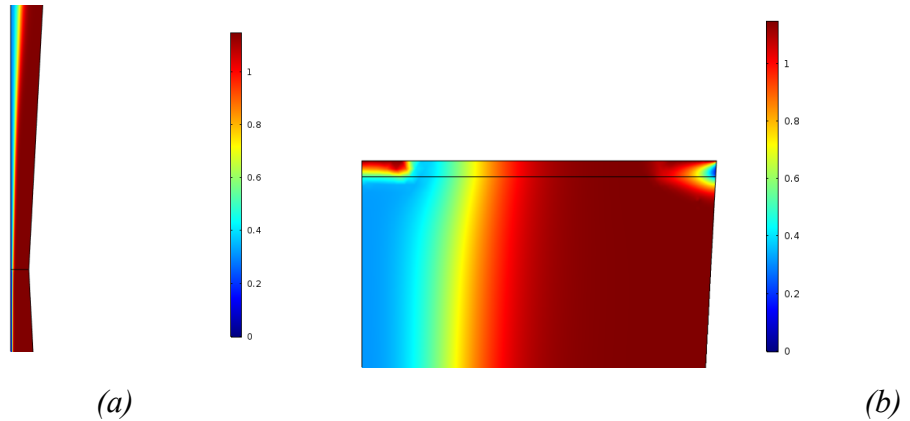
*Figura 11: (a) Perfil de pressão em Pa do flare; (b) Perfil de pressão próximo da garganta; (c) perfil de pressão próximo do bico injetor*



Como o esperado, a saída não possui uma mistura homogênea, mesmo levando em

consideração a placa perfurada, reforçando a necessidade de algum tipo de anteparo para promover a mistura, entretanto isso aumentaria a perda de carga. Pode-se observar a porcentagem de ar em relação a quantidade de ar estequiométrica em base molar na figura 12:

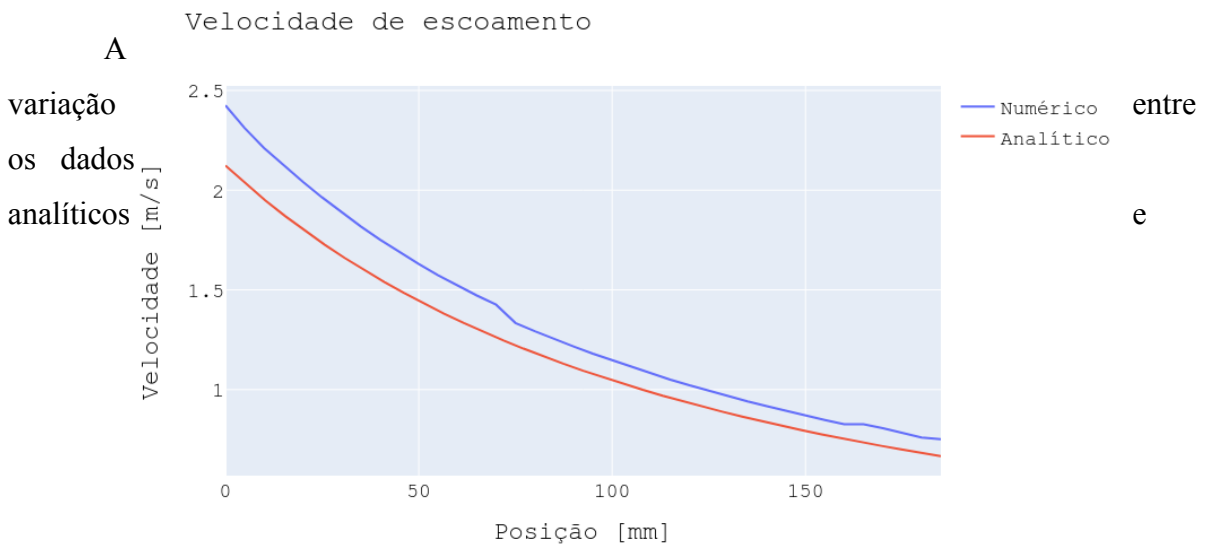
figura 12: (a) perfil de % de ar para estequiometria; (b) perfil próximo da saída.



### 5.3 Análise Unidimensional

Para comparar a simulação ao modelo analítico foi necessário utilizar as médias das seções transversais em cada ponto. Com os gráficos referentes as equações 12 e os dados obtidos a partir da simulação observa-se a comparação entre os resultados no gráfico 1.

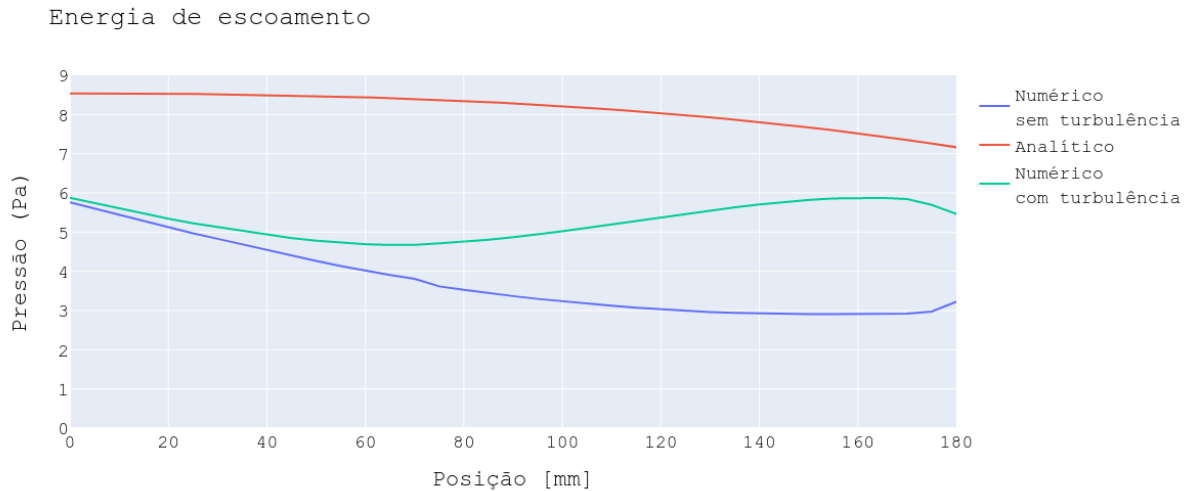
Gráfico 1: resultados obtidos a partir da simulação e do cálculo analítico.



numéricos de pressão por sua vez é mais significativa que a variação de velocidade.

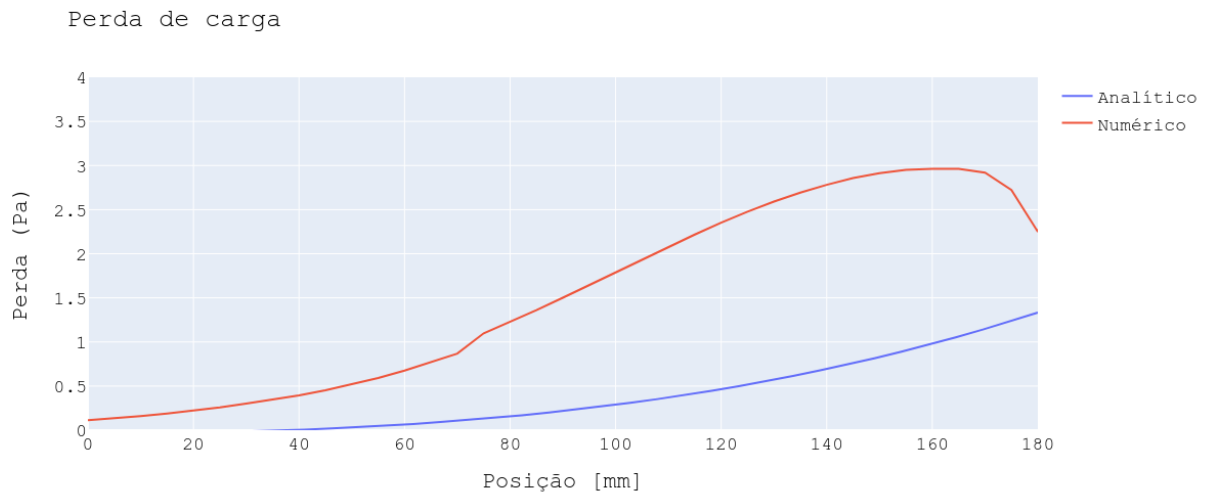
Observa-se no gráfico 2, três curvas: duas numéricas e uma analítica. Dentre as curvas numéricas uma considera as perdas devido a turbulência e outra não. O comportamento do decaimento da curva também se difere. É notável também uma mudança abrupta na extremidade devido a saída para atmosfera através da placa perfurada:

*Gráfico 2: Resultados analíticos e numéricos de pressão em relação a posição.*



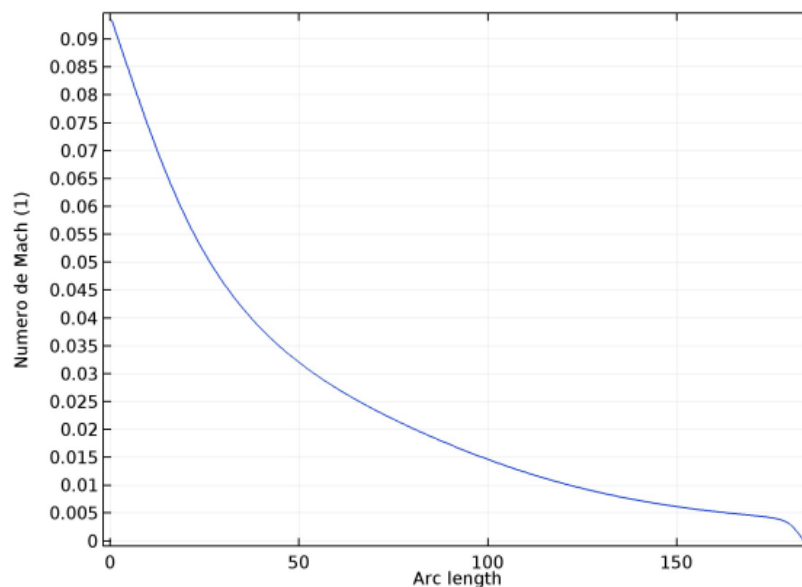
A energia turbulenta não é completamente perdida e pode ser recuperada como podemos observar no gráfico 2 próximo da saída, embora parte da energia cinética de turbulência seja dissipada. No gráfico 3 podemos observar com mais clareza estes fenômenos de recuperação e dissipação de energia:

*Gráfico 3: Perda de energia no modelo analítico e no modelo numérico.*



Outro parâmetro a ser observado é o número de Mach. Este número adimensional relaciona a velocidade do escoamento com a velocidade do som. Através deste número podemos concluir se os efeitos da compressibilidade do fluido são significativos ou não. No gráfico 4 observa-se o número de Mach ao longo da reta central no escoamento.

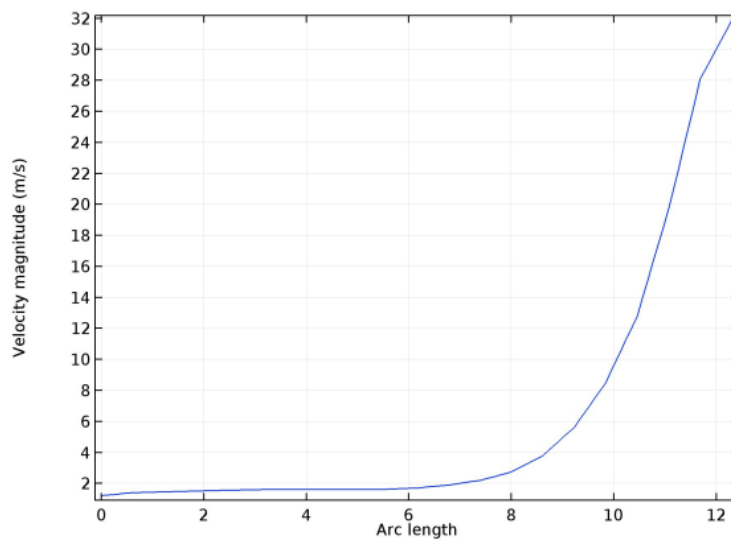
*Gráfico 4: Numero de Mach ao longo da linha axial de centro.*



Os efeitos de compressibilidade, por convenção, é considerado significativo a partir de Mach 0,3 <sup>[37]</sup>. Portanto, para este caso, a compressibilidade não tem efeitos significativos no escoamento.

O escoamento não ocorre de forma unidimensional, podendo acarretar em perdas maiores do que as consideradas no modelo unidimensional, visto que para que a partícula mudar de direção ela precisa ser acelerada. No gráfico 5 podemos observar a velocidade radial na linha da garganta, onde ocorre a mudança do trecho convergente para o trecho divergente.

*Gráfico 5: velocidade radial ao longo da linha radial da garganta*



## 6 CONCLUSÃO

O flare pode suprir as necessidades de uma ETE com as com a vazão, pressão e composição apresentados ao longo deste trabalho. Entretanto a modelagem analítica unidimensional apresenta limitações pois não leva em consideração a energia oriunda da turbulência e parte do pressupostos simplificadores como mistura é homogênea e pressão dinâmica desprezível.

O dispositivo foi projetado para uma mistura estequiométrica, mas na prática haverá necessidade de limitar a entrada de ar através de algum mecanismo no convergente ou na garganta para trabalhar com misturas mais ricas em combustível, com apenas 50% do ar necessário para atingir a estequiometria [24]. Após a realizada a simulação pode ser observado um valor de PA médio na saída de 108% tendo 114% em uma extremidade e 40% em outra. Entretanto com esta geometria será possível trabalhar com faixas maiores de razão de equivalência, podendo assim se adaptar a novas necessidades.

As divergências encontradas entre os modelos podem ter sido causadas pelas seguintes causas:

- Consideração ou não a dissipação de energia pela turbulência.
- Escoamento não ocorre apenas no sentido axial.
- Perdas devido ao atrito e viscosidade do fluido.
- Pressuposto no modelo analítico que toda a energia cinética foi transformada em pressão.

Com isso a simulação pode ser utilizada para ajustar a geometria inicial visto que, apesar da diferença entre os valores em cada modelo, as necessidades continuam sendo atendidas, visto que a chama em queimadores atmosféricos acontece por difusão. Um dos principais componentes a serem ajustados seria a saída do queimador por ter uma uma mistura não homogênea e a velocidade maior que a velocidade de propagação de chama, podendo ocasionar uma chama acima do queimador que pode ocasionar instabilidade.

## REFERÊNCIAS



- [1] ABiogás. Geração de rsu e potencial de produção de biogás. 2018. Disponível em: <[https://www.dropbox.com/s/12dhw6a8h0b3ks4/Infogr%C3%A1fico\\_A4\\_sem%20sangria%20-%20material%20on%20line.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/12dhw6a8h0b3ks4/Infogr%C3%A1fico_A4_sem%20sangria%20-%20material%20on%20line.pdf?dl=0)> Acesso em: 22. abr. 2022.
- [2] dwipayana1, CO2 emission reduction from solar power Plant in rural area (study of solar power plant in sukaraksa village, tanjung sari sub-district, bogor regency), e3s web of conferences 65, 05017 (2018)
- [3] EMAN A., Eman. Gas Flaring In Industry: An Overview. **Petroleum & Coal**, Egito, v. 57, 3 dez. 2015.
- [4] FEYISETAN ADEKUNLE, Kayode; AWELE OKOLIE, Jude. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, Nigeria, v. 6, p. 205-212, 26 mar. 2015.
- [5] PROBIOGAS. Tecnologia de Digestão Anaeróbia com Relevância para o Brasil. Substratos, Digestores e Uso de Biogás. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-tecnologias-biogas.pdf>>. Acesso em 06 jun 2022.
- [6] VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. UFMG, 2005.
- [7] METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: Treatment and reuse. 4ª Ed. New York, 2003.
- [8] RIBEIRO SALOMON, Karina; SILVA LORA, Electo Eduardo. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], v. 33, 23 maio 2009.
- [9] SILVA DOS SANTOS, Ivan Felipe *et al.* Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation & Recycling**, Brazil, 28 dez. 2017.
- [10] PARSAEE, Mostafa *et al.* A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, [s. l.], ed. 122, 31 jan. 2019.
- [11] DUBLEIN, Dieter; STEINHAUSER, Angelika. **Biogas from Waste and Renewable Sources**. Weinheim: Wiley-Vch, 2008.
- [12] TURNS, Stephen R.. **An Introduction to Combustion: concepts and applications**. 2. ed. Nova Iorque: McGraw, 1999.
- [13] LESLIE B. EVANS (Durham). **VOC Destruction Controls**. In: EPA (Estados Unidos) (org.). **EPA AIR POLLUTION CONTROL COST MANUAL** . 6. ed. Carolina do Norte: Research Triangle Park, 2002. p. 283-325.
- [14] APPROVED AMERICAN NATIONAL STANDARD. **521: Pressure-relieving and Depressuring Systems**. Washington, D.C., 2008.

- [15] KUMAR, Akash. A GUIDE ON SMOKELESS FLARING:: air/steam assisted and high pressure flaring. **International Journal Of Engineering Applied Sciences And Technology**, Pune, v. 4, n. 12, p. 517-520, abr. 2020.
- [16] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **EPA 450/3-90-016B**: Reactor Processes in the Synthetic Organic Chemical Manufacturing Industry, Background Information for Promulgated Standards. Research Triangle Park: Office Of Air Quality Planning And Standards, 1993.
- [17] PRITCHARD, Philip J.. **INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS**. 8. ed. Hoboken: Fox And McDonald's Introduction To Fluid Mechanics Eighth Edition Philip J. Pritchard Manhattan College With Special Contributions From: John C. Leylegian Manhattan College John Wiley & Sons, In, 2011.
- [18] NAMKHAT, A.. Primary air entrainment characteristics for a self-aspirating burner:: model and experiments. **Energy**, Bangkok, v. 35, n. 0360-5442/, p. 1701-1708, jan. 2010.
- [19] EGOLFOPOULOS, F. N.. Laminar Flame Speeds of Methane-Air Mixtures Under Reduced and Elevated Pressures. **Combustion And Flame**, New York, v. 76, n. 001/21801/0350, p. 375-391, jan. 1989.
- [20] GLAUDE, Pierre-Alexandre. Combustion and oxidation kinetics of alternative gas turbines fuels. In: 1 PROCEEDINGS OF ASME TURBO EXPO 2014: TURBINE TECHNICAL CONFERENCE AND EXPOSITION, 2014., 2014, Düsseldorf. **DRAFT GT2014-25070**. Düsseldorf: Asme, 2014. p. 1-10.
- [21] HEYWOOD, John B.. **Internal Combustion Engines Fundamentals**. Hoboken: McGraw, 1988.
- [22] LOBATO, Livia C. S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. Doutorado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais. UFMG, 2011.
- [23] APPELS, Lise. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress In Energy And Combustion Science**, Bélgica, v. 34, n. 0360-1285/, p. 755-781, jun. 2008.
- [24] SLAGER, A.A.. **Design of a flaring system for small and medium scale biogas installations in rural Mali**. Wangenigen: Fact Foundation, 2012.
- [25] FEITOSA FILHO, José Crispiniano. Otimização Hidráulica E Manejo De Injetores Tipo Venturi Duplo Para Fins De Quimigação. 1998. 185 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Usp, Piracicaba, 1998.
- [26] CRANE. **Flow of Fluids Trough Valves, Fittings, and Pipe**. Long Beach-Ca, Technical Paper No. 410M, 1999.
- [27] IBÁÑEZ, William. Análise E Desenvolvimento De Uma Metodologia De Projeto De Queimadores Atmosféricos Tipo Tubo Perfurado. 2005. 154 f. Dissertação (Mestrado) - Curso

de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

- [28] Engineering ToolBox, (2018). **Methane - Dynamic and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure**. [online] disponível em:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d\\_2068.html](https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d_2068.html) [Acessado em 25/06/2022]
- [29] Engineering ToolBox, (2018). **Nitrogen - Dynamic and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure**. [online] disponível em:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d\\_2068.html](https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d_2068.html) [Acessado em 25/06/2022]
- [30] Engineering ToolBox, (2018). **Carbon Dioxide - Dynamic and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure**. [online] disponível em:  
[https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d\\_2068.html](https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d_2068.html) [Acessado em 25/06/2022]
- [31] SZWAJA, Stanisław; TUTAK, Wojciech; GRAB-ROGALIŃSKI, Karol; JAMROZIK, Arkadiusz; KOCISZEWSKI, Arkadiusz. Selected combustion parameters of biogas at elevated pressure–temperature conditions. **Combustion Engines**, [S.L.], v. 148, n. 1, p. 40-47, 1 fev. 2012. Polish Scientific Society of Combustion Engines.  
<http://dx.doi.org/10.19206/ce-117050>.
- [32] KOŁODZIE, P. A.; VAN WINKLE, Matthew. Discharge coefficients through perforated plates. **Aiche Journal**, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 305-312, set. 1957. Wiley.  
<http://dx.doi.org/10.1002/aic.690030304>.
- [33] FREI, Walter. Which Turbulence Model Should I Choose for My CFD Application?. COMSOL Blog. 6, Jul. 2017. Disponível em:  
<https://www.comsol.com/blogs/which-turbulence-model-should-choose-cfd-application/>
- [34] BARDINA, Jorge e. **Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development**. Moffett Field: Microfiche, 1997.
- [35] FRARI, Ricardo Vargas del. Malhas Computacionais Para Simulação Numérica De Escoamentos De Fluidos Entre Cilindros Com Excentricidade. In: X ENCONTRO GAËCHO DE EDUCAÇÃO MATEMÁTICA, 04., 2009, Ijuí. **Trabalhos X EGEM**. Ijuí: Comunicação Científica, 2009.
- [36] HIESTER, H.R.; PIGGOTT, M.D.; FARRELL, P.e.; ALLISON, P.A.. Assessment of spurious mixing in adaptive mesh simulations of the two-dimensional lock-exchange. **Ocean Modelling**, [S.L.], v. 73, n. 1463-5003/, p. 30-44, jan. 2014. Elsevier BV.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.10.003>.
- [37] ZOHURI, Bahman. Compressible Flow. In: ZOHURI, Dr. Bahman. **Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors**. Novo México: Springer Cham, 2015. Cap. 7. p. 231-252.
- [38] PINKER, R. A.; HERBERT, M. V.. Pressure loss Associated with Compressible flow through Square-Mesh wire Gauzes. **Journal Of Mechanical Engineering Science**, [S.L.], v. 9, n. 1, p. 11-23, fev. 1967.