

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPRIMENTO VISÍVEL DE CHAMAS NÃO PRÉ-  
MISTURADAS DE GÁS NATURAL DILUÍDAS COM DIÓXIDO DE CARBONO

por

Dárlon César Kleveston Soliman

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, junho de 2014

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPRIMENTO VISÍVEL DE CHAMAS NÃO PRÉ-  
MISTURADAS DE GÁS NATURAL DILUÍDAS COM DIÓXIDO DE CARBONO

por

Dárlon César Kleveston Soliman

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi  
Coordenadora do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Ciências Térmicas

Orientador: Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Thamy Cristina Hayashi

Prof. Dr. Volnei Borges

Prof. Dr. Luis Alberto Oliveira Rocha

Porto Alegre, 02 de junho de 2014.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Fernando Marcelo Pereira, pela sugestão do tema, pelas fundamentais discussões técnicas ao longo deste trabalho e pela orientação.

Agradeço ao meu co-orientador, Prof. Dr. Nattan Roberto Caetano, pelo apoio em todo o projeto e execução do experimento, bem como pelas contribuições técnicas a este texto.

Agradeço ao meu amigo Fladimir Barbosa pelo auxílio na elaboração dos desenhos esquemáticos.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, José e Rosmari, pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha vida e pelo contínuo incentivo para que eu fosse em busca de meus objetivos.

Dedico este trabalho aos meus colegas Érgon Fleck, Pedro Schaan, Renan Viana e Filipe Geiger pela fundamental importância exercida ao longo de minha vida acadêmica, pelo apoio nos momentos de dificuldade e principalmente pela amizade.

SOLIMAN, D. C. K. **Estudo Experimental do Comprimento Visível de Chamas Não Pré-Misturadas de Gás Natural Diluídas com Dióxido de Carbono**. 2014. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

## Resumo

O estudo da estabilização de chamas não pré-misturadas é de suma importância para que se possa delimitar faixas de operação de queimadores de unidades petrolíferas. As recentes descobertas das reservas do pré-sal brasileiro que apresentam elevados teores de dióxido de carbono no gás natural associado motiva a necessidade de estudo de chamas não pré-misturadas de gás natural diluídas com este inerte. Para tanto, usou-se uma bancada experimental para analisar a influência do dióxido de carbono nos valores de altura de chama e altura de levantamento para diferentes diluições em função do número de Reynolds. As alturas foram determinadas por imagens fotográficas. Para fins de comparação, os resultados foram apresentados juntamente com soluções analíticas encontradas na literatura. Constatou-se que o acréscimo de dióxido de carbono no gás natural reduz a altura da chama e favorece o levantamento e a extinção da chama. Na comparação com as soluções analíticas, os resultados encontrados apresentam boa concordância em regiões distantes da transição para a turbulência e da extinção.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estabilidade de chama, altura de chama visível, altura de levantamento, extinção de chama

SOLIMAN, D. C. K. **Experimental Study of the Visible Length of Nonpremixed Flames of Natural Gas Diluted with Carbon Dioxide.** 2014. 26. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

#### Abstract

The study of the stabilization of nonpremixed flames plays an important role in the combustion control. The recent discoveries of the brazilian pre-salt reserves which show high levels of carbon dioxide mixed with associated natural gas motivate the study of the visible length of nonpremixed flames of natural gas diluted with this inert. Thus, a testing bench was used in order to analyze the influence of carbon dioxide in the flame length and liftoff distance for different dilutions depending on the Reynolds number. The heights were determined by photography images. The results were compared with analytical solutions found in the literature. The outcome was that the addition of carbon dioxide in natural gas reduces the flame length and favors flame lifting and extinction. In the comparison with analytical solutions, the results show good agreement for regions far from the transition to turbulence and blowout.

**KEYWORDS:** Flame stability, flame length, liftoff distance, blowout

## ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1. Justificativa.....	01
1.2. Objetivos .....	01
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	01
2.1. Tipo de Chama.....	02
2.2. Altura de Chama .....	02
2.3. Altura de Levantamento e Extinção de Chama.....	02
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	04
4.1. Verificação dos Rotâmetros.....	04
4.1.1. Controlador Digital de Vazão .....	05
4.1.2. Manômetro de Coluna d'Água.....	05
4.1.3. Rotâmetros .....	05
4.2. Procedimento Experimental para a Verificação dos Rotâmetros .....	05
4.2.1. Fator de Correção .....	05
4.3. Bancada de Testes para Medição de Chama .....	07
4.3.1. Queimador .....	08
4.3.2. Gases .....	08
4.3.3. Sistema de Aquisição de Imagens .....	08
4.4. Procedimento Experimental para Medição de Chama .....	08
5. RESULTADOS .....	09
5.1. Verificação dos Rotâmetros.....	09
5.2. Estabilidade de Chama .....	09
5.2.1. Altura de Chama .....	09
5.2.2. Levantamento de Chama .....	12
5.2.3. Reynolds Crítico de Levantamento e Extinção de Chama.....	12
6. CONCLUSÕES.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	14
ANEXO I .....	16
ANEXO II.....	16
ANEXO III.....	17
ANEXO IV .....	17
APÊNDICE I.....	18

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Justificativa

A descoberta das reservas petrolíferas do pré-sal brasileiro impulsiona cada vez mais os investimentos na construção de instalações, compra de equipamentos e investimentos em pesquisas na área de petróleo e gás natural. Segundo a Petrobrás, 38 novas unidades vão passar a produzir petróleo e gás no período de 2013-2020, número que a coloca entre as empresas com maior demanda por novas unidades.

No entanto, a exploração de novos campos inclui alguns desafios tecnológicos dentre os quais está a qualidade do gás natural associado. Se por um lado as reservas encontradas apresentam muitos produtos de alto valor [Gouveia, 2010], por outro, algumas reservas são contaminadas com grande quantidade de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). No campo de Tupi, por exemplo, a presença de  $\text{CO}_2$  pode variar entre 8 e 12% [CAEAT, 2009]. Em geral, os níveis de  $\text{CO}_2$  no gás natural de outros campos petrolíferos brasileiros não passa de 1,95% [GasNet, 2014]. Desta forma, entender a influência deste inerte na combustão do gás natural é um fator importante para que se possa fazer um dimensionamento preciso de equipamentos, instalações e tubulações das plataformas petrolíferas que estão operando ou atuarão sob esta condição.

Na extração de petróleo *offshore*, a utilização de queimadores (*flares*) para a eliminação de gases residuais é uma necessidade inerente ao processo de produção e ocorre por motivos de segurança no início de operação de plataformas, em paradas de manutenção e em situações de emergência ou limitações operacionais [Petrobrás, 2014]. Outra técnica para a eliminação do gás é a ventilação (*venting*, em inglês, e que se refere à liberação do gás na atmosfera), no entanto, essa técnica é muito prejudicial ao meio ambiente visto que o metano, principal componente do gás natural, tem maior impacto em termos de efeito estufa que os produtos da reação de combustão.

Outro motivo para a eliminação do gás natural através dos queimadores é a dificuldade de transporte. A grande distância entre a área do pré-sal e o continente (cerca de 300 km) torna inviável o escoamento deste gás por dutos até a costa, fazendo-se necessário realizar a queima na própria plataforma [Rodrigues, 2010].

### 1.2. Objetivos

O objetivo geral desse trabalho é estudar a estabilidade de chamas de gás natural com diferentes proporções de diluição de dióxido de carbono. Para alcançar esse objetivo geral são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Montar uma bancada experimental para a realização de medidas de comprimento de chama visível;
2. Verificar os rotâmetros utilizados para a medição de vazão;
3. Medir comprimento visível e altura de levantamento de chama em função do número de Reynolds para diferentes proporções GN/ $\text{CO}_2$ ;
4. Calcular o comprimento de chama e a altura de levantamento para as diferentes diluições GN/ $\text{CO}_2$  empregando modelos clássicos encontrados na literatura;
5. Comparar os resultados experimentais com as soluções analíticas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão expostos os principais conceitos e definições acerca da estabilidade de chama, a fim de favorecer a compreensão dos mecanismos envolvidos na combustão de chamas difusivas tipo jato.



## 2.1. Tipos de Chama

As chamas podem ser divididas em dois tipos: chamas pré-misturadas e chamas não pré-misturadas, também chamadas de difusão. Chamas pré-misturadas são aquelas nas quais o combustível e o oxidante são misturados, em nível molecular, antes da ignição da mistura. Estas apresentam a vantagem de uma combustão intensa em um pequeno volume, bem como um maior controle da combustão. No entanto, para grandes quantidades de combustível apresentam baixo nível de segurança devido ao risco de uma explosão não controlada [Coelho e Costa, 2007]. Já nas chamas de difusão, os reagentes estão inicialmente separados. A reação química ocorre na interface entre o combustível e o oxidante, onde os processos de mistura e reação ocorrem simultaneamente [Coelho e Costa, 2007].

As chamas podem ser divididas de acordo com o comportamento em relação à velocidade de escoamento em: laminares ou turbulentas. Chamas laminares possuem estrutura estacionária, ou seja, não variam com o tempo. Nestas chamas, o principal mecanismo no processo de combustão é a difusão molecular, a qual transporta o combustível e o oxidante à zona de reação. Chamas turbulentas, por sua vez, apresentam flutuações temporais de concentração, velocidade e temperatura [Turns, 2000]. A turbulência provoca um aumento da taxa de mistura, o que promove um aumento na taxa de difusão e, conseqüentemente, um aumento na taxa de reação.

## 2.2. Altura de Chama

Há várias formas de definir a altura de uma chama difusiva tipo jato e não há consenso sobre qual é a forma mais adequada [Turns, 2000]. O comprimento de uma chama de difusão pode ser definido como a distância entre o bico injetor de combustível e o ponto na linha central onde é encontrada a temperatura máxima onde a fração de mistura é equivalente a fração de mistura estequiométrica [Becker e Liang, 1978]. Outro método para a medição do comprimento de chama é o utilizado por Gunnar, 1983 e Delichatsios, 1993, os quais são consistentes com as descobertas de Mungal e O'Neil, 1989. A medição da altura de chama consiste em determinar o meio da altura intermitente. Nota-se que, Turns, 2000, afirma que a medição da altura de chama visível apresenta valores maiores do que medições de altura de chama realizadas por técnicas apropriadas. A posição da frente de chama pode ser medida de forma confiável por meio da técnica de Fluorescência Induzida por Plano de Luz Laser (PLIF). Caetano, 2012 considerou a espécie química hidroxila, que alcança a concentração máxima onde a taxa de reação química é máxima, de modo a mapear a região estequiométrica. A técnica PLIF captura a fluorescência emitida por este radical químico, de modo a localizar a frente da chama. No entanto, esta técnica requer equipamentos altamente sofisticados. Assim, este estudo está limitado a executar as medições da altura da chama visível.

## 2.3. Altura de Levantamento e Extinção de Chama

Para um escoamento de combustível de baixa velocidade, a base da chama fica muito próxima à borda do queimador e, então, diz-se que ela está ancorada (*attached*, em inglês). À medida que a velocidade do escoamento aumenta, a base da chama perde essa ancoragem e é deslocada à uma pequena distância a jusante do bico injetor. Quando o escoamento atinge uma velocidade crítica a base da chama é deslocada abruptamente para uma nova posição mais distante da borda do queimador. Esta distância entre o bocal e a base da chama é chamada de altura de levantamento (*lift-off height*, em inglês). Aumentando ainda mais a velocidade, encontra-se um valor crítico no qual a chama se extingue (*blowout*, em inglês) [Turns, 2000]. Os efeitos de levantamento e extinção da chama podem ser observados na Figura III do Anexo III.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os estudos experimentais de Wohl et al., 1949, mostram que para baixas vazões, situação na qual o escoamento permanece laminar, a altura de chama independe do diâmetro do bocal de saída de combustível e depende apenas da vazão. Com o aumento da vazão, inicia-se a turbulência e observa-se uma região de transição na qual a chama tem sua altura máxima local e então começa a decrescer. Aumentando-se ainda mais a vazão, observam-se dois comportamentos distintos. Para bocais diâmetros menores do que 0,133 polegadas a altura de chama é independente da vazão, mantendo-se constante. Para bocais maiores de 0,152 polegas, observa-se o crescimento da altura de chama, porém com taxas decrescentes (vide Anexo I).

Delichatsios, 1993, estudou a relação entre a altura de chama, a razão de mistura estequiométrica ( $f_s$ ), o diâmetro do bocal ( $d_j$ ), a razão entre a densidade do combustível e do ambiente ( $\rho_0/\rho_\infty$ ) e o número de Froude para chamas ( $Fr_f$ ). Unindo os quatro primeiros termos através de um comprimento adimensional de chama ( $L^*$ ) e traçando-se o gráfico deste em relação ao número de Froude, distingue-se claramente duas regiões. Na primeira, para número de Froude menor que cinco, o regime é dominado pelo empuxo originado pelos gases quentes e varia proporcionalmente às variações do comprimento adimensional de chama. Na segunda, para número de Froude maior que 5, o regime é dominado pela quantidade de movimento linear no bico injetor e é independente do comprimento adimensional de chama (vide Anexo II). A seguinte correlação foi proposta para estimar a altura de chama de um jato turbulento:

$$L_f = L^* \frac{d_j \sqrt{\rho_0/\rho_\infty}}{f_s} \quad (3.1)$$

$$L^* = \frac{13,5 Fr_f^{2/5}}{(1+0,07 Fr_f^2)^{1/5}}, \text{ para } Fr < 5 \quad (3.2)$$

$$L^* = 23 \text{ para } Fr > 5 \quad (3.3)$$

$$Fr_f = \frac{v_e f_s^{3/2}}{\left(\frac{\rho_0}{\rho_\infty}\right)^{1/4} \left(\frac{\Delta T_f}{T_\infty} g d_j\right)^{1/2}} \quad (3.4)$$

$$f_s = \frac{1}{(A/F)_{stoic} + 1} \quad (3.5)$$

onde  $Fr_f$  é o número de Froude para chamas,  $d_j$  é o diâmetro do bico injetor,  $\rho_0$  é a densidade do combustível,  $\rho_\infty$  é a densidade do oxidante,  $f_s$  é a fração de mistura estequiométrica,  $v_e$  é a velocidade na saída do bico injetor,  $g$  é a gravidade,  $T_\infty$  é a temperatura do oxidante,  $\Delta T_f$  é a diferença entre a temperatura de injeção e a temperatura adiabática de chama do combustível e  $(A/F)_{stoic}$  é a relação estequiométrica oxidante/combustível.

Kalghatgi, 1984, baseado na teoria desenvolvida por Wohl, 1949, propôs a seguinte correlação para descrever o comportamento da altura de levantamento de chamas turbulentas de hidrocarbonetos:

$$h = \left(\frac{50 \mu_0}{\rho_0 S_{L,max}}\right) \left(\frac{v_0}{S_{L,max}}\right) \left(\frac{\rho_0}{\rho_\infty}\right)^{3/2} \quad (3.6)$$

onde  $\mu_0$  é a viscosidade dinâmica do combustível,  $S_{L,max}$  é a máxima velocidade de chama laminar e  $v_0$  é a velocidade de saída de combustível no bocal. A dependência com a

velocidade de chama se explica porque nessa teoria assume-se que na base da chama levantada há uma mistura entre combustível e oxidante gerando uma condição pré-misturada.

Roper, 1977, desenvolveu e verificou experimentalmente expressões para a altura de chamas laminares para diferentes geometrias de bocais. A seguinte correlação foi proposta para bocais circulares:

$$L_f = \frac{Q_F(T_\infty/T_F)}{4\pi D_\infty \ln(1+1/S)} \left(\frac{T_\infty}{T_f}\right)^{0,67} \quad (3.7)$$

onde  $Q_F$  é a vazão de combustível,  $S$  é a razão estequiométrica molar oxidante-combustível,  $D_\infty$  é o coeficiente de difusão médio,  $T_F$  é a temperatura de entrada do combustível,  $T_\infty$  é a temperatura do oxidante e  $T_f$  é a temperatura média de chama.

Diversos autores desenvolveram teorias para explicar o levantamento da chama. Vanquickenborne, L. e van Tiggelen, 1966, afirmam que entre a saída do bocal e a base da chama ocorre a pré-mistura do combustível e do oxidante e que os reagentes estão completamente misturados na superfície onde a fração de mistura é igual à estequiométrica. A chama estabiliza na posição onde o valor médio da componente axial da velocidade é igual à velocidade de propagação de uma chama turbulenta de pré-mistura.

Peters e Williams, 1983, contestaram esta teoria alegando não haver pré-mistura suficiente entre o combustível e o oxidante. Sugerem que a chama se extingue na vizinhança do queimador devido ao fato de a taxa de deformação da chama exceder um valor crítico. A chama estabiliza na superfície onde a taxa de deformação atinge esse valor crítico.

Broadwell et al., 1984, afirmam que a extinção ocorre porque o tempo disponível para a mistura dos produtos da combustão, arrastados para a base da chama pela turbulência, com os reagentes é inferior ao tempo requerido para a ignição. A chama estabiliza quando esses tempos são iguais.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, serão descritos os equipamentos e procedimentos utilizados para a verificação dos rotâmetros, medições de altura de chama visível e levantamento de chama.

##### 4.1. Verificação dos Rotâmetros

Para alcançar maior confiabilidade nos resultados, os rotâmetros empregados foram verificados em comparação com medidores/controladores eletrônicos de alta precisão. O fluido usado foi ar comprimido e a montagem experimental para essa verificação é mostrada na Figura 4.1. O ar comprimido passa pelo controlador digital de vazão (*mass flow controller - MFC*) e, em seguida, pelo rotâmetro. Um manômetro em U é usado para medir a pressão estática na entrada do rotâmetro.

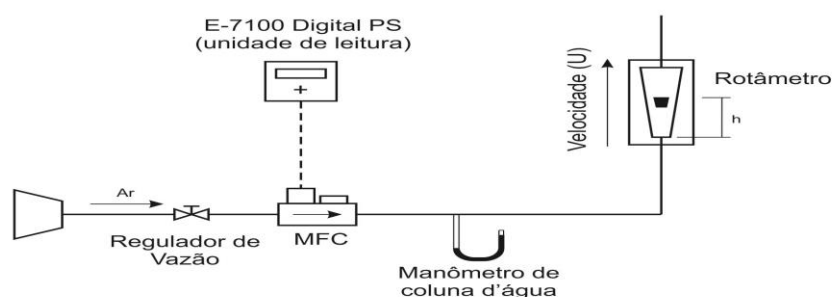


Figura 4.1: Desenho esquemático da montagem para a verificação dos rotâmetros

#### 4.1.1. Controlador Digital de Vazão

Para a realização destes experimentos, foram utilizados dois controladores digitais da marca BRONKHORST. O primeiro é do modelo F-112AC com vazão de operação máxima de 150 sl/min (onde sl é *standard litre*, padrão que utiliza como referência a pressão de 1 atm e a temperatura de 20°C) e incerteza de medição de 0,1% do valor de fundo de escala mais 0,5% da medição. O segundo é do modelo F-201CV com vazão de operação máxima de 15 sl/min e mesma incerteza. A unidade de leitura utilizada foi uma E-7100 digital PS. Devido à alta precisão destes equipamentos, eles foram utilizados como referência para a medida dos rotâmetros.

#### 4.1.2. Manômetro de Coluna d'Água

Para as medições de pressão foi utilizado um manômetro de coluna d'água da marca HIDRO DIDÁTICA com limite de operação de 1550 mmca, resolução de 1 mm e incerteza de medição de 0,5 mm.

#### 4.1.3. Rotâmetros

Com a utilização desta bancada e configuração de montagem, foram verificados três rotâmetros, todos eles da marca CONAUT, modelo 420 e pressão de referência de 250 mmca. O primeiro opera com limite inferior de 10 NL/min, limite superior de 100 NL/min e foi calibrado para ar. O segundo com limite inferior de 1 NL/min, superior de 10 NL/min e foi calibrado para metano. E, o terceiro com limite inferior de 0,05 NL/min, superior de 0,6 NL/min e foi calibrado para metano.

### 4.2. Procedimento Experimental para a Verificação dos Rotâmetros

Este procedimento tem por objetivo a utilização dos rotâmetros para fluidos e pressões diferentes daqueles para os quais foram calibrados. Os rotâmetros foram medidos em quatro posições de vazão e pressão diferentes. Após a aplicação do fator analítico de correção os dados foram comparados com os obtidos pelo MFC.

#### 4.2.1. Fator de Correção

Dado que os rotâmetros serão operados em condições (pressão e tipo de gás) diferentes daquelas para as quais foram calibrados, é necessário corrigir as medições. Para encontrar o fator de correção, inicia-se pelo balanço de forças no flutuador do rotâmetro. Na situação estática, tem-se o equilíbrio entre o peso do flutuador e as forças de arrasto e empuxo conforme:

$$V_s \rho_s g = k_d \rho_f U^2 + V_s \rho_f g \quad (4.1)$$

onde  $V_s$  é o volume do flutuador,  $\rho_s$  é a densidade do flutuador,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $k_d$  é o coeficiente de arrasto,  $\rho_f$  é a densidade do fluido e  $U$  é a velocidade linear através da seção transversal entre o flutuador e a parede do tubo inclinado.

Nessa situação, a velocidade do gás que passa pelo flutuador é dada por

$$U = Q/A \quad (4.2)$$

onde  $Q$  é a vazão volumétrica e  $A$  é a área da seção transversal. Como a área ( $A$ ) é proporcional à altura de equilíbrio do flutuador ( $h$ ), então temos que  $A = kh$  e, assim:

$$U = \frac{Q}{kh} = k_1 \frac{Q}{h}. \quad (4.3)$$

onde  $k_1=1/k$  e representa parâmetros geométricos do rotâmetro, então, a partir da equação (4.1), tem-se que:

$$V_s \rho_s g = k_1^2 k_d \rho_f \left(\frac{Q}{h}\right)^2 + V_s \rho_f g. \quad (4.4)$$

Isolando  $(Q/h)^2$  na equação (4.4) e trocando  $k_1^2 k_d$  por  $k_2$ , tem-se:

$$Q = h \sqrt{\frac{V_s g}{k_2}} \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}}. \quad (4.5)$$

Para um dado flutuador, o valor de  $\sqrt{\frac{V_s g}{k_2}}$  é um parâmetro fixo e, então, tem-se:

$$Q = h k_3 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f}}. \quad (4.6)$$

A equação (4.6) representa a relação entre a vazão volumétrica e a altura do flutuador, onde  $k_3$  é um termo que depende apenas das características geométricas do rotâmetro e parâmetros constantes.

Um rotâmetro tem a sua escala definida com base em uma condição de operação de referência ( $P_{ref}$  e  $T_{ref}$ ) que por sua vez define uma densidade de referência  $\rho_{ref}$  quando é assumido o modelo de gás ideal. Assim, para uma dada temperatura, pressão e altura, a vazão volumétrica de referência é dada por:

$$Q_{ref} = h_1 k_3 \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_{ref})}{\rho_{ref}}}. \quad (4.7)$$

Como a densidade dos gases é, em geral, muito menor do que a densidade do flutuador tem-se que:

$$\rho_s - \rho_{ref} \approx \rho_s \quad (4.8)$$

e, então:

$$Q_{ref} = h_1 k_3 \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_{ref}}}. \quad (4.9)$$

Utilizando-se o mesmo rotâmetro para a medição de outro fluido e/ou outra condição de operação (temperatura e pressão) teremos outra densidade ( $\rho_{gás}$ ). Ajustando-se a vazão até encontrar a mesma altura ( $h_1$ ) tem-se

$$Q_{gás} = h_1 k_3 \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_{gás}}}. \quad (4.10)$$

Dividindo-se a equação (4.10) pela equação (4.9), tem-se

$$Q_{gás} = \sqrt{\frac{\rho_{ref}}{\rho_{gás}}} Q_{ref}. \quad (4.11)$$

Com a equação (4.11) pode-se corrigir a medição obtida na escala do rotâmetro ( $Q_{ref}$ ) para a vazão correta ( $Q_{gás}$ ) nas condições de operação do rotâmetro ( $\rho_{gás}$ ) a partir dos dados da calibração do rotâmetro ( $\rho_{ref}$ ). Com a vazão correta, pode-se encontrar a vazão mássica de gás por

$$\dot{m}_{gás} = \rho_{gás} Q_{gás}. \quad (4.12)$$

Assim, é possível encontrar a vazão volumétrica em qualquer condição a partir da conservação da massa. Para encontrar a vazão nas condições normais de temperatura e pressão (CNTP), por exemplo, faz-se

$$\dot{m}_{gás} = \dot{m}_{CNTP} \quad (4.13)$$

$$\rho_{gás} Q_{gás} = \rho_{gás,CNTP} Q_{CNTP} \quad (4.14)$$

$$Q_{gás} = Q_{CNTP} \frac{\rho_{gás,CNTP}}{\rho_{gás}} \quad (4.15)$$

Substituindo a equação (4.11) na equação (4.15) obtém-se,

$$Q_{CNTP} = \sqrt{\frac{\rho_{ref}}{\rho_{gás}}} \frac{\rho_{gás}}{\rho_{CNTP}} Q_{ref}. \quad (4.16)$$

No experimento descrito na seção 4.1, o valor da medição de pressão e a temperatura do ambiente são utilizados para o cálculo de  $\rho_{gás}$ .

Os seguintes parâmetros:  $\rho_{ref}$ ,  $\rho_{gás}$  e  $\rho_{gás,CNTP}$  são obtidos a partir do modelo de gás perfeito:

$$\rho = \frac{PM}{RT}, \quad (4.17)$$

onde P é a pressão, M é a massa molar do fluido, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura.

Para encontrar  $\rho_{ref}$ , utiliza-se os dados de temperatura e pressão fornecidos pelo fabricante do rotâmetro. Para determinar  $\rho_{CNTP}$ , utiliza-se as informações das condições normais de temperatura e pressão (0°C e 1 atm).

### 4.3. Bancada de Testes para Medição de Chama

Os experimentos foram realizados seguindo a configuração de montagem mostrada na figura 4.2. Após a medição de vazão nos rotâmetros, o gás natural e o dióxido de carbono são misturados por meio de um conector do tipo Y. O comprimento de mistura usado (distância entre o conector Y e a entrada do queimador) foi de 0,5 m.

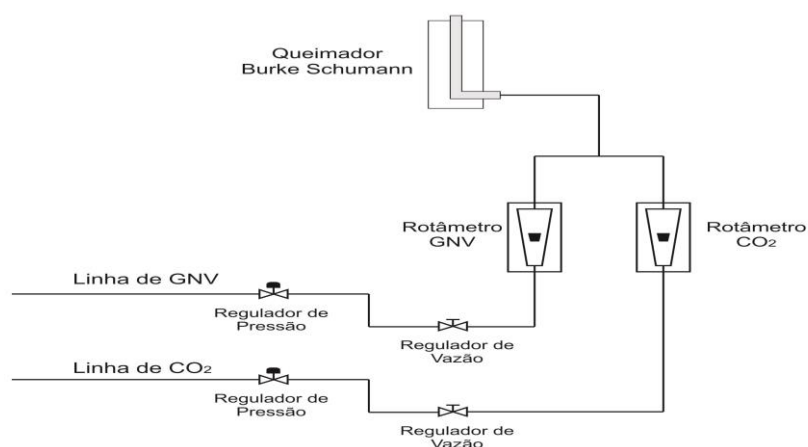


Figura 4.2: Desenho esquemático da montagem para a medição de chama

#### 4.3.1. Queimador

Para a realização deste estudo, foi utilizado o queimador construído por Nunes, 2012, que pode ser visto em detalhes na Figura 4.3. O queimador possui um bico injetor central de combustível e uma injeção coaxial de ar. Apesar da utilização deste queimador, todos os experimentos foram realizados sem o uso de vazão de ar. O fator mais importante a se destacar no queimador é o diâmetro de saída do bocal de 4,7 mm, pois será utilizado posteriormente na modelagem teórica. Uma vista em corte do queimador pode ser vista na Figura IV do Anexo IV.

#### 4.3.2. Gases

Para a obtenção das chamas, utilizou-se gás natural veicular com a seguinte composição química: 89,44% de metano, 6,7% de etano, 2,26% de propano, 0,8% de nitrogênio, 0,34% de dióxido de carbono e 0,46% de outros componentes [GasNet, 2014]. Enquanto o dióxido de carbono apresenta pureza de 99,95%. As diluições utilizadas foram de 2,75%, 5,75%, 9,15% e 12,2%, em termos de volume, de CO<sub>2</sub> em relação à vazão total de combustível.

#### 4.3.3. Sistema de Aquisição de Imagens

Para a aquisição das imagens das chamas utilizou-se uma câmera fotográfica modelo COOLPIX L810, da marca NIKON. Esta foi montada sobre um tripé em uma posição 0,35 metros acima do bocal de saída de combustível e a uma distância de 1,75 metros do mesmo. O tempo de exposição é de 1/1500 segundos, com compensação de exposição -2.0, com a seleção de lentes em 4.0 mm e a abertura da câmera selecionada em 1:5,9.

#### 4.4. Procedimento Experimental para Medição de Chama

A medição dos valores de altura de chama, levantamento e extinção envolveram duas etapas. Primeiramente, foram realizados os experimentos apenas com gás natural, a uma pressão de 2 bar, e desta forma foi possível realizar medições para um grande número de vazões. Em seguida, foram realizados experimentos com diferentes valores de diluição de dióxido de carbono no gás natural. Devido à necessidade da utilização simultânea de dois rotômetros, houve uma redução na quantidade de pontos de medição

Foram capturadas três imagens diferentes para cada vazão de combustível, a fim de obter um valor médio para os valores da altura de chama e levantamento. As medições destes valores foram feitas através de inspeção visual das imagens conforme os métodos de [Gunnar, 1983; Delichatsios, 1993] citados na seção 2.2.

## 5. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados obtidos na verificação dos rotâmetros, medições de comprimento e levantamento de chama e as respectivas comparações com os modelos teóricos encontrados na literatura.

### 5.1. Verificação dos Rotâmetros

Os valores medidos nos rotâmetros foram corrigidos utilizando-se a metodologia definida na seção 4.2.1. e comparados com os valores obtidos pelo MCF. Para o rotâmetro de vazões entre 10 e 100 NL/min, esta comparação resultou em uma diferença média de 4,8% no valor da vazão. Para o rotâmetro de vazões entre 1 e 10 NL/min, a diferença média foi de 2,8% e para o de 0,05 a 0,6 NL/min a diferença média foi de 16,9%. Assim, conclui-se que os rotâmetros para maiores vazões apresentam incertezas compatíveis com o que se espera para rotâmetros. Já o rotâmetro para vazões menores apresenta incertezas elevadas o que compromete a qualidade dos resultados. Para a melhoria dos resultados é necessário fazer uma calibração desse rotâmetro empregando CO<sub>2</sub> como gás de trabalho. Os dados de propagação de incerteza de medição estão apresentados na Tabela I do Apêndice I.

### 5.2. Estabilidade de Chama

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais e teóricos para os principais parâmetros de estabilidade de chama.

#### 5.2.1. Altura de Chama

O gráfico ilustrado da Figura 5.1 representa esquematicamente os resultados obtidos durante a realização dos experimentos para as alturas de chama e de levantamento em função do número de Reynolds utilizando apenas gás natural. Observa-se que para Reynolds menor que 1500 as chamas apresentam comportamento laminar e para valores maiores começam a apresentar sinais de turbulência. A baixa luminosidade da segunda e terceira chama na região próxima ao bico injetor dá a sensação de que estão levantadas, no entanto esse efeito só ocorre a partir da quarta chama. Com relação à cor das chamas, nota-se que quanto maior a altura de levantamento mais azul a chama fica. Esse efeito deve-se à entrada de oxidante na base da chama, o que gera uma pré-mistura parcial. As alturas de chama foram medidas com base na metodologia da seção 4.4 e estão representadas na figura 5.2.

Como pode ser visto na Figura 5.2, para as chamas de gás natural sem diluição, os valores das medições experimentais acompanham o comportamento encontrado por Roper, 1977, para regimes laminares de chama. Nota-se que neste regime há uma variação linear entre altura de chama e o número de Reynolds. Na região próxima ao valor de número de Reynolds de 1500 há uma faixa onde ocorre a transição para o regime turbulento onde a altura de chama diminui. As alturas de chama voltam a crescer para valores de Reynolds de aproximadamente 3000, com taxas decrescentes. Como o bico injetor do queimador utilizado neste experimento possui diâmetro de 0,185 polegadas, este comportamento está de acordo com os estudos de Wohl et al., 1949 e o experimento apresenta boa concordância com os apresentados na Figura I, do Anexo I.



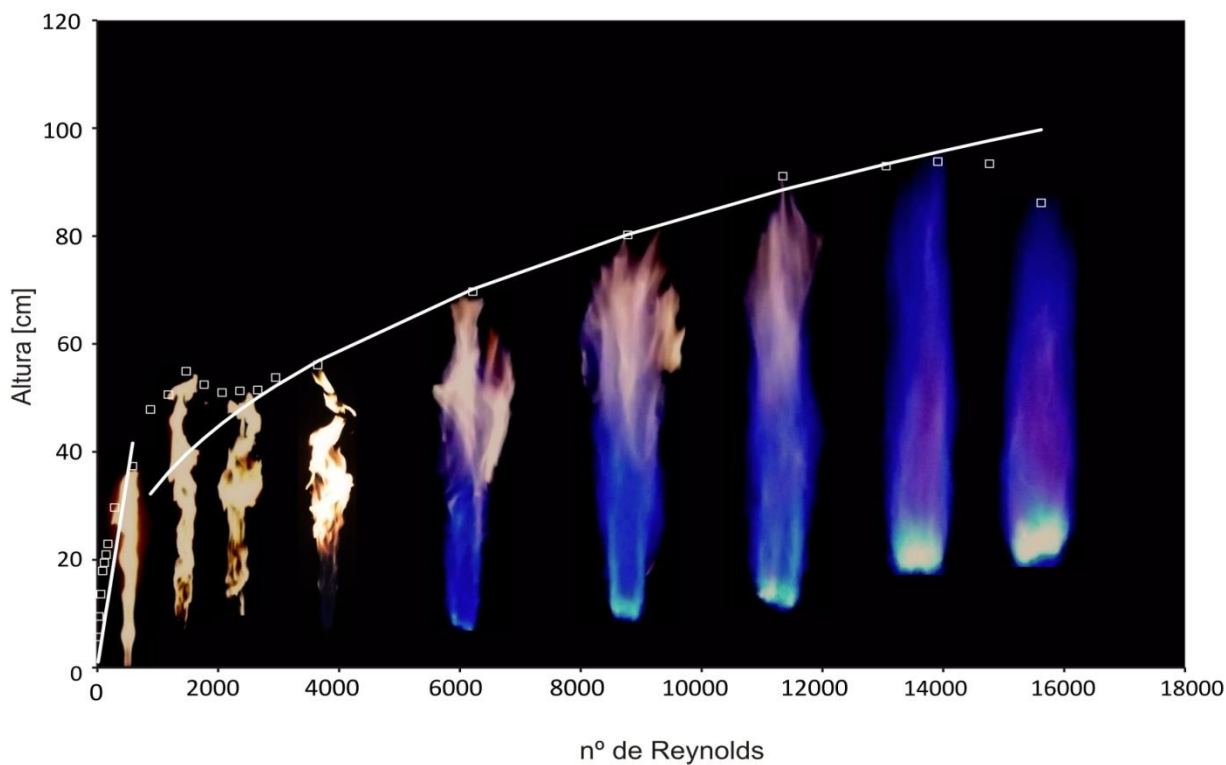


Figura 5.1: Representação esquemática da altura de chama ( $L_f$ ) e do levantamento ( $h$ ) em função do número de Reynolds.

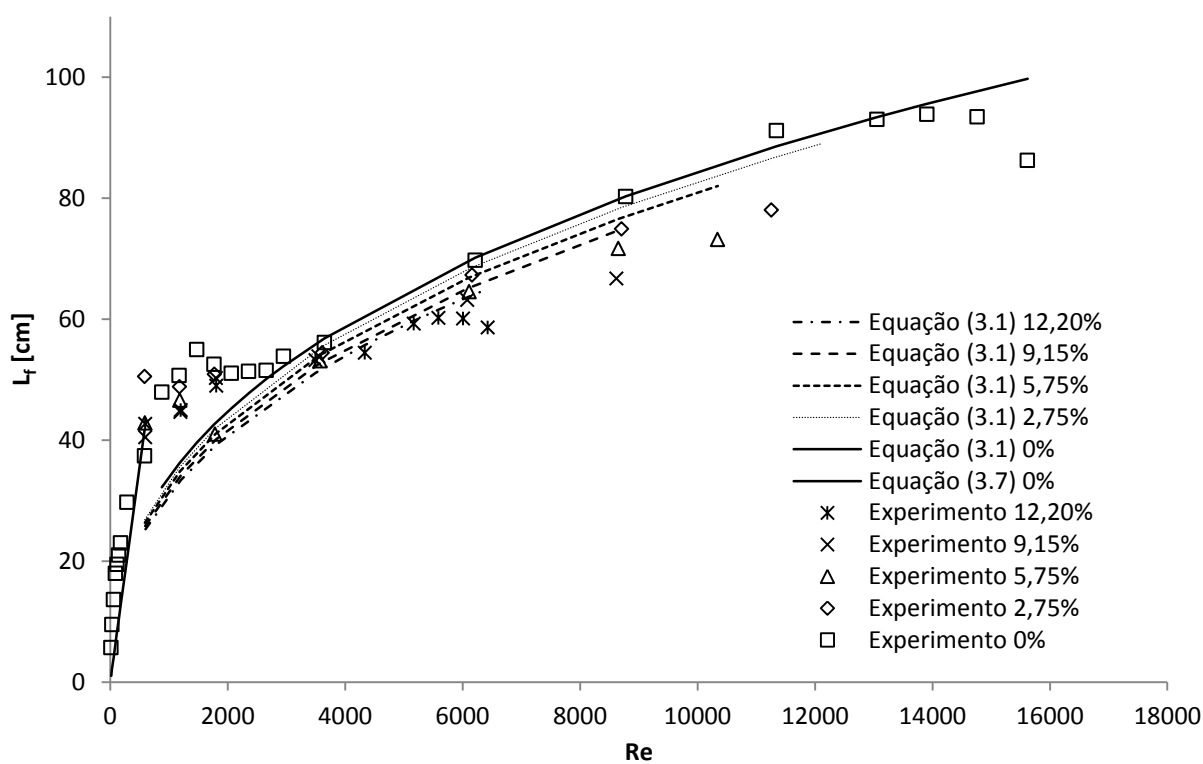


Figura 5.2: Altura de chama visível ( $L_f$ ) em função do número de Reynolds.

Os resultados experimentais deste trabalho concordam com a curva teórica proposta por Delichatsios, 1993, para  $Re > 3000$  e com a curva proposta por Roper, 1977 para  $Re < 1500$ , distanciando-se, portanto, na região de transição e próximo à extinção. O número de Froude, que representa a razão entre as forças de inércia e forças de empuxo ficou abaixo de 5 para todas as chamas apresentando um valor máximo de 1,24 (Tabela I, Apêndice I) mostrando que o estudo ficou limitado a chamas controladas por empuxo como se espera para chamas de baixa potência

A diminuição das alturas de chama para crescentes valores de diluição de  $CO_2$  se deve ao fato de que tais chamas demandam menos ar para a sua combustão já que a quantidade de metano no combustível é menor. Isso pode ser verificado observando que o comprimento de chama decresce com o aumento da fração de mistura estequiométrica  $f_s$  na equação 3.1. A fração de mistura estequiométrica para o metano puro é de 0,056, já para misturas com 12,20% de  $CO_2$  esse valor sobe para 0,064. O efeito da diluição sobre o número de Froude foi de crescimento para maiores valores de diluição e  $f_s$ , conforme previsto pela equação 3.4.

Segundo Delichatsios, 1993, o comprimento adimensional de chama é dependente do número de Froude em faixas de escoamento dominadas pelo empuxo e independente em faixas dominadas pelo momento linear. Os resultados experimentais e a curva teórica estão representados na Figura 5.3 como função de  $Fr$ . A curva teórica foi traçada a partir da correlação proposta por Delichatsios, 1993 (equação 3.2). Observa-se que a equação 3.2 conseguiu descrever melhor o comportamento para chamas turbulentas enquanto para chamas laminares os resultados, apesar de manterem qualitativamente a mesma tendência, distanciaram-se quantitativamente dos valores previsto pela equação. Em comparação com a Figura II, do Anexo II, os resultados experimentais apresentam uma boa concordância qualitativa com os obtidos por Delichatsios, 1993, para escoamentos dominados pelo empuxo.

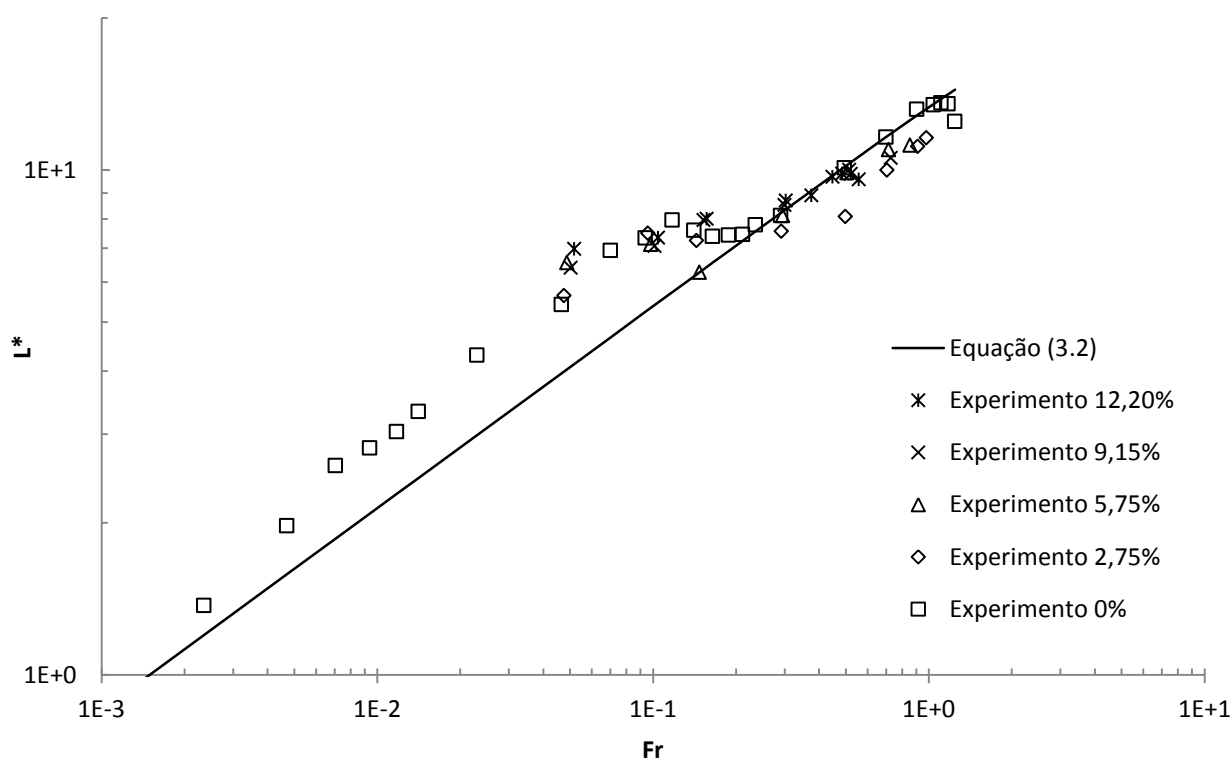


Figura 5.3: Variação do comprimento adimensional de chama ( $L^*$ ) em função do número de Froude.

### 5.2.2. Levantamento de Chama

A Figura 5.4 apresenta os resultados de levantamento de chama em função do número de Reynolds, bem como as curvas teóricas de levantamento propostas por Kalghatgi, 1984.

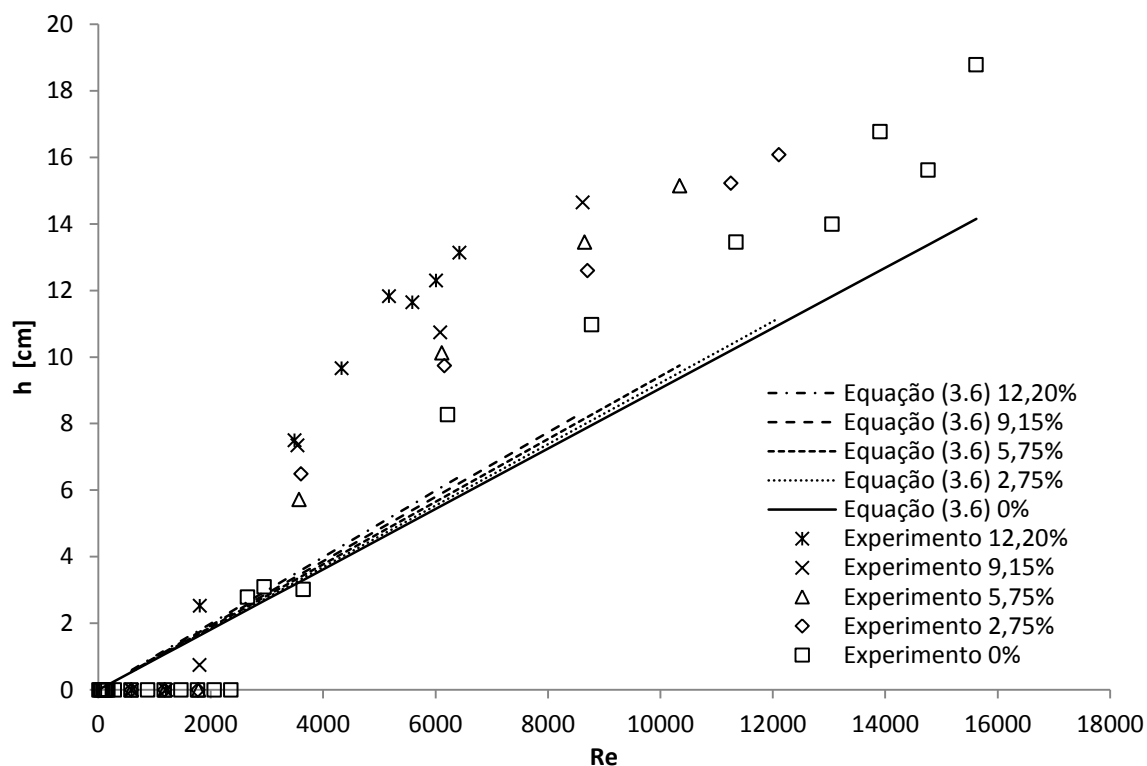


Figura 5.4: Variação do levantamento de chama ( $h$ ) em função do número de Reynolds.

Na figura acima pode ser visto que inicialmente muitos pontos experimentais apresentam valor nulo, indicando que a chama está ancorada no bico injetor. A chama repentinamente passa a apresentar um valor de altura de levantamento quando o escoamento atinge uma vazão crítica de levantamento. Este efeito também pode ser observado de maneira ilustrativa na Figura 5.1.

O aumento da diluição de  $\text{CO}_2$  no combustível implica em um aumento da densidade e da viscosidade cinemática. Pela equação 3.6 nota-se que o aumento desses termos resulta em um aumento do valor de altura de levantamento. Apesar das discrepâncias dos pontos experimentais em relação à curva teórica, ainda assim é possível verificar uma concordância qualitativa entre os resultados e teoria, pois nota-se aproximadamente a mesma taxa de crescimento da altura de levantamento com o número de Reynolds.

### 5.2.3. Reynolds Crítico de Levantamento e Extinção de Chama

O conhecimento do ponto de levantamento de chama e extinção de chama é de grande importância para o projeto de queimadores. A Figura 5.5 apresenta os resultados de Reynolds de levantamento e extinção para diferentes diluições de  $\text{CO}_2$  no combustível.

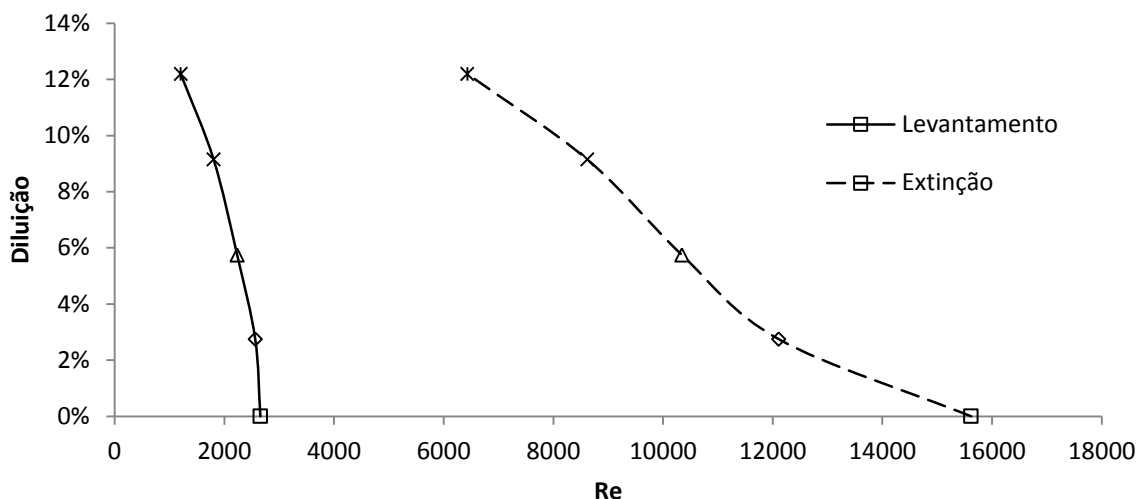


Figura 5.5: Número de Reynolds de levantamento e extinção para diferentes diluições de CO<sub>2</sub>.

Na figura acima nota-se uma clara tendência de diminuição dos valores de Reynolds a medida que acrescenta-se mais CO<sub>2</sub> à mistura, informações que concordam com Kalghatgi, 1984.

Comparando-se o combustível sem diluição e o combustível com 12,20% de diluição, a redução do valor de Reynolds para levantamento é de 54,7% e para o valor de extinção de 58,8%.

## 6. CONCLUSÕES

A verificação dos rotômetros apresentou resultados dentro da faixa de incerteza esperada para os rotômetros de 100-10 NL/min e e 1-10 NL/min e resultados incerteza acima da esperada para o rotômetro de 0,05-0,6 NL/min.

A medição das alturas de chama mostrou-se um desafio, pois para regimes de escoamento turbulento havia uma grande variação tanto na altura da chama quanto na altura de levantamento. Apesar disso, os resultados conseguiram representar bem as faixas laminar, de transição e turbulenta.

Em relação às diferentes diluições entre o dióxido de carbono e o gás natural, concluiu-se que para chamas mais diluídas e, por consequência, com poder calorífico menor, a chama levanta e extingue-se para menores valores de Reynolds. Este resultado é bastante importante do ponto de vista de aplicação, pois limita as vazões de operações de *flares* que operam em campos que possuem gás natural contaminado por CO<sub>2</sub>.

As curvas teóricas utilizadas descrevem bem o fenômeno físico nas regiões onde há apenas regime laminar ou turbulento. No entanto, nota-se uma grande discordância entre os resultados e os valores analíticos para a região próxima à extinção da chama e para a região de transição.

A comparação entre os resultados obtidos e os encontrados na literatura foi qualitativamente boa, como pode ser observado comparando-se a Figura 5.2 e a Figura I e entre a Figura 5.3 e a Figura II. Infelizmente, devido a limitações dos equipamentos utilizados, não foi possível reproduzir chamas com número de Froude maior do que 5 para a visualização do escoamento dominado pelo momento linear.

Para trabalhos futuros, sugere-se utilizar uma técnica computacional para melhorar a medição do comprimento e levantamento de chama e aumentar a escala da montagem experimental para que aproxime-se mais de condições de operação industrial.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Becker, H. A. e Liang, P.; **“Visible Length of Vertical Free Turbulent Diffusion Flames”**, Combustion and Flame, vol. 32, pp. 115-137, 1978.

Broadwell, J. E., Dahm, W. J. A. e Mungal, M. G.; **“Blowout of Turbulent Diffusion Flames”**, Proceedings of the Combustion Institute, vol. 20, pp. 303-310, 1984.

Caetano, N. R.; **“Estudo Experimental de Chamas Turbulentas não Pré-Misturadas Empregando Simultaneamente as Técnicas de Diagnóstico Laser PLIF e PIV”**, Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, pp. 180, 2012.

Câmara dos Deputados, Conselho de Altos Estudos e Avaliação Tecnológica; **“Os desafios do Pré-Sal”**, <http://www2.camara.leg.br/a-camara/altosestudios/pdf/Livro-pre-sal.pdf>. Acessado em 10/05/2014.

Coelho, P. e Costa, M.; **“Combustão”**, Edições Orion, 1ª edição, 2007.

Delichatsios, M. A.; **“Transition from Momentum to Buoyancy-Controlled Turbulent Jet Diffusion Flames and Flame Height Relationships”**, Combustion and Flame, pp 340-364, 1993.

GasNet – O site do gás natural; **“Composição do Gás Natural Bruto”**, [http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas\\_completo.asp#gas11](http://www.gasnet.com.br/gasnatural/gas_completo.asp#gas11). Acessado em 19/05/2014.

Gouveia, F.; **“Tecnologia nacional para extrair petróleo e gás do pré-sal.”**, Conhecimento & Inovação [online]. 2010, vol.6, n.1 [http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1984-43952010000100010&lng=pt&nrm=iso](http://inovacao.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-43952010000100010&lng=pt&nrm=iso). Acessado em 10/05/2014.

Gunnar, H.; **“Luminous Heights of Turbulent Diffusion Flames”**, Fire Safety Journal, pp. 6, 1983.

Hottel, H. C. e Hawthorne, W. R., **“Diffusion in Laminar Flame Jets”**, Proceedings of the Thrid Symposium on Combustion Flame and Explosion Phenomena, pp. 254-266, 1949.

Kalghatgi, G. T.; **“Lift-Off Heights and Visible Lengths of Vertical Turbulent Jet Diffusion Flames in Still Air”**, Combustion Science and Technology, vol. 41, pp 17-29, 1984.

Mungal, M. G. e O’Neil, J. M.; **“Visual Observations of a Turbulent Diffusion Flame”**, Combustion and Flame, vol. 78, pp.377-389, 1989.

Nunes, C. D.; **“Estudo Experimental de Chamas Difusivas Laminares”**, Trabalho de Conclusão do Curso – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, pp. 26, 2012.

Peters, N. e Williams, F. A.; **“Lift-off Characteristics of Turbulent Jet Diffusion Flames”**, AIAA Journal, vol. 21, pp. 423-429, 1983.

Petrobras S.A.; **“Queima de gás natural: carta ao Globo”**, <http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/queima-de-gas-natural-carta-ao-globo.htm>. Acessado em 10/05/2014.

Petrobras S.A.; **“Tocha da produção e segurança”**, <http://fatosedados.blogspot.com.br/2009/10/24/tocha-da-producao-e-seguranca/>. Acessado em 10/05/2014.

Rodrigues, R.; **“Pré-sal: desafios tecnológicos”**, <http://www.conhecimentoeinovacao.com.br/materia.php?id=360>. Acessado em 10/05/2014.

Roper, F. G.; **“The Prediction of Laminar Jet Diffusion Flame Sizes: Part I. Theoretical Model”**, *Combustion and Flame*, vol. 29, pp. 219-226, 1977.

Turns, S. R.; **“An Introduction to Combustion”**, McGraw-Hill Higher Education, 2<sup>nd</sup> ed., 2000.

Vanquickenborne, L. e van Tiggelen, A; **“The Stabilization Mechanism of Lifted Diffusion Flames”**, *Combustion and Flame*, vol. 10, pp. 59-66, 1966.

Wohl, K., Gazley, C. e Kapp, N.; **“Diffusion Flames”**, *Third Symposium on Combustion and Flame and Explosion Phenomena*, pp. 288, 1949.

ANEXO I

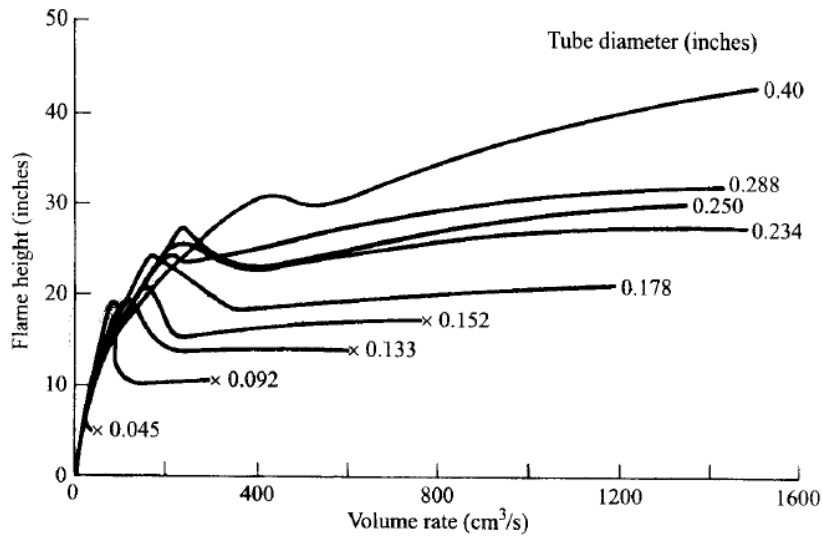


Figura I: Variação do comprimento de chama em função da vazão para diferentes diâmetros de bocal [Adaptado de Wohl et al., 1949].

ANEXO II

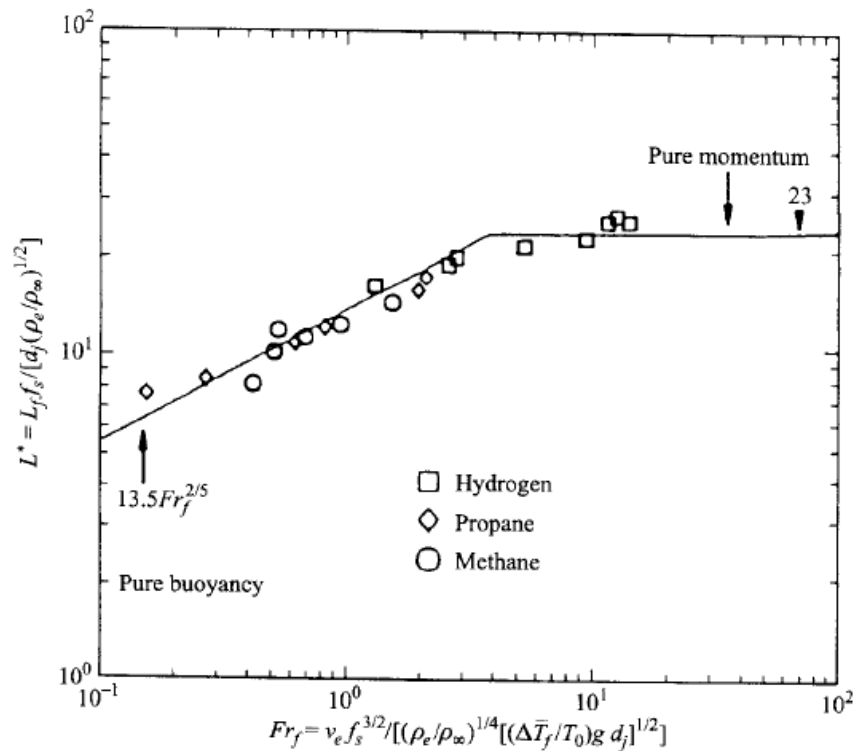


Figura II: Variação do comprimento adimensional de chama em função do número de Froude para diferentes combustíveis [Adaptado de Delichatsios, 1993].

## ANEXO III

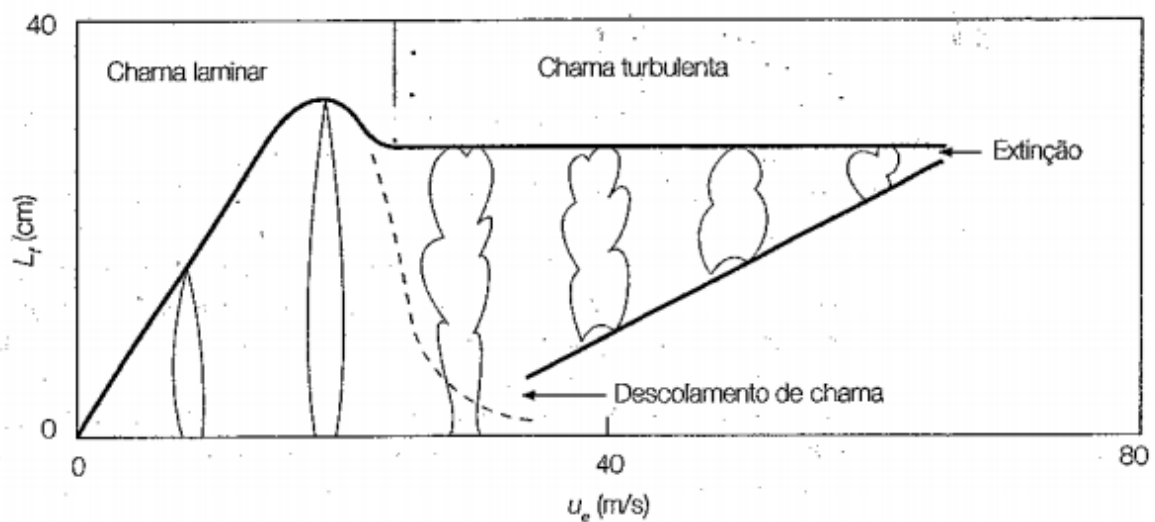


Figura III: Variação do comprimento de chama em função da velocidade de saída do combustível do bico injetor [Adaptado de Hottel e Hawthorne, 1949].

## ANEXO IV

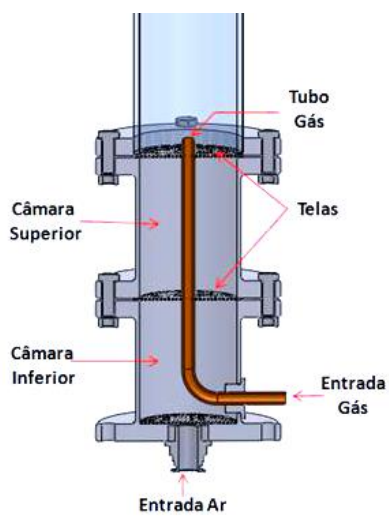


Figura IV: Vista em corte do queimador [Adaptado de Nunes, 2012]



## APÊNDICE I

Tabela I: Dados obtidos a partir da realização das medições experimentais.

Vazão GN Corrigida [NL/min]	Vazão CO2 Corrigida [NL/min]	Número de Reynolds	Altura de Chama [cm]	Compr. Adm de Chama (L*)	Altura de Levantamento [cm]	Número de Froude	Proporção de CO <sub>2</sub>	Incerteza de Medição
<b>Sem Diluição</b>								
0,05	0,00	14,8	5,67	0,82	0,00	0,00	-	16,9%
0,09	0,00	29,5	9,48	1,37	0,00	0,00	-	16,9%
0,18	0,00	59,0	13,63	1,97	0,00	0,00	-	16,9%
0,28	0,00	88,5	17,93	2,60	0,00	0,01	-	16,9%
0,37	0,00	118,0	19,44	2,81	0,00	0,01	-	16,9%
0,46	0,00	147,5	20,95	3,03	0,00	0,01	-	16,9%
0,55	0,00	177,0	22,96	3,32	0,00	0,01	-	16,9%
0,90	0,00	288,9	29,68	4,30	0,00	0,02	-	2,8%
1,82	0,00	584,8	37,37	5,41	0,00	0,05	-	2,8%
2,74	0,00	880,7	47,87	6,93	0,00	0,07	-	2,8%
3,67	0,00	1176,5	50,63	7,33	0,00	0,09	-	2,8%
4,59	0,00	1472,4	54,96	7,95	0,00	0,12	-	2,8%
5,51	0,00	1768,3	52,48	7,60	0,00	0,14	-	2,8%
6,43	0,00	2064,2	51,01	7,38	0,00	0,16	-	2,8%
7,36	0,00	2360,1	51,32	7,43	0,00	0,19	-	2,8%
8,28	0,00	2656,0	51,48	7,45	2,78	0,21	-	2,8%
9,20	0,00	2951,8	53,80	7,79	3,09	0,24	-	2,8%
11,37	0,00	3649,4	56,12	8,12	3,01	0,29	-	4,8%
19,37	0,00	6214,5	69,72	10,09	8,27	0,49	-	4,8%
27,36	0,00	8779,5	80,23	11,61	10,98	0,70	-	4,8%
35,35	0,00	11344,6	91,13	13,19	13,45	0,90	-	4,8%
40,68	0,00	13054,6	92,99	13,46	13,99	1,04	-	4,8%
43,35	0,00	13909,6	93,84	13,58	16,77	1,11	-	4,8%
46,01	0,00	14764,6	93,43	13,52	15,61	1,18	-	4,8%
48,68	0,00	15619,7	86,18	12,47	18,78	1,24	-	4,8%
<b>2,75% de Diluição Média</b>								
1,73	0,06	587,14	37,95	5,64	0,00	0,05	3,27%	45,7%
3,48	0,12	1181,43	50,47	7,50	0,00	0,10	3,25%	22,8%
5,23	0,18	1775,72	48,77	7,25	0,00	0,14	3,25%	15,2%
10,71	0,29	3610,55	50,86	7,56	6,49	0,29	2,66%	15,5%
18,30	0,47	6160,90	54,42	8,09	9,74	0,50	2,50%	9,7%
25,90	0,63	8707,30	67,25	9,99	12,60	0,71	2,38%	7,2%
33,49	0,81	11257,82	74,90	11,13	15,23	0,91	2,36%	5,7%
36,02	0,87	12107,99	77,99	11,59	16,08	0,98	2,35%	5,3%
<b>5,75% de Diluição Média</b>								
1,64	0,12	590,58	42,82	6,55	0,00	0,05	6,67%	22,7%
3,30	0,23	1188,49	46,56	7,13	0,00	0,10	6,63%	11,3%
4,96	0,35	1786,40	40,97	6,27	0,00	0,15	6,62%	7,6%
10,04	0,57	3571,60	53,06	8,12	5,72	0,29	5,40%	7,5%
17,24	0,93	6111,05	64,52	9,87	10,13	0,50	5,10%	4,7%
24,43	1,28	8650,51	71,65	10,97	13,45	0,71	4,97%	3,4%
29,23	1,51	10343,47	73,12	11,19	15,15	0,85	4,92%	2,9%

9,15% de Diluição Média								
1,55	0,18	596,08	40,43	6,40	0,00	0,05	10,20%	15,6%
3,11	0,35	1199,72	44,62	7,07	0,00	0,10	10,14%	7,8%
4,68	0,53	1803,35	50,24	7,96	0,75	0,15	10,12%	5,2%
9,37	0,87	3546,40	53,80	8,52	7,34	0,30	8,46%	4,6%
16,17	1,40	6082,25	63,15	10,00	10,74	0,51	7,94%	2,9%
22,96	1,92	8618,11	66,69	10,56	14,65	0,73	7,73%	2,1%
12,20% de Diluição Média								
1,45	0,23	597,80	42,64	6,98	0,00	0,05	13,87%	12,4%
2,93	0,47	1203,33	44,91	7,35	0,00	0,10	13,79%	6,2%
4,40	0,70	1808,86	48,95	8,01	2,52	0,16	13,76%	4,1%
8,71	1,16	3495,61	53,18	8,70	7,50	0,30	11,76%	3,2%
10,84	1,40	4333,85	54,42	8,90	9,66	0,38	11,40%	2,7%
12,97	1,63	5172,09	59,21	9,69	11,83	0,45	11,16%	2,3%
14,04	1,75	5591,21	60,16	9,84	11,65	0,48	11,07%	2,2%
15,10	1,86	6010,33	60,06	9,82	12,30	0,52	10,99%	2,0%
16,17	1,98	6429,45	58,56	9,58	13,14	0,56	10,92%	1,9%