

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
ENGENHARIA AUTOMOTIVA

ANA CAROLINA LIMA DA SILVA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE COMPORTAMENTO DE CHAMA EM  
QUEIMADORES ATMOSFÉRICOS

Joinville  
2024

ANA CAROLINA LIMA DA SILVA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE COMPORTAMENTO DE CHAMA EM  
QUEIMADORES ATMOSFÉRICOS

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Prof. Leonel R Cancino, Dr. Eng.

Joinville  
2024

ANA CAROLINA LIMA DA SILVA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE COMPORTAMENTO DE CHAMA EM  
QUEIMADORES ATMOSFÉRICOS

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Automotiva, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 03 de Julho de 2024.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Leonel R Cancino, Dr. Eng.  
Orientador/Presidente

---

Prof(a). Sueli Fischer Beckert, Dr(a)  
Membro(a)  
UFSC

---

Prof. Amir A.M Oliveira Jr, Ph.D  
Membro(a)  
UFSC

---

Maurício Zago, Eng.  
Membro(a)  
Whirlpool S.A

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, quero expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Célio e Eliane, pelo sacrifício e apoio incansáveis durante os anos de graduação. Agradeço por sempre priorizarem minha educação e por compreenderem minha ausência durante esse período. Sua dedicação e compreensão foram pilares essenciais ao longo da minha jornada de vida e acadêmica.

Agradeço aos amigos que fiz durante esses anos, por todo apoio emocional e companherismo, em especial a Mayara, Helder, Flor, Mayra e Millena, vocês tornaram tudo isso mais leve.

À minha querida cachorrinha Nairobi, que esteve ao meu lado durante todos os anos da minha graduação, por todo o amor incondicional.

Agradeço também à Whirlpool Latin America pelo apoio inestimável oferecido para o desenvolvimento deste trabalho. A disponibilização dos equipamentos e do laboratório foram fundamentais para a realização dos experimentos. Um agradecimento especial ao Maurício Zago, meu gestor durante o estágio, e ao Lucas Baldani, que generosamente compartilharam seus conhecimentos e orientações.

Agradeço ao meu orientador, Leonel, por sua orientação crucial no desenvolvimento e conclusão deste trabalho, pelas aulas lecionadas, por seu apoio contínuo que contribuíram significativamente para meu crescimento acadêmico e profissional.

Por fim, à Universidade Federal de Santa Catarina, por todo conhecimento e oportunidades fornecidas.

*“ Nenhuma história tem começo e nenhuma história tem fim. Começos e fins podem ser entendidos como algo que serve a um propósito, a uma intenção momentânea e provisória, mas são, em sua natureza fundamental, arbitrários e existem apenas como uma ideia conveniente na mente humana. ”*

Caitlín R. Kiernan

## RESUMO

Queimadores atmosféricos são componentes essenciais em fogões a gás, desempenhando um papel crucial na combustão eficiente do gás, esses queimadores operam em um ambiente onde o ar necessário para a combustão é obtido diretamente do ambiente ao redor, sem a necessidade de um ventilador ou soprador adicional. Diversas geometrias, potências e fluxos de gás podem resultar em comportamentos de chama variados, sendo que alguns deles podem apresentar riscos, tais como a produção de monóxido de carbono ou vazamentos de gás. Portanto, é válido antecipar e identificar tais comportamentos, especialmente por meio de testes de potência com gás natural. Utilizando árvore de amostragem e o MSE conforme o método Lean Six Sigma, foram definidas as etapas, as expectativas e mensurados os erros médio quadráticos de medição para os testes de potência. Os comportamentos de chama observados permitem não apenas a compreensão de pontos de convergência ou discrepâncias em relação aos resultados encontrados na literatura mas também a capacidade de prever e otimizar o comportamento dos queimadores em uma variedade de condições operacionais.

**Palavra-chave:** Queimadores atmosféricos; comportamento de chama; MSE.

## ABSTRACT

Atmospheric burners are essential components in gas stoves, playing a crucial role in the efficient combustion of gas, these burners operate in an environment where the air required for combustion is obtained directly from the surrounding environment, without the need for an additional fan or blower . Different geometries, powers and gas flows can result in varied flame behavior, some of which may present risks, such as the production of carbon monoxide or gas leaks. Therefore, it is worth anticipating and identifying such behaviors, especially through power tests with natural gas. Using a sampling tree and MSE according to the Lean Six Sigma method, the steps, expectations were defined and the mean squared errors of measurement were measured for the power tests. The observed flame behaviors allow not only the understanding of points of convergence or discrepancies in relation to results found in the literature but also the ability to predict and optimize burner behavior in a variety of operating conditions.

**Keywords:** Atmospheric burners; flame stability; MSE.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Queimador atmosférico . . . . .	16
Figura 2 – Vista cortada de um queimador atmosférico. . . . .	17
Figura 3 – Tamanhos de queimadores. . . . .	18
Figura 4 – Geometria interna de injetores. . . . .	19
Figura 5 – Influência do número de Reynolds. . . . .	20
Figura 6 – Chama laminar em um bico de Busen. . . . .	22
Figura 7 – Mínima energia de ignição. . . . .	23
Figura 8 – Chama cônica. . . . .	24
Figura 9 – Chama inclinada. . . . .	25
Figura 10 – Bancada de teste. . . . .	29
Figura 11 – Medidor de vazão. . . . .	30
Figura 12 – Termômetro Testo 103. . . . .	31
Figura 13 – Regulador de pressão. . . . .	32
Figura 14 – Manômetro de saída. . . . .	33
Figura 15 – Manômetro de entrada. . . . .	34
Figura 16 – Chama do primeiro ensaio. . . . .	36
Figura 17 – Árvore de amostragem. . . . .	39
Figura 18 – Range das cartas. . . . .	42
Figura 19 – Carta $\bar{X}R$ . . . . .	43
Figura 20 – Operadores x Válvulas. . . . .	44
Figura 21 – Curva de operação de queimador. . . . .	45
Figura 22 – Operação normal. . . . .	46
Figura 23 – Flashback. . . . .	47
Figura 24 – Amarelamento parcial. . . . .	48
Figura 25 – Amarelamento. . . . .	49
Figura 26 – Levantamento. . . . .	50
Figura 27 – Geometria de influência da capa. . . . .	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões de queimadores. . . . .	18
Tabela 2 – Potência de queimadores. . . . .	19
Tabela 3 – Características dos gases de teste. . . . .	33
Tabela 4 – Pressão de entrada - mmH <sub>2</sub> O (KPa) . . . . .	34
Tabela 5 – Condições iniciais . . . . .	35
Tabela 6 – Resultado do primeiro ensaio . . . . .	36
Tabela 7 – Potências obtidas . . . . .	39
Tabela 8 – Médias e amplitudes . . . . .	41
Tabela 9 – Limites superiores e inferiores . . . . .	41
Tabela 10 – Característica de operação normal . . . . .	47
Tabela 11 – Memorial de ensaios . . . . .	52

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GLP	Gás liquefeito de petróleo
CO	Monóxido de carbono
PCS	Poder calorífico superior
PCI	Poder calorífico inferior
MSE	Erro quadrático médio
RE	Reynolds
DMAIC	Definir-Medir-Analisar-Melhorar-Controlar
UCL	Limite superior
LCL	Limite inferior

## LISTA DE SÍMBOLOS

$W$	Watts
$MJ/m^3$	Mega Joule por metro cúbico
$mm$	Milímetro
$\sin$	Seno
$\alpha$	Alfa
$g$	Gradiente de velocidade limite
$y$	Ditância do limite do fluxo de gás
$mmH_2O$	Milímetros de coluna d'água
$KPa$	Kilo pascal
$dm^3$	Decímetros cúbicos
$mmHg$	Milímetros de coluna de mercúrio
$C$	Graus Celsius
$min$	Minutos
$kg/h$	Kilograma por hora
$m^3/h$	Metro cúbico por hora
$P$	Pressão
$Hv$	Valor de aquecimento do combustível
$Fc$	Fator de correção
$t1$	Tempo em minutos
$t2$	Tempo em segundos
$Gv$	Volume de gás
$Cu.Ft.$	Pés cúbicos
$Patm$	Pressão atmosférica
$Pmv$	Pressão do medidor de vazão

$tv$	Temperatura do medidor de vazão
$in.Hg$	Polegadas de mercúrio
$F$	Grau fahrenheit
$Mn$	Vazão mássica
$Vn$	Vazão volumétrica
$MJ/kg$	Mega joule por kilograma
$\sigma$	Sigma
$btu/h$	Unidade térmica britânica
$\bar{X}$	Carta X-barra
$R$	Carta R
$\overline{\bar{X}}$	Média das médias
$A_2$	Valor estatístico
$\bar{R}$	Média das amplitudes

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos Específicos	14
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>16</b>
2.1	ESTRUTURA DOS QUEIMADORES ATMOSFÉRICOS	16
2.1.1	Tamanho de queimadores atmosféricos	18
2.1.2	Injetores	19
2.1.3	Válvulas	20
2.2	CHAMAS PRÉ MISTURADAS	21
2.2.1	Propriedades de chama	22
2.2.2	Aparência e estabilidade de chama	23
2.2.3	Efeito da geometria dos pórticos	25
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>27</b>
3.1	CONFIGURAÇÃO	28
<b>4</b>	<b>ERRO ASSOCIADO AO PROCEDIMENTO</b>	<b>38</b>
4.1	CURVA DE OPERAÇÃO DO QUEIMADOR	44
<b>5</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS</b>	<b>46</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os queimadores atmosféricos desempenham papel fundamental nos fogões, sendo peças essenciais na transformação de energia de combustíveis gasosos, como o gás natural ou gás liquefeito de petróleo (GLP), em calor para cocção, esses dispositivos operam em um ambiente aberto, aproveitando o ar circundante para o processo de combustão. A eficiência e o desempenho dos queimadores atmosféricos possuem um papel crucial na culinária diária, proporcionando uma fonte confiável e controlável de calor.

O funcionamento dos queimadores atmosféricos é caracterizado por um processo de mistura do combustível com o ar ambiente antes da ignição e, ao serem acionados, esses queimadores criam uma chama estável e controlada, que é direcionada para as superfícies de cocção, sem que haja necessidade de ventilação forçada, como, queimadores herméticos. Embora apresente uma operação comum, é caracterizado por um campo de escoamento complexo com comportamento transitório, tridimensional e multicomponente, contendo mistura de componentes e reações químicas (Baldani, 2016).

Portanto, uma dimensão inadequada pode resultar em alterações indesejadas, como o amarelamento da chama, variações no comportamento da chama, tais como retorno de chama (*flashback*) ou levantamento (*lifting*), e a produção em larga escala de monóxido de carbono (CO). Os diversos comportamentos da chama não são exclusivamente influenciados pela geometria do queimador, também podem surgir com variações no fluxo do combustível, seja aumentando ou diminuindo.

A norma brasileira ABNT NBR 13723-1:2019 contempla questões relacionadas a queimadores atmosféricos que utilizam gás para fins domésticos. De acordo com (ABNT, 2019) deve usado nos testes de potência para análise do comportamento de chama o combustível de gás natural com principalidade de metano, que possui um número de Wobbe entre 51,1 MJ/m<sup>3</sup> e 56,5 MJ/m<sup>3</sup> (mega joule por metro cúbico). O número de Wobbe é a razão entre o poder calorífico de um gás, por unidade de volume, e a raiz quadrada da densidade relativa do mesmo gás (Jones, 1990) como expressada na equação 1.

$$Wobbe = \frac{PCS \text{ ou } PCI}{\sqrt{\text{densidade relativa}}} \quad (1)$$

Na equação 1 o poder calorífico é a quantidade de calor liberada durante a combustão completa a uma pressão constante. O poder calorífico superior (PCS) é o calor de combustão calculado que assume que toda a água nos produtos se condensa em líquido, liberando uma maior quantidade de energia. Já o poder calorífico

inferior (PCI) é o valor de aquecimento mais baixo, considerando que nenhuma água foi condensada (Turns, 2000).

A norma ABNT NBR 13723-1:2019 não apresenta valores para as potências máxima e mínima permitidas em queimadores atmosféricos. Portanto, para um queimador do tipo semi-rápido, considera-se uma faixa de potência entre 2.665,39 W e 820 W (Watts) para garantir um comportamento de chama padrão ABNT NBR 13723-1:2019.

A condução de testes de potência com variação controlada do fluxo de combustível é um componente fundamental deste trabalho, cujo objetivo é compreender e analisar distintos comportamentos de chama em queimadores. A variação intencional da potência por meio do ajuste do fluxo de combustível permitirá identificar possíveis desafios, como elevação da chama (*lifting*) ou riscos de retorno (*flashback*) da chama em direção ao interior do queimador, que podem surgir em condições operacionais de maior demanda de potência e, ao reduzir o fluxo de combustível, a intenção é examinar o comportamento em situações de baixa potência, avaliando a capacidade do queimador de manter uma chama estável, prevenindo situações indesejadas, como extinção da chama.

Esses comportamentos físicos obtidos por meio de experimentação servirão como parâmetros para a construção de uma árvore de amostragem e um erro quadrático médio (MSE). Permitindo não apenas a compreensão de pontos de convergência ou discrepâncias em relação aos resultados encontrados na literatura mas também a capacidade de prever e otimizar o comportamento do queimador em uma variedade de condições operacionais.

## 1.1 OBJETIVOS

Para compreender o comportamento de chama influenciada por variação do fluxo de combustível, propõe-se os seguintes objetivos.

### 1.1.1 Objetivo geral

Analisar experimentalmente diferentes tamanhos de queimadores atmosféricos de um mesmo modelo, a fim de interpretar possíveis comportamentos de chama a partir da variação de fluxo do combustível.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Compreender os efeitos da variação de vazão e potência em um queimador atmosférico de modelo genérico.

- Classificar os diferentes tipos de queimadores e reconhecer os comportamentos de chama associados a cada um, como levantamento (*lifting*), retorno de chama (*flashback*), amarelamanto, comportamento normal e sem presença de chama.
- Identificar pontos de concordância e possíveis discrepâncias para compreender a causa raiz, isto é, o fator determinante do comportamento da chama.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Queimadores são dispositivos projetados para misturar combustível, como gás natural ou metano, com ar/oxigênio para produção de calor ou energia térmica de forma eficiente e controlada. Os queimadores atmosféricos são definidos como o processo natural da passagem de ar pelo sistema mecânico e a combustão ocorrem em pressões similares a pressão atmosférica (Salvi, 1995).

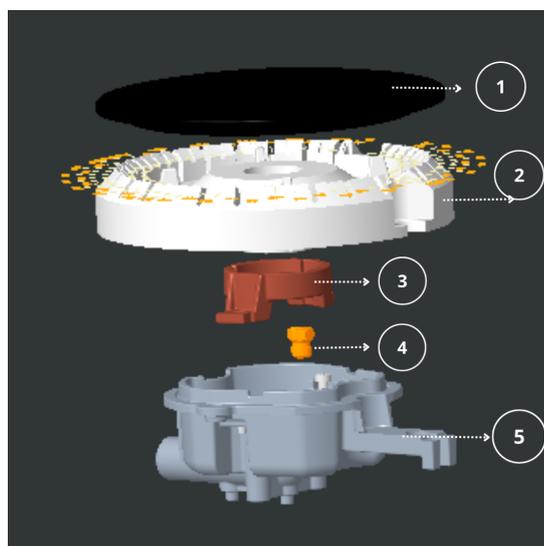
Durante o processo de combustão, a relação entre a quantidade de combustível e oxidante que entram em reação desempenha um papel crucial e alterações nessas quantidades resultam em comportamentos de chamas distintos, categorizados em chamas não aeradas e chamas pré-misturadas.

De acordo com Jones (1990) a combustão de uma chama não aerada ocorre por difusão de oxigênio no fluxo de combustível não queimado à medida que o combustível é injetado na câmara de combustão, ou seja, partes do combustível entram em contato com o oxidante após a ignição que a denomina como uma combustão incompleta. Isso é o que difere uma chama pré misturada que possui uma combustão completa, a mistura entre os componentes ocorre antes da ignição de uma forma homogênea (Jones, 1990).

### 2.1 ESTRUTURA DOS QUEIMADORES ATMOFÉRICOS

Um queimador atmosférico, genérico, pode ser constituído pelas partes mostradas na figura 1.

Figura 1 – Queimador atmosférico



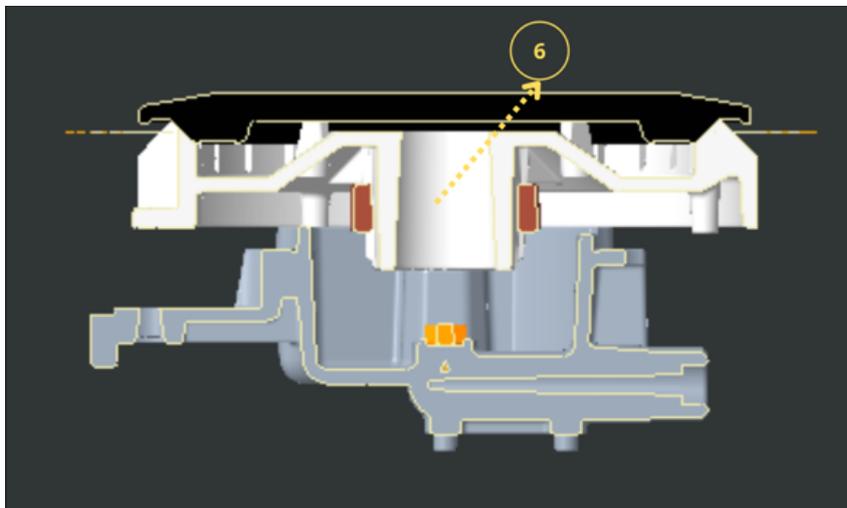
Fonte: Whirlpool, 2023

As partes indicadas na figura 1 estão descritas a seguir,

1. **Capa do queimador**, tem a função de distribuir uniformemente a mistura ar/combustível para garantir uma queima eficiente e estável;
2. **Espalhador**, possui aberturas ou pórticos projetados de forma específica para permitir que o combustível seja distribuído de maneira uniforme na área da chama. Isso evita pontos quentes ou frios na chama, o que poderia levar a uma queima desigual do combustível;
3. **Suporte**, neste caso é posicionado abaixo do espalhador para fornecer estabilidade ao conjunto.
4. **Injetor**, regula e limita a vazão de gás que flui para o interior do queimador, ou seja, o gás que emerge de um injetor cria um jato que induz o fluxo de ar primário para dentro do tubo do queimador;
5. **Suporte injetor**, mantém o orifício em uma posição específica e precisa, garantindo que o gás seja liberado na quantidade correta para uma queima.

Com uma vista cortada na horizontal, é possível ver outras partes da estrutura do queimador que são importantes.

Figura 2 – Vista cortada de um queimador atmosférico.



Fonte: Whirlpool, 2023

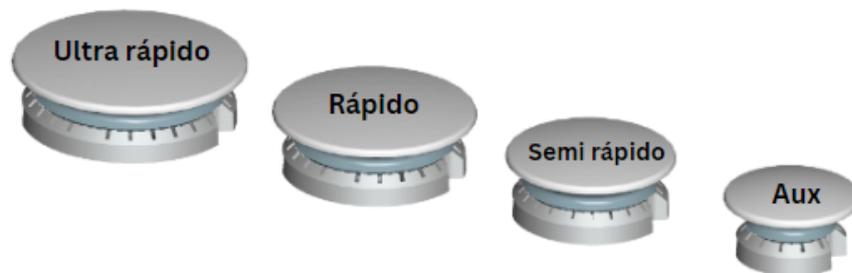
O item (6) refere-se ao Venturi, uma peça cônica no interior do queimador, ao longo da qual, em função da sua variação da seção transversal ao escoamento é gerada uma zona de baixa pressão (na seção convergente) acelerando desta forma os gases e contribuindo no processo de mistura. Observe-se que, o gás combustível é injetado, concêntrico ao Venturi, em pressão superior à pressão atmosférica, o jato resultante induz a admissão de ar primário por um efeito de arrasto aerodinâmico em

função da sua quantidade de movimento. De acordo com (Segeler, 1968), a razão entre a área do venturi e a área total dos pórticos do espalhador seja igual a 0,45 que resulta em um desvio de cinco por cento da injeção máxima de ar, ou seja, da velocidade do arraste de ar, quando comparado a uma razão de igual proporção em projetos de queimadores atmosféricos.

### 2.1.1 Tamanho de queimadores atmosféricos

Como mencionado anteriormente, a configuração do queimador tem impacto no comportamento de chama. Na figura 3, são apresentadas quatro classificações de tamanho para os queimadores atmosféricos do tipo "American burner".

Figura 3 – Tamanhos de queimadores.



Fonte: Adaptado de (Whirlpool, 2023)

É perceptível que a variação visível entre eles está no dimensionamento, o que resulta em diferentes capacidades de potência de operação. Os queimadores de maior dimensão, como os classificados como ultra rápidos, são capazes de gerar altas taxas de calor em um curto espaço de tempo, por outro lado, queimadores de menor dimensão, como os rápidos e semi rápidos, proporcionam uma potência de operação mais moderada, adequada para preparações que necessitam de calor constante e controlado. Os queimadores auxiliares, por sua vez, desempenham um papel secundário, auxiliando durante picos de demanda ou em situações de contingência.

Tabela 1 – Dimensões de queimadores.

Tipo de queimador	Ultra rápido	Rápido	Semi rápido	Auxiliar
Diâmetro da capa (mm)	113,63	98,63	82,13	65,93
Distância capa x espalhador (mm)	35,57	33,57	33,57	33,84
Altura do espalhador (mm)	14,64	14,65	14,65	14,64

Fonte: O autor, 2024.

Na tabela 1, são destacadas as principais variações de dimensões entre os distintos tipos de queimadores. Esses valores foram obtidos a partir de amostras re-

representativas de cada tipo de queimador, utilizando um paquímetro como instrumento de medição. Essas discrepâncias têm impacto no funcionamento do queimador, que se baseia em aproveitar a quantidade de movimento do gás combustível injetado para arrastar o ar primário (Carrillo, 2005), que está associada à geometria do queimador.

Em termos de capacidade de potência, as normas ANSI Z21.1-2016 e ABNT NBR 13723- 1:2019 não especificam valores exatos, usualmente esses valores são determinados de forma experimental e numérica, logo foram utilizados os registros de pesquisas e experimentos da Whirlpool S.A. para determinar as faixas de potências descritos na tabela 4.

Tabela 2 – Potência de queimadores.

Tipo de queimador	Ultra rápido	Rápido	Semi rápido	Auxiliar
Potência máxima (W)	5,275	2,665	1,903	1,465
Potência mínima (W)	967	966	966	292,9

Fonte: O autor, 2024.

### 2.1.2 Injetores

Os injetores são componentes separados dos queimadores, contudo, são responsáveis por limitar ou regular a quantidade de gás que flui para dentro do queimador. A taxa de fluxo de gás é determinada pelo tamanho do orifício do injetor e pela pressão do combustível na entrada do injetor. Do ponto de vista físico, um injetor converte a energia potencial de um suprimento de gás de alta pressão em energia cinética de um jato de gás que emerge (Jones, 1990).

Figura 4 – Geometria interna de injetores.

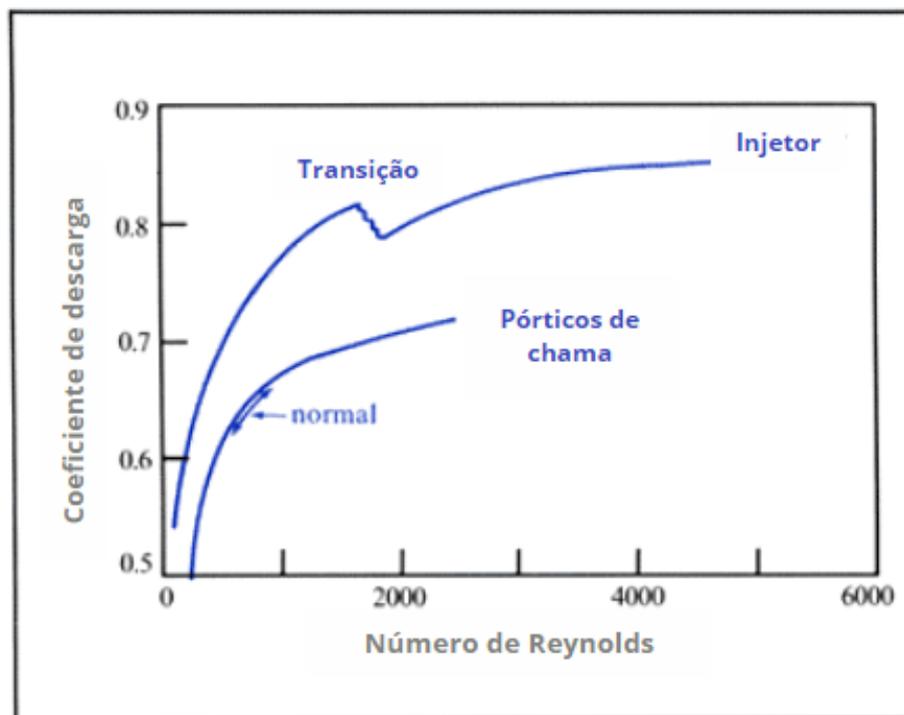
				
Dímetro	0.58	3.5	0.8	1.0
Saída angular	45°	55°	33°	40°
Coefficiente de descarga	0.81	0.84	0.93	0.94

Fonte: Adaptado de (Jones, 1990).

O coeficiente de descarga é definido como a relação entre a vazão mássica real de um fluido através de um orifício e a vazão mássica ideal (Charles E. e Bakual, 2004), ou seja, indica a proporção do combustível que, teoricamente, poderia passar

pelo injetor e efetivamente passa por ele. Os valores são comumente determinados com base no número de Reynolds ( $Re$ ) do fluxo no orifício que de acordo com (Charles E. e Bakual, 2004). O efeito do número de Reynolds demonstra que, em um injetor operando em regime laminar ( $Re < 2000$ ), o coeficiente de descarga é completamente influenciado pelo número de Reynolds. Em contraste, em um regime turbulento, o coeficiente de descarga pode ser considerado constante (Jones, 1990). Injetores residenciais geralmente operam em regime de fluxo turbulento ( $Re > 2000$ ), onde qualquer variação no coeficiente de descarga pode ser desconsiderada pois passam pela zona de transição e adotam comportamento constante, como mostra a figura 5.

Figura 5 – Influência do número de Reynolds.



Fonte: Adaptado de (Jones, 1990).

### 2.1.3 Válvulas

O dispositivo de controle mais comum usado nas indústrias de controle de processos são as válvulas de controle. Elas têm como finalidade manipular fluidos, tais como gás, vapor, água ou compostos químicos, a fim de compensar perturbações no sistema e manter a variável de processo regulada o mais próximo possível do ponto ideal desejado (Fisher, 2023). Dentro do contexto das válvulas empregadas em sistemas industriais, diferentes tipos são comumente utilizados, tais como as válvulas globo, de esfera e de borboleta. No entanto, destaca-se a relevância da válvula *bypass*, também conhecida como válvula de desvio. Esta válvula oferece a capaci-

dade de estabelecer um caminho alternativo para o fluxo de fluido em um sistema, possibilitando uma regulação precisa da vazão.

## 2.2 CHAMAS PRÉ MISTURADAS

Chama é uma propagação autossustentada de uma zona de combustão localizada em velocidades subsônicas (Turns, 2000), em outras palavras, a chama está distribuída de forma uniforme em diferentes partes da mistura de ar e combustível, ocupando essas áreas de maneira homogênea. Pode-se dizer que uma onda de combustão que se movimenta subsonicamente é chamada de deflagração, e quando ocorre de forma supersônica é denominada detonação (Turns, 2000). Dará-se enfoque apenas nas que se deslocam de forma subsônica.

A chama pré misturada recebe todo o ar primário necessário para uma combustão completa (Jones, 1990). Um exemplo claro de chama laminar pré-misturada é ilustrado pelo queimador do tipo bico de Bunsen, onde o ar primário é incorporado à corrente de gás antes da combustão ocorrer no topo do tubo do queimador. É considerada uma chama dupla, ou seja, uma chama interna pré misturada rica em combustível cercada por uma chama de difusão (Turns, 2000). O formato cônico de chama e sua estabilidade é determinada pelos efeitos de velocidade e perdas de calor na parede do tubo de forma que a chama permaneça estacionária. A velocidade de propagação da chama segundo (Turns, 2000) dá-se pela equação 2.

$$SI = Vu * \text{sen}\alpha \quad (2)$$

Onde,

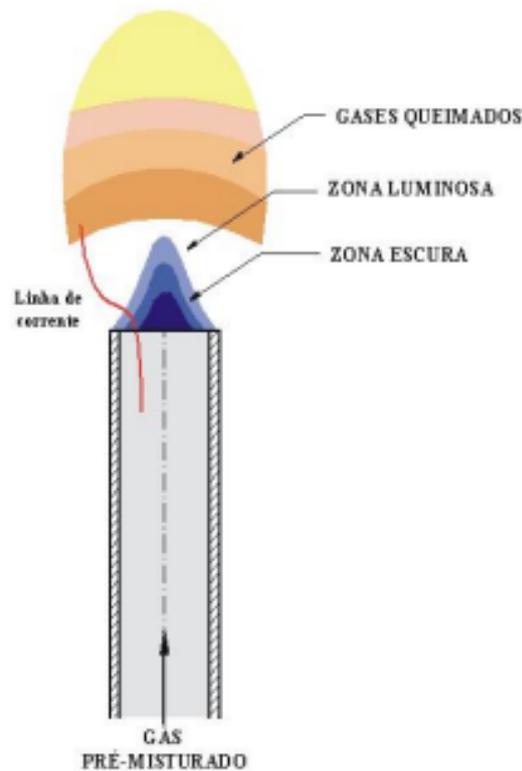
SI = Velocidade de queima da chama laminar;

Vu = Velocidade da mistura ar combustível;

$\alpha$  = Ângulo do cone formado pela chama interna.

Antes da aplicação com o bico Busen, as chamas eram geradas principalmente pela combustão de gases injetados no ambiente através de orifícios de injeção, sem a mistura prévia com o ar (Lewis B. e Von Elbe, 1961). A figura abaixo ilustra uma chama laminar estabilizada em um bico de Busen.

Figura 6 – Chama laminar em um bico de Busen.



Fonte: (Carrillo, 2005).

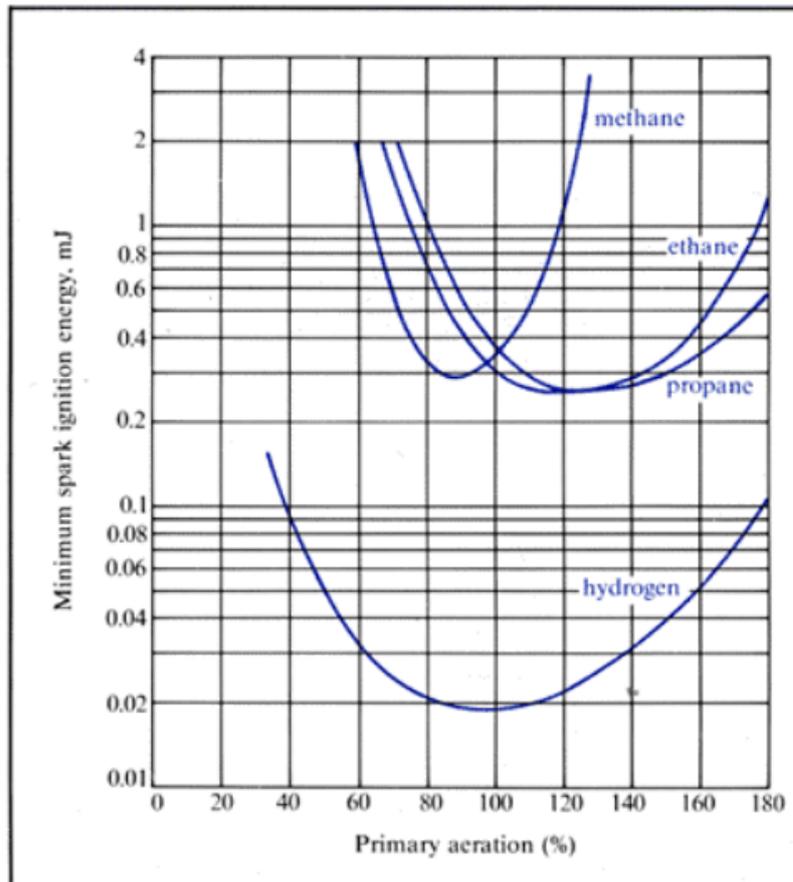
### 2.2.1 Propriedades de chama

Para além do simples surgimento da chama, vários fatores cruciais estão envolvidos nesse processo, destacando-se principalmente a ignição e o limite de inflamabilidade. A combustão é sustentada quando ar e combustível estão dentro dos limites de inflamabilidade. Por definição o limite superior é a concentração máxima de combustível que manterá a chama, conforme essa concentração aumenta mais ar é necessário para a queima. No limite inferior o processo é inverso (AMERICAN GAS ASSOCIATION LABORATORIES, 2001).

A ignição representa o momento em que existe energia em quantidade suficiente de combustível presente, permitindo que a combustão ocorra de forma autossustentável, como mencionado por Charles E. e Bakual (2004). Se esse ponto de inflamabilidade não for alcançado, a chama se extingue devido à falta de combustível ou oxidante necessários no sistema. De acordo com Jones (1990) a energia para a ignição da mistura deve ser fornecida por uma fonte externa, como uma faísca. A mínima energia de ignição vai depender da composição, pressão, temperatura e velocidade da mistura reagente.

A figura 7 mostra valores de mínima energia de ignição em relação ao ar primário para combustíveis, por exemplo, metano, propano e afins.

Figura 7 – Mínima energia de ignição.



Fonte: (Jones, 1990).

### 2.2.2 Aparência e estabilidade de chama

A aparência e estabilidade da chama são influenciadas por diversos fatores, incluindo a quantidade de ar primário, a velocidade de queima do combustível e as dimensões das portas do queimador. Que podem ser divididas em dois critérios, um que diz respeito as capacidades de mistura ar/combustível de suportar a propagação de chama, que inclui os limites de inflamabilidade e o efeito quenching (Gattei, 2008). As portas do queimador, representadas pelos pórticos ao redor do espalhador, desempenham um papel crucial nesse contexto.

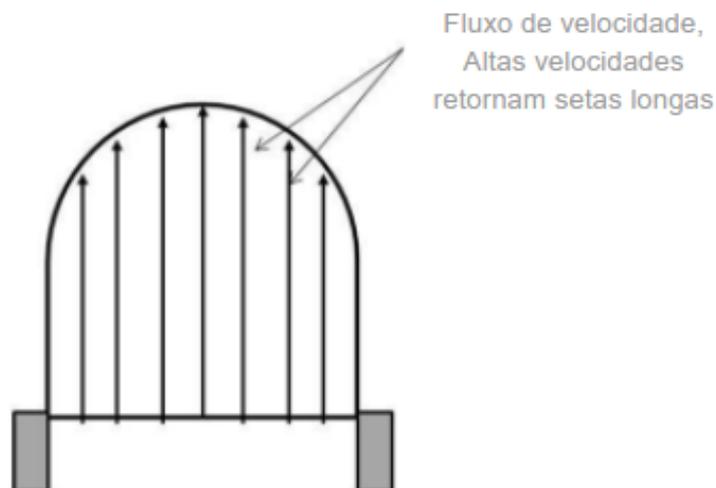
Nos pórticos ocorre um fenômeno denominado como efeito quenching, que é descrito como o fenômeno que leva à extinção da chama dentro de um tubo ou queimador. Esse efeito é causado pelas perdas ou dissipação de calor para as paredes (pórticos), que reduzem a taxa de reação química a um ponto em que a chama não pode mais ser sustentada (Gattei, 2008).

O segundo critério está associado ao escoamento do combustível e sua interação com a chama. De acordo com Gattei (2008), "Esse limite de estabilidade que

inclui os fenômenos de flashback [...] descreve as limitações da estabilização de uma chama laminar em uma situação experimental real".

A velocidade do escoamento do combustível está vinculada à quantidade de ar presente e ao diâmetro do tubo. Fluxos mais robustos em tubos de menor diâmetro resultam em velocidades mais elevadas. Assim, a velocidade do escoamento não é uniforme em todos os pontos, o atrito nas paredes do tubo reduz a velocidade ao ponto de extinguir a chama, chegando a uma velocidade nula e as maiores velocidades de fluxo se encontram na linha central do tubo, resultando em uma chama de formato cônico (AMERICAN GAS ASSOCIATION LABORATORIES, 2001).

Figura 8 – Chama cônica.

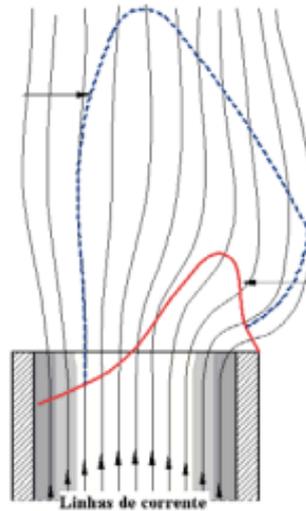


Fonte: Adaptado de (AMERICAN GAS ASSOCIATION LABORATORIES, 2001)

A chama adquire uma configuração cônica quando a mistura de ar e combustível se afasta do tubo a uma certa distância. Nesse ponto, a velocidade do escoamento e a velocidade de queima da chama se tornam iguais, resultando na estabilização da chama. Como previamente mencionado, o fluxo é mais intenso na linha central do tubo, resultando na estabilização mais proeminente da chama ao longo dessa linha. Além disso, a chama estabiliza-se em outros pontos conforme a variação da velocidade do fluxo (Carrillo, 2005).

Os pontos de instabilidade ocorrem fora da linha central, quando a velocidade do gás excede a velocidade da queima de chama. O perfil da onda é inclinado contra a direção do fluxo do gás combustível produzindo uma chama inclinada (Lewis B. e Von Elbe, 1961), conforme a figura 9.

Figura 9 – Chama inclinada.



Fonte: (Carrillo, 2005)

Quando o diâmetro do tubo é suficientemente largo para que o perfil de velocidade do gás da onda cônica seja considerado linear, tem-se a equação 3.

$$U u = g * y \quad (3)$$

Onde,

$y$  = Distância do limite do fluxo de gás;  $g$  = Gradiente de velocidade limite.

Se o fluxo da mistura ar-combustível diminui, a constante  $g$  também diminui. Nesse cenário, a posição de equilíbrio se desloca em direção à extremidade do tubo, alcançando uma posição na qual a velocidade do fluxo de gás é inferior à velocidade de queima da chama. Esse fenômeno é conhecido como retrocesso (flashback), no qual a chama retrocede para dentro do sistema de combustão (Lewis B. e Von Elbe, 1961). Outra condição crítica associada ao gradiente de velocidade é o *blow-off*, que ocorre quando a velocidade do fluxo de combustível aumenta a ponto de ultrapassar a velocidade de queima da chama. Nesse caso, a chama formada afasta-se da borda do tubo e é expelida por difusão para o ambiente (Lewis B. e Von Elbe, 1961).

### 2.2.3 Efeito da geometria dos pórticos

O dimensionamento dos pórticos de um queimador influenciam os dois comportamentos de chamas que mais causam riscos, que são o levantamento e o retrocesso de chama. Portanto é preciso que a geometria tenha um dimensionamento ótimo afim de evitar tais comportamentos.

Para o levantamento de chama, pórticos menores são mais propensos à instabilidade, pois aumentam a velocidade de queima. Em contrapartida, para o retrocesso

de chama, pórticos maiores amplificam o efeito quenching, aumentando assim a probabilidade de ocorrer o flashback (Gattei, 2008).

Gattei afirma que, na entrada dos pórticos, há um fluxo uniforme com a velocidade de fluxo livre. À medida que esse fluxo passa pelas ranhuras, o cisalhamento entre o fluido e a parede retarda o movimento, fazendo com que a camada limite cresça até estar totalmente desenvolvida. Para isso, é necessário que o orifício tenha uma determinada profundidade. Portanto, o flashback ocorrerá em orifícios mais espaçados e rasos.

A perda de calor pode ser expressa como coeficiente de descarga, que é menor para portos menores e maior para portos maiores. Portanto, para um determinado pórtico e uma entrada de calor constante, a carga efetiva suportada pelo orifício (quantidade de combustível que pode passar) aumenta conforme a geometria diminui, pois isso provoca o aumento da velocidade de escoamento. Em outras palavras, o levantamento de chama é mais provável (Gattei, 2008).

### 3 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho se assemelha aos métodos utilizados por Junus J. E. Vierkanti (1998), de característica experimental, o qual aborda os efeitos da estabilidade de chama em queimadores atmosféricos utilizados em cooktops de gás natural, o autor aborda principalmente os comportamentos de chama a partir da aeração primária. Como também se assemelha aos métodos utilizados por Gattei (2008) que discute e prevê os comportamentos de chama a partir da literatura e ensaios experimentais em diferentes geometrias de queimadores.

Gattei afirma que o tipo de instabilidade que causa o levantamento de chama não pode ser investigado sem um processo de combustão. Gattei (2008) aplicou ensaios experimentais em um queimador atmosférico, com o objetivo de capturar essa instabilidade de forma estacionária ou transitória. As metodologias são semelhantes, pois partem do mesmo princípio: forçar as instabilidades de chama. Por exemplo, a escolha do queimador por Gattei foi baseada na potência nominal, um critério também utilizado neste trabalho para manter constantes alguns possíveis fatores que influenciam a instabilidade.

Para Gattei, as alterações na aparência da chama sugerem que uma pré-mistura reduz a altura da chama, e quanto maior for a pré-mistura parcial, menor será a quantidade de ar secundário necessária para obter uma mistura estequiométrica (valores iguais de ar e combustível). Em seus ensaios, observou que, em baixas velocidades de injeção de combustível, a chama se ancora mais próxima aos orifícios, enquanto em velocidades maiores, a chama é forçada a se ancorar a uma distância maior ou até mesmo a se desprender. O autor conclui que o levantamento de chama ocorre devido ao equilíbrio entre a velocidade de queima e a velocidade do reagente não queimado.

A escolha do queimador para realizar os ensaios foi baseada em parâmetros de geometria e potência nominal, uma vez que o tipo de combustível, embora relevante para a análise do comportamento da chama, já estava predefinido como gás natural, predominantemente composto por metano, dessa forma, optou-se pela escolha de um queimador do tipo ultra rápido, caracterizado por uma potência nominal geralmente em torno de 5.275 W na máxima e 967 W na mínima. A expectativa é que, devido à sua maior faixa de potência, seja possível abranger os comportamentos de chama desejados.

Existem diversas maneiras de alterar a aparência da chama, e uma delas envolve a realização de testes de potência com variações no fluxo da mistura ar-combustível, os quais foram conduzidos como parte experimental deste estudo. Esses testes foram executados no laboratório de cocção da empresa Whirlpool S.A.

A condução dos testes seguiu os padrões estabelecidos pela norma americana conhecida como Household Cooking Gas Appliances - General (ANSI, 2016). Deve-se enfatizar que, uma vez que o produto não foi inicialmente projetado para o mercado brasileiro, algumas adaptações seriam necessárias para conformidade com as normas brasileiras, o que poderia potencialmente introduzir instabilidades nos resultados obtidos.

### 3.1 CONFIGURAÇÃO

Os ensaios foram conduzidos no laboratório de cocção da companhia na cidade de Joinville em Santa Catarina durante os anos de 2023 e 2024. Para atingir os comportamentos de chama desejados, procedeu-se à instalação da bancada de teste, demonstrada na figura 10, a fim de realizar os testes de potência de queimador. Para cada queimador testado foi alterado o injetor com mesmo perfil interno mas com diâmetros distintos. Em um caso especial foram invertidas duas válvulas, ambos os casos alteram a passagem do ar combustível no interior do queimador.

Foram necessários os seguintes equipamentos e ferramentas:

1. Cooktop;
2. Manômetro;
3. Termômetro;
4. Medidor de vazão de gás;
5. Cronômetro;
6. Planilha de calculo de potência.

Figura 10 – Bancada de teste.



Fonte: O autor, 2023.

O medidor de vazão ilustrado na figura 10 é do tipo tambor imerso que utiliza o princípio de medição de volume deslocado para medir a vazão de gases, essa vazão é medida enquanto o queimador está em funcionamento.

Figura 11 – Medidor de vazão.



Fonte: O autor, 2023.

Para monitorar a temperatura do medidor de vazão, empregou-se um termômetro de imersão do tipo Testo 103, voltado para medições em meios líquidos. Esse termômetro é capaz de aferir a temperatura dentro do medidor de vazão de tambor imerso, conforme a figura 11.

Figura 12 – Termômetro Testo 103.



Fonte: O autor, 2023.

Figura 13 – Regulador de pressão.



Fonte: O autor, 2023.

A pressão da rede que fornece o combustível é ajustada para um valor de sete milímetros de coluna d'água, na saída do medidor de vazão e na entrada do produto conforme indicado pelo manômetro na figura 14. Esse ajuste é estabelecido como padrão para os testes, uma vez que essa pressão afeta a vazão de combustível. No entanto, como a vazão será monitorada durante todos os experimentos, a acuracidade desse valor não se faz essencial. A regulação da pressão é realizada por meio de um regulador de pressão equipado com um sistema mecânico de parafuso e mola.

Figura 14 – Manômetro de saída.



Fonte: O autor, 2023.

Este valor ajustado de pressão da-se a partir de tabelas disponíveis em ANSI Z21.1-2016 para o combustível gás natural, mostrada a partir da tabela 3.

Tabela 3 – Características dos gases de teste.

	Valor de aquecimento		Gravidade específica
	Btu/ft <sup>3</sup>	MJ/m <sup>3</sup>	Air = 1.0
Gas A (Natural)	1075	40,1	0,65
Gas B (Manufaturado)	535	19,9	0,38
Gas C (Misturado)	800	29,8	0,50
Gas D (n-Butano)	3200	119,2	2,00
Gas E (Propano HD-5)	2500	93,1	1,55
Gas F (Propano - Ar)	700	26,1	1,16
Gas G (Butano - Ar)	1400	52,2	1,42
Gas H (Propano - Ar)	1400	52,2	1,30

Fonte: Adaptado de (ANSI, 2016).

Tabela 4 – Pressão de entrada - mmH2O (KPa)

Gas testado	Reduzido	Normal	Aumentado
A	3,5 (0,87)	7,0 (1,74)	10,5 (2,61)
B	3,0 (0,75)	6,0 (1,49)	9,0 (2,24)
C	3,0 (0,75)	6,0 (1,49)	9,0 (2,24)
D	8,0 (1,99)	11,0 (2,74)	13,0 (3,23)

Fonte: Adaptado de (ANSI, 2016).

A mesma pressão da rede também é registrada pelo manômetro de entrada do medidor de vazão expressa também em milímetros de coluna d'água, como na figura 15.

Figura 15 – Manômetro de entrada.



Fonte: O autor, 2023.

O ensaio inicia-se com a realização do teste de estanquidade, visando garantir a ausência de vazamentos de ar combustível. Em seguida, o produto é instalado na bancada de teste. Conforme as normas, é recomendado acender todos os queimadores, ou aqueles de interesse, até que a chama se estabilize, permitindo a expulsão do ar presente na linha de transmissão para o ambiente. Em seguida, o produto é resfriado até a temperatura ambiente para que seja possível dar início ao teste de acordo com ANSI Z21.1-2016:

1. Acender os queimadores em teste na configuração desejada e iniciar o cronômetro.
2. Confirmar a pressão de entrada no sistema de acordo com o combustível utilizado.
3. Registrar a pressão e a temperatura do medidor de vazão.
4. Medir a temperatura atmosférica.
5. Após operado por cinco minutos, usar o cronômetro para registrar o tempo em que o medidor de vazão leva para dar 0,32 revoluções em decímetros cúbicos ( $dm^3$ ).
6. Compilar as medidas mensuradas na planilha de apoio.

O teste inicial ocorreu sob condições operacionais padrão, onde o queimador ultra-rápido foi utilizado juntamente com a válvula bypass padrão já integrada ao produto. Além disso, um injetor com diâmetro de 1,88 milímetros (mm), conforme definido no projeto de desenvolvimento do produto, foi empregado para efeito de comparação com o valor nominal de potência disponível na literatura, que é de 5,275 W.

Tabela 5 – Condições iniciais

Parâmetros	
Pressão medidor de vazão (mmH <sub>2</sub> O)	186
Pressão de saída (mmH <sub>2</sub> O)	7
Temperatura atmosférica (mmHg)	30,14
Temperatura medidor de vazão (°C)	23,7
Tempo de 0,32 revoluções (min)	0,42

Fonte: O autor, 2024.

Com os valores indicados na tabela 6 encontrou-se uma chama estável em operação normal sem amarelamento e com os seguintes valores de potência, vazão mássica e volumétrica.

Figura 16 – Chama do primeiro ensaio.



Fonte: O autor, 2023

Tabela 6 – Resultado do primeiro ensaio

Tipo do queimador	Ultra rápido
Potência (W)	5,134
Vazão mássica (kg/h)	338,76
Vazão volumétrica (m3/h)	0,5159

Fonte: O autor, 2024.

É importante destacar que o valor de potência obtido não corresponde exatamente ao mencionado anteriormente. No entanto, de acordo com a norma ANSI Z21.1-2016, a tolerância admissível é de +/-5%. Portanto, o valor medido de 5.134 W está dentro dessa faixa de tolerância.

O cálculo é realizado utilizando a vazão de combustível ao longo do tempo como base. A empresa optou por utilizar uma planilha para calcular a potência, e a partir dela serão demonstrados os princípios das equações utilizadas, fornecendo uma explicação do método empregado para determinar o valor potência.

$$P = \frac{Hv * 3600 * Fc}{t1 * 60 + t2} * Gv \quad (4)$$

Onde,

P = Potência;

Hv = Heating value/ Poder calorífico superior do combustível;

Fc = Fator de correção;

t1 = Tempo (min);  
 t2 = Tempo (s);  
 Gv = Volume de gás (Cu.Ft.).

O fator de correção é empregado para ajustar os valores de pressão, temperatura e tempo, que podem resultar em variações durante as conversões de unidades. Seu valor ideal é próximo de 1 e pode ser explicado através de:

$$F_c = \frac{P_{atm} + P_{mv} * 520}{30 * t_v + 460} \quad (5)$$

Onde,

$P_{atm}$  = Pressão atmosférica (in.Hg);  
 $P_{mv}$  = Pressão do medidor de vazão (in.Hg);  
 $t_v$  = Temperatura do medidor de vazão (F°).

Os numerais presentes nas equações 4 e 5 são valores fixos de conversão de unidade para tempo e temperatura que variam de minutos para segundos e graus celsius para graus fahrenheit consecutivamente.

As vazões mássica e volumétricas foram calculadas a partir da norma ABNT NBR 13723- 1:2019 já com os valores convertidos para a unidade de medida internacional.

$$P = 0,278M_n * PCS \quad (6)$$

E,

$$P = 0,278V_n * PCS \quad (7)$$

Onde,

P = Potência;  
 $M_n$  = Vazão mássica;  
 $V_n$  = Vazão volumétrica;  
 PCS = Poder calorífico superior do gás (mássico - MJ/kg) ou (volumétrico - MJ/m<sup>3</sup>);  
 0,278 = Constante admitida.

#### 4 ERRO ASSOCIADO AO PROCEDIMENTO

Para esta aplicação, adotou-se o modelo Definir-Medir-Analisar-Melhorar-Controlar (DMAIC), o qual oferece uma estrutura abrangente para o controle de processo ou projeto (Pyzdek T. e Keller, 2009). Neste contexto, será discutida apenas a fase de medição, enfocando a avaliação do erro quadrático médio (MSE). Conforme (Pyzdek T. e Keller, 2009) menciona, o sistema de medição deve atender aos princípios de repetibilidade, ou seja, ser consistente em múltiplas medições; deve ser linear e estável, possibilitando que os testes sejam replicados por diferentes operadores e resultem em resultados similares.

As definições do MSE são:

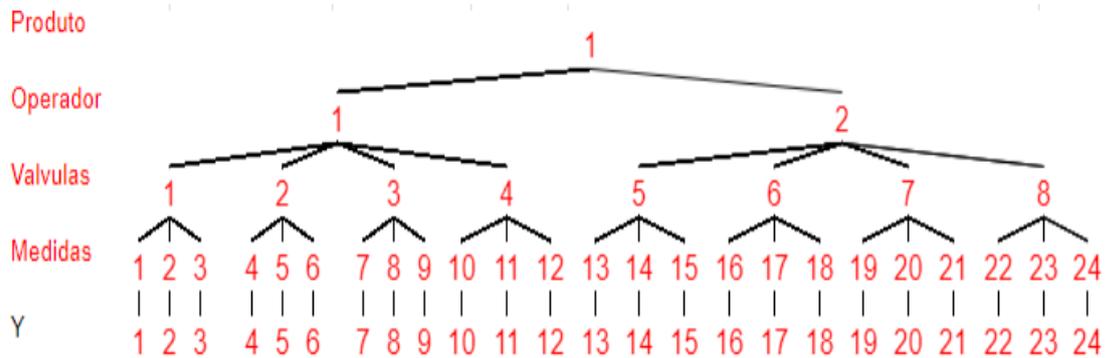
- **Discriminação:** A habilidade tecnológica do sistema de medição de adequadamente diferenciar entre as medições repetidas.
- **Repetibilidade:** Se refere a quantidade de variação entre medições da mesma característica na mesma peça pela mesma pessoa, usando o mesmo instrumento.
- **Tendencia:** A diferença entre o valor médio observado nas medições e o valor mestre.
- **Reprodutibilidade:** Diferentes operadores, máquinas, etc. obtém basicamente a mesma média quando medindo a mesma característica na mesma peça.
- **Estabilidade:** Mantém todas as características ao longo do tempo/execuções.

É possível avaliar as características de um sistema de medição utilizando cartas de controle. Nesse contexto, é importante lembrar que a variação observada nos valores medidos resulta da soma da variação do processo com a variação do sistema de medição (Pyzdek T. e Keller, 2009).

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{processo} + \sigma^2_{medio} \quad (8)$$

Para garantir a estabilidade dos testes, foi essencial desenvolver uma árvore de amostragem, conforme ilustrado na figura 17.

Figura 17 – Árvore de amostragem.



Fonte: O autor, 2024

Determinando que os ensaios foram conduzidos em um único produto, com dois operadores e com quatro válvulas de um mesmo modelo setada em uma mesma abertura de vazão, essa que fornece uma potência de 702,96 W.

Tabela 7 – Potências obtidas

Produto	Operador	Válvulas	Medidas	Queimador	Set de válvula	Potência (btu/h)	Potência (W)
1	1	1	1	UR - Central	2400	2391	700,32
1	1	1	2	UR - Central	2400	2400	702,96
1	1	1	3	UR - Central	2400	2398	702,37
1	1	2	4	UR - Direita	2400	2386	698,86
1	1	2	5	UR - Direita	2400	2388	699,45
1	1	2	6	UR - Direita	2400	2390	700,03
1	1	3	7	R - Esquerda Superior	2400	2389	699,74
1	1	3	8	R - Esquerda Superior	2400	2385	698,57
1	1	3	9	R - Esquerda Superior	2400	2389	699,74
1	1	4	10	R - Esquerda Inferior	2400	2395	701,50
1	1	4	11	R - Esquerda Inferior	2400	2393	700,91
1	1	4	12	R - Esquerda Inferior	2400	2397	702,08
1	2	1	13	UR - Central	2400	2393	700,91
1	2	1	14	UR - Central	2400	2394	701,20
1	2	1	15	UR - Central	2400	2396	701,79
1	2	2	16	UR - Direita	2400	2383	697,98
1	2	2	17	UR - Direita	2400	2378	696,52
1	2	2	18	UR - Direita	2400	2389	699,74
1	2	3	19	R - Esquerda Superior	2400	2379	696,81
1	2	3	20	R - Esquerda Superior	2400	2380	697,10
1	2	3	21	R - Esquerda Superior	2400	2388	699,45
1	2	4	22	R - Esquerda Inferior	2400	2386	698,86
1	2	4	23	R - Esquerda Inferior	2400	2386	698,86
1	2	4	24	R - Esquerda Inferior	2400	2394	701,20

Fonte: O autor, 2024.

A tabela 7 ilustra os valores de potências encontrados a partir dos ensaios realizados seguindo o mesmo passo a passo anteriormente mencionado. Para o controle estatístico de processo, são usadas cartas de controle, como as cartas X-barra ( $\bar{X}$ ) e R. A carta  $\bar{X}$  monitora a média do processo ao longo do tempo, enquanto a

carta R acompanha a variação do processo. Essas ferramentas são essenciais para detectar mudanças ou tendências no processo, garantindo que ele permaneça dentro de limites aceitáveis de variação. Quando os pontos nas cartas  $\bar{X}$  e R estão dentro dos limites de controle estabelecidos, indica-se que o processo está em controle estatístico, produzindo resultados consistentes e previsíveis.

Para construir ambas as cartas é necessário:

1. Calcular média e amplitude de cada subgrupo;
2. Plotar os dados no Minitab;
3. Calcular os limites de controle para a carta R;
4. Se a carta R estiver sob controle, calcular os limites para a carta X-barra;
5. Se a carta  $\bar{X}$  barra tiver pontos fora dos limites de controle, a variação é maior entre subgrupos;
6. Se a carta  $\bar{X}$  tiver todos os pontos dentro dos limites de controle, a variação é maior dentro do subgrupo.

A carta X-barra é dado pela equação 9.

$$\bar{X} = \text{Somadasmedidasdosubgrupo} / T\text{amnahodosubgrupo} = \text{Mdia} \quad (9)$$

E a carta R, na equação 10.

$$R = \text{Amplitude} \quad (10)$$

Assim, chega-se aos valores de:

Tabela 8 – Médias e amplitudes

Produto	Operador	Valvulas	Medidas	Queimador	Set de valvula	Potência (btu/h)	Média	Amplitude
1	1	1	1	UR - Central	2000	2391	2396,33	9,00
1	1	1	2	UR - Central	2000	2400		
1	1	1	3	UR - Central	2000	2398		
1	1	2	4	UR - Direita	2000	2386	2388,00	4,00
1	1	2	5	UR - Direita	2000	2388		
1	1	2	6	UR - Direita	2000	2390		
1	1	3	7	R - Esquerda Superior	2000	2389	2387,67	4,00
1	1	3	8	R - Esquerda Superior	2000	2385		
1	1	3	9	R - Esquerda Superior	2000	2389		
1	1	4	10	R - Esquerda Inferior	2000	2395	2395,00	4,00
1	1	4	11	R - Esquerda Inferior	2000	2393		
1	1	4	12	R - Esquerda Inferior	2000	2397		
1	2	1	13	UR - Central	2000	2393	2394,33	3,00
1	2	1	14	UR - Central	2000	2394		
1	2	1	15	UR - Central	2000	2396		
1	2	2	16	UR - Direita	2000	2383	2383,33	11,00
1	2	2	17	UR - Direita	2000	2378		
1	2	2	18	UR - Direita	2000	2389		
1	2	3	19	R - Esquerda Superior	2000	2379	2382,33	9,00
1	2	3	20	R - Esquerda Superior	2000	2380		
1	2	3	21	R - Esquerda Superior	2000	2388		
1	2	4	22	R - Esquerda Inferior	2000	2386	2388,67	8,00
1	2	4	23	R - Esquerda Inferior	2000	2386		
1	2	4	24	R - Esquerda Inferior	2000	2394		

Fonte: O autor, 2024.

Os limites superiores (UCL) e inferiores (LCL) definem a faixa dentro da qual se espera que a maioria dos pontos de dados do processo se encontre quando o processo está sob controle. Se um ponto de dados exceder o UCL ou o LCL, isso pode indicar uma causa especial ou uma mudança significativa, seus valores são encontrados a partir da equação abaixo.

$$UCL = \bar{\bar{X}} + A_2 * \bar{R} \quad (11)$$

$$LCL = \bar{\bar{X}} - A_2 * \bar{R} \quad (12)$$

Onde,

$\bar{\bar{X}}$  = Média das médias;

$A_2$  = Valor estatístico referente a figura 18;

$\bar{R}$  = Média das amplitudes.

Logo, encontram-se valores iguais a:

Tabela 9 – Limites superiores e inferiores

Rbar	6,50
Xbarbar	2389,46
UCL R	16,73
LCL Xbar	2382,81
UCL Xbar	2396,11

Fonte: O autor, 2024.

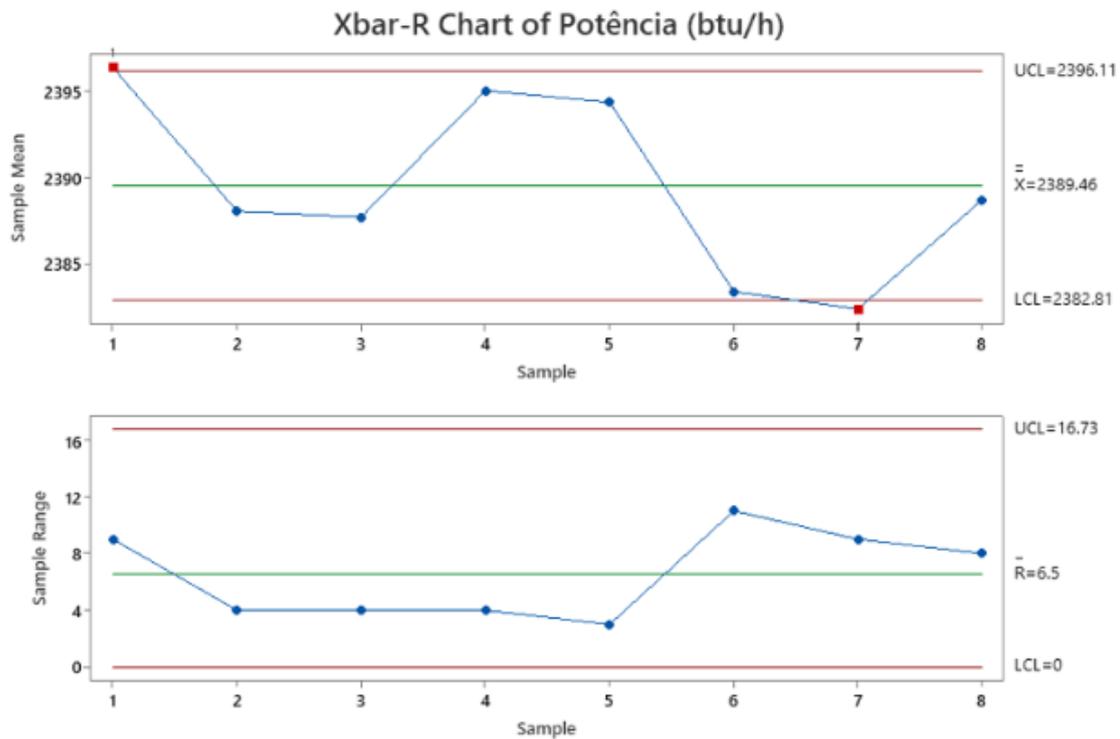
Figura 18 – Range das cartas.

Observations in Sample, $n$	Chart for Averages			Chart for Standard Deviations					
	Factors for Control Limits			Factors for Central Line		Factors for Control Limits			
	$A$	$A_2$	$A_3$	$c_4$	$1/c_4$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$
2	2.121	1.880	2.659	0.7979	1.2533	0	3.267	0	2.606
3	1.732	1.023	1.954	0.8862	1.1284	0	2.568	0	2.276
4	1.500	0.729	1.628	0.9213	1.0854	0	2.266	0	2.088
5	1.342	0.577	1.427	0.9400	1.0638	0	2.089	0	1.964
6	1.225	0.483	1.287	0.9515	1.0510	0.030	1.970	0.029	1.874
7	1.134	0.419	1.182	0.9594	1.0423	0.118	1.882	0.113	1.806
8	1.061	0.373	1.099	0.9650	1.0363	0.185	1.815	0.179	1.751
9	1.000	0.337	1.032	0.9693	1.0317	0.239	1.761	0.232	1.707
10	0.949	0.308	0.975	0.9727	1.0281	0.284	1.716	0.276	1.669

Observations in Sample, $n$	Chart for Ranges							$\bar{x}$ Charts
	Factors for Central Line			Factors for Control Limits				$E_2$
	$d_2$	$1/d_2$	$d_3$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	
2	1.128	0.8865	0.853	0	3.686	0	3.267	2.660
3	1.693	0.5907	0.888	0	4.358	0	2.574	1.772
4	2.059	0.4857	0.880	0	4.698	0	2.282	1.457
5	2.326	0.4299	0.864	0	4.918	0	2.114	1.290
6	2.534	0.3946	0.848	0	5.078	0	2.004	1.184
7	2.704	0.3698	0.833	0.204	5.204	0.076	1.924	1.109
8	2.847	0.3512	0.820	0.388	5.306	0.136	1.864	1.054
9	2.970	0.3367	0.808	0.547	5.393	0.184	1.816	1.010
10	3.078	0.3249	0.797	0.687	5.469	0.223	1.777	0.975

Fonte: Adaptado de (Pyzdek T. e Keller, 2009)

Após os cálculos, os valores obtidos foram plotados no software Minitab para a análise das medições, os gráficos plotados estão nas figuras 19 e 20.

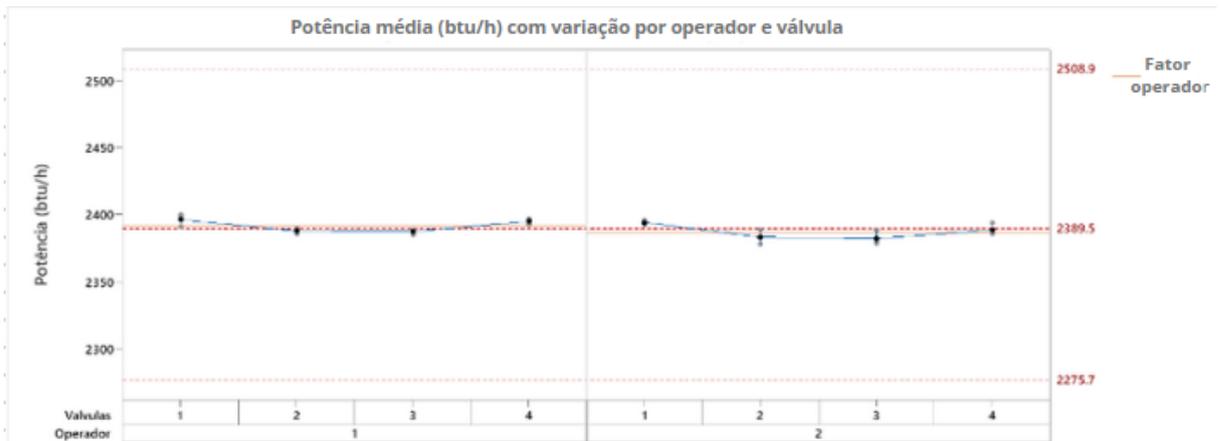
Figura 19 – Carta  $\bar{X}R$ .

Fonte: O autor, 2024.

A visualização do gráfico 19 revela que a média das amostras se situa entre os limites superior e inferior. Isso indica que a maior variação ocorre dentro do subgrupo, ou seja, entre as medidas, e não entre as válvulas. Portanto, não é possível distinguir uma válvula da outra com base no gráfico. Para que o resultado fosse contrário a isso, fosse possível distinguir as válvulas, a média deveria estar fora dos limites.

Para um MSE de procedimento, este resultado é positivo, indicando a ausência ou a incapacidade de distinguir variações significativas dentro do processo de medição. O gráfico referenciado como figura 20 ilustra a relação entre a média, operadores e as válvulas. Ambos os operadores observaram um perfil de curva de medidas semelhante, e os limites estão consideravelmente afastados da média. Isso sugere uma amplitude substancial que pode conter variações nas medidas, caracterizando, assim, um MSE conforme.

Figura 20 – Operadores x Válvulas.



Fonte: O autor, 2024.

Logo, é possível calcular o sigma que pode ser chamado de erro relacionado ao procedimento a partir dos valores da figura 9, de acordo com (Pyzdek T. e Keller, 2009) a equação é:

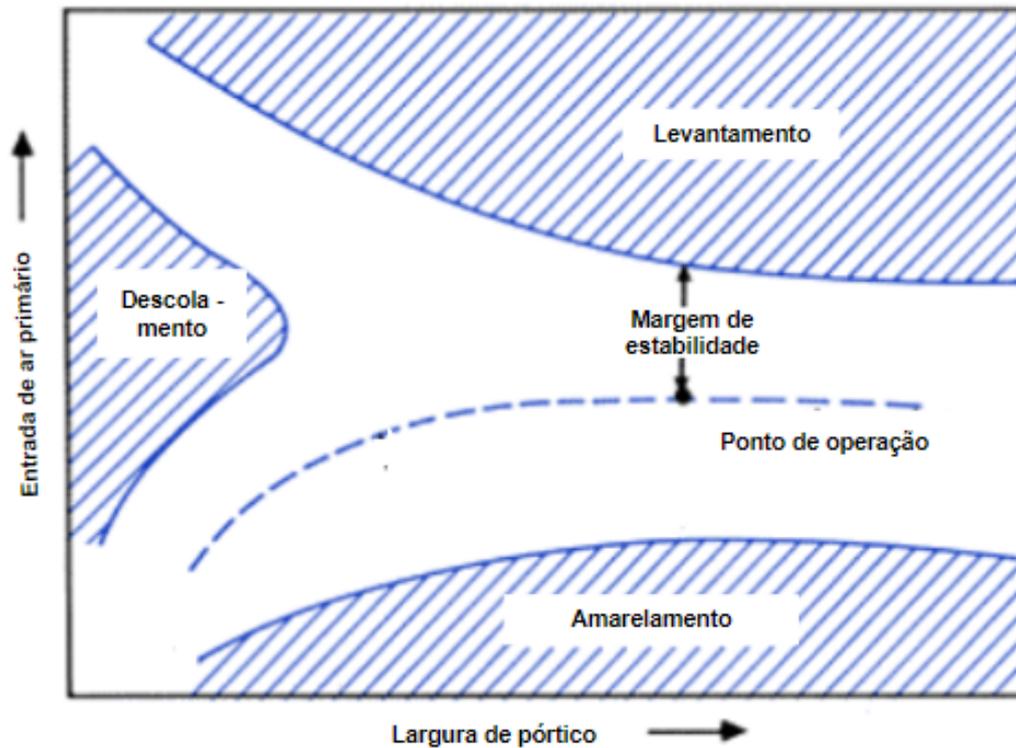
$$\sigma = \frac{\bar{R}}{D2} \quad (13)$$

Tem-se um sigma de aproximadamente 3,85 que para estar de acordo com a metodologia six sigma é necessário ser multiplicado por três, sendo assim igual a 11,52 equivalente a 0,0048% de erro de procedimento.

#### 4.1 CURVA DE OPERAÇÃO DO QUEIMADOR

Após a os cálculos do MSE realizados, foi iniciado os ensaios para atingir os comportamentos desejados, a princípio não é possível chegar aos comportamentos físicos de *flasback*, *lifting* e amarelamento sem que aja variações no fluxo de combustível, logo, a partir da curva de operação de queimadores do inglês *burner operation curve* (BOC), onde as áreas de operação ideal de um queimador atmosférico é dado em relação a entrada de ar primário no queimador e das dimensões dos pórticos pode-se ajustar o fluxo de combustível para alcançar os comportamentos desejados.

Figura 21 – Curva de operação de queimador.



Fonte: Adaptado de (Jones, 1990).

O fenômeno do levantamento ocorre quando o aumento na vazão de ar fornecido ao queimador não é compensado pela velocidade de queima do combustível, ou seja, há uma proporção maior de ar em relação ao gás. Por outro lado, o deslocamento da chama é o oposto do levantamento, ocorrendo quando a velocidade de queima do combustível excede a velocidade do fluxo de ar. O amarelamento da chama, por sua vez, surge quando não ocorre uma combustão completa, geralmente devido ao excesso de combustível em relação à quantidade de oxigênio disponível (Jones, 1990).

Durante os ensaios conduzidos, a variação no fluxo de gás foi realizada ao manipular as válvulas do produto, variando a abertura e, assim, a vazão de combustível.

## 5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados derivados dos testes de potência descritos no capítulo anterior, assim como os comportamentos de chama correspondentes. Estes foram observados em diversos tipos de queimadores e em diferentes taxas de fluxo de gás, as quais foram controladas pelas válvulas. Foram conduzidos aproximadamente vinte ensaios, no entanto, serão destacados somente aqueles que apresentaram características físicas de relevância ou interesse específico.

Os primeiros ensaios foram realizados com o intuito de chegar ao *flashback* e a não existência de chama pois ambos ocorrem a potências baixas e por consequência com baixo fluxo de gás. Portanto obteve-se uma chama com a seguinte característica:

Figura 22 – Operação normal.



Fonte: O autor, 2024.

Tabela 10 – Característica de operação normal

Potência (W)	380,77
Vazão mássica (kg/h)	25,12
Vazão volumétrica (m <sup>3</sup> /h)	0,0383
Válvula	padrão
Injetor	padrão

Fonte: O autor, 2024.

Uma chama que se mantém estável durante a operação normal, mas se extingue devido a uma corrente de ar, indica uma proporção excessiva de ar em relação ao combustível. No entanto, essa proporção não está tão desequilibrada a ponto de extinguir a chama sem a influência de um fator externo, como a corrente de ar. Para alcançar o flashback, foi necessário reduzir a vazão de combustível em comparação com o teste mostrado na figura 22, conforme ilustrado na figura 23.

Figura 23 – Flashback.



Fonte: O autor, 2024.

Obteve-se a uma potência de 272,39W com válvula e injetor padrão, os mesmo usados em lista de montagem do produto, com vazão mássica e volumétrica igual a 17,97 kg/h e 0,0274 m<sup>3</sup>/h respectivamente. Diferente do caso anterior, a chama se extingue sem influência de fatores externos. Isso pode ocorrer devido ao atraso na autoignição, que depende da temperatura local, pressão e razão de equivalência, bem

como à proximidade com uma parede sólida, em fluxos de baixa turbulência, a velocidade é suficientemente baixa para permitir a propagação da chama, que é limitada pela área dos pórticos do queimador (Gattei, 2008).

Os ensaios equivalentes as figuras 22 e 23 foram realizados no queimador ultra rápido, que é o queimador de maior desempenho analisado, logo valores de potência menores que 272,39 W não obtém presença de chama. Isso reflete um estado em que a proporção excessiva de ar dentro do queimador em relação ao combustível compromete a formação da chama. Como resultado, a mistura não atinge uma concentração de combustível adequada para sustentar a queima.

Os a seguir, estão em um contexto distinto, caracterizado por potências mais elevadas, realizadas em um queimador diferente. Estes foram conduzidos com o objetivo de observar comportamentos como o fenômeno de *lifting* e o amarelamento da chama.

Figura 24 – Amarelamento parcial.



Fonte: O autor, 2024.

Como mencionado na seção 4.1 o amarelamento da chama indica uma combustão incompleta no queimador, algumas partículas de carbono, que normalmente seriam completamente oxidadas em uma chama azulada, permanecem sem queimar e são visíveis como uma cor amarela na chama semelhante a figura 24. A qual encontrou-se a 328,63W com válvula invertida, ou seja, a válvula usada para este en-

saio foi a mesma usada para os ensaios no queimador ultra rápido que estava setada a uma vazão de combustível maior do que normalmente é para o queimador auxiliar, com injetor padrão de 0,96 mm, vazão mássica de 21,68 kg/h e vazão volumétrica de 0,0330 m<sup>3</sup>/h.

Nota-se que o amarelamento é apenas parcial. Para alcançar um amarelamento completo, a decisão foi aumentar o diâmetro do injetor para 1,88, que é o tamanho padrão do injetor usado no queimador de maior desempenho, conforme ilustrado na figura 25, afim de induzir o aumento da vazão de combustível e por consequência o aumento de potência.

Figura 25 – Amarelamento.



Fonte: O autor, 2024.

Nesta configuração, os parâmetros são semelhantes aos da configuração anterior. No entanto, a principal diferença reside na presença de uma quantidade significativamente maior de carbono não oxidado, resultando em um amarelamento mais pronunciado da chama. A influência do tamanho do injetor é evidente, pois um injetor de maior diâmetro aumenta a quantidade de combustível introduzido no interior do queimador. Esse aumento na quantidade de combustível pode acentuar ainda mais o amarelamento da chama, pois há uma proporção maior de combustível.

Ainda não é caracterizando um amarelamento completo, a modificação do injetor exerce influência direta na entrada aumentada de combustível e na redução

correspondente da entrada de ar primário. Foram realizados testes com injetores de maior tamanho, no entanto, a aparência da chama permaneceu inalterada. Isso sugere que o amarelamento da chama não é exclusivamente influenciado pelo tamanho do injetor. Outros fatores, como a geometria do queimador, a distância e largura entre os pórticos, desempenham um papel crucial na ocorrência de uma combustão incompleta e, conseqüentemente, no amarelamento da chama.

Para o levantamento foi usado o mesmo queimador, auxiliar, com injetor de 1.88mm e com fluxo de combustível maior, então a válvula de combustível se manteve a mesma já alterada.

Figura 26 – Levantamento.



Fonte: O autor, 2024.

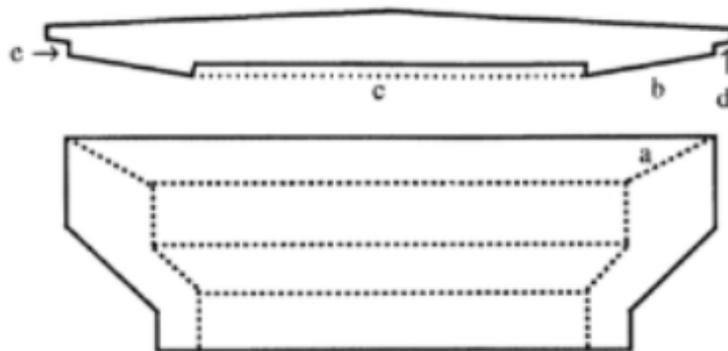
A válvula foi ajustada para a potência máxima especificada pelo fabricante do queimador auxiliar, que é de 1464,5 W. Isso resultou em valores de 96,63 kg/h e 0,1472 m<sup>3</sup>/h para as vazões mássica e volumétrica, respectivamente. Conforme mostrado na figura 26, observou-se que a velocidade do fluxo da mistura ar-combustível excedeu a velocidade da chama nos pórticos destacados. Geralmente, a chama se estabiliza acima dos pórticos, dando a impressão de estar flutuando.

Foi necessário substituir a capa do queimador devido à sua relevância no comportamento físico da chama. A capa original possui uma geometria específica projetada para trabalhar como um defletor, o que desempenha um papel crucial na redução da velocidade de queima e na prevenção do levantamento da chama. No entanto, para atingir o levantamento, foi utilizada uma capa genérica sem a geometria defletiva. Essa substituição pode ter contribuído para um aumento na velocidade de queima e para uma maior propensão ao levantamento da chama, mostrado na figura 26.

Uma metodologia semelhante foi realizada por (Junus J. E. Vierkanti, 1998), que identificou os ângulos sob a tampa e o tamanho do degrau do queimador como os principais fatores que influenciam o arraste de ar primário, promovendo uma maior velocidade de queima e, conseqüentemente, induzindo o levantamento da chama. De acordo com Junus (1998), o tamanho do degrau não tem influência significativa quando varia isoladamente, mas exerce um efeito relevante quando combinado com o ângulo sob a tampa (o ângulo de contato entre a tampa e o espalhador). Com base em seus testes experimentais, Junus (1998) recomenda valores de  $15^\circ$  e 2 mm, respectivamente, para obter uma chama estável.

Como os ângulos relacionados a capa do queimador influenciam o arraste de ar primário, estipula-se que a partir das variações dos ângulos, a posição da ancoragem de chama também varia, porque pode haver uma redistribuição de combustível que influencie esse ponto de ancoragem, podendo ou não influenciar o levantamento de chama.

Conforme a figura 27 b é o ângulo sob a tampa e c o degrau da tampa.



Fonte: (Junus J. E. Vierkanti, 1998).

Tabela 11 – Memorial de ensaios

Queimador	Potência (W)	OBS	Válvula	Injetor	Vazão mássica (kg/h)	Vazão vol (m <sup>3</sup> /h)
UR	380,77	Operação normal, falha por corrente de ar	padrão	padrão 1,88	25,12	0,0383
UR	272,39	<i>Flashback</i>	invertida	padrão 1,88	17,97	0,0274
AUX	175,74	Operação normal	padrão	padrão 0,96	11,60	0,0177
AUX	328,63	Amarelamento parcial	invertida	1,8	21,68	0,0330
AUX	328,63	Amarelamento parcial	invertida	0,96	21,68	0,0330
AUX	328,63	Amarelamento parcial	invertida	2,1	21,68	0,0330
UR	5134	Operação normal	padrão	padrão 1,88	338,76	0,5159
AUX	1464,5	<i>Lifiting</i>	invertida	padrão 1,88	96,63	0,1472

Fonte: O autor, 2024.

A tabela 11 exibe o registro dos ensaios realizados, fornecendo detalhes sobre os comportamentos físicos da chama de interesse que foram observados.

## 6 CONCLUSÃO

A análise teve como objetivo examinar experimentalmente o comportamento da chama em diferentes tamanhos de queimadores atmosféricos de gás natural, interpretando as variações causadas pelo fluxo de combustível para compreender os efeitos da variação de vazão e potência, classificar os tipos de queimadores e identificar comportamentos da chama como levantamento, descolamento, amarelecimento e ausência de chama.

A metodologia adotada integrou testes experimentais com queimadores de potência nominal, realizados no laboratório da Whirlpool S.A., seguindo a norma americana. Foi importante considerar que, devido à adaptação do produto às normas brasileiras, algumas instabilidades nos resultados foram previstas. Os testes focaram em variações no fluxo da mistura ar-combustível para fornecer a análise do comportamento da chama.

Ao realizar o MSE constatou-se que a maior variação foi observada entre as medidas em vez de entre as amostras (válvulas). Essa constatação sugere que a variação entre as válvulas é um fator de influência mínima. Em suma, as variações detectadas a partir das válvulas estão mais relacionadas à calibração ou à precisão do operador durante a leitura, destacando que a consistência dos resultados é mais afetada pelos procedimentos de medição do que pelas discrepâncias intrínsecas entre as válvulas.

Logo, as divergências entre experimento e literatura não estão correlacionadas as diferentes válvulas utilizadas. De maneira geral os comportamentos de chama foram condizentes com o esperado. Por exemplo, no ensaio representado pela figura 23 o qual ocorre o *flashback* a 272.39W, quando comparado a potência mínima de 967W sugerida pela companhia em um queimador ultra rápido, há uma diferença de 694,61W. Portanto, é previsível que ocorra algum comportamento fora dos limites de segurança, como a extinção da chama.

No entanto, no que diz respeito aos casos de amarelamento e *lifiting*, os resultados podem ser considerados satisfatórios. A premissa subjacente ao amarelamento é a presença de uma maior quantidade de combustível em relação à quantidade de ar, o que leva ao aparecimento do amarelamento. Nos ensaios realizados, a combustão incompleta é evidente, porém de forma não uniforme, o amarelamento ocorre de maneira parcial, mesmo com o uso de injetores de diâmetros maiores. De acordo com (Jones, 1990), a geometria e o tamanho dos e entre pórticos têm influência na aparência da chama. Para o *lifiting* é evidente que a geometria desempenha um papel crucial. Com a capa adequada no queimador, o fenômeno físico não ocorria devido à sua capacidade defletiva, conseqüentemente, a chama permanecia alta e teorica-

mente mais potente, porém não se descolava do entrepórtico, mantendo-se estável. Após a substituição da capa, foi possível observar esse comportamento, validando-o a partir de sua premissa inicial.

Portanto, os resultados experimentais apontam que a geometria do queimador e o tipo de injetor desempenham papéis significativos nos resultados dos experimentos, sendo essenciais para compreender e controlar o comportamento da chama.

Para futuras pesquisas, é recomendado replicar os experimentos realizados com queimadores de modelos distintos, que não se restrinjam ao tipo "american burner", além de explorar o uso de diferentes tipos de gás combustível, como o GLP. Adicionalmente, é sugerido empregar modelos computacionais para comparar e contrastar os resultados obtidos experimentalmente com simulações numéricas.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN GAS ASSOCIATION LABORATORIES. **Fundamentals of gas combustion**: Combined manual and workbook. 3. ed. United States of America, 2001.
- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **ANSI Z21.1 Household cooking gas appliances - general**. New York, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13723-1**. Rio de Janeiro, 2019.
- BALDANI, L. S. **Avaliação numérico-experimental do arraste de ar induzido por jato de combustível em queimadores atmosféricos**. 2016. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica — Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade Estadual de Santa Catarina, Joinville, 2016.
- CARRILLO, I. **Análise e desenvolvimento de uma metodologia de projeto de queimadores atmosféricos tipo tubo perfurado**. 2005. Dissertação de mestrado em engenharia mecânica — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- CHARLES E. E BAKUAL, J. **Industrial combustion testing**. 1. ed. London, New York: CRC Press, 2004.
- FISHER, E. **Control valve handbook**. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2023.
- GATTEI, L. **A study on the fluid dynamics of domestic gas burners**. 2008. Tese (PhD In industrial engineering desing and methods) — University of Bologna, 2008.
- JONES, H. **The application of combustion principles to domestic gas burner**. 1. ed. New York: Routledge, 1990.
- E. JUNUS J. E. VIERKANTI, e. The effects of the desing of the cap of a natural gas-fired cooktop burner on flame stability. **Energy Research**, 1998.
- LEWIS B. E VON ELBE, G. **Combustion, flames and explosion of gases**. 2. ed. New York: Academic Press, 1961.
- PYZDEK T. E KELLER, P. **The Six Sigma Handbook**. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Professional, 2009.
- SALVI, G. **La combustion – Teoria y aplicaciones**. 1. ed. Madrid: Dossat S.A., 1995.
- SEGELER, C. **Gas engineer handbook**. 2. ed. New York: Industrial Press, Inc., 1968.
- URNS, S. R. **An introduction to combustion - Concepts and applications**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2000.