

**UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ALEXANDRE TIAGO MARTINS**

**ESTUDO DE INTERCAMBIALIDADE DE GASES COMBUSTÍVEIS EM UM  
QUEIMADOR INDUSTRIAL**

**SANTOS/SP**

**2024**

**ALEXANDRE TIAGO MARTINS**

**ESTUDO DE INTERCAMBIALIDADE DE GASES COMBUSTÍVEIS EM UM  
QUEIMADOR INDUSTRIAL**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob orientação do Prof. Dr. Aldo Ramos Santos e coorientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior

**SANTOS/SP**

**2024**

621.402  
M341e

Martins, Alexandre Tiago.

Estudo de intercambialidade de gases combustíveis em um  
queimador industrial / Alexandre Tiago Martins.  
2024.  
45 f.

Orientador: Dr. Aldo Ramos Santos.

Coorientador: Dr. Deovaldo de Moraes Junior.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Santa Cecília, Programa  
de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2024.

1. Índice de Wobbe. 2. Índices de Weaver. 3. Intercambialidade  
de Gases. 4. Transição Energética. I. Santos, Aldo Ramos . II.  
Estudo de intercambialidade de gases combustíveis em um  
queimador industrial.

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho a minha mãe  
Messias Candida Martins, minha irmã, Ana  
Cristina Martins Latuf, minha esposa  
Karina Aparecida da Silva Martins e meu  
filho, Levy Martins, que foram e são meus  
alicerces e fonte de inspiração.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por me guiar e inspirar e aos professores doutores Aldo Ramos Santos, Deovaldo de Moraes Júnior, Karina Tamião de Campos Roseno e Cláudio Neves Borges, pelo tempo e dedicação dispendidos.

A meu pai, Rubens de Oliveira Martins (*in memoriam*), por despertar em mim a curiosidade de querer entender como funcionam os processos e as disciplinas na área industrial.

A minha família, minha esposa Karina Aparecida da Silva Martins, meu filho Levy Martins, minha mãe Messias Candida Martins, minha irmã Ana Cristina Martins Latuf e meu cunhado Marcio Antonio Latuf por toda paciência e compreensão sobre os motivos de minha ausência ao convívio familiar durante as pesquisas.

A todo o corpo docente pelos valiosos ensinamentos e total comprometimento.

Ao corpo administrativo, em especial as secretárias Sandra Helena Araujo e Imaculada Scorza, por todo o carinho e prontidão.

## RESUMO

Com o objetivo de contribuir para a transição energética, este estudo explorou a intercambialidade de gases combustíveis através da aplicação dos índices de Wobbe e Weaver. Foram realizadas simulações numéricas de misturas metano-hidrogênio para avaliar o comportamento de um queimador industrial sob diferentes condições operacionais.

Resultados experimentais, obtidos por meio de técnicas empíricas, permitiram a identificação da ocorrência de levantamento de chama em misturas com menor teor de hidrogênio. A análise do índice de Weaver confirmou a relação entre a composição do gás e a estabilidade da chama.

Os resultados mostraram-se satisfatórios em diversas condições. No entanto, em misturas com maior teor de hidrogênio, foi observado o fenômeno do retrocesso da chama. A análise do Índice de Weaver, que relaciona a velocidade de propagação da chama à composição da mistura, mostrou-se fundamental para identificar as condições propícias à ocorrência deste fenômeno.

Através de ajustes técnicos, é possível minimizar os riscos associados ao retrocesso e ao afastamento da chama.

**Palavras-Chave:** Índice de Wobbe, índices de Weaver, intercambialidade de gases, transição energética

## ABSTRACT

This study aims to contribute to the energy transition by exploring the interchangeability of combustible gases using the Wobbe and Weaver indexes. Numerical simulations of methane-hydrogen mixtures were conducted to evaluate the performance of an industrial burner under diverse operating conditions. Experimental validation, employing empirical techniques, identified flame lifting in mixtures with lower hydrogen content. The Weaver index analysis confirmed the correlation between gas composition and flame stability.

While the results were satisfactory under various conditions, mixtures with higher hydrogen content exhibited flashback. The Weaver Index, which relates flame propagation speed to mixture composition, proved crucial in identifying conditions conducive to flashback. Technical adjustments can mitigate the risks associated with flashback and flame lifting issues.

**Keywords:** Wobbe index, Weaver indexes, gas interchangeability, energetic transition

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1: CHAMA ESTÁVEL. <sup>[11]</sup> .....                                                     | 17 |
| FIGURA 2: “FLASH BACK” OU RETROCESSO DE CHAMA. <sup>[11]</sup> .....                               | 18 |
| FIGURA 3: “FLAME LIFT” OU AFASTAMENTO DE CHAMA. <sup>[11]</sup> .....                              | 19 |
| FIGURA 4: ESQUEMA DE UM QUEIMADOR DE OXI/COMBUSTÍVEL. <sup>[11]</sup> .....                        | 20 |
| FIGURA 5: GRÁFICO WOBBE X WEAVER - ALPHA COMO REFERÊNCIA E BETA SUBSTITUTO <sup>[1]</sup> .....    | 27 |
| FIGURA 6: TELA DO SIMULADOR VULCANO 2.5 .....                                                      | 30 |
| FIGURA 7: TELA DO SIMULADOR VULCANO 2.5 PARA COMPOR O GAS A 38% DE N <sub>2</sub> .....            | 31 |
| FIGURA 8: GRÁFICO WOBBE X WEAVER - GAS NATURAL (GN) COMO REFERÊNCIA .....                          | 32 |
| FIGURA 9: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC21,57%H <sub>2</sub> ) COMO REFERÊNCIA ..... | 33 |
| FIGURA 10: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC25%H <sub>2</sub> ) COMO REFERÊNCIA .....   | 34 |
| FIGURA 11: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC30%H <sub>2</sub> ) COMO REFERÊNCIA .....   | 34 |
| FIGURA 12: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC33,9%H <sub>2</sub> ) COMO REFERÊNCIA ..... | 35 |
| FIGURA 13: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC38%H <sub>2</sub> ) COMO REFERÊNCIA .....   | 35 |



## LISTA DE TABELAS

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| TABELA 1: COMPOSIÇÃO HIPOTÉTICA DOS GASES (%) ..... | 27 |
| TABELA 2: VALORES ADOTADOS .....                    | 30 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                               |   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-------------------------------|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A                             | _ | Ar necessário para combustão estequiométrica, vol. de ar/vol. de gás                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| ANP                           | _ | Agência Nacional de Petróleo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| B <sub>i</sub>                | _ | Coeficiente de velocidade de chama de Weaver para o componente i                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| C                             | _ | Carbono                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | _ | Eteno                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | _ | Etano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | _ | Propeno                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | _ | Propano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| CH <sub>4</sub>               | _ | Metano                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| CO                            | _ | Monóxido de Carbono                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| CO <sub>2</sub>               | _ | Dióxido de Carbono                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Cp <sub>g</sub>               | _ | Calor específico dos gases de combustão                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| d                             | _ | Densidade relativa do ar                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| d <sub>r</sub>                | _ | Densidade Relativa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| GC                            | _ | Gás Combustível de Refinaria                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| GLP                           | _ | Gás Liquefeito de Petróleo                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| GN                            | _ | Gás Natural                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| h                             | _ | Hora                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| H                             | _ | Teor de hidrogênio do combustível em base seca;                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| H <sub>2</sub>                | _ | Hidrogênio                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| H <sub>2</sub> O              | _ | Água                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| HCC                           | _ | Hidrocraqueamento Catalítico                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| HDT                           | _ | Hidrotratamento                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|                               |   | Aeração primária, medida precisa das condições relativas de suprimento de ar primário para a queima dos dois gases, como também do ar secundário. Portanto, indica a possibilidade de combustão incompleta, nos equipamentos onde a incidência de chama não é envolvida e o ar secundário é ajustado precisamente para aumentar a eficiência térmica |
| J <sub>A</sub>                | _ |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| J <sub>F</sub>                | _ | Retorno de chama (deve ser menor ou igual a 0,08)                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| J <sub>H</sub>                | _ | É a razão dos números de Wobbe para os dois gases (deve estar entre 0,95 e 1,05)                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| J <sub>I</sub>                | _ | Combustão incompleta, medida de emissão de monóxido de carbono (deve ser menor ou igual a zero)                                                                                                                                                                                                                                                      |
| J <sub>L</sub>                | _ | Deslocamento de chama (deve ser maior ou igual a 0,64)                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| J <sub>Y</sub>                | _ | Pontas amarelas (deve ser menor ou igual a 0,14)                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |

|                         |   |                                                                                                                     |
|-------------------------|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| K                       | _ | Graus Kelvin                                                                                                        |
| kcal                    | _ | Quilocaloria                                                                                                        |
| kcal/<br>m <sup>3</sup> | _ | Quilocaloria por metro cúbico                                                                                       |
| kg                      | _ | Quilo gramas                                                                                                        |
| kJ                      | _ | Quilo Joule                                                                                                         |
| kW                      | _ | Quilo Watts                                                                                                         |
| m <sub>c</sub>          | _ | Massa do combustível queimado                                                                                       |
| m <sub>g</sub>          | _ | Massa dos gases de combustão                                                                                        |
| N                       | _ | Número de átomos de carbono facilmente liberados na combustão de 100 moléculas de gás                               |
| N <sub>2</sub>          | _ | Nitrogênio                                                                                                          |
| NO <sub>x</sub>         | _ | Óxido de Nitrogênio                                                                                                 |
| O <sub>2</sub>          | _ | Oxigênio                                                                                                            |
| °C                      | _ | Graus Celsius                                                                                                       |
| Pa                      | _ | Pascal                                                                                                              |
| PCI                     | _ | Poder Calorífico Inferior                                                                                           |
| PCI <sub>v</sub><br>ol  | _ | Poder Calorífico Inferior em base volumétrica                                                                       |
| PCS                     | _ | Poder Calorífico Superior                                                                                           |
| Q                       | _ | Fração volumétrica de oxigênio na mistura                                                                           |
| QAV                     | _ | Querosene de Aviação                                                                                                |
| R                       | _ | Proporção de número de átomos de hidrogênio para o número de átomos de carbono, considerando apenas hidrocarbonetos |
| <i>r</i>                | _ | Gás de referência                                                                                                   |
| S                       | _ | Fator de velocidade de chama de Weaver                                                                              |
| s                       | _ | Gás substituto                                                                                                      |
| s                       | _ | Segundo                                                                                                             |
| T <sub>ar</sub>         | _ | Temperatura de entrada do ar de combustão                                                                           |
| T <sub>cham</sub><br>a  | _ | Temperatura de chama                                                                                                |
| u                       | _ | Teor de umidade do combustível (massa de água / massa de combustível)                                               |
| WI                      | _ | Índice de Wobbe                                                                                                     |
| x <sub>i</sub>          | _ | Fração volumétrica do componente i                                                                                  |
| Z                       | _ | Fração volumétrica de inertes na mistura                                                                            |

## SUMÁRIO

|                                                         |           |
|---------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                              | <b>13</b> |
| 1.1. GÁS NATURAL .....                                  | 14        |
| 1.2. GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO .....                   | 14        |
| 1.3. GÁS COMBUSTÍVEL DE REFINARIA .....                 | 15        |
| 1.4. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO .....                       | 15        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                   | <b>16</b> |
| 2.1. QUEIMADORES INDUSTRIAIS .....                      | 16        |
| 2.2. CONTROLE DA QUEIMA.....                            | 21        |
| 2.3. QUEIMADORES COMBINADOS E QUEIMADORES DE ÓLEO ..... | 21        |
| 2.4. INTERCAMBIALIDADE DE GASES .....                   | 21        |
| 2.5. QUEIMADORES CONVENCIONAIS DE GASES .....           | 22        |
| <b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>                      | <b>27</b> |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>                   | <b>31</b> |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                               | <b>38</b> |
| <b>6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>          | <b>40</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS.....</b>                              | <b>42</b> |
| <b>APÊNDICE I.....</b>                                  | <b>43</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

Com grande acuidade no que diz respeito à eficiência energética, redução do índice de emissões de gases de efeito estufa e relevante contribuição para a transição energética, tema atual e cujo desdobramento mostra-se cada vez mais necessário, técnicas para o estudo de intercambialidade de gases combustíveis como aplicação do Índice de Wobbe e os Índices de Weaver se apresentam de forma contemporânea, e corroboram para a flexibilidade no uso de combustíveis gasosos e o balanço de massa e energia das plantas industriais [1].

Por volta de 1970, com a primeira crise do petróleo, distintas companhias no mundo fomentaram o desenvolvimento de projetos para fontes alternativas de energia, carvão mineral, xisto e madeira, de acordo com a disponibilidade. No Brasil, ganhou destaque o xisto, carvão mineral, carvão vegetal, madeira, casca de babaçu, álcool, e a partir dos anos 1980, o gás natural [1].

A grande repercussão do assunto nas décadas precedentes, por sua vez, não converge para o esgotamento das pesquisas relacionadas, e muito pelo contrário, estimula o alcance de maior número de literatura, principalmente no que diz respeito a combustíveis alternativos aos usuais [1].

O objetivo desse estudo foi evidenciar que, fundamentando-se no estado da arte, é possível explorar metodologias para a utilização de diferentes combustíveis gasosos em um determinado queimador industrial, atingindo intercambialidade [1].

Na grande maioria dos queimadores, é difícil satisfazer o desempenho para todos os díspares gases que se deseja utilizar, principalmente quando a composição do gás é diferente [8].

A intercambialidade do gás é definida como o grau de mudança no desempenho de um dispositivo de combustão ao queimar um outro tipo de combustível, diferente do qual esse foi inicialmente projetado, portanto, o termo intercambialidade entre gases significa que o gás alternativo pode ser usado no mesmo dispositivo de combustão, embora não altere as condições de operação ou outros parâmetros geométricos significativos, ou material de construção [3].

Mesmo que a composição do gás mude, se a chama é estável no dispositivo de combustão de gás, permanecendo a segurança operacional e o

adequado desempenho térmico, existe intercambialidade, porém é imperativa uma criteriosa avaliação que combina as decorrências das adulterações de composição durante sua combustão [8].

### **1.1. GÁS NATURAL**

Composto por metano, na faixa de aproximadamente 80 a 90%, etano de 5 a 10% e outros gases em menores proporções (propanos, butanos, pentanos, hexanos, gás carbônico, gás sulfídrico, nitrogênio e gases raros), o gás natural pode ou não ocorrer associado ao petróleo [1].

Quando ocorre junto ao petróleo, é dado como resultado da produção do petróleo e pode ser enviado para gasodutos de transporte e distribuição para o mercado consumidor, pode ser reinjetado no campo petrolífero para sustentar a pressão do reservatório e assim melhorar a recuperação primária do óleo, pode ser utilizado na aquisição de energia no próprio campo ou mesmo queimado quando não houver gasodutos para seu bom emprego, circunstância essa indesejável, por se tratar de desperdício de energia [1].

As composições dos gases naturais efluentes das unidades de processamento não diferem muito. É um extraordinário combustível, pois praticamente não contém compostos sulfurados, demanda excesso de ar muito baixo e queima com baixas emissões de óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e material particulado [1].

A ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis) especifica o gás natural brasileiro pela resolução ANP n.º 16 de 17/06/2008 [1].

### **1.2. GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO**

O gás liquefeito de petróleo é uma combinação de hidrocarbonetos compostos de três e quatro átomos de carbono. O GLP ocorre espontaneamente no petróleo, normalmente, em baixas proporções, da ordem de no máximo 2% em volume. Este GLP é então recuperado no topo da torre de destilação atmosférica das refinarias de petróleo [2].

Ocorre também em associação com o gás natural, sendo eles separados na Unidade de Processamento de Gás Natural, além das outras unidades como Unidade de Craqueamento Catalítico Fluido, Unidade de Coqueamento Retardado, Unidade de Craqueamento Térmico e Unidade de

Hidrocrackeamento que podem vir a colaborar com correntes de C<sub>3</sub> e C<sub>4</sub> para compor o GLP final de uma refinaria [2].

A composição do GLP não é especificada e, não há especificação do seu poder calorífico, pois é uma mistura resultante de várias correntes e de várias unidades de processo, contudo, mesmo assim seu poder calorífico não muda muito [2].

### **1.3. GÁS COMBUSTÍVEL DE REFINARIA**

O refino do petróleo constitui na separação desta complexa mistura, via processos físico-químicos, em frações de derivados, que são processados em unidades de separação e conversão até o final [2].

Esses produtos incluem combustíveis como gasolina, diesel, óleo combustível, gás liquefeito de petróleo (GLP), querosene de aviação (QAV), querosene, coque de petróleo, óleos residuais, gás combustível, produtos acabados não combustíveis como solventes, lubrificantes, graxas asfalto, coque e intermediários da indústria química como nafta, etano, propano, butano, eteno, propeno, buteno e o BTX (butadieno, benzeno, tolueno e xileno) [2].

A composição da carga da refinaria pode variar significativamente. Refinarias de petróleo são sistemas complexos com múltiplas operações que dependem tanto das propriedades do insumo quanto dos produtos desejados. Não existem duas refinarias iguais no mundo [2].

O gás combustível de refinaria, também conhecido como gás residual de refinaria, é um produto obtido sobretudo nas unidades de conversão, tais como Craqueamento Catalítico Fluido, Coqueamento Retardado, Coqueamento Fluido, Hidrodessulfurização e Hidrocrackeamento [2].

Para ser comercializado a consumidores externos a refinaria, precisa ser odorado, de forma que possam ser detectados acidentais vazamentos [1].

### **1.4. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO**

Em uma refinaria de petróleo, nem todo o hidrogênio demandado por processos consumidores de hidrogênio como o HCC (Hidrocrackeamento Catalítico) e o HDT (Hidrotratamento), advém de outras unidades de conversão da refinaria [2].

Embora a reforma catalítica produza o hidrogênio, ela não o faz em quantidade suficiente para atender aos processos hidrogênio-intensivos. Assim,

uma planta de geração de hidrogênio na refinaria, com unidades de HDT e HCC torna-se necessária. Esta planta baseia-se em reforma a vapor de frações leves ou de gás natural e ou oxidação parcial (gasificação) de frações pesadas de hidrocarbonetos [2].

A reforma a vapor é o processo mais comum de produção de hidrogênio em refinarias de petróleo. Neste processo, o gás natural ou um hidrocarboneto leve, como a nafta leve, é preaquecido, e após passar por um reator de dessulfurização, é misturado com vapor em excesso, que foi gerado pelo reaproveitamento de calor do exaustor do reator de reforma (reformador) [2].

A mistura é então encaminhada ao forno reformador, que promove as reações que transformam o metano em uma mistura de hidrogênio, dióxido de carbono e monóxido de carbono [2].

Como estas reações são endotérmicas, gás combustível é queimado de forma a gerar o calor necessário para as reações. Em seguida, a mistura gasosa é resfriada, gerando vapor, e encaminhada ao reator de *shift*, onde se aumenta a produção de hidrogênio. Em seguida a mistura é resfriada para condensar a água em excesso [9].

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. QUEIMADORES INDUSTRIAIS**

Queimador ou maçarico é o equipamento que processa a queima do combustível em uma fornalha, caldeira, aquecedor ou vários tipos de equipamentos, seja este combustível, gás, líquido ou sólido. O emprego fundamental de um queimador é promover uma mistura eficiente entre o ar e o combustível, de maneira que a chama seja estável e bem conformada [1].

O queimador deve, além de misturar bem, dosar o combustível e o ar em proporções que estejam dentro dos limites de flamabilidade para ignição e para uma queima estável. Ele deve também garantir que não haverá retorno de chama e nem seu deslocamento conforme figuras 1, 2 e 3 [4].



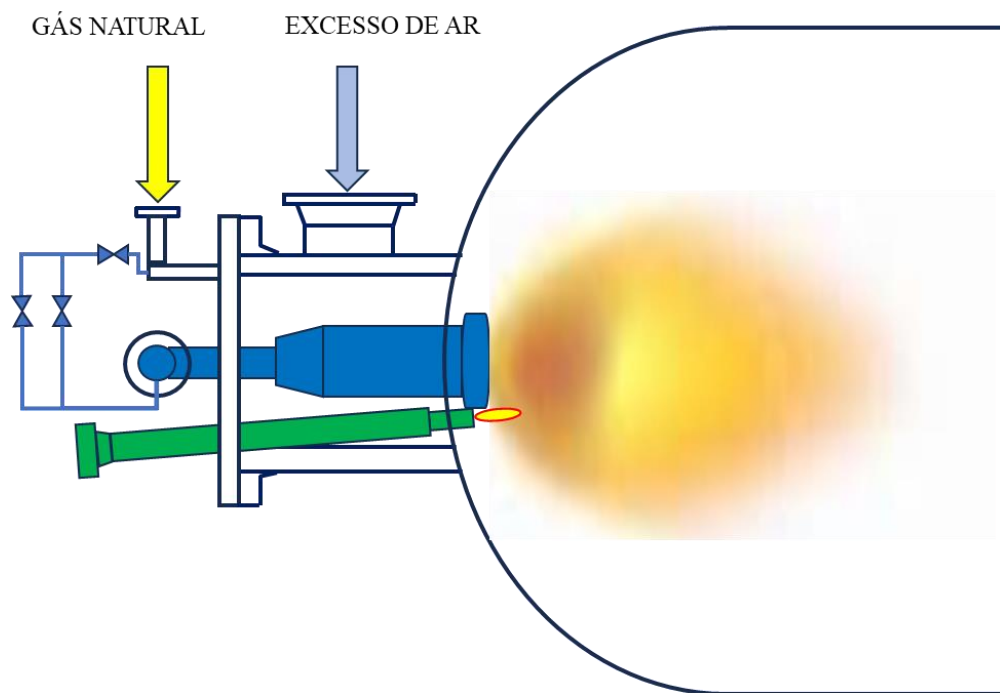


FIGURA 1: CHAMA ESTÁVEL. <sup>[11]</sup>

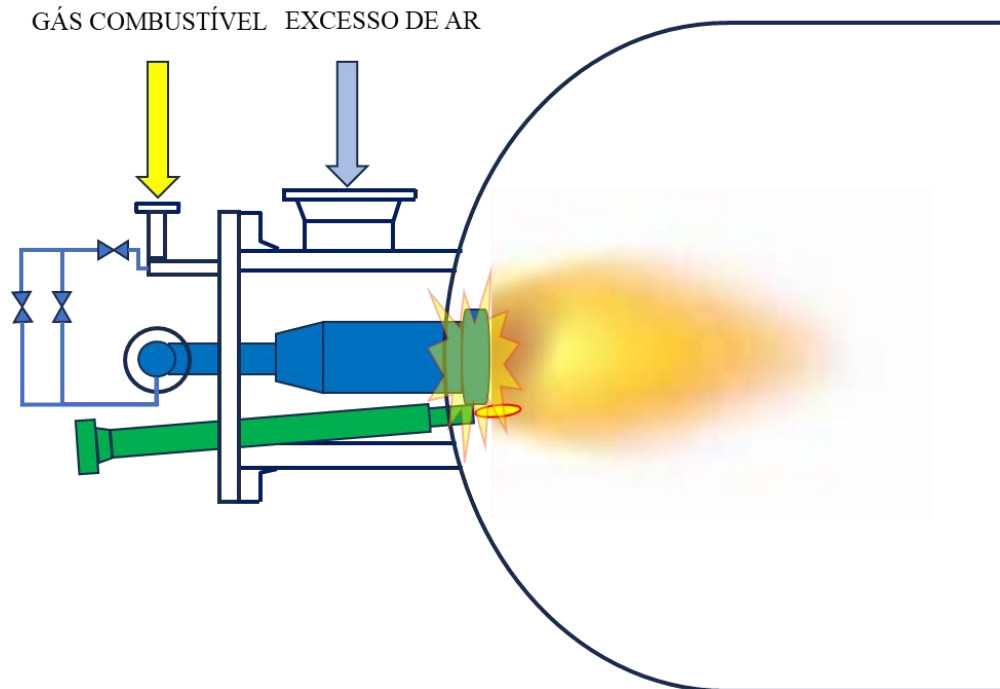
Outros itens são triviais, como a razão de redução de queima (*turn down*), que é uma medida da flexibilidade de variação de cargas do queimador. É definido como sendo a razão entre a liberação máxima de calor e a liberação mínima de calor [1].

Facilidade de operação, nível de ruído, baixa necessidade de manutenção e emissões de particulados, óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio ( $\text{SO}_x$  e  $\text{NO}_x$ ) também são itens importantes a serem observados. Para entender o comportamento da chama, é fundamental destacar dois fenômenos: retorno de chama *flash back* e deslocamento de chama *flame lift* [4].

O *flash back*, é o fenômeno que ocorre quando a velocidade de propagação da chama é maior que a velocidade de saída da mistura ar primário-combustível, fazendo com que a chama venha a ocorrer dentro do queimador, tão logo haja combustível e ar, e não na distância projetada para ele. Quando isso ocorre, fatalmente a vida útil do queimador é reduzida [4].

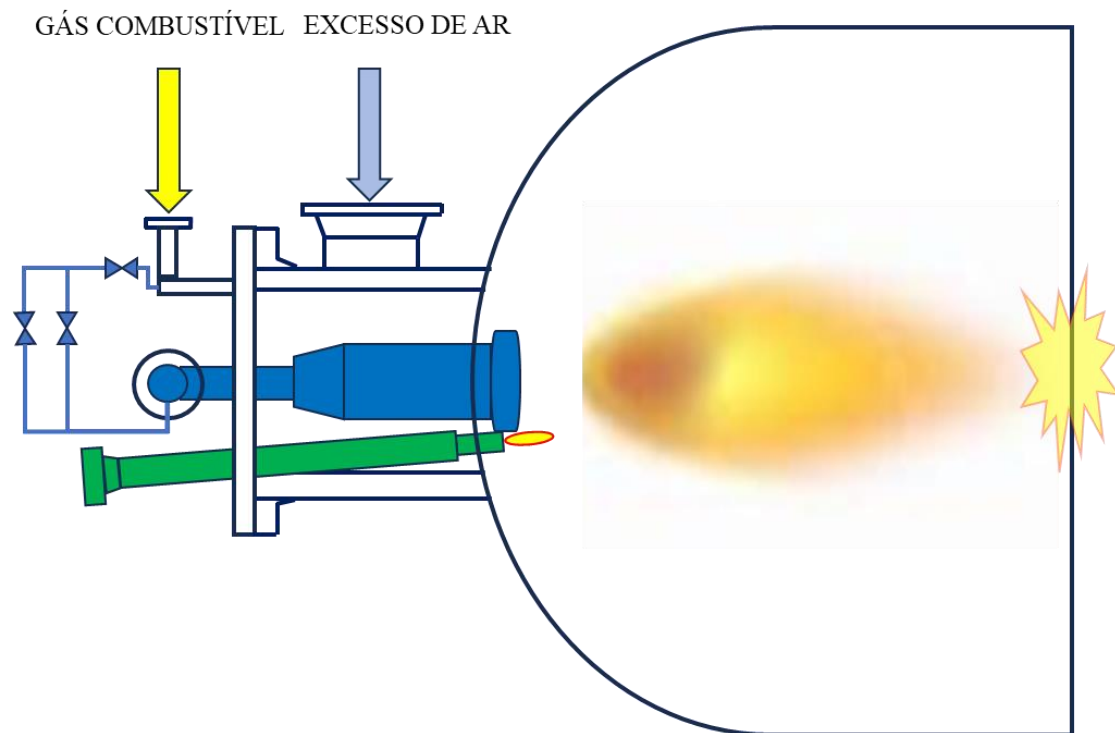
Pode ocorrer em queimadores de pré-mistura e pilotos quando a frente da chama se propaga através da ponta. Às vezes, o *flash back* também é conhecido como *backflash*, *backburn*, *burnback*, *blowback*, inversão de chama ou *pop-back*. Quando ocorre um *flashback*, a chama pode se estabilizar dentro

do Venturi, em concordância com a figura 4, seção a jusante e/ou ponta. Se ocorre e não é corrigido, o sistema edutor pode ser rapidamente danificado devido ao superaquecimento [4].



**FIGURA 2: “FLASH BACK” OU RETROCESSO DE CHAMA.** <sup>[11]</sup>

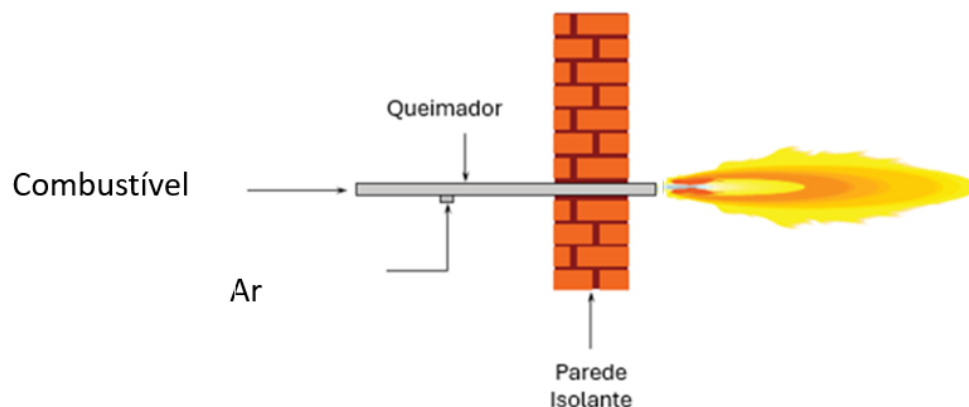
Já o deslocamento de chama, conforme mostrado na figura 5, é o inverso do retorno, isto é, ocorre quando a velocidade da mistura combustível-ar é muito maior que a de propagação da chama, assim, a chama ocorre a uma distância grande do queimador [1]. Esta também é uma condição altamente indesejável, pois torna a chama muito instável e pode também levá-la a incidir sobre partes do forno, tais como os tubos, levando a problemas operacionais graves [1].



**FIGURA 3: “FLAME LIFT” OU AFASTAMENTO DE CHAMA.** <sup>[11]</sup>

Existem muitos tipos de queimadores devido à grande variedade de combustíveis, oxidantes, combustão geometrias de câmaras, regulamentações ambientais, tamanhos de entrada térmica e requisitos de transferência de calor. Além disso, os requisitos de transferência de calor incluem temperatura de chama, momento da chama e distribuição de calor [4].

As seguintes especificações de queimador são necessárias para escolher corretamente um queimador para uma determinada aplicação: tipo de queimador, liberação e redução de calor, suprimento de ar (tiragem natural, tiragem forçada ou tiragem equilibrada), excesso de ar, composição do combustível, posição de tiro, dimensões da chama, tipo de ignição, meio de atomização para combustível líquido (se for o caso), disparo, ruído, taxa de emissão de  $\text{NO}_x$  e se os resíduos da queima de gás serão usados, conforme ilustrado na figura 6 [4].



**FIGURA 4: ESQUEMA DE UM QUEIMADOR DE OXI/COMBUSTÍVEL.** <sup>[11]</sup>

Certos tipos de combustíveis são preferidos para certas localizações geográficas devido ao custo e considerações de disponibilidade. Combustíveis gasosos, especialmente gás natural, são comumente usados na maioria das aplicações nos Estados Unidos [4]. Na Europa, o gás também é comumente usado junto com óleo combustível leve [4].

Os combustíveis também variam dependendo da aplicação. Para os processos de incineração, os combustíveis residuais são normalmente usados sozinhos ou com outros combustíveis como gás natural [1]. Na indústria petroquímica, os gases combustíveis muitas vezes consistem em uma mistura de vários combustíveis, incluindo gases como hidrogênio, metano, propano, butano, propileno, nitrogênio e dióxido de carbono [4].

O combustível tem uma influência importante no calor e transferência de uma chama. Em geral, combustíveis sólidos como o carvão e combustíveis líquidos como o petróleo produzem muitas chamas luminosas, que contêm partículas de fuligem que irradiam para a carga de calor [1].

Combustíveis gasosos como o gás natural, muitas vezes produzem chamas não luminosas porque eles queimam de forma tão limpa e completamente sem produzir muitas partículas de fuligem. Um combustível como o hidrogênio é completamente não luminoso, pois não há carbono disponível para produzir fuligem [4].

Nos casos em que são necessárias chamas altamente radiantes, uma chama luminosa é preferida. Nos casos em que a convecção e a transferência

de calor são preferidas, uma chama não luminosa pode ser preferida para minimizar a possibilidade de contaminar a carga de calor com partículas de fuligem de uma chama luminosa. Onde o gás natural é o combustível preferido e chamas altamente radiantes são desejadas, novas tecnologias estão sendo desenvolvidos para produzir chamas mais luminosas [4].

## **2.2. CONTROLE DA QUEIMA**

É altamente recomendável que a chama seja monitorada por meio de um sensor de chama, intertravado com as válvulas de bloqueio automático do sistema de alimentação, de forma a garantir a segurança da instalação em caso de falha da chama, especialmente durante a partida do equipamento. Em sequência ao corte do gás, deve ser estabelecido um tempo mínimo de purga do equipamento, antes de se abrir novamente a válvula de gás [4].

## **2.3. QUEIMADORES COMBINADOS E QUEIMADORES DE ÓLEO**

Existem também os queimadores de queima combinada, que permitem queimar gás e óleo e os queimadores de óleo combustível, ambos usuais em refinarias e petroquímicas, porém esses tipos de queimadores não serão abordados no presente estudo [1].

Este tipo de queimador é fabricado para uma ampla gama de capacidade de liberação de calor, indo de 5000 até 10,83 milhões de kcal/h. Seu uso deve ser cuidadoso em fornos com diversos queimadores, pois em caso de um ou mais serem desligados, é necessário se cuidar para que os gases quentes não passem através dos queimadores desligados [1].

## **2.4. INTERCAMBIALIDADE DE GASES**

Ao se almejar a troca de um determinado gás combustível por outro de diferentes características, é necessário que seja feita a verificação da intercambialidade, caso contrário, poderá haver sérios problemas de operação, provenientes de falhas dos queimadores e fornos [1].

Por características satisfatórias de chama, os seguintes quesitos devem ser atendidos: A chama deve ser estável, sem apresentar deslocamento, retorno ou pontas amarelas, a combustão deve garantir a ausência de emissões inaceitáveis de monóxido de carbono ou fuligem, os fluxos de energia térmica

proporcionados pelo queimador devem ser próximos para ambos os gases e o sistema de ignição e controle deve operar bem para ambos os gases [1].

É notável que um ponto dentro da zona de chama estável, como função da aeração primária e taxa de alimentação de gás, pode ser estabelecido para qualquer dado queimador aerado [1].

Estes limites de chama irão variar em função da composição do gás suprido. Assim, tanto o gás de referência quanto o gás substituto devem ter as vazões de ar primário e de gás dentro dos limites de chama do queimador, para que os dois gases em pauta sejam considerados intercambiáveis [1].

## **2.5. QUEIMADORES CONVENCIONAIS DE GASES**

Os queimadores de gás combustível podem ser divididos em aspirantes e de queima direta [1].

Nos queimadores aspirantes a maior parte do ar de combustão é aspirado pela expansão do gás combustível em um *venturi*, onde se misturam o ar e o gás combustível. O ar primário é função, portanto, apenas da vazão de gás combustível [1].

São queimadores de chama curta, baixa capacidade e baixa razão de redução de queima. São indicados em fornos onde são necessários muitos queimadores, com uma distribuição de calor muito homogênea, em diferentes condições de tiragem e nos quais seria muito complicado o ajuste individual cada vez que variasse a carga. São sujeitos a retorno de chama quando operam com cargas reduzidas [1].

Já nos queimadores de queima direta, o gás é injetado puro, diretamente na zona de combustão, através de bicos com furos de pequeno diâmetro. Estes queimadores apresentam baixo nível de ruído, chamas longas e elevada razão de redução de queima. Por outro lado, requerem ajustes frequentes, já que a vazão de ar é função da tiragem e da posição das virolas [1].

Um outro tipo de queimador muito utilizado é o queimador monobloco, em aplicações de baixas cargas térmicas, para uma ampla variedade de equipamentos, por exemplo, em caldeiras pequenas, em fornos de indústrias alimentícias, secadores de minérios entre outros [1].

Por outro lado, também é necessário cuidado para que, dependendo da pressão da câmara de combustão, não haja entrada de ar falso através dos queimadores desligados, acarretando baixa eficiência do forno neste caso [1].

Os queimadores denominados “cortina de ar quente” ou “queimadores de duto” que nada mais são do que aquecedores de ar, dado que a vazão de ar é muito acima da estequiométrica, são utilizados para secagem de alimentos e grãos, em estufas de secagem de pintura, para a secagem de ramais têxteis e geração de ar quente para outras necessidades [1].

No caso de geradores de gás inerte, quando se quer secar outros combustíveis, tais como pó de carvão mineral, é necessário se atentar para o fato de que o teor máximo de oxigênio nos gases de combustão não pode ultrapassar 8% em volume, sob risco de explosão do pó de carvão nas correntes de gases quentes [1].

Estes queimadores são projetados para trabalhar dentro de fluxos de ar, podendo ser montados em dutos de ar já existentes, sem necessidade de haver uma câmara de combustão. São fabricados com capacidades a partir de 18.000 a 20.000 kW [1].

Há na literatura, vários métodos analíticos para cálculo da intercambialidade de gases. Cada método, foi constituído em uma série de pesquisas empíricas, feitas para determinados tipos de gases e alguns queimadores padronizados [1,3].

Por esse motivo, deve-se escolher mais de um método analítico, considerando a variação de gases utilizados para o desenvolvimento dos métodos.

A pesquisa acadêmica, fundamentada na literatura clássica representada pelas equações de Wobbe [1] e Weaver [3], ofereceu embasamento técnico para aplicação às necessidades contemporâneas, mediante a comparação de índices consagrados na indústria, dos quais foram considerados o Índice de Wobbe e os Múltiplos Índices de Weaver [3].

Um dos principais parâmetros de intercambialidade entre gases é o índice de Wobbe (WI), que é função do PCI volumétrico do gás e de sua densidade relativa, ou seja, essencialmente do poder calorífico e peso molecular característicos de cada gás avaliado [3].

Este índice é um parâmetro para verificação do desempenho térmico dos diversos gases em determinado queimador/piloto, e expressa a capacidade de um dado gás combustível de manter uma relação entre a quantidade de energia liberada e a queda de pressão no queimador, ou uma medida de energia do gás que passa através de um orifício com uma determinada queda de pressão, conforme Equação (1) [1].

Isso significa que gases com WI iguais não necessitam de ajustes da pressão de operação, nem de alterações físicas no equipamento, para fornecer uma mesma liberação térmica, pois suas curvas de desempenho térmico resultantes (gráfico pressão x liberação do queimador) são equivalentes [1].

Índice de Wobbe (WI);

$$WI = \frac{PCI_{vol}}{\sqrt{d_r}} \quad (1)$$

Sendo:

$PCI_{vol}$  o Poder Calorífico Inferior (base volumétrica);

$d_r$  a densidade (relativa).

Contudo, outro importante parâmetro a ser verificado é o índice de Weaver (S), que compara a velocidade de frente de chama dos gases avaliados. Esse índice é calculado por uma razão entre os componentes combustíveis do gás, ponderada pelos respectivos coeficientes de velocidade de chama característicos (o  $H_2$  possui alta velocidade, sendo a referência para os demais), e a quantidade de inertes (quanto maior, menor a velocidade obtida), bem como a quantidade de ar na combustão (razão ar/combustível estequiométrica). Um maior S em relação ao original indica maior velocidade da frente de combustão, ou seja, maior tendência de aproximação da chama em relação ao bico, ou mesmo seu retorno. Enquanto, um menor S indica maior tendência ao afastamento, um maior S indica descolamento de chama [1].

Esse método foi desenvolvido por Weaver, com a ideia de aumentar o escopo de validade de um método desenvolvido anteriormente pela AGA, de



forma a abranger gases com poderes caloríficos menores que os dos gases naturais. São seis índices, dos quais cinco deles foram criados para aferir o grau de intercambialidade, conforme Equação (2) até (8). O método foi desenvolvido a partir de ensaios com misturas de metano, hidrogênio, monóxido de carbono, etano, propano, butano, eteno, propeno, acetileno, benzeno, nitrogênio e dióxido de carbono, de forma a simular gases manufaturados e naturais [1].

Múltiplos Índices de Weaver (S);

$$J_H = \frac{H_s}{H_r} \times \left( \frac{d_r}{d_s} \right)^{0,5} \quad (2)$$

$$J_A = \frac{A_s}{A_r} \times \left( \frac{d_r}{d_s} \right)^{0,5} \quad (3)$$

$$J_L = J_A \frac{S_s}{S_r} \times \frac{(1 - Q_s)}{(1 - Q_r)} \quad (4)$$

$$J_F = \frac{S_s}{S_r} - 1,4 \times J_A + 0,4 \quad (5)$$

$$J_Y = J_A + \frac{N_s - N_r}{110} - 1,0 \quad (6)$$

$$J_I = J_A - 0,366 \times \frac{R_s}{R_r} \quad (7)$$

$$S = \frac{\sum xi \times Bi}{A + 1 + 5Z - 18,8 Q} \quad (8)$$

Sendo que:

$S$  é o fator de velocidade de chama de Weaver;

$x_i$  é a fração volumétrica do componente  $i$ ;

$B_i$  é o coeficiente de velocidade de chama de Weaver para o componente  $i$ ;

$A$  é o ar necessário para a combustão estequiométrica, vol. de ar/vol. de gás;

$Z$  é a fração volumétrica de inertes ( $N_2$ ,  $CO_2$ ) na mistura;

$Q$  é a fração volumétrica de oxigênio na mistura;

$H$  é o poder calorífico do gás;

$d$  é a densidade relativa do ar;

$N$  é o número de átomos de carbono facilmente liberados na combustão de 100 moléculas de gás;

$R$  é a proporção de número de átomos de hidrogênio para o número de átomos de carbono, considerando apenas hidrocarbonetos;

$s$  é o gás substituto;

$r$  é o gás de referência;

$J_H$  é a razão dos números de Wobbe para os dois gases (deve estar entre 0,95 e 1,05);

$J_I$  é a combustão incompleta, medida de emissão de monóxido de carbono (deve ser menor ou igual a zero);

$J_A$  é a aeração primária, medida precisa das condições relativas de suprimento de ar primário para a queima dos dois gases, como também do ar secundário. Portanto, indica a possibilidade de combustão incompleta, nos equipamentos onde a incidência de chama não é envolvida e o ar secundário é ajustado precisamente para aumentar a eficiência térmica.

$J_L$  é o deslocamento de chama (deve ser maior ou igual a 0,64);

$J_F$  é o retorno de chama (deve ser menor ou igual a 0,08);

$J_Y$  representa as pontas amarelas (deve ser menor ou igual a 0,14).

O trabalho é teórico e contemplou técnicas empiricamente conhecidas e aderentes, que se completam na análise.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Conforme Tabela. 1, segue relacionada a composição hipotética para os gases que foram avaliados:

| TABELA 1: COMPOSIÇÃO HIPOTÉTICA DOS GASES (%) |                               |             |       |                 |       |       |       |
|-----------------------------------------------|-------------------------------|-------------|-------|-----------------|-------|-------|-------|
| Combustível (%)                               |                               | Gás Natural |       | Gás Combustível |       |       |       |
| Hidrogênio                                    | H <sub>2</sub>                | 0,08        | 21,57 | 25              | 30    | 33,9  | 38    |
| Água                                          | H <sub>2</sub> O              | 0           | 0     | 0               | 0     | 0     | 0     |
| Nitrogênio                                    | N <sub>2</sub>                | 0,75        | 0,25  | 0,25            | 0,25  | 0,25  | 0,25  |
| Oxigênio                                      | O <sub>2</sub>                | 0,01        | 0,01  | 0,01            | 0,01  | 0,01  | 0,01  |
| Monóxido de Carbono                           | CO                            | 0,01        | 0,01  | 0,01            | 0,01  | 0,01  | 0,01  |
| Dióxido de Carbono                            | CO <sub>2</sub>               | 0,2         | 0,03  | 0,03            | 0,03  | 0,03  | 0,03  |
| Metano                                        | CH <sub>4</sub>               | 88,86       | 66,76 | 63,44           | 59,44 | 54,34 | 50,24 |
| Etano                                         | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> | 5,88        | 5,88  | 5,88            | 5,88  | 5,88  | 5,88  |
| Eteno                                         | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 0,31        | 0,31  | 0,31            | 0,31  | 0,31  | 0,31  |
| Propano                                       | C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> | 3,08        | 3,08  | 3,08            | 3,08  | 3,08  | 3,08  |
| Propeno                                       | C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> | 0           | 0     | 0               | 0     | 0     | 0     |

FONTE: ADAPTADO DE SZKLO A.; ULLER V.C.; BONFÁ PHM.

Dessa forma, foi possível criar um mapa de situação que viabilizou fazer uma comparação dos gases avaliados com relação ao gás de referência, onde o Gás  $\alpha$  é o gás de referência e o Gás  $\beta$  é o gás substituto, de acordo com a Fig 7, adaptado de GARCIA R. [1]:

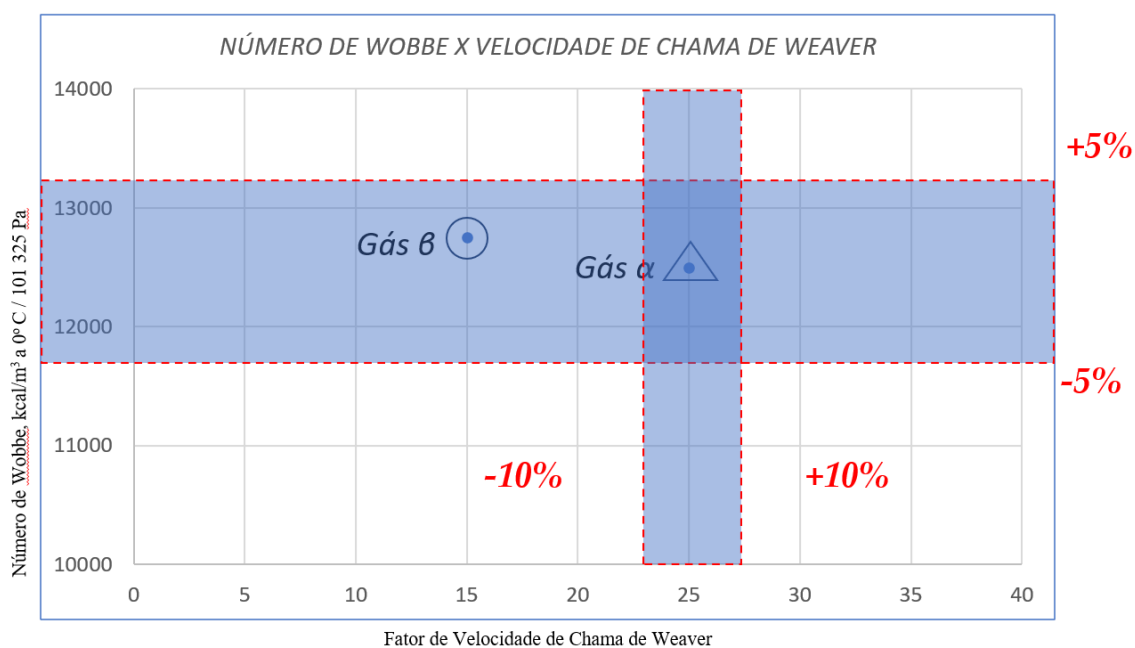


FIGURA 5: GRÁFICO WOBBE X WEAVER - ALPHA COMO REFERÊNCIA E BETA SUBSTITUTO <sup>[1]</sup>

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor que é desprendida na sua queima completa, estequiometricamente. Caso a quantidade de calor seja medida com a água gerada na queima da fase gasosa, o poder calorífico é chamado de Poder Calorífico Inferior (PCI). Caso a água gerada na combustão seja considerada na fase líquida, tem-se o Poder Calorífico Superior (PCS). A diferença entre os dois é exatamente a entalpia de vaporização da água formada pela queima do hidrogênio contido no combustível e da água já contida no combustível como umidade.

A relação matemática entre eles é a representada na Equação (9):

$$PCI = PCS - 2440(9H + u) \quad (9)$$

Considerando que:

PCI é o Poder Calorífico Inferior (kJ/kg) em base seca;

PCS é o Poder Calorífico Superior (kJ/kg);

H é o Teor de hidrogênio do combustível (kg/kg) em base seca;

u é o Teor de umidade do combustível (kg de água / kg de combustível seco).

Os valores utilizados no presente estudo foram obtidos na literatura. Empiricamente seus valores são obtidos em laboratório, através de uma bomba calorimétrica com temperatura controlada do banho onde está imersa a bomba em que se faz a queima do combustível. O valor obtido é sempre o PCS. Assim, o PCI é obtido por meio de cálculo, utilizando-se a expressão (9).

Portanto, foi necessário se conhecer o teor de hidrogênio do combustível e sua umidade. Normalmente, o que mais se usa é o PCI, uma vez que na maioria dos processos industriais, os gases de combustão são liberados a temperaturas altas onde a água neles contida se encontra na fase gasosa.

Também se levou em consideração a temperatura de chama teórica, que foi calculada considerando-se que o calor resultante da combustão foi integralmente transformado em entalpia dos produtos de combustão, isto é, obteve-se a temperatura adiabática de chama. Assim, não há neste cálculo nenhuma perda de calor para o meio ambiente ou por dissociação do combustível.

A expressão para a temperatura de chama utilizada é expressa na Equação (10):

$$T_{chama} = T_{ar} + m_c \times PCI / (m_g \times C_{p_g}) \quad (10)$$

Onde:

$T_{chama}$  é a temperatura de chama (K);

$T_{ar}$  é a temperatura de entrada do ar de combustão (K);

PCI é o Poder Calorífico Inferior (kJ/kg);

$m_c$  é a massa do combustível queimado (kg/s);

$m_g$  é a massa dos gases de combustão (kg/s);

$C_{p_g}$  é o calor específico dos gases de combustão (kJ/kg.K).

A temperatura de chama é um recurso muito útil na comparação entre combustíveis dada necessidade de calor e temperatura. A análise pura e simples dos poderes caloríficos não retrata o desempenho do combustível.

Para o estudo, verificou-se o estado da arte e o que já foi realizado no âmbito de intercambialidade de gases para utilização em queimador industrial, através da literatura clássica (referência) voltada principalmente para a área industrial.

A pesquisa acadêmica preencheu a lacuna existente entre as aplicações empíricas utilizadas na indústria e a necessidade de transição energética atual, aplicando-se os métodos conhecidos por intermédio das equações (1) e (8).

Para isso, levou-se em conta valores empíricos para fator de velocidade de chama de Weaver, PCI em base volumétrica e número de Wobbe para os gases denominados GN, para gás natural, GC (A), GC (B) e GC (C), para gás combustível.

Para todos os gases, as densidades relativas listadas da Tabela 2 foram calculadas e comparada com valores reais.

Os valores de composição relacionados ao hidrogênio são idênticos aos da Tabela 1.

TABELA 2: VALORES ADOTADOS

| Nome do Gás                                                | GN      | GC(A)   | GC(B)    | GC(C)    | GC(D)    | GC(E)    |
|------------------------------------------------------------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| H <sub>2</sub> (%MOL)                                      | 0,08    | 21,57   | 25,00    | 30,00    | 33,90    | 38,00    |
| Fator de Velocidade de Chama de Weaver                     | 14      | 25      | 26       | 27       | 28       | 30       |
| PCI <sub>vol</sub> (kcal/m <sup>3</sup> )                  | 8809,00 | 8235,00 | 11108,57 | 11241,56 | 11205,78 | 11263,31 |
| √d <sub>r</sub>                                            | 0,76    | 0,70    | 0,96     | 0,99     | 1,00     | 1,02     |
| Número de Wobbe, (kcal/m <sup>3</sup> a 0 °C / 101 325 Pa) | 11592   | 11764   | 11580    | 11355    | 11206    | 11042    |

FONTE: ADAPTADO DE SZKLO A.; ULLER V.C.; BONFÁ PHM.

Para o PCI em base volumétrica foi utilizada interpolação linear, sabendo-se que seu comportamento de fato é linear nessa faixa, conforme a variação de hidrogênio.

Para os gases GC (D) e GC (E), utilizaram-se o simulador Vulcano, conforme tela ilustrada na Figura 6 [10], e gráficos ilustrados nas Figura 12 e 13.

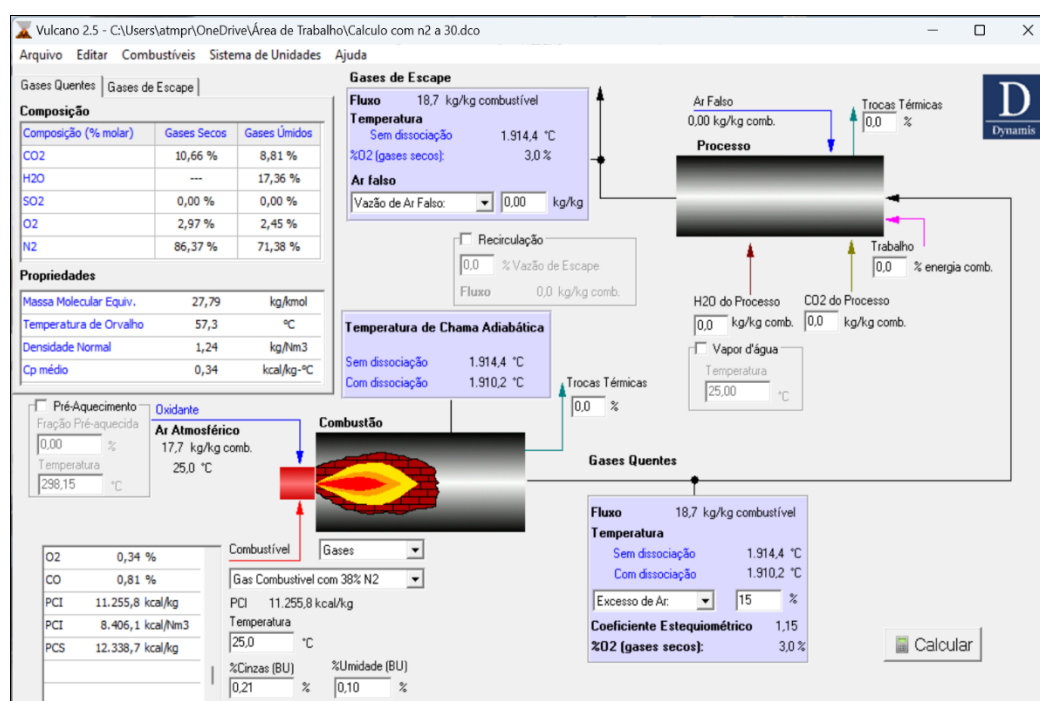


FIGURA 6: TELA DO SIMULADOR VULCANO 2.5

O simulador Vulcano viabilizou encontrar o PCI em base volumétrica de forma alternativa, viabilizando a continuidade dos cálculos. Suas entradas são inerentes as frações moleculares contidas na composição do gás simulado em questão, sua aplicação vai de necessidades voltadas para simulação de processos em fornos de siderurgia, indústria cimenteira, química, petroquímica e aplicações acadêmicas de menor complexidade.

Foram inseridos os dados na aba “Editar Combustível Gasoso”, e o software realizou a simulação do PCI, entre outros parâmetros que não foram utilizados na pesquisa, conforme demonstrado na Figura 7.

Editar Combustível Gasoso

Nome do Combustível  
Gas Combustível com 38% N2

Composição Volumétrica (molar)

|       |        |        |       |       |       |
|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| %CH4  | %C2H2  | %C2H4  | %C2H6 | %C3H6 | %C3H8 |
| 23,8  | 1      | 15,26  | 10,07 | 3,71  | 1,49  |
| %C4H8 | %C4H10 | %C5H12 | %H2   | %CO2  | %N2   |
| 1     | 0,61   | 0,03   | 38    | 0,04  | 3,84  |
| %O2   | %CO    | %SO2   | %H2S  |       |       |
| 0,34  | 0,81   | 0      | 0     |       |       |

Soma dos componentes: 100,00%  
Cp 0,54 kcal/kg·°C  
PCI 11.255,8 kcal/kg

1) Nome do Combustível ✓  
2) Soma dos Componentes = 100% ✓

OK Cancelar

FIGURA 7: TELA DO SIMULADOR VULCANO 2.5 PARA COMPOR O GAS A 38% DE N<sub>2</sub>

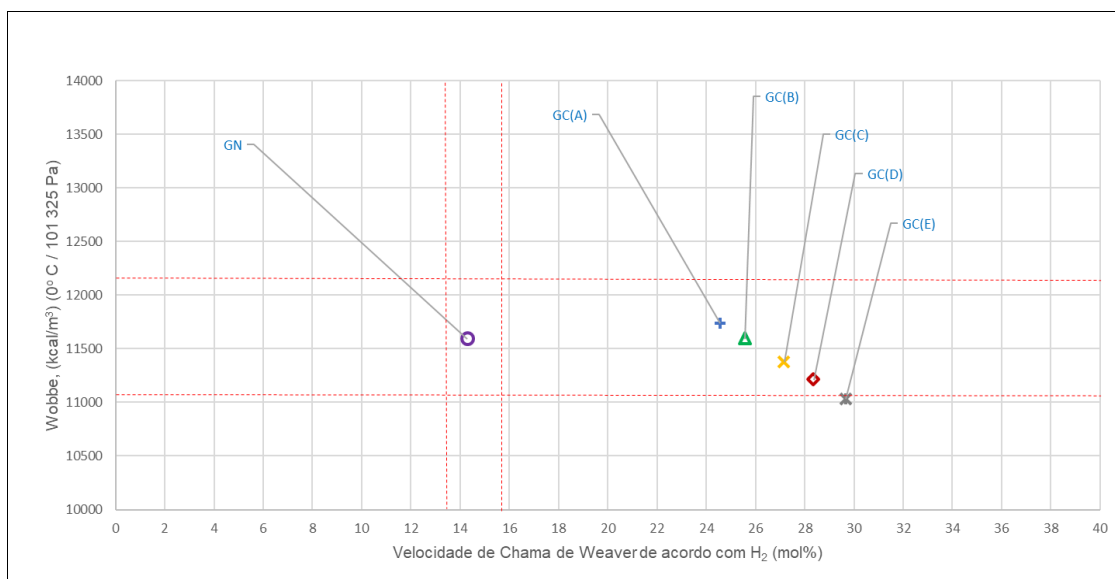
Também pode ser utilizado para eventuais simulações para fornos e equipamentos térmicos que se utilizam como fonte de alimentação os combustíveis mistos, líquidos e sólidos, com entrada de ar em excesso natural ou forçada.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Juntos, os índices de Wobbe (W) e Weaver (S), foram representados graficamente em 6 mapas com pontos para cada gás avaliado em relação ao original, conforme ilustrado nas Fig.10 até 15. Vale mencionar que na literatura [referência] geralmente são considerados equivalentes, gases com W variando até  $\pm 5\%$  e S variando até  $\pm 10\%$ , aproximadamente [11].

Isso significa que, teoricamente, a mudança para alguns dos gases avaliados não demonstraram alterações relevantes nas pressões de operação do queimador para a mesma liberação obtida com o GN. Ou seja, as curvas de pressão e liberação do queimador não sofreram alteração significativa na grande

parte dos cenários estudados, bem como as propriedades dimensionais do equipamento [11].



**FIGURA 8: GRÁFICO WOBBE X WEAVER - GAS NATURAL (GN) COMO REFERÊNCIA**

Os mapas ilustrados nas Fig. 10 até 15, mostraram que, em termos de Wobbe, todos os gases previstos se encontram em uma região (delimitada pelas linhas tracejadas horizontais) de plena intercambialidade em relação ao gás natural, até certa composição [11].

No entanto, o mesmo não ocorre relação a Weaver, como se observa pela região de linha tracejada vertical do mapa [11].

Há, inclusive, tendência de maior retrocesso de chama à medida em que se aumenta o teor de H<sub>2</sub> [11].

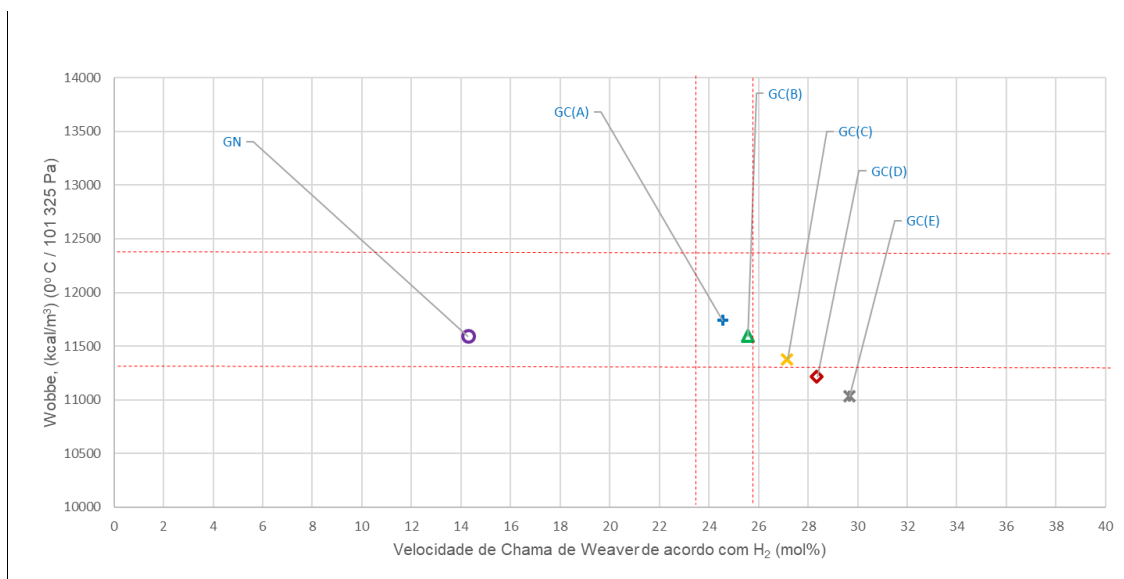
Isso não significa, necessariamente, que seja inadmissível a operação com esses combustíveis, porém, é necessário verificar se pode haver problemas de instabilidade ou integridade do queimador, e do equipamento no qual está inserido, em função da tendência à aproximação de sua chama [11].

A consulta específica ao fornecedor do queimador deve garantir que, apenas com ajustes de pressão de operação no queimador, para dada liberação, seu uso pode ser considerado [11].

Quando um determinado queimador é projetado, e fornecido comercialmente, o fabricante oferece sua folha de dados, que indica a composição dos gases para qual sua performance é a mais ideal [11].



Na Fig. 9 verificou-se que tomando-se o GC (A) como referência, ou seja, consideramos que é o gás de projeto, na intersecção entre as faixas de W e S.

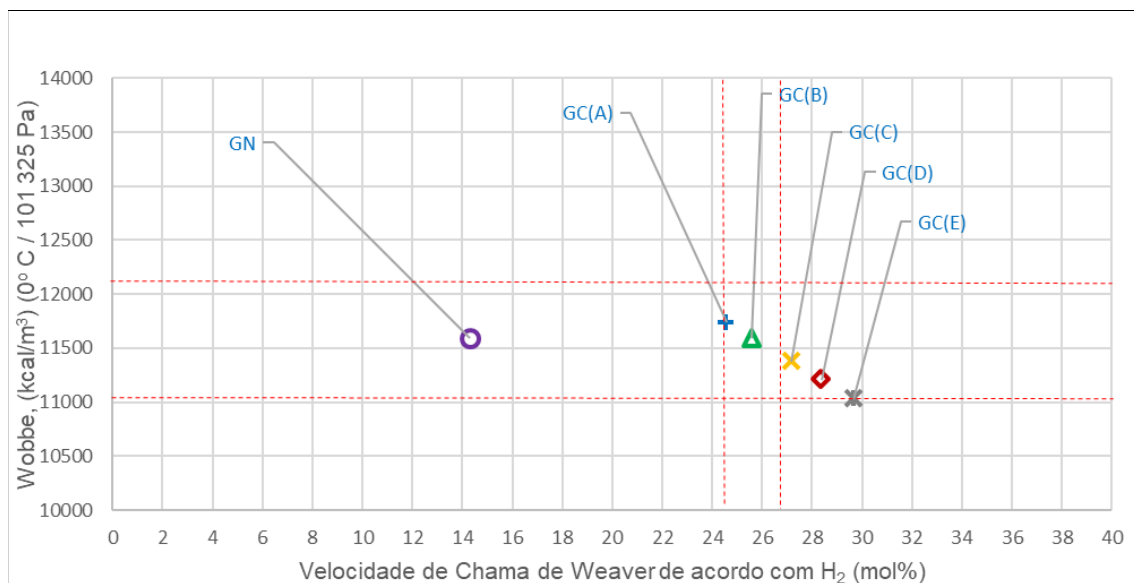


**FIGURA 9: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC21,57%H<sub>2</sub>) COMO REFERÊNCIA**

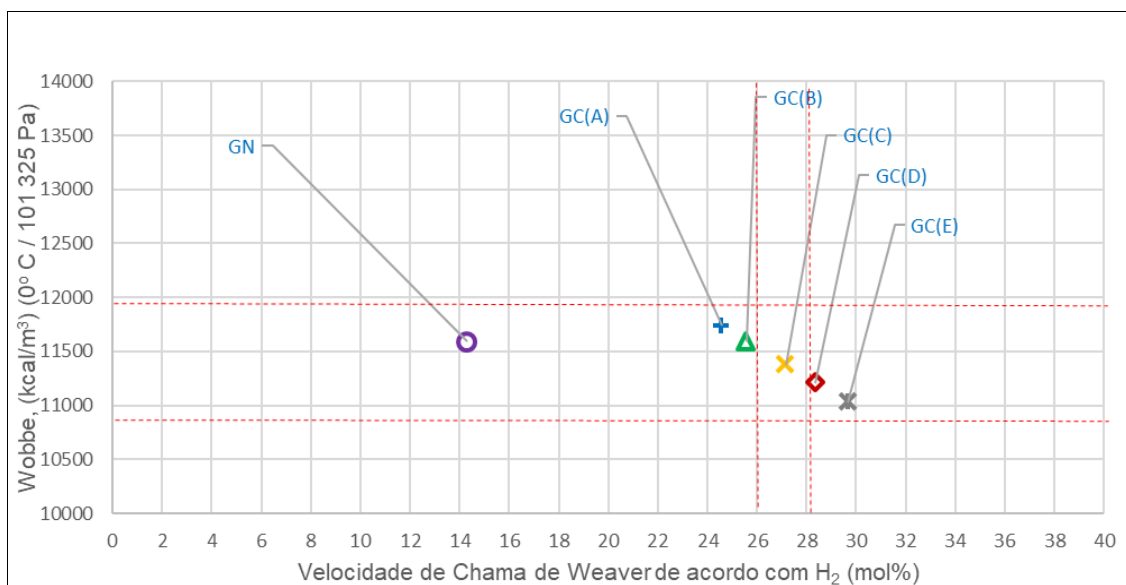
Notou-se que o GN quando aplicado, com certeza incidirá no efeito de afastamento de chama. Por sua vez, o GC (B), é plenamente intercambiável para ambos os índices. O GC (C) indicou o efeito de retrocesso de chama, e os demais gases, GC (D) e GC (E) não se apresentaram dentro dos limites estabelecidos para a intercambialidade [11].

Tomou-se como gás de referência o GC (B), que evidenciou intercambialidade para os gases imediatamente à montante GC (A) e à jusante GC (C) [11].

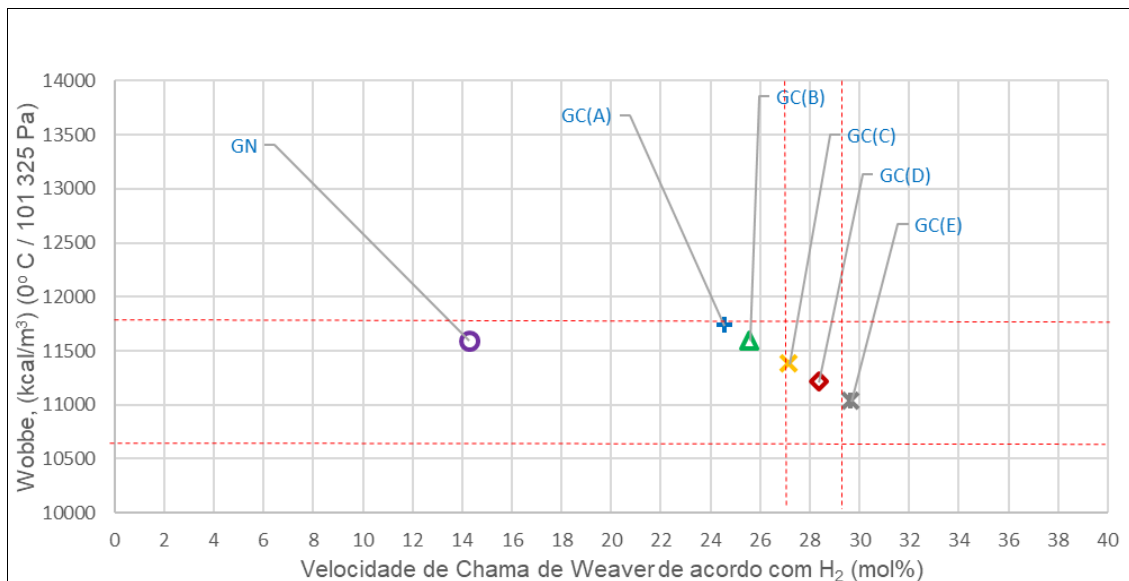
Para considerar uma substituição por qualquer outro gás, o gráfico da Fig. 12 demonstrou que seriam necessários ajustes em válvulas de controle que permitam restringir e aliviar o alinhamento de gás, porém isto influenciaria também no índice de Wobbe, uma vez que sua condição é relacionada à quantidade de energia liberada por um gás em um determinado orifício [11].



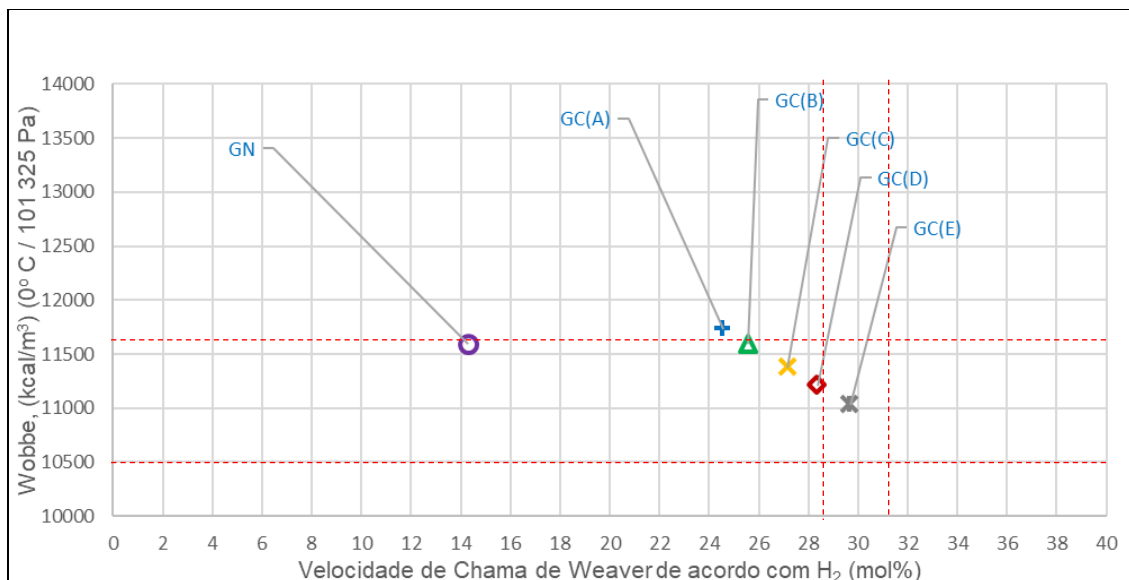
**FIGURA 10: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC25%H<sub>2</sub>) COMO REFERÊNCIA**



**FIGURA 11: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC30%H<sub>2</sub>) COMO REFERÊNCIA**



**FIGURA 12: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC33,9%H<sub>2</sub>) COMO REFERÊNCIA**



**FIGURA 13: GRÁFICO WOBBE X WEAVER – GÁS COMBUSTÍVEL (GC38%H<sub>2</sub>) COMO REFERÊNCIA**

Em função de ações de redução do consumo de vapor relacionadas a oportunidades de ganhos com eficiência energética de uma refinaria, a geração de gás combustível pode se tornar excedente [2].

Sendo assim, avaliou-se a possibilidade de consumi-lo, evitando o seu envio para tocha. Por isso, foi necessário verificar a adequação do uso do gás combustível como alternativa ao gás natural em um determinado queimador de um forno [2].

Levou-se em consideração para a combustão do processo que o excesso de ar não deve exceder o limite fixo de 2 a 3% de oxigênio, de forma a assegurar uma combustão completa.

O estudo possibilitou detectar possíveis consequências indesejadas na operação de um queimador, devido à queima de gás combustível, e o risco de eventuais pontos quentes [11].

A avaliação de parâmetros de referência sobre a intercambialidade entre gases (gás combustível e gás natural), previu também possíveis impactos nas curvas de desempenho do queimador (conforme dados do fabricante), alterações nas faixas de pressão operacional, e a temperatura mínima admissível do gás efluente, considerando seu ponto de orvalho [11].

Em função de terem sido considerados critérios de manutenção e estabilidade de chama com determinados teores de hidrogênio, julgou-se necessária a consulta ao determinado fabricante.

O controle de combustão também se mostrou essencial, de forma que ao fixar um valor entre os limites ótimos para o excesso de ar, tornou-se viável a combustão completa e estabilizou-se a queima da mistura gasosa no queimador.

Um agravante na utilização de hidrogênio na mistura foi que sua produção convencional em refinarias acarreta emissões de CO<sub>2</sub> provenientes do processo de geração deste gás.

Para cada 8g de hidrogênio produzido a partir da reforma do metano, por exemplo, incluindo a reação de *shift* com a água, são emitidos 44g de CO<sub>2</sub> oriundo do processo [2].

As emissões não energéticas de CO<sub>2</sub> da produção de hidrogênio a partir do metano liberam cerca de 5,5 toneladas de CO<sub>2</sub> por tonelada de hidrogênio produzido [2].

Isso levando em consideração que o metano é a matéria-prima com menor teor de carbono que pode ser utilizada para a produção de hidrogênio, ou seja, a partir de hidrocarbonetos mais pesados, libera-se um volume ainda maior de CO<sub>2</sub>, incluindo as emissões de processo e as emissões energéticas.

A intercambialidade de combustíveis é uma das principais medidas de mitigação das emissões atmosféricas para o setor de refino.

Uma maior participação do gás natural pode reduzir em até 26% o fator de emissão de GEE do combustível.

A possibilidade de aumentar a associação de gases ricos em hidrogênio na formação do gás de refinaria também é uma medida interessante, tanto para obtenção de integração energética quanto para evitar sua queima por excesso de geração.

O estudo da intercambialidade deve ser aplicado sempre que possível, evitando diversas modificações em equipamentos e gerando dessa forma uma economia tangível no que diz respeito a paradas de produção e aquisição ou modificação dos equipamentos existentes.

Foi notado que fornos em más condições de conservação tendem a operar com excesso de ar acima do valor ótimo, o que reduz a eficiência dos queimadores.

A função do queimador é fazer com que o combustível e o oxidante fiquem em contato o tempo suficiente e à temperatura suficiente para ocorrer e completar a reação de combustão. Uma vez que a maioria das reações de combustão acontecem na fase gasosa, o contato eficiente depende de: Tempo, Temperatura e Turbulência.

Em geral os queimadores não podem ser considerados isolados do equipamento térmico, pois os arredores obviamente vão ter um efeito sobre a quantidade de calor perdida pela chama, conseqüentemente sobre a sua temperatura, sobre o tempo em que os gases da chama são mantidos na zona de combustão e, sobre a recirculação do gás [1].

Considere as paredes da câmara de combustão fechada e fria, a chama vai perder calor rapidamente e sua temperatura pode ser tão reduzida que a queima cessa antes que se complete, isto vai acontecer por exemplo, quando um forno é ligado frio [1].

Outro resultado de uma câmara de combustão fria será o alongamento da chama por causa das reações químicas mais lentas em temperatura reduzida [1].

Do mesmo modo, paredes refratárias quentes vão irradiar o calor de volta para a chama, aumentando sua temperatura e a intensidade de combustão, dando uma chama menor e mais intensa. De maneira análoga, se o calor é irradiado para a base da chama ele vai reduzir a zona de pré-aquecimento, novamente aumentando a intensidade da combustão [1].

Enquanto a turbulência inicial pode ser gerada pelo queimador, seu desenvolvimento pode ser alterado pela proximidade das paredes da câmara, além de fazer uma boa mistura do combustível e do oxidante, a turbulência tem o efeito de fazer com que os gases quentes e os intermediários da combustão retornem para a zona de ignição, com a consequente redução no tempo de ignição. A maneira de introdução do ar secundário também pode afetar a forma, intensidade e estabilidade da chama [1].

Se o ar secundário foi adicionado com alta turbulência, isto aumentará a turbulência dando uma chama menor e mais intensa e uma ignição mais estável. Se o ar secundário foi adicionado rápido demais a uma chama que queima devagar, ele pode ter um efeito de esfriamento brusco e, portanto, o ar secundário é normalmente adicionado em etapas [1].

Do mesmo modo, o ar secundário em excesso pode ter um efeito de esfriamento em qualquer chama. Este efeito pode ser reduzido se usarmos ar secundário quente [1].

Os gases podem ser classificados em termos de velocidade da chama e do índice de Wobbe para propósitos de projeto do queimador. O índice de Wobbe é uma medida de energia do gás que passa através de um determinado orifício com uma determinada queda de pressão [8].

## **5. CONCLUSÕES**

O hidrogênio apareceu como um vetor energético que proporcionou atributos que o coloca como o combustível do futuro, numa possível permuta dos combustíveis fósseis. Dentre essas propriedades destaca-se o fato de não emitir gases poluentes na atmosfera, uma vez que em sua combustão há apenas a liberação de água e energia.

A melhoria de performance de queimadores associada a melhor controle de queima mostrou-se como um dos principais fatores para viabilizar a integração energética.

Verificaram-se a viabilidade de uso de um gás combustível como alternativa ao gás natural em um determinado queimador. Para isso avaliou-se os possíveis impactos, como tendências a possíveis pontos quentes no queimador. Além da composição média de um determinado GC, com 21,57%mol

de hidrogênio, avaliou-se o uso, eventualmente, de até 38%mol deste componente.

Portanto, podemos concluir que:

- a. Os GC avaliados possuem índice de Wobbe compatível com o do GN original, o que sugere boa adequação no que diz respeito à liberação térmica para dada pressão do combustível em dado queimador;

Isso significa que as curvas de desempenho estimadas para estes conjuntos não se alteraram significativamente.

Contudo, outro parâmetro de intercambialidade também avaliado apresentou desvio significativo.

O principal deles é o índice de Weaver, que demonstrou forte aumento, indicando uma maior velocidade de frente de chamas de GC em relação ao GN, o que poderia trazer impactos à integridade do queimador ou à sua estabilidade, devido à tendência ao retorno de chamas (quanto maior o teor de H<sub>2</sub>, maior o efeito).

Deste modo, mostrou-se necessário elaborar consultas específicas ao fabricante do queimador, e inclusive, a execução de testes de campo para que seja verificada a ocorrência de *flash-back*, avaliar o possível aumento de sua pressão, ou propor outras soluções.

Comprovou-se que variações do índice de Weaver, podem levar a uma tendência de aproximação da chama, com possíveis impactos na estabilidade da combustão ou na integridade dos queimadores.

Considerando ainda que existe a possibilidade do seu teor de hidrogênio chegar até aproximados 38%mol, o índice de Weaver teria uma tendência a aumentar ainda mais (H<sub>2</sub> possui alta velocidade de frente de chama).

- b. Verificou-se possíveis consequências indesejadas na operação dos queimadores/pilotos devido à queima de diferentes gases (gás combustível ou gás natural), permitindo prever necessidade de modificações nos queimadores no caso de não haver intercambialidade;

Considerando que os índices dos dois gases são muito próximos dentro da variação aceitável típica entre combustíveis de cerca de  $\pm 5\%$  do Índice de Wobbe, entendeu-se que o queimador considerado pode ser utilizado.

Tendo em vista, principalmente, a quantidade de hidrogênio que pode estar presente no Gás Combustível, demonstrou-se uma maior velocidade de frente de chamas do GC em relação ao GN, o que poderia trazer impactos à integridade do queimador ou à sua estabilidade, devido à tendência ao retorno de chamas.

Nesse caso, considerou-se hipoteticamente que os queimadores poderão ser alimentados com o gás combustível nas composições informadas, até certos limites de composição não sendo esperados problemas operacionais, mesmo com os maiores teores de  $H_2$  informados, fato esse que deve ser verificado junto ao fabricante do queimador de maneira a garantir sua performance e integridade, no que diz respeito ao material de fabricação.

- c. Possibilitou-se obter maior estabilidade do balanço de massa e energia da planta (eficiência energética);
- d. Estimou-se menor emissão de Gases de Efeito Estufa na atmosfera, no que diz respeito ao balanço geral de uma planta, uma vez que a mudança de gases pode ser avaliada de acordo com a necessidade;

## **6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

Não existem grandes esforços de pesquisa e desenvolvimento associados ao tema desse artigo, no que se refere ao controle de queima com ganhos consideráveis e baixo custo.

A atual preocupação mundial com as questões ambientais, que corroboram com as especificações dos derivados de petróleo resulta em um importante desafio ao segmento.

Além de buscar a redução da produção convencional de  $H_2$  nas refinarias e indústrias, diante do maior uso de processos de hidrotratamento, trabalhos futuros podem ser fomentados no sentido da integração do hidrogênio verde no processo, a fim de mitigar a produção de resíduos pesados que resultam em maiores emissões de  $CO_2$ .

Altas temperaturas de processo são obtidas pela transferência direta de calor dos produtos da combustão de combustíveis. As temperaturas máximas de chama de hidrocarbonetos queimados com ar estequiométrico são de cerca de 1926 °C.



Com excesso de ar para garantir a combustão completa as temperaturas são mais baixas, mas ainda adequadas para atingir temperaturas de processo acima de 1093 °C quando necessário.

Temperaturas mais baixas são obtidas com meios de transferência de calor, que por sua vez são atendidos em aquecedores de queima direta.

Em aquecedores de processo e fornos, o calor é liberado pela combustão de combustíveis em um espaço aberto e transferido para fluidos dentro de tubos que estão dispostos ao longo das paredes e do teto da câmara de combustão.

Três zonas são identificadas em um forno de processo típico. Na zona radiante, a transferência de calor é predominantemente (cerca de 90%) por radiação.

A zona de convecção fica distante dos queimadores, embora alguma transferência ocorra por radiação, como a temperatura ainda é alta o suficiente, a maior parte da transferência aqui é por convecção. A aplicação de superfícies estendidas permite a obtenção de fluxos de calor por unidade de superfície nua comparáveis aos da zona radiante.

No geral, esses tubos recebem o mesmo fluxo de calor que os tubos radiantes porque a maior transferência de convecção neutraliza a menor radiação devido à falta de suporte de parede refratário.

A outra oportunidade para trabalhos futuros é traduzida em realização de uma análise completa da performance da chama no ambiente em que está inserida, ou seja, na atmosfera interna do equipamento térmico, levando em consideração as análises necessárias para se obter os resultados esperados nos principais equipamentos térmicos de uma indústria petroquímica ou mesmo em fornos de processos de siderurgia, metalurgia ou indústria cimenteira.

Quanto à formação de fuligem, uma vez que também depende da quantidade de hidrogênio na composição, também é um fenômeno que pode ser avaliado em oportunidades futuras, tendo como entendimento que é inversamente proporcional a quantidade em massa molar deste componente;

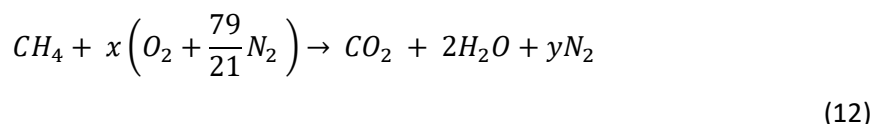
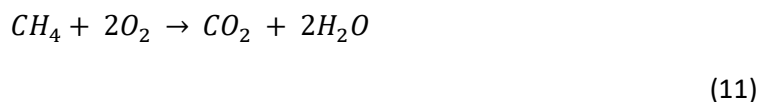
## 7. REFERÊNCIAS

1. Garcia R. **Combustíveis e combustão industrial**. Interciência 2013.
2. Szklo A., Uller VC.; Bonfá PHM. **Fundamentos do refino de petróleo: tecnologia e economia** Interciência 2012.
3. Weaver ER. **Formulas and Graphs for Representing the Interchangeability of Fuel Gases**. National Bureau of Standards. Washington, DC. 1951.
4. Baukal CEJ. **The John Zink Hamworthy Combustion Handbook**. CRC Press 2013
5. Harmen DV., Anatoli VM., Howard BL. **The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end-use equipment: Interchangeability analysis for domestic appliances**. Appl Energy 2017;208:1007-1019.
6. Abeysekera M., W.U. J., Jenkins N., Rees M. **Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas**. Appl Energy 2016;164:991-1002.
7. Pellegrino S., Lanzini A., Leone P. **Greening the gas network – The need for modelling the distributed injection of alternative fuels**. Renew Sustain Energy Rev 2017;70:266-86.
8. Cheolwoong PA., Sechul O., Changgi K., Young C., Youngcheol H. **Effect of natural gas composition and gas interchangeability on performance and emission characteristics in an air–fuel controlled natural gas engine**. Fuel, v. 287, 2021. DOI:10.1016/J.FUEL.2020.119501.
9. Gomes J.; **Eletrólise da água na obtenção de hidrogénio**, Rev. Ciência Elem., v. 10(2):025, 2022  
DOI:10.24927/rce2022.025.
10. DYNAMIS [acesso em 10 jun 2024]. Disponível em <https://dynamis-br.com>.
11. Martins AT, Santos AR. **Avaliação da Intercambialidade de Gás Combustível para um Forno Industrial**. Anais do Encontro Nacional de Pós-Graduação 2024; 8:254-258.

## APÊNDICE I

### Memorial de Cálculos

O primeiro passo foi efetuar os cálculos estequiométricos para obtenção do ar necessário para a combustão do metano, conforme equações (11 até 20):



$$2x = 2 + 2 \quad (13)$$

$$x = 2 \quad (14)$$

A quantidade  $x$  mostrada na equação (12,13,14) é o número de moléculas de  $O_2$  necessários para a combustão completa do  $CH_4$ .

$$y = \left( \frac{79}{21} \right) \times x = 7,5 \quad (15)$$

Para cada mol de metano, ou cada volume de metano são necessários 7,5 volumes de oxigênio e então:

$$7,5 \times \left( 1 + \frac{79}{21} \right) = 9,5 \quad (16)$$

Da equação (11) mostrou-se que em base volumétrica que, 1 volume de metano requer 2 volumes de oxigênio de forma que a razão volumétrica correspondente de ar/combustível é 9,5:1.

Nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), o volume molar de qualquer gás é de 22,4 litros.

A Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP) foi definida por uma pressão de 1 atm e uma temperatura de 273 K (0°C).

$$Ar = 9,5 \text{ volumes de ar atmosférico} \quad (17)$$

$$Ar = 9,5 \times \frac{22,4 \text{ litros}}{\text{mol}} = 212,8 \text{ litros} \quad (18)$$

$$CH_4 \text{ Comb} = 2 \times \frac{22,4 \text{ litros}}{\text{mol}} = 44,8 \text{ litros} \quad (19)$$

$$\text{Razão } Ar/Combustível = 212,8 \text{ litros} \times 44,8 \text{ litros} = 4,7 \text{ litros} \quad (20)$$

Em seguida, aplicou-se as equações (1) e (8) conforme apresentado nas equações (21 até 32), respectivamente, para obtenção dos índices de Wobbe e Velocidade de Frente de Chama de Weaver do GC e *blends* de GC-Hidrogênio:

$$WI_{GN} = \frac{8809}{\sqrt{0,57}} = 11592 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \quad (21)$$

$$S_{GN} = \frac{0,88 \times 148}{4,7 + [(5) \times 0,78] - [(18,8) \times 0,01] + 1} = 13,8 \quad (22)$$

$$WI_{GC_A} = \frac{8235}{\sqrt{0,49}} = 11764 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \quad (23)$$

$$S_{GC_A} = \frac{(0,67 \times 148) + (0,21 \times 339)}{4,7 + [(5) \times 0,28] - [(18,8) \times 0,01] + 1} = 24,6 \quad (24)$$

$$WI_{GC_B} = \frac{11108}{\sqrt{0,96}} = 11580 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \quad (25)$$

$$S_{GC_B} = \frac{(0,64 \times 148) + (0,25 \times 339)}{4,7 + [(5) \times 0,28] - [(18,8) \times 0,01] + 1} = 25,9$$

(26)

$$WI_{GC_C} = \frac{11241}{\sqrt{0,98}} = 11355 \frac{kcal}{m^3}$$

(27)

$$S_{GC_C} = \frac{(0,59 \times 148) + (0,30 \times 339)}{4,7 + [(5) \times 0,28] - [(18,8) \times 0,01] + 1} = 27$$

(28)

$$WI_{GC_D} = \frac{11206}{\sqrt{1}} = 11206 \frac{kcal}{m^3}$$

(29)

$$S_{GC_D} = \frac{(0,54 \times 148) + (0,34 \times 339)}{4,7 + [(5) \times 0,28] - [(18,8) \times 0,01] + 1} = 28$$

(30)

$$WI_{GC_E} = \frac{11263}{\sqrt{1,04}} = 11263 \frac{kcal}{m^3}$$

(31)

$$S_{GC_E} = \frac{(0,50 \times 148) + (0,38 \times 339)}{4,7 + [(5) \times 0,28] - [(18,8) \times 0,01] + 1} = 29,4$$

(32)