

# **Utilização do GLP para a simulação de combustível siderúrgico**

**Prêmio GLP de Inovação e Tecnologia 2024**

**Categoria:**

**Aplicações do GLP**

## Sumário

<b>Breve histórico dos profissionais.....</b>	<b>2</b>
<b>UTILIZAÇÃO DO GLP PARA SIMULAÇÃO DE COMBUSTÍVEL SIDERÚRGICO ....</b>	<b>4</b>
<b>Apresentação do case .....</b>	<b>4</b>
<b>Adequação do case à categoria.....</b>	<b>5</b>
<b>Relato do case .....</b>	<b>6</b>
<b>Estratégia .....</b>	<b>6</b>
<b>Resultados Numéricos.....</b>	<b>9</b>
<b>Resultados Experimentais .....</b>	<b>12</b>
<b>Considerações Finais.....</b>	<b>12</b>
<b>Referência Bibliográfica .....</b>	<b>13</b>

## **Breve histórico dos profissionais**

**Anton Skyrda Veríssimo** – Doutor em Engenharia Mecânica e Pós-doutor da UTL-IST Lisboa e Pós-doutor da UNESP, especialista em combustão. Atualmente é o pesquisador responsável pelos projetos das empresas Thermojet/Æstus. Nos últimos 20 anos, dedicou-se ao estudo de tecnologias avançadas no processo de combustão; dentre elas está a combustão sem chama visível (Flameless Combustion). Tem atuado em projetos de otimização de sistemas de combustão que visam obter maior eficiência com baixas emissões de poluentes em diversos setores industriais.

E-mail: [anton.skyrda@thermojet.com](mailto:anton.skyrda@thermojet.com)

Tel.: (11) 94827-1053

**Ricardo Leite Passos** – Engenheiro Metalúrgico pela FEI/SP fundador da Thermojet do Brasil.

Tem atuado há mais de 35 anos em diversos setores industriais, principalmente na indústria siderúrgica.

Email: [solucoes@thermojet.com](mailto:solucoes@thermojet.com)

Tel.:(12) 2126-9800

## UTILIZAÇÃO DO GLP PARA SIMULAÇÃO DE COMBUSTÍVEL SIDERÚRGICO

Dr. Anton Skyrda Veríssimo

Eng. Ricardo Passos

### Apresentação do case

Durante o processo de fabricação do aço são gerados uma grande quantidade de resíduos, sólidos, líquidos e gasosos. Os resíduos gasosos geralmente possuem uma grande quantidade de elementos tóxicos que não podem ser descartados diretamente no meio ambiente, tendo de ser incinerado. Por outro lado, estes gases possuem uma quantidade de poder calorífico e são inflamáveis, o que acabam por ser reutilizados em alguns processos dentro da própria usina tais como geração de eletricidade por meio de turbinas, geração de calor através de queimadores geralmente utilizados em aquecedores para estações de aquecimento de panelas de aciaria, etc. Um dos grandes desafios ao se projetar equipamentos utilizando gases provenientes de processos siderúrgicos é realizar a bateria de testes de operacionalidade e segurança devido a disponibilidade dos gases fora da planta siderúrgica. Ao se projetar determinados equipamentos, como queimadores, é necessário verificar uma série de testes que vai desde o range de operações até o sistema de segurança do queimador, como válvulas de bloqueio e sensores de chama. Os gases siderúrgicos possuem características físico químicas bem peculiares com composição química muito complexa. simular gases siderúrgicos é um desafio técnico e científico que envolve diversas dificuldades devido à sua composição complexa e às condições extremas em que esses gases são gerados. Em processos siderúrgicos, como a produção de aço em altos-fornos e conversores, os gases resultantes contêm uma mistura variável de componentes como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), hidrocarbonetos diversos (C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>) óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), enxofre (SO<sub>x</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>). Os gases com poder calorífico gerados durante os processos siderúrgicos são o BFG (Blast Furnace Gas) conhecido como gás de alto forno, p COG (Coke Oven Gas) conhecido como gás de coqueria e o BOF (Basic Oxygen Furnace) ou LDG (Linz Donawitz Gas) conhecido como gás de aciaria A composição química destes gases siderúrgicos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Propriedades dos gases siderúrgicos.

	O <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>n</sub> H <sub>m</sub>	Poder calorífico Inferior (kcal/Nm <sup>3</sup> )	Temperatura de chama na estequiometria (°C)	Quantidade de ar teórico (Nm <sup>3</sup> /Nm <sup>3</sup> )	Densidade do gás (kg/Nm <sup>3</sup> )
BFG	0.4	20 - 36	1.5 - 8	3.5 - 13	55 - 61	-	-	~800	~1300	~0.61	~1.34
COG	1.0	7.5	59.1	2.6	6.2	21.5	2.1	~4300	~2130	~4.50	~0.45
BOF ou LDG	trace	65 - 80	-	5 - 7	25 - 35	-	-	~1900	~1900	~1.61	~1.34

Geralmente, os equipamentos industriais que consomem grandes quantidades destes gases, o que inviabiliza economicamente ter linhas e reservatórios para suprir cada um dos gases que compõe quimicamente os siderúrgicos, a fim de realizar uma mistura para a simulação destes gases.

Portanto, a simulação de gases siderúrgicos requer uma abordagem multidisciplinar que integra química, física e engenharia computacional, aliada ao uso de poderosas ferramentas de simulação para tratar a complexidade e a dinâmica dos processos industriais.

Nos últimos anos, a Thermojet do Brasil tem avançado muito no âmbito de utilizar gases residuais siderúrgicos para a geração de calor. Para isso, a THERMOJET tem desenvolvido diversos projetos para a utilização dos gases siderúrgicos como combustível sem o auxílio de gases de poder calorífico maior. Entretanto, projetar, simular, construir e testar os equipamentos de elevadas potências antes de serem instalados para seu pleno funcionamento tem sido um enorme desafio, principalmente pela dificuldade de ter estes gases disponíveis para testes fora das siderurgias.

## **Adequação do case à categoria**

Para suprir a necessidade de realizar testes e demais ajustes nos equipamentos é proposto utilizar o GLP misturando com ar e/ou outro gás inerte como nitrogênio para simular estes gases combustíveis siderúrgicos. O GLP é um ótimo gás capaz de cumprir o propósito uma vez que possui um poder calorífico inferior (PCI) bem elevado e uma grande quantidade elementar de carbono e hidrogênio em sua composição química. Por outro lado, há uma facilidade na disponibilidade do GLP no mercado e as instalações de uma central de GLP para o suprimento em grandes quantidades requer menos tempo do que uma instalação de gás natural onde não tem um combustível gasoso.

Neste estudo, foi desenvolvido um queimador para aquecimento de placas de aciaria utilizando gases de aciaria, mais especificamente o BOF, no qual necessitou realizar diversos testes até sua configuração final. Além de avaliar a utilização do GLP para simular gases siderúrgicos foi desenvolvida uma bancada de testes para avaliar equipamentos industriais utilizando os gases oriundos dos processos siderúrgicos de alta potência. A bancada experimental consiste em misturas de GLP e ar para estudar a intercambiabilidade de gases pelo índice de Wobbe e múltiplos índices de Weaver. Foram realizados testes experimentais recorrendo a sondas de medição de gases, temperaturas e velocidade. Para auxiliar a avaliação dos resultados, foram realizadas simulações numéricas usando FLUENT/ANSYS em duas situações distintas: uma utilizando o gás siderúrgico propriamente dito e outra para avaliar a mistura entre GLP e ar. O modelo de turbulência utilizado foi o *Reynolds Stress* e para o modelo de combustão foi empregado o *Eddy Dissipation Concept*. Os resultados mostram boa concordância entre a simulação e os dados experimentais.

## **Relato do case**

O queimador utilizado foi idealizado, projetado, construído e patenteado por Veríssimo e Passos (2021). O queimador é projetado para atingir altas taxas de carga térmica usando gases combustíveis produzidos como subproduto da produção de aço (BOF). A necessidade de calor do queimador é de 5.000.000 kcal/h (cinco milhões de kcal/h) e requereu um amplo estudo aprofundado de todos os aspectos físicos e químicos, ou seja, projeto térmico, aerodinâmico e mecânico. O gás BOF é um gás com PCI extremamente baixo, pois esse valor é cerca de 1/4 do PCI do gás natural e sua composição química é essencialmente monóxido de carbono e substâncias inertes. Geralmente, esse tipo de gás é queimado em flares em locais remotos em uma siderúrgica e, quando é usado para outras finalidades, é queimado junto com oxigênio. Com o objetivo de usar apenas o BOF, foi estudada a configuração aerodinâmica adequada para obter ancoragem eficaz da chama sem elevação ou retorno de chama.

Um projeto deste tipo é de enorme complexidade, pois é necessário resolver vários aspectos relacionados ao gás e ao aquecimento final ao qual ele será destinado, divididos nas seguintes etapas: Determinação da carga térmica do queimador, avaliação da variação da composição química do gás, da sua umidade, dos particulados e do requisito de aplicabilidade, no caso de aquecimento de painéis de aço e suas respectivas curvas de aquecimento. As velocidades de saída do queimador são da ordem de 100 m/s, com o objetivo de aquecer bem as partes inferiores da panela de aço. Este requisito é um dos grandes desafios a serem vencidos uma vez que as velocidades são bem maiores que as de velocidade de queima da chama, sendo necessário um complexo sistema de ancoragem de chamas. Uma imagem do queimador é mostrada na Figura 1.



Figura 1 – Imagem dos queimadores utilizando BOF como combustível.

## **Estratégia**

Além de realizar diversas simulações numéricas, a principal estratégia está desenvolver uma metodologia experimental para testar o queimador, avaliando diversos aspectos tais como ignição, ancoragem e estabilidade de chama para uma faixa de modulação de ar e combustível, emissão de poluentes, eficiência de combustão, velocidade e temperaturas de saída dos gases quentes. Para isso, foi projetado e montado uma bancada de teste para realizar testes com a mistura de gases para simular BOF. O diagrama para fazer a mistura dos gases é mostrado na Figura 2 e consiste em uma linha de ar alimentada com um soprador centrífugo de velocidade variável para controlar o fluxo de ar, GLP com uma válvula de agulha e uma linha de nitrogênio para purga. A

vazão dos gases foi medida usando medidores de vazão mássica fabricados pela FOX, modelo FT-2.

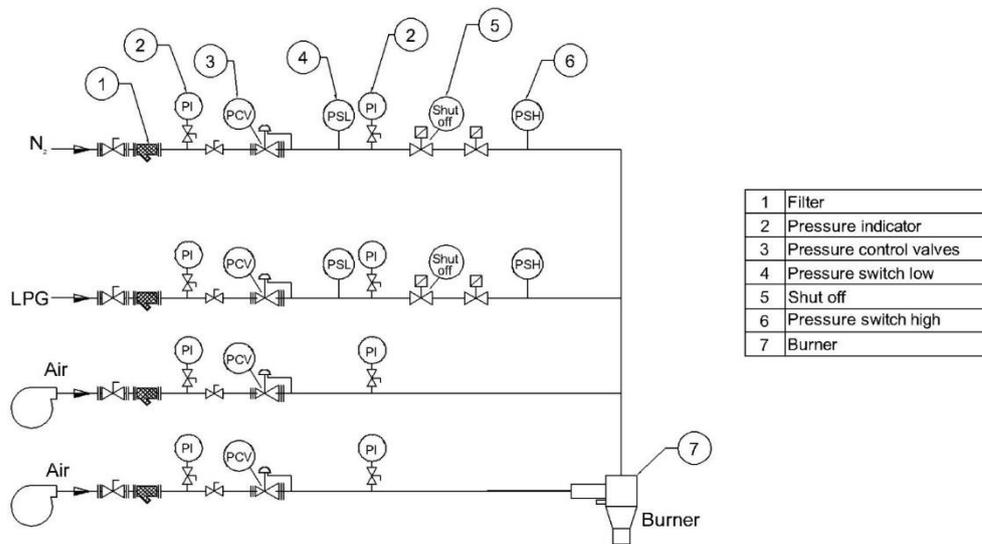


Figura 2 – Diagrama da bancada de testes para simular gases siderúrgicos.

Para simular, neste caso, o gás BOF foi utilizado o conceito de intercambialidade de gases. A intercambialidade de gases é a capacidade de utilizar diferentes tipos de gases no mesmo dispositivo de combustão sem afetar o funcionamento do dispositivo. Se dois gases apresentam um índice de Wobbe dentro de uma faixa de  $\pm 5\%$ , eles podem ser considerados intercambiáveis, Garcia (2010) e Costa (2015). O índice de Wobbe ( $I_w$ ) é obtido a partir da Equação 1:

$$I_w = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (1)$$

onde  $I_w$  é o índice de Wobbe, PCS é o poder calorífico superior e  $d$  é a densidade do gás em relação ao ar.

A seguinte composição química e algumas propriedades do BOF estão listadas na Tabela 2. Esta é a composição química média medida por meio de uma cromatografia gasosa na siderúrgica onde o queimador está em operação.

TABLE 2 – BOF composition to use in numerical simulation.

Componente	
CO (% Vol.)	53,23
CO <sub>2</sub> (% Vol.)	17,34
H <sub>2</sub> (% Vol.)	2,71
N <sub>2</sub> (% Vol.)	26,72
Viscosidade (cP)	0,016478
PCS (kcal/Nm <sup>3</sup> )	1.675,8
Temp. Estequiometria (°C)	1.878
Índice de Wobbe ( $I_w$ ) (kcal/Nm <sup>3</sup> )	1.896

Para a composição da Tabela 2, o índice de Wobbe é de 1.896 kcal/Nm<sup>3</sup>. Com base nisso, foi calculada a mistura entre o GLP e o ar apresentada na Tabela 3. Embora para fins práticos a composição química do GLP seja estimada em 50% butano e 50% propano, é importante utilizar a composição química de forma mais detalhada envolvendo outros elementos como propileno, butileno, etc., para obter o índice de Wobbe o mais próximo possível do real. Na tabela 3 é apresentada a nossa análise através de cromatografia gasosa para determinar a composição química do GLP. Esta composição foi utilizada tanto nos os cálculos de intercambialidade, como nas simulações numéricas.

Tabela 3 – Composição química do GLP utilizada para os cálculos deste trabalho.

<b>Espécies</b>	<b>%</b>
C3H8	26,06
C3H6	31,25
C3H4	5,00
C4H10	19,83
C4H8	10,03
C5H12	7,07
CH4	0,77
Total	100

A variação estudada para a intercambialidade dos gases é dada na Tabela 4.

Table 3 – Mixture between LPG and Air.

<b>Espécies Químicas</b>	<b>(%)</b>		
CH <sub>4</sub>	0,0592	0,0624	0,0656
N <sub>2</sub>	72,9300	72,6018	72,2727
O <sub>2</sub>	19,3865	19,2992	19,2117
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2,0021	2,1104	2,2189
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	2,4009	2,5307	2,6609
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	0,3841	0,4049	0,4257
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	1,5235	1,6059	1,6885
C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	0,7706	0,8122	0,8540
C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,5432	0,5725	0,6020
Total	100	100	100
Iw	1801.5	1896	1991.1
Combustível	7.68%	8.10%	8.52%
Ar	92.32%	91.90%	91.48%

Utilizar uma mistura de GLP e ar para avaliar o comportamento do queimador BOF é muito importante porque esse subproduto não é um gás disponível na rede, muito menos em siderúrgicas para realizar esse tipo de teste.

Outra abordagem estratégica inclui determinar os múltiplos índices de Weaver para avaliação do comportamento da combustão destes gases de mistura no queimador. Detalhes dos cálculos e dos fatores para cada gás podem ser encontrados em (Yu e Mandi, 2021). O método do índice de Weaver inclui seis índices de determinação: aporte de calor JH, aeração primária JA, retorno de chama JF, deslocamento de chama JL, combustão incompleta CO JI e pontas amarelas JY, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Múltiplos Índices de Weaver

Múltiplos Índices de Weaver		
Índices	Fórmulas	Exchange range
$J_H$	$J_H = \frac{I_{W_s}}{I_{W_a}}$	0.95 ~ 1.05
$J_A$	$J_A = \frac{V_{0s} \sqrt{S_a}}{V_{0a} \sqrt{S_s}}$	0.80 ~ 1.20
$J_F$	$J_F = \frac{S_{fs}}{S_{fa}} - 1.4 \frac{V_{0s} \sqrt{S_a}}{V_{0a} \sqrt{S_s}} + 0.4$	< 0.08
$J_L$	$J_L = \frac{S_{fs} V_{0s} \sqrt{S_a} (100 - O_{2s})}{S_{fa} V_{0a} \sqrt{S_s} (100 - O_{2a})}$	> 0.64
$J_I$	$J_I = \frac{V_{0s} \sqrt{S_a}}{V_{0a} \sqrt{S_s}} - 0.366 \frac{R_s}{R_a} - 0.634$	< 0
$J_Y$	$J_Y = \frac{V_{0s} \sqrt{S_a}}{V_{0s} \sqrt{S_s}} + \frac{N_s - N_a}{110} - 1$	< 0.14

W é o índice de Wobbe; V0 é o volume teórico de ar; s é a densidade relativa; O<sub>2</sub> é a composição volumétrica de oxigênio no gás combustível; Sf é o índice de velocidade da chama; N é o número de átomos de carbono que precipitam prontamente durante a combustão em 100 moléculas de gás combustível; R é a razão de átomos de hidrogênio no gás combustível para o número de átomos de carbono no hidrocarboneto. Os índices a e s representam o gás de referência e o gás substituto, respectivamente.

## Resultados Numéricos

Os resultados dos cálculos dos múltiplos índices de Weaver para as variações dos índices de Wobbe são mostrados na Tabela 5. Observe que a carga térmica unitária é alcançada quando o I<sub>w</sub> está 5% abaixo do I<sub>w</sub> do BOF, o que é evidente pelo aumento percentual de GLP na mistura. No entanto, o suprimento de ar pode ser afetado nessas condições. Nenhum dos outros cálculos indica descolamento ou retorno de chama, com taxas de emissão de CO e picos amarelos permanecendo abaixo dos limites prescritos dos índices de Weaver.

Tabela 5 – Resultado dos cálculos dos múltiplos índices de Weaver.

	A	B	C	Limites de operação
W (kcal/Nm <sup>3</sup> )	1801	1896	1991	
Combustível (GLP)	7.68%	8.10%	8.52%	
Ar	92.32%	91.90%	91.48%	
J <sub>H</sub> (aporte térmico)	1.00	1.06	1.11	0.95 ~ 1.05
J <sub>A</sub> (aeração primária)	0.71	0.79	0.87	0.80 ~ 1.20
J <sub>F</sub> (retorno de chama)	-0.42	-0.53	-0.63	< 0.08
J <sub>L</sub> (descolamento de chama)	1.03	1.15	1.26	> 0.64
J <sub>I</sub> (combustão incompleta)	-0.36	-0.28	-0.21	< 0
J <sub>Y</sub> (pontas amarelas)	-0.11	-0.04	0.04	< 0.14

Para simular o comportamento do queimador, simulações numéricas foram realizadas com o subproduto BOF como combustível e as misturas de ar e GLP de índice de Wobbe correspondentes. O FLUENT/ANSYS foi usado para esse propósito. A malha usada para a simulação numérica do queimador é mostrada na Figura 3. A malha consiste em 4.147.336 elementos. Para capturar os efeitos da chama na saída do queimador, um cilindro de 2 m de comprimento com um diâmetro de 600 mm foi considerado. A condição de "outlet pressure" foi usada para todas as superfícies deste cilindro. Para as condições iniciais de combustível e ar, 17,17 m/s @ 1,5 mmH<sub>2</sub>O e 24,68 m/s @ 700 mmH<sub>2</sub>O foram usados, respectivamente.



Figura 3 – Malha computacional.

O modelo k- $\epsilon$  RNG foi usado para simular turbulência, com tratamento próximo à parede usando a Standard Wall Function. Para modelagem de combustão foi empregado o *Eddy Dissipation Concept*, utilizando a composição dada na Tabela 2 para o BOF e Tabela 3 para a mistura entre GLP e ar. As Figuras 4 a 6 mostram os resultados para a distribuição de temperatura e a distribuição das espécies químicas monóxido de carbono (CO) e hidroxila (OH), que estão todas localizadas no plano central do queimador. Observe que, apesar das entradas de ar e de combustível opostas, há uma certa simetria na distribuição de temperatura e espécies químicas. OH pode ser usado como um bom indicador da frente de chama, pois está presente nas áreas de maior reatividade, que coincidem com as de maior temperatura. A oxidação do CO é mais lenta em comparação com outras reações químicas, o que também dá uma indicação da extensão do intervalo de reações químicas entre combustível e oxigênio. Embora as misturas de GLP e ar estejam dentro da faixa aceitável de intercambiabilidade do índice de Wobbe, elas são diferentes da simulação BOF em si. Na mistura de GLP e ar, as temperaturas tendem a ocorrer no centro do queimador, enquanto a distribuição de temperatura na simulação do queimador em si é bastante ampla (Figura 4). Embora as misturas devam obedecer aos limites dos índices de Wobbe, o ar e o GLP são misturados, dando ao queimador uma característica pré-misturada, o que também justifica as temperaturas mais altas e as concentrações mais altas de OH em comparação com a simulação BOF (Figura 5). Além disso, na Figura 5, a área com a maior concentração pode ser vista em uma região fina representando a própria frente de chama. As concentrações de monóxido de carbono são, como esperado, muito maiores no caso da simulação BOF, o que se deve à alta concentração no combustível (Figura 6). Observando apenas as misturas, pode-se observar que a concentração de CO aumenta com a porcentagem de GLP, o que é esperado devido ao aumento da dissociação das moléculas de hidrocarbonetos. Em todos

os casos, as maiores concentrações são encontradas no centro do queimador, pois o fluxo é espiralado, e o combustível é injetado pelo centro. Por outro lado, deve-se notar que o queimador não apresentou nenhum retorno de chama ou desprendimento previsto nas simulações numéricas, o que é consistente com os cálculos realizados com os índices de Weaver mostrados na Tabela 5.

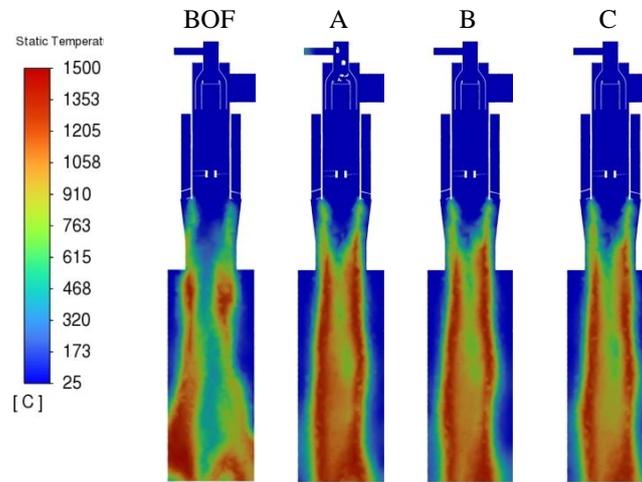


Figura 4 – Distribuição de Temperatura.

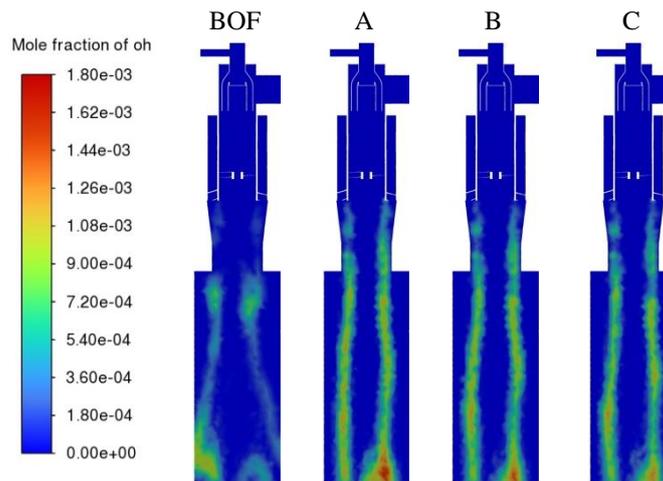


Figura 5 – Distribuição da molécula de OH.

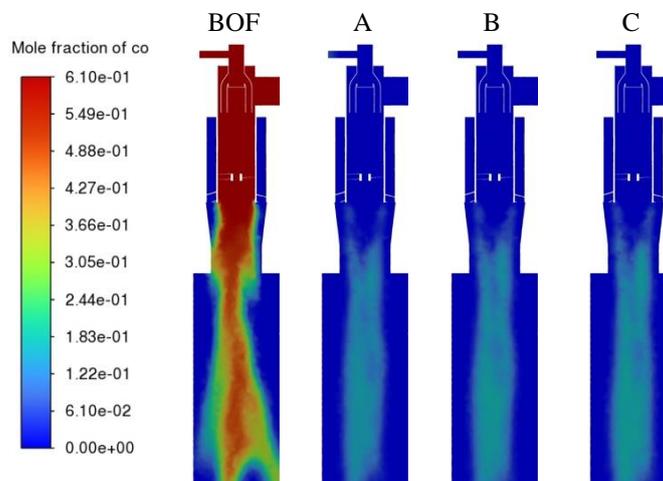


Figura 6 – Distribuição do monóxido de carbono.

## Resultados Experimentais

Primeiramente, foram realizados testes de modulação de combustível para verificar a estabilidade das operações do combustor. Em seguida, foram feitas medições de temperatura com o termopar posicionado a 1 metro de distância da saída do queimador no centro. As medições de temperatura foram feitas com um termopar tipo K com 6 milímetros de diâmetro, colocado na saída do queimador tanto para a simulação da mistura de GLP e ar e gases de siderurgia quanto durante a operação da siderúrgica em si. Os resultados das medições de temperatura são mostrados na Figura 7. Comparados aos valores teóricos, eles são significativamente menores, pois as condições adiabáticas foram levadas em consideração nos cálculos, onde não há perda de calor. As medições foram feitas definindo uma vazão de ar e variando uma vazão de combustível para simular os limites de operação do queimador. Note que as medições de temperatura para o caso da mistura B e a combustão do próprio BOF estão abaixo da temperatura adiabática da chama. Isso se deve às perdas de calor por radiação térmica na cabeça do termopar e também ao seu tamanho. Como as medições foram realizadas em ambiente aberto, as temperaturas foram corrigidas para perdas por radiação térmica conforme descrito em Rocha et al (2008). As medições de temperatura foram realizadas para as misturas A e B, e não foram observadas alterações em relação à mistura B. Durante os testes, a chama não apresentou retrocesso ou descolamento, mantendo-se a operação estável conforme o esperado.

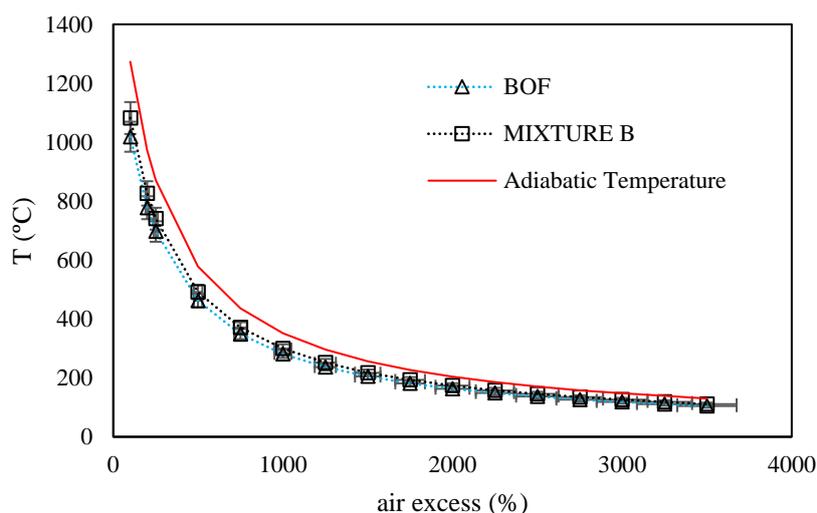


Figura 7 - Comparação entre temperatura adiabática da mistura B e BOF.

## Considerações Finais

O objetivo deste trabalho foi utilizar o GLP para simular gases siderúrgicos, em especial o BOF, para testar os limites operacionais de um queimador que utiliza este gás siderúrgico como combustível. Como o BOF só está disponível em siderúrgicas que produzem aço inoxidável, um equipamento de teste foi construído com uma mistura de ar e GLP, onde os respectivos índices de Wobbe do BOF e das respectivas misturas foram devidamente calculados. Foi verificado que há algumas distorções nas frentes de chama do combustível com o qual o queimador foi projetado para operar no combustível simulado no equipamento de teste. Isso provavelmente ocorre porque o combustível simulado contém oxigênio em sua composição, o que dá ao queimador características de chama pré-misturada. Entretanto, os resultados obtidos com o BOF simulado

através de misturas de GLP e ar foram muito próximos com o queimador operando somente com o BOF, o que mostra a eficácia da metodologia apresentada.

## Referência Bibliográfica

- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, RESOLUÇÃO ANP Nº 825, DE 28 DE AGOSTO DE 2020, DOU31 DE AGOSTO DE 2020, Atualizada pela Resolução Nº 958/2023, disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-825-2020-dispoe-sobre-a-especificacao-e-o-controle-da-qualidade-dos-gases-liquefeitos-de-petroleo-glp-comercializados-pelos-agentes-economicos-no-territorio-nacional?origin=instituicao&q=Resolu%C3%A7%C3%A3o%20Ahttps://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-825-2020-dispoe-sobre-a-especificacao-e-o-controle-da-qualidade-dos-gases-liquefeitos-de-petroleo-glp-comercializados-pelos-agentes-economicos-no-territorio-nacional?origin=instituicao&q=Resolu%C3%A7%C3%A3o%20ANP%20N%C2%BA%20825,%20de%2028%20de%20agosto%20de%202020>
- Costa, F.C., 2010. “Handbook of Combustion, Fuel Gas Application in Industry”. WILEY-VCH, Germany, volume 3, chapter 9.
- Costa, F. C., Santos, E. M, Fagá, M. T. W., Costa, H. K. M., 2015. “Technical procedures for using synthetic natural gas as an alternative to natural gas in different supply conditions for industrial customers”. Brazilian Journal of Petroleum and Gas, vol. 9 n. 2, p. 037-044.
- Caillat, S., 2017. “Burners in the steel industry: utilization of by-product combustion gases in reheating furnaces and annealing lines”. INFUB - 11th European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, INFUB-11, Energy Procedia, vol. 120, pp.20–27.
- Garcia, R. 2013. “Fuels and Industrial Combustion” (*in Portuguese*), Editora Interciência, Rio de Janeiro.
- Ludick, A. “Developing a by-product gas controller to improve on-site electricity generation for iron and steel manufacturing.” M. Eng. Dissertation, North-West University, Potchefstroom, South Africa, 2018.
- Rocha, A. M. A. Carvalho, J. A., Lacava, P. T. 2008. “Gas concentration and temperature in acoustically excited Delft turbulent jet flames”, Fuel, vol. 87, p. 3433-3444.
- Turkdogan, E.T. 1996. “Fundamentals of Steelmaking”. London: Institute of Materials. ISBN 9781907625732. OCLC 701103539.
- Verissimo, A. S. and Passos, R. L., 2021. “Queimador para fornos industriais com sistema venturi e movimentação espiralada de gás combustível/fluido e ar de combustão, para aumento de queima e vazão de combustível de baixo poder calorífico”. Patent, Instituto Nacional de Propriedade Intelectual. Registry number: BR 10 2022 006504 7., Publication date: 04/04/2022.
- Yu, Z. and Mandi, L., 2021. “Study on the interchangeability between low calorific value coalbed methane blended with hydrogen, dimethyl ether and natural”. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 766, pp. 1-7 0120
- Zhao, J., Ma, L., Zayed, M. E., Elsheikh, A. H., Li, W., Yan, Q. and Wang. “Industrial reheating furnaces: A review of energy efficiency assessments, waste heat recovery potentials, heating process characteristics and perspectives for steel industry”. Process Safety and Environmental Protection, vol. 147, 2021, pp. 1209-1228.