

Avaliação fluidodinâmica do escoamento interno em queimadores de gases residuais da formação do carvão vegetal por CFD

Meyer, J. V.^{1*}; Toledo, R. S.¹; Broetto, P. H. N.¹; Costa, J. V. M.¹; Martins, R. S.¹;

Martins, M. F.¹; Faria, L. C.²; Sartim, R.²

¹ Laboratório de Modelagem Multifísica (MM Labs), Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil

² Global Research and Development, ArcelorMittal Tubarão, Serra, ES, Brasil

* e-mail: joao.meyer@edu.ufes.br

Resumo

O presente estudo objetiva investigar o escoamento em um queimador de gases residuais provenientes da carbonização da madeira. Esse processo, conduzido sob restrição de oxigênio em grandes fornos, decompõe componentes orgânicos e libera compostos voláteis, gerando carvão vegetal e subprodutos. A análise apoia-se em modelos computacionais desenvolvidos no Ansys Fluent, os quais permitem visualizar de forma detalhada os campos de pressão e velocidade ao longo do domínio de simulação. Destacam-se a modelagem tridimensional do queimador, a definição rigorosa de sua geometria e a verificação de independência de malha, bem como o pós-processamento das simulações sob distintas condições operacionais. Considera-se, ainda, que o escoamento é impulsionado pelo empuxo térmico resultante da variação de densidade do fluido causada pelas diferenças de temperatura durante a combustão. O enfoque recai sobre os parâmetros que influenciam a eficiência da combustão e a redução de emissões, visando ao desenvolvimento de um queimador mais eficiente e ambientalmente sustentável. Ademais, evidenciam-se a necessidade de malha refinada para capturar com precisão fenômenos de baixa velocidade, uma vez que o sistema opera sem auxílio de ventiladores.

Abstract

The present study aims to investigate the flow behavior within a burner supplied by residual gases from wood carbonization. This process, conducted under oxygen-restricted conditions in large furnaces, decomposes organic constituents and releases volatile compounds, yielding charcoal and useful by-products. The analysis is grounded in computational models implemented in Ansys Fluent, which enable detailed visualization of pressure and velocity fields throughout the simulation domain. Emphasis is placed on the three-dimensional modeling of the burner, the precise definition of its geometry, and the mesh-independence verification, as well as on post-processing the simulations under various operational conditions. It is further considered that the flow is driven by thermal buoyancy resulting from fluid density variations induced by temperature differences during gas combustion. The focus lies on the parameters influencing combustion efficiency and emissions reduction, with the objective of developing a more efficient and environmentally sustainable burner. Moreover, the results underscore the necessity of a refined mesh to accurately capture low-velocity phenomena, given that the system operates without fan assistance.

Keywords: Burner, Optimization, Fluid Dynamics, Residual Gases, Mesh Test, Fluent, CFD

1. Introdução

A pirólise da madeira para a produção de carvão vegetal, destacando-se sua consolidação no setor de energias renováveis. O ciclo de produção engloba desde o plantio em áreas de reflorestamento até a limpeza e preparo do forno para novas cargas de lenha, sendo a fase de carbonização a mais crítica, pois exige controle rígido de oxigênio em fornos de grande porte por cerca de cinco dias. Durante esse estágio, as reações termoquímicas degradam os componentes orgânicos da madeira, liberando gases ricos em carbono – principalmente CO, CO₂ e diversos hidrocarbonetos – cuja combustão controlada no queimador é essencial tanto para mitigar emissões poluentes quanto para aproveitar seu poder calorífico.

O queimador de gases residuais consiste em uma câmara de combustão interligada a entradas de fornos, difusores, convergentes, paredes de contenção e bocal de exaustão. Apesar de seu princípio de operação – mistura e queima dos gases – ser conceitualmente simples, a dinâmica interna é complexa, pois o escoamento, impulsionado exclusivamente pelo empuxo térmico, apresenta baixas velocidades.

O estudo dos campos de velocidade e pressão no interior do queimador é fundamental para garantir eficiência hidrodinâmica. Esses parâmetros influenciam a estabilidade do fluxo, a formação de vórtices e recirculações e a homogeneização da mistura gasosa. Desvios na geometria de vazão ou em gradientes de pressão podem gerar regiões de baixa velocidade, prejudicando o transporte de espécies reativas e elevando as emissões de CO devido a tempos de residência e taxas de mistura inadequados. Dessa forma, o domínio das variáveis fluidodinâmicas torna-se imprescindível para o projeto de sistemas de combustão eficientes e ambientalmente sustentáveis.

2. Metodologia

A investigação inicia com a modelagem tridimensional detalhada do queimador, contemplando as condições de entrada dos gases, o efeito das paredes defletoras de chama, a câmara de combustão e a transição para a chaminé. Para capturar a dinâmica de escoamento de baixa velocidade – impulsionada exclusivamente pelo empuxo térmico, em razão da ausência de ventiladores – são geradas

malhas computacionais refinadas e submetidas a rigorosa verificação de independência de malha, assegurando precisão numérica conforme as diretrizes de [1]. As simulações CFD, conduzidas em Ansys Fluent, empregam modelos RANS (k- ϵ realizável) e consideram o gás como ideal. As condições de contorno reproduzem parâmetros operacionais reais de carbonização, com foco nos campos de pressão e velocidade. Os estudos abarcam três geometrias base distintas (Figura 1) e incluem o teste de independência de malha, cujo objetivo é verificar a estabilização das variáveis fluidodinâmicas frente a sucessivos refinamentos.

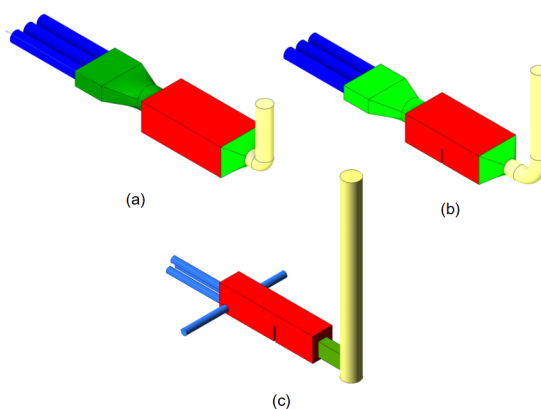


Figura 1: a geometria do queimador foi segmentada por função: os dutos de admissão (azul) conectam-se aos fornos; as zonas de transição (verde) promovem a conexão hidrodinâmica; a câmara de combustão (vermelha) garante a queima completa; e o chaminé (amarelo) controla a descarga atmosférica.

2.1 Teste de malha

Para a geometria representada na Figura 1, conduziu-se um estudo de independência de malha utilizando seis níveis de discretização distintos, cujos parâmetros de qualidade encontram-se na Tabela 1. Nesta análise, adotou-se a configuração sem a presença da parede defletora de chama. Procedimento semelhante foi aplicado às demais geometrias, cujos detalhes de malha estão descritos nas Tabelas 3 e 5.

Ressalta-se que, embora as dimensões dos queimadores variem entre si, a velocidade de entrada permaneceu constante em todas as simulações, de modo a isolar e avaliar exclusivamente os efeitos advindos das diferenças geométricas.

Tabela 1: Parâmetros das malhas geradas para a geometria (a).

Malha	Tamanho [mm]	Elementos	Skewness
1	100	297 552	0,347
2	50	646 611	0,319
3	25	737 434	0,320
4	10	859 536	0,233
5	5	1 295 361	0,252
6	2,5	1 505 764	0,248

Nos gráficos apresentados na Figura X, observa-se um comportamento monotônico no perfil de velocidade, indicando convergência dos resultados à medida que a malha é refinada. Conclui-se que a malha de maior densidade representa com maior fidelidade os fenômenos analisados. Além disso, o teste de tolerância demonstra que a redução dos critérios de parada da simulação produz efeitos negligíveis neste estudo. Ressalte-se que toda a metodologia de validação de malha descrita aplica-se exclusivamente à Geometria (a); para as demais geometrias, empregou-se procedimento idêntico, não reproduzido aqui para evitar redundância.

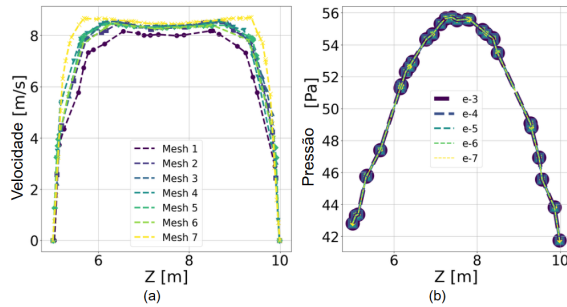


Figura 2 : Na figura à esquerda, apresenta-se o perfil de velocidade extraído ao longo da saída dos dutos de admissão, com as malhas empregadas descritas na Tabela 1. Já na figura à direita, exibe-se o teste de tolerância realizado ao longo da mesma linha, ilustrando o perfil de pressão.

2.2 Variação geométrica

Após a validação da malha, avalia-se o impacto de diferentes configurações de paredes defletoras em cada modelo de queimador. Além dos três modelos-base previamente analisados, estudam-se três arranjos distintos: ausência de defletoras, presença de uma única defletora e configuração com três defletoras (Figura 3).

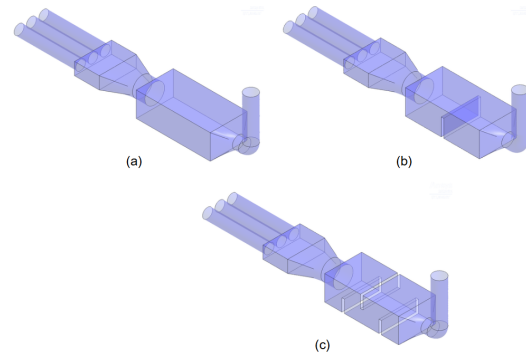


Figura 3: Variações na parede defletora de chama.

3. Discussão dos resultados

3.1 Geometria a

Os resultados da Tabela 1 evidenciam distintas distribuições de velocidade conforme o refinamento da malha, tendo sido adotada a Malha 6, de maior densidade e qualidade, para todas as análises iniciais na Geometria (a) sem defletora. As subfiguras presente na Figura 4 revelam intensa recirculação nas laterais do queimador e um gradiente pronunciado na região de transição entre o coletor de admissão e o corpo principal. Embora essas recirculações favoreçam a estabilidade da chama, elas aumentam a perda de carga, comprometendo o desempenho fluidodinâmico quando o escoamento é acionado unicamente pelo empuxo térmico. Portanto, torna-se crucial minimizar tais perdas para otimizar a eficiência do sistema.

Portanto, as regiões mais relevantes do escoamento concentram-se na transição entre a entrada e a câmara de combustão e na própria câmara. Por mais que os gradientes não apresentem magnitudes elevadas, eles indicam fluxos opostos nas áreas periféricas da geometria, formando um canal central livre para os gases e, consequentemente, para a chama formada.

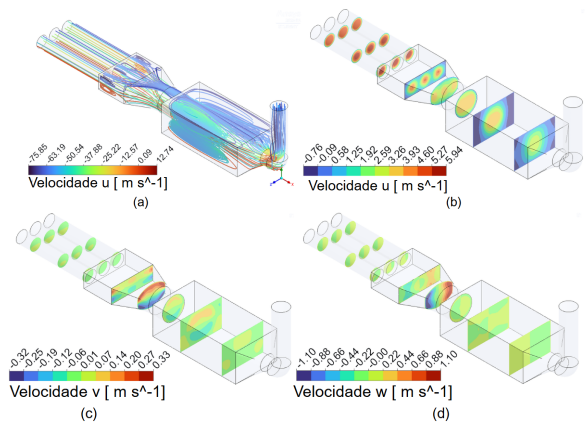


Figura 4 : Na Figura (a) são representadas as linhas de corrente do escoamento a partir da entrada. As subfiguras (b)–(d) apresentam os campos das componentes de velocidade U , V e W ao longo da geometria principal.

Conforme [2], o padrão de fluxo dentro do forno ocasiona variações significativas na transferência de calor pelas paredes da carga. Assim, modificações na geometria do queimador, como o posicionamento de defletores ou ajustes nas seções de entrada, podem impactar diretamente tanto a eficiência térmica quanto o desempenho hidrodinâmico. Dessa maneira, a alteração geométrica configura-se como estratégia crucial para otimizar o confinamento da chama e reduzir perdas térmicas e fluidodinâmicas.

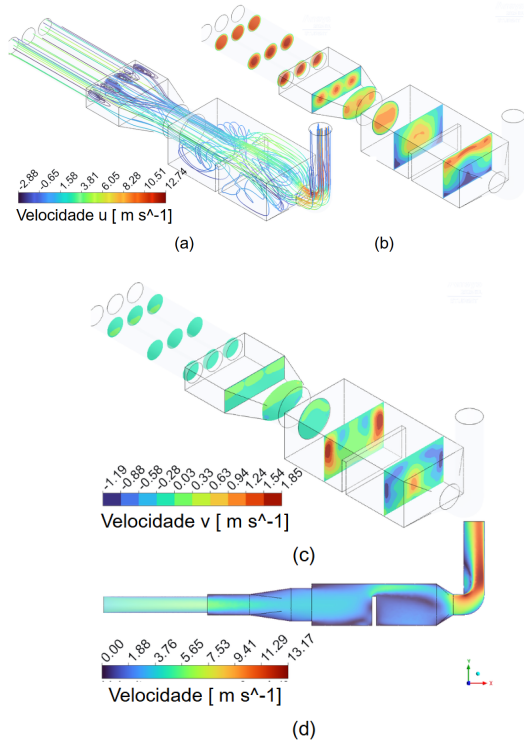


Figura 5: Análise fluidodinâmica com única parede defletora. Na subfigura (a), as linhas de corrente a partir da entrada evidenciam zonas de recirculação em todo o domínio. Nas subfiguras (b)–(d), são exibidos os contornos de velocidade nos planos de interesse, representando as componentes U , V e o módulo da velocidade, respectivamente.

É necessário limitar a combustão à câmara, impedindo que a chama alcance áreas indevidas; para isso, incorpora-se uma parede defletora de chama como mostrado na figura 3 (b). Embora a malha gerada apresente parâmetros muito semelhantes aos do caso sem defletora da tabela 1, a inclusão da barreira modifica de forma significativa os padrões de escoamento, como evidenciado na Figura 5.

A presença da parede defletora provoca uma mudança expressiva no fluxo dos gases, pois impede a passagem direta. Nesta configuração, a parede possui altura equivalente a metade da altura do forno. Como resultado, a densidade e a intensidade das recirculações aumentam, deslocando o ponto de maior recirculação das extremidades para a região a jusante da barreira, conforme demonstrado na Figura 7. O desvio de linha gerado pela curvatura na base da chaminé provoca um impacto no escoamento ainda mais acentuado do que na configuração sem defletora, presente na figura 4.

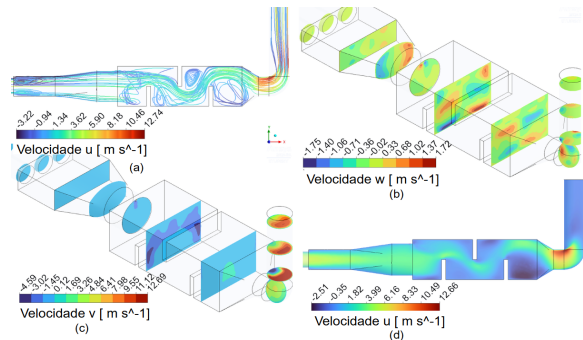


Figura 6: Parâmetros para a Geometria (a) com três defletores. Na subfigura (a), apresenta-se vista lateral das linhas de corrente no queimador a partir da entrada. Nas subfiguras (b) e (d), exibem-se os campos das componentes u , v e do módulo da velocidade, respectivamente.

Uma alternativa adotou três defletores intercalados, cada um com altura de 40 % do queimador, visando condicionar o escoamento e impedir o avanço da chama até a chaminé, presente na figura 6. Os resultados mostraram um aumento na concentração de zonas com gradiente negativo de velocidade, e as variações na componente W revelaram-se pouco expressivas frente às componentes U e V , justificando a omissão de seus planos de velocidade.

Outra forma prática de evidenciar o impacto causado pela presença das paredes defletoras é por meio da análise da localização das regiões de recirculação. Na Figura 7, observam-se as áreas com velocidades negativas para cada uma das configurações analisadas. Nota-se que, na ausência de obstáculos, as recirculações tendem a se concentrar nas regiões periféricas do domínio. No entanto, com a adição das paredes defletoras, há um claro deslocamento dessas zonas para as regiões a jusante, indicando a alteração do padrão de escoamento induzido pela geometria.

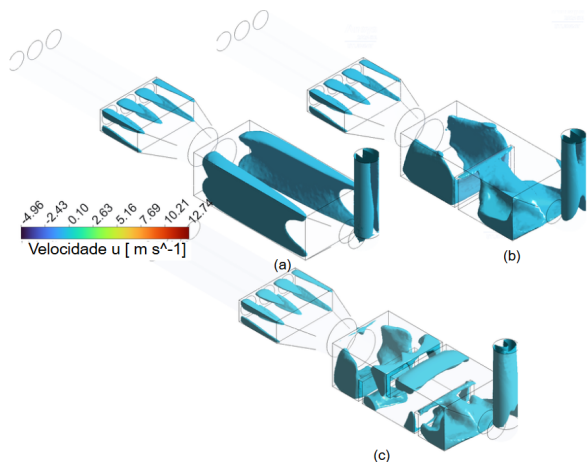


Figura 7: Representação do componente de velocidade u , variando na faixa de 0 a -1 m/s, por meio de isovolumes para as três configurações de defletores consideradas na geometria (a).

A análise da perda de carga no queimador constitui um procedimento essencial para quantificar os impactos das alterações geométricas. Na Tabela 2, estão reunidos os valores de perda de carga para cada combinação de geometria e discretização de malha. Observa-se um acréscimo de até 20% na queda de pressão entre entrada e saída ao comparar as configurações com e sem defletores, evidenciando a influência direta desses dispositivos no desempenho fluidodinâmico do sistema.

Tabela 2: Informações das malhas e resultados médios de pressão e Y^+ para os diferentes casos simulados.

Caso	Elementos	ΔP [Pa]	Y^+ médio
Ø defletor	859 536	111,26	0,42
1 defletor	812 161	130,20	0,58
3 defletores	1 003 420	134,14	0,62

3.2 Geometria b

Na Geometria (b), partindo da configuração da Geometria (a), introduziu-se como principal aprimoramento o arredondamento do perfil de transição entre a câmara de combustão e a chaminé. Essa modificação busca atenuar as perdas de carga associadas à inversão abrupta do escoamento, promovendo um gradiente de pressão mais suave. Mantêm-se, ainda, os elementos fundamentais — dutos de admissão, zona de transição, câmara de combustão e chaminé — bem como as paredes defletoras de chama, responsáveis por intensificar a recirculação interna e otimizar a mistura dos gases. As malhas utilizadas estão detalhadas na Tabela 3, tendo sido selecionada aquela que

melhor equilibra precisão numérica e custo computacional. Os campos de velocidade e pressão evidenciam atenuação das recirculações na saída da câmara e um perfil de pressão mais uniforme, indicando redução das perdas de carga.

Tabela 3. Parâmetros das malhas geradas para geometria (b)

Malha	Tamanho [mm]	Elementos	Skewness
7	4 992	25 951	0,594
8	2 496	34 466	0,635
9	1 248	72 937	0,558
10	624	202 773	0,413
11	312	993 873	0,358

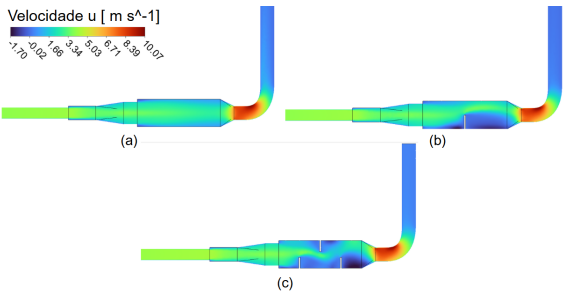


Figura 8: Comparação do campo de velocidade longitudinal entre as configurações de operação com as paredes defletoras para a geometria (b).

Devido à similaridade entre as geometrias (a) e (b), o comportamento fluidodinâmico observado é, em grande parte, equivalente, conforme ilustrado na Figura 8. A principal diferença encontra-se na região de transição entre a câmara de combustão e a chaminé, uma vez que o raio de adoçamento da curva na geometria (b) é aproximadamente oito vezes maior do que o da geometria (a). Apesar de pontual, essa alteração é suficiente para promover uma redução de até 58% na perda de carga nos casos mais críticos, como mostrado na tabela 4, um valor expressivo, especialmente considerando que o escoamento ocorre em baixas velocidades.

Tabela 4: Perda de carga para as configurações da geometria (b).

Malha	Elementos	ΔP [Pa]
Ø defletor	993 873	43,19
1 defletor	964 959	48,06

3 defletores	975 170	55,38
--------------	---------	-------

Para esta e para a próxima geometria, os resultados são apresentados diretamente em função das variações nas configurações das paredes defletoras, com o objetivo de possibilitar uma comparação clara entre os diferentes arranjos analisados.

3.3 Geometria c

A Geometria (c) apresenta alterações estruturais mais significativas. Nessa configuração, não há zonas de transição entre os dutos de admissão e a câmara de combustão, nem curva de ligação entre a câmara e a chaminé. Todas as conexões são ortogonais, com uniões em ângulo reto. Essa abordagem visa simplificar a construção do sistema, mas impõe desafios adicionais ao escoamento. As malhas utilizadas nessa geometria estão presentes na tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros das malhas geradas para a geometria (c)

Malha	Tamanho [mm]	Elementos	Razão de aspecto
12	500	207 813	17,56
13	250	666 635	8,34
14	225	2 729 060	1,77
15	112	10 083 160	1,23

Para a geometria (c), a análise é restrita à comparação entre as configurações sem parede defletora e com uma única parede defletora. A opção por não empregar três paredes deve-se à diferença na disposição dos dutos de entrada, que, ao invés de estarem alinhados horizontalmente, encontram-se dispostos em formato triangular. Essa configuração promove uma maior vazão mássica na região inferior do queimador, direcionando a chama para a base e contribuindo para que ela não se propague até a chaminé. Adicionalmente, considera-se a possível existência de um anteparo estrutural necessário para a fixação da parede defletora.

Conforme pode ser observado na Figura 9, a configuração da geometria (c) com uma parede defletora apresenta extensas zonas de recirculação, localizadas a montante e a jusante do defletor. Por esse motivo, a análise dos perfis de velocidade no teste de malha é conduzida em uma região próxima a essas zonas, de modo a captar com maior precisão os

efeitos dessas recirculações sobre o escoamento.

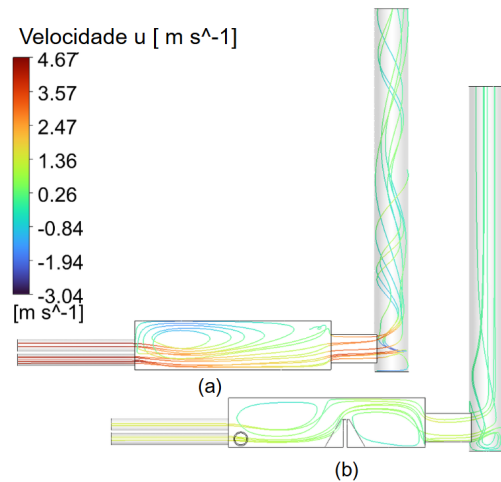


Figura 9: Linhas de corrente a partir da entrada para a geometria (c). É possível perceber que como a geometria é mais simplificada o fluxo se mostra mais estável.

Como essa geometria é a menos complexa, por não ter intermediários entre os dutos de admissão e a câmara de combustão, além de ser composta apenas de formas retangulares e cilíndricas, sem a presença de curvas, é realizado outro teste de malha mudando o método para geração da malha. Para todas as malhas até então, em sua geração, eram criadas com a lógica de blocos, atuando em cada parte conforme fosse mais adequado. Nesse caso, as seguintes malhas, presentes na tabela 6 foram elaboradas de um modo geral, justamente pela simplicidade da geometria.

Dessa forma, todo o processo de validação das malhas por convergência de resultados foi feito com a mesma metodologia apresentada anteriormente. Os resultados podem ser observados na figura 10.

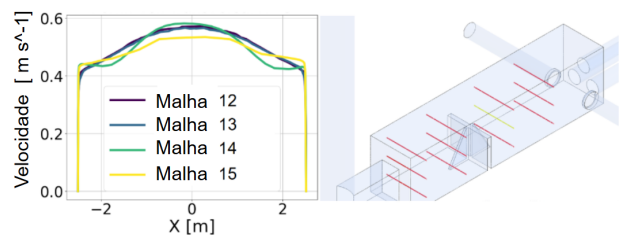


Figura 10: Perfis de velocidade extraídos da linha destacada em amarelo. Os perfis são correspondente as malhas da tabela 5 para a geometria (c).

Como é demonstrado por [3] apenas aumentar a quantidade de elementos não é suficiente para garantir a qualidade da malha uma vez que os testes podem apresentar resultados em que a lógica de convergência não é aplicada. Logo, pelo gráfico da figura 11, cujos dados das

malhas utilizadas estão presentes na tabela 6 é possível concluir que essa estratégia de malha leva a resultados não monotônicos. A ausência de transições suaves intensifica os efeitos de separação do escoamento, promovendo regiões de estagnação e recirculação acentuadas. Mesmo com a presença das paredes defletoras, observam-se padrões assimétricos de velocidade e gradientes de pressão mais pronunciados. A malha adotada para essa geometria possui características semelhantes à da geometria (b), com refinamento adicional nas regiões de junções ortogonais para capturar adequadamente os efeitos locais. Essa geometria representa um caso-limite que permite avaliar os impactos negativos da simplificação geométrica sobre a eficiência fluidodinâmica do queimador.

Tabela 6: Parâmetros das malhas geradas para a geometria analisada (c)

Malha	Tamanho [mm]	Elementos	ΔP [Pa]
Malha 16	500	162 617	1,15035
Malha 17	450	189 271	1,30053
Malha 18	400	226 413	1,22357
Malha 19	350	280 303	1,29170
Malha 20	300	366 224	1,22809
Malha 21	250	503 799	1,36853
Malha 22	200	795 538	1,21090
Malha 23	185	931 850	1,23173

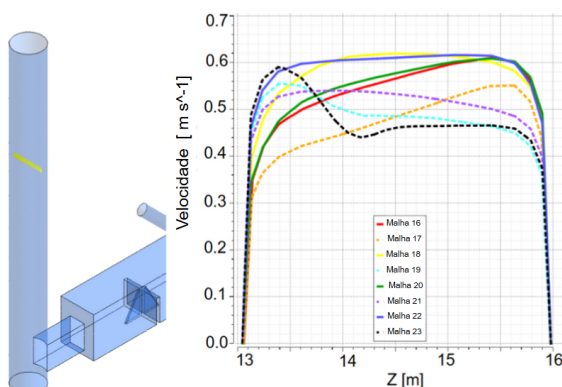


Figura 11: Perfis de velocidades extraídos da linha destacada na figura à esquerda. Os perfis de velocidade são correspondentes das malhas na tabela 6. para a geometria (c)

O estudo comparativo realizado demonstra que a conformação da geometria de transição, bem

como a presença de defletores, exerce influência direta sobre o comportamento hidrodinâmico do queimador. Em todas as configurações analisadas, observou-se a formação de zonas de recirculação, cuja intensidade e localização variam conforme o perfil geométrico e o arranjo dos defletores. Na Geometria (a), caracterizada por transições abruptas e ausência de defletores, identificaram-se recirculações intensas nas regiões laterais da câmara. A introdução de um defletor promove o deslocamento dessas zonas, contudo, acarreta um aumento de aproximadamente 17% na perda de carga. A inclusão de três defletores intensifica ainda mais essas recirculações, resultando em um acréscimo marginal na queda de pressão, o que reforça a correlação entre o número de defletores e a intensidade das zonas. Na Geometria (b), que incorpora transições suavizadas entre a câmara de combustão e a chaminé, o campo de pressão torna-se visivelmente mais homogêneo e as perdas de carga são significativamente reduzidas. Na configuração sem defletores, a perda de carga é 61% inferior à observada na Geometria (a). Mesmo com a adição de três defletores, o incremento permanece 58% abaixo do caso correspondente na geometria abrupta. Esses resultados confirmam que a introdução de raios de curvatura nas regiões de transição contribui para a minimização das perdas hidrodinâmicas, mantendo a eficiência do sistema mesmo com a presença de defletores.

Em síntese, transições suaves mitigam perdas de carga, permitindo a redução expressiva das perdas mesmo na presença de obstáculos internos. Tal característica é especialmente benéfica em projetos de queimadores que operam por empuxo térmico natural, pois favorece o desempenho com menor consumo energético. Por outro lado, a adição de defletores, embora promova maior homogeneidade da mistura e contribua para a estabilização da chama, acarreta aumento nas perdas de carga. Em comparação à geometria sem defletores (Geometria a), essas perdas podem alcançar até 20%, e, em relação à Geometria (b), até 30%. Na Geometria (c), por sua vez, que apresenta conexões ortogonais e ausência de transições suaves, observam-se recirculações assimétricas e regiões acentuadas de separação. Embora as perdas de carga obtidas (entre 1,15 e 1,37 Pa) pareçam pequenas, a baixa resolução da malha em regiões críticas sugere subestimação dos valores reais, comprometendo a confiabilidade dos resultados numéricos. Oscilações de grade

e zonas mal resolvidas podem, inclusive, induzir instabilidades no processo de queima.

Portanto, conclui-se que a combinação entre transições suavizadas e a inserção criteriosa de defletores, conforme adotado na Geometria (b) com um ou três defletores, constitui um arranjo equilibrado entre eficiência hidrodinâmica e qualidade de mistura. Tal configuração proporciona redução significativa na perda de carga e controle efetivo das recirculações, características fundamentais para o desenvolvimento de queimadores energeticamente eficientes e com baixas emissões de poluentes.

4. Conclusão

O estudo comparativo evidenciou que a geometria da transição entre a câmara de combustão e a chaminé é o principal fator determinante do comportamento hidrodinâmico do queimador. Três aspectos centrais foram identificados: (i) transições geométricas suavizadas reduzem significativamente as perdas de carga e atenuam zonas de recirculação, favorecendo uma combustão mais estável e uniforme; (ii) defletores, embora promovam acréscimos na perda de carga, são essenciais para o confinamento da chama e melhoria da homogeneização da mistura gasosa; e (iii) a qualidade da malha influencia diretamente a confiabilidade dos resultados numéricos, sendo o refinamento em regiões críticas indispensável para representar com fidelidade os perfis de velocidade e pressão, evitando subestimações ou instabilidades decorrentes de discretizações inadequadas.

Com base nesses achados, recomenda-se, para projetos futuros, a adoção de geometrias com transições suavizadas e a implementação de malhas adaptativas, com refinamento localizado em áreas propensas à separação do escoamento. Além disso, sugere-se a realização

de simulações transientes para avaliação de instabilidades periódicas e oscilações do campo de velocidade, especialmente em resposta a variações na vazão de gás. Também se recomenda investigar a influência de diferentes ângulos e posicionamentos de defletores, objetivando otimizar o compromisso entre eficiência de mistura e perda de carga.

Adicionalmente, torna-se imprescindível validar e calibrar os modelos numéricos por meio de medições experimentais in situ de pressão, temperatura e emissões. Finalmente, deve-se estender o estudo para incluir a análise de espécies químicas e formação de poluentes (como CO e NO_x), incorporando modelos de reação química acoplados ao CFD, de modo a fornecer um panorama mais completo do desempenho do queimador em condições reais de operação.

5. Referências

- [1] SAPONAROA, A.; SENNECA, O. CFD modeling: a powerful tool for high efficiency burner design. In: *European Conference on Industrial Furnaces and Boilers (INFUB-12)*, 2020.
- [2] ARROYO, J.; PÉREZ, L.; CUERVO-PIÑERA, V. CFD modeling and validation of blast furnace gas/natural gas mixture combustion in an experimental industrial furnace. *Processes*, v. 11, n. 2, p. 332, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/2/332>. Acesso em: 26 jun. 2025.
- [3] DE AQUINO, G. S.; MARTINS, R. S.; MARTINS, M. F.; RAMOS, R. Statistical considerations on RANS simulations of inhomogeneous pipe flows. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 47, n. 2, p. 1–15, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40430-025-04567-z>. Acesso em: 26 jun. 2025.