

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA INFLUÊNCIA DO SWIRL EM PROJETOS DE QUEIMADORES PARA APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Turan Dias Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹
Caroline Silva Alves, carol.alves93@gmail.com¹
Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹
Luzia Aparecida Tofaneli, luzia.tofaneli@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC – Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia, Avenida Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, Brasil, CEP.: 41650-010.

Resumo: Os queimadores industriais para a melhor eficiência energética e controle de chamas possuem aplicações com swirl (controle do número de rotação do escoamento do oxidante). Todavia seus efeitos nos projetos fluidodinâmicos de queimadores são restritos a aplicações industriais – com restrições de resultados por serem de segredo industrial –, o que não permite o entendimento adequado do seu funcionamento. A simulação em CFD – fluidodinâmica computacional – pode trazer perspectivas de melhor entendimento dos projetos de queimadores pela academia para uma melhor eficiência energética e desenvolvimento de protótipos funcionais com maior viabilidade de aplicação industrial. O trabalho em questão aborda a simulação em CFD de queimadores de gás natural com escoamento do oxidante tanto com escoamento paralelo como acoplada à aplicação da técnica de swirl, verificando a influência dos requisitos fluidodinâmicos do projeto como variação de pressão, campo de velocidades, entre outros.

Palavras-chave: natural gas, combustion, swirl

1. INTRODUÇÃO

Ao longo do desenvolvimento industrial, a combustão desde o seu início apresentou-se como a principal fonte de energia tanto para produzir base da fonte motriz como para a disponibilidade de calor para os processos. Os queimadores, dispositivos que promovem o fenômeno da combustão nos equipamentos industriais como fornos, turbinas e caldeiras, os projetistas ao longo do tempo vêm melhorando o seu projeto, com a adoção de novos conhecimentos gerados pelo desenvolvimento científico e tecnológico, o que tem promovido a melhora tanto da eficiência energética, controle da combustão como também redução de emissões atmosféricas. Os queimadores industriais para a melhor eficiência energética e controle de chamas possuem aplicações com swirl (controle do número de rotação do escoamento do oxidante).

Inúmeros estudos vêm sendo realizados com o objetivo de entender esse fenômeno e suas aplicações na combustão. Um dos pioneiros nesses estudos foram Beér, J. M. and Chigier, N. A. (1974) que estudaram a aerodinâmica da combustão e o papel do swirl. Nesse trabalho os autores dissertaram sobre vários aspectos de como o swirl pode promover um controle de chama, como também apresentou alguns projetos de queimadores, o que é raro já que os fabricantes de equipamentos os tratam como um segredo industrial. Em outro trabalho pioneiro Syred, N. and Beér, J. M. (1974) também descrevem a importância do swirl na combustão.

Lilley, D.G. (1977) apresentou também um estudo de revisão sobre os escoamentos rotacionais na combustão. Muitos autores têm trabalhado nesse fenômeno com o objetivo de entender a influência do escoamento rotacional na combustão, melhorar o controle do desenvolvimento da chama, como também o impacto na eficiência energética e nas emissões dos queimadores. A influência do swirl tem sido estudada por muitos autores dentre eles: Abujelala M.T., Lilley, D.G. (1983), Favalaro, S.C., Nejad, A.S., Ahmed, S.A. (1991), Gupta A.K., Lilley, D.G. (1994), Kenbar, A. M. A., Beltagui, S. A. and Maccallum, N.R. L. (1995), Fudihara, T. J., Goldstein Jr., L. ; Mori, M. (2003), Fudihara, T. J., Goldstein Jr., L. ; Mori, M. (2007), Jones W.P., Lentini, D. (2008), Ramadan O.B. et al. (2009), Palies, P. (2009), Palies, P. (2010), Mafra, M.R. et al. (2010), Palies, P. (2011), HuiQun Yang, TongBeum Kim, TianJian Lu. (2011), Grech N. (2012), Tongxun Yi, Domenic Santavicca (2012), Yi, F., Axelbaum, R.L.. (2013), Durox, D. et al. (2013), Singh, et al. (2014).

Fudihara, T. J., Goldstein Jr., L. ; Mori, M. (2003) estudaram a influência do swirl, utilizando CFD (dinâmica dos fluidos computacional), avaliando modelos de turbulência para verificar a influência desses fatores em alguns aspectos na aerodinâmica do queimador.

Fudihara, T. J., Goldstein Jr., L. ; Mori, M. (2007) apresentaram um estudo da aerodinâmica de um queimador através da técnica de CFD, relevando a influência do swirl no campo de velocidades para o dispositivo estudado.

Mafra, M.R. et al. (2010) avaliaram a influência do escoamento rotacional na emissão de NO em uma câmara de combustão com gás liquefeito de petróleo (GLP), verificando que a variação do swirl associada a outros parâmetros físico na combustão podem resultar em um melhor controle da emissão de NO.

A partir do levantamento bibliográfico realizado, pode-se verificar que a simulação em CFD pode trazer perspectivas de melhor entendimento dos projetos de queimadores pela academia para uma melhor eficiência energética e desenvolvimento de protótipos funcionais com maior viabilidade de aplicação industrial, como também a sua influência das emissões atmosféricas. O trabalho aborda a simulação em CFD de queimadores de gás natural com escoamento do oxidante tanto com escoamento paralelo como acoplada à aplicação da técnica de swirl, verificando a influência dos requisitos fluidodinâmicos do projeto como variação de pressão, campo de velocidades, entre outros.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelagem Computacional

Para o estudo da aerodinâmica interna dos queimadores e para a análise da formação de swirl será admitida uma condição monofásica. O escoamento real interno a um queimador é, devido à presença de combustível e comburente, naturalmente multifásica. A reação entre os componentes, no entanto, não é o foco desse trabalho. Assim, é admitido que o combustível gasoso tem as mesmas propriedades do ar (densidade e viscosidade), formando, juntamente com o comburente, uma fase única.

O escoamento em questão também é tido como isotérmico. Essa não é a condição real de um queimador mas, no presente trabalho, todas as comparações são tomadas com uma fase escoante sempre a temperatura ambiente (25 °C). Supondo que as velocidades presentes internamente aos queimadores não produzem elevados números de Mach tem-se também que o escoamento será incompressível.

Para obtenção da solução das equações descritoras do escoamento estudado uma abordagem numérica foi adotada. O software ANSYS CFX foi utilizado para através do método dos volumes finitos, resolver as equações de continuidade e de Navier Stokes, descritas nas Eqs. (1)-(4):

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \text{div}(\rho u \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } u) + S_{Mx} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \text{div}(\rho v \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } v) + S_{My} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \text{div}(\rho w \vec{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } w) + S_{Mz} \quad (4)$$

onde p é pressão, t é tempo; ρ é a densidade do fluido; x , y e z são, respectivamente, as três direções cartesianas; u , v e w são, respectivamente, as velocidades nas direções x , y e z ; \vec{u} é o vetor tridimensional de velocidade; μ é a viscosidade do fluido; S_{Mx} , S_{My} e S_{Mz} são os termos fontes de momento nas direções descritas em subscrito.

Na modelagem computacional, o “*scheme*” de interpolação utilizado foi o *high resolution*. Segundo o manual de uso do ANSYS CFX (ANSYS CFX, 2009) este é o indicado para obtenção de resultados finais.

Uma vez que a computação de escoamentos turbulentos diretamente através das equações de Navier Stokes exige um refinamento de malha não processável em tempo hábil pela maioria dos recursos computacionais atualmente disponíveis é necessário utilizar uma modelagem para esse propósito. No presente trabalho o modelo de turbulência utilizado é sst $k-\omega$. Esse modelo exige a resolução de duas equações de transporte a mais: uma relativa à energia cinética turbulenta(k) e outra referente à frequência turbulenta (ω).

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \vec{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } k) + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega \vec{u}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \omega) + S_\omega \quad (6)$$

S_k e S_ω são os termos fontes de k e ω respectivamente e podem ter seus equacionamentos encontrados em Ferreira (2011), pág. 52.

2.2. Geometrias Estudadas

O presente trabalho estudará três queimadores distintos, doravante denominados de: Queimador Convencional, Queimador Rotacional 1 e Queimador Rotacional 2. A Fig. 1 ilustra as vistas isométricas e frontais das geometrias desses queimadores.

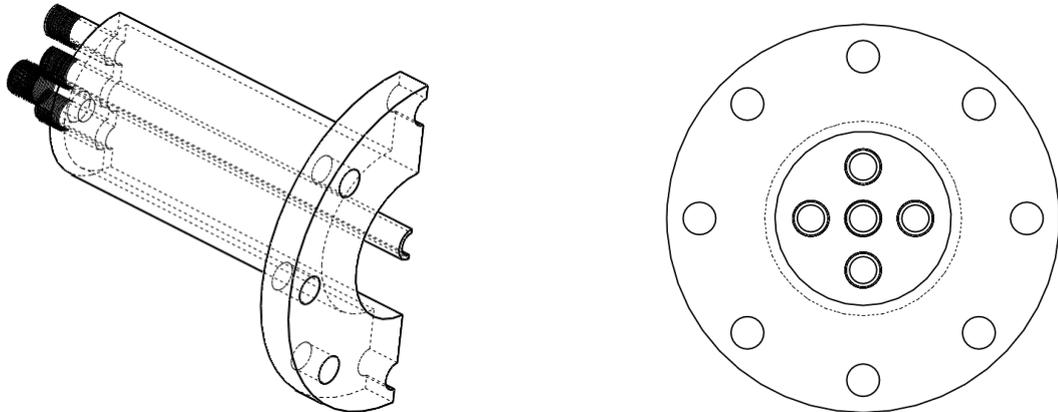


Figura 1: Vistas isométrica e frontal do Queimador Convencional.

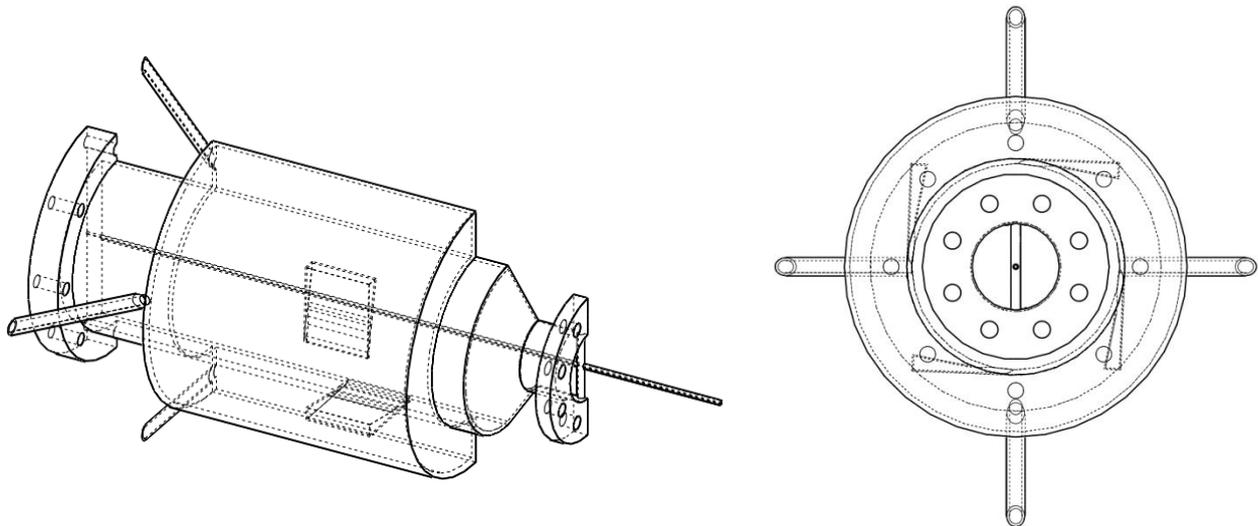


Figura 2: Vistas isométrica e frontal do Queimador Rotacional 1.

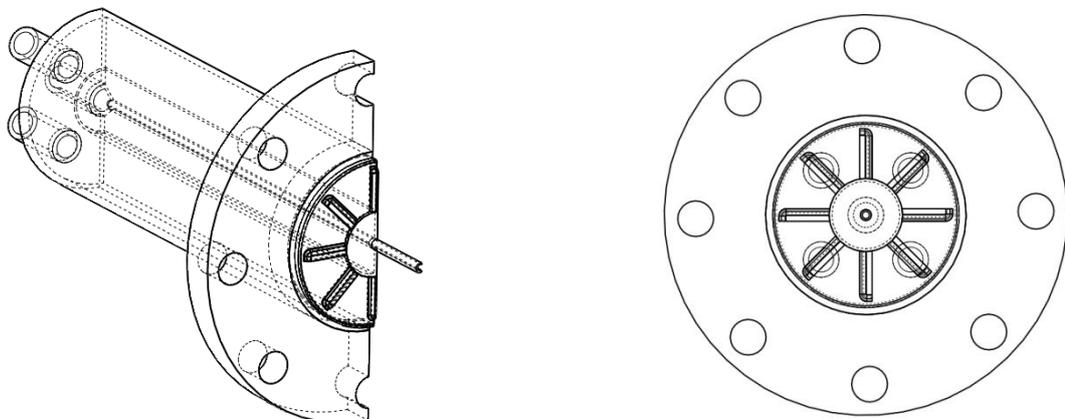


Figura 3: Vistas isométrica e frontal do Queimador Rotacional 2

As geometrias expostas nas Figs. 1-3 são acopladas sempre à mesma câmara de combustão, região na qual o escoamento ocorrerá. A geometria da câmara de combustão é exibida na Figura 4.

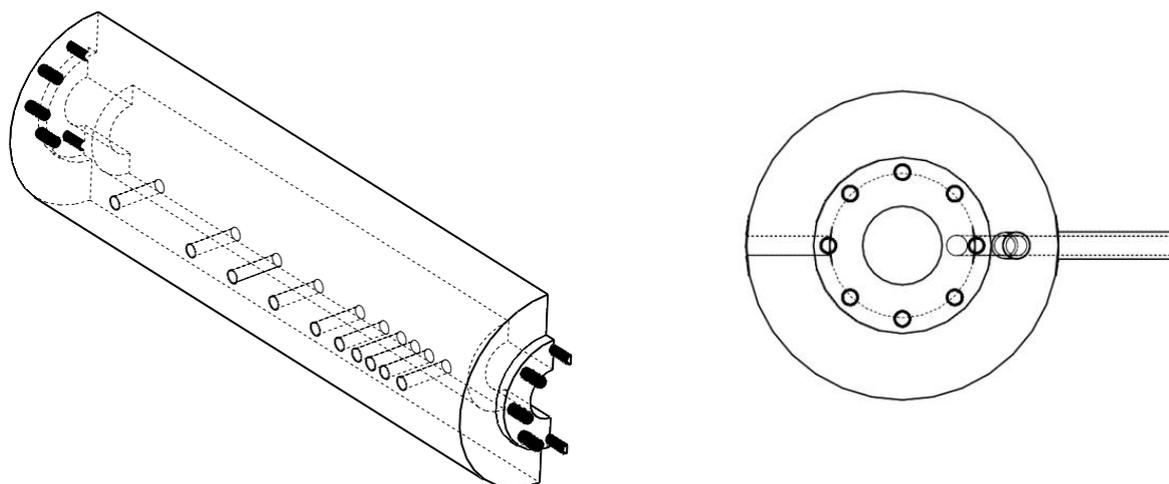


Figura 4: Vistas isométrica e frontal da câmara de combustão utilizada com todos os queimadores simulados.

No Queimador convencional todo o fluxo é axial, direcionado por dutos concêntricos. No Queimador Rotacional 1 o fluxo de combustível é axial (a partir de um tubo central) enquanto o comburente é lançado de formas tangencial ou axial numa pré câmara e então é escoado para a câmara de combustão (nas simulações com este queimador o fluxo de comburente é 50% tangencial e 50% radial). No Queimador Rotacional 2 o combustível é lançado na câmara de combustão de forma axial e o comburente passa por orifícios que tornam sua entrada na câmara de combustão totalmente tangencial.

As malhas computacionais utilizadas para o estudo variaram de 3 a 5 milhões de elementos. A Fig. 5 ilustra a malha computacional utilizada para a simulação da geometria do Queimador Rotacional 1 (que possui o maior número de elementos). As malhas são sempre feitas para o conjunto queimador-câmara.

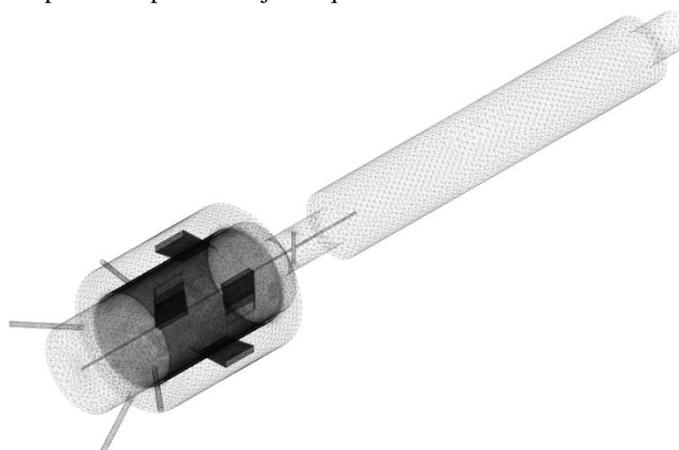


Figura 5: Malha computacional utilizada para simulação da geometria do Queimador Rotacional 1.

2.3. Condições de Contorno

A Fig. 6 ilustra onde estão localizadas as principais condições de contorno utilizadas na simulação. A geometria da Fig. 6 é do Queimador Rotacional 2 mas o posicionamento se aplica a todas as geometrias simuladas.

Para todos os casos a entrada de ar possui condição de contorno de vazão de $3,90 \cdot 10^{-3}$ kg/s. A entrada de combustível, também em todos os casos possui valor de $2,31 \cdot 10^{-4}$ kg/s. Esses dois valores resultam numa relação ar/combustível de 16,6 para todas as simulações realizadas.

A saída, também em todas as simulações configurada com pressão constante de 1 atm. Todas as outras superfícies das geometrias foram tratadas como paredes.

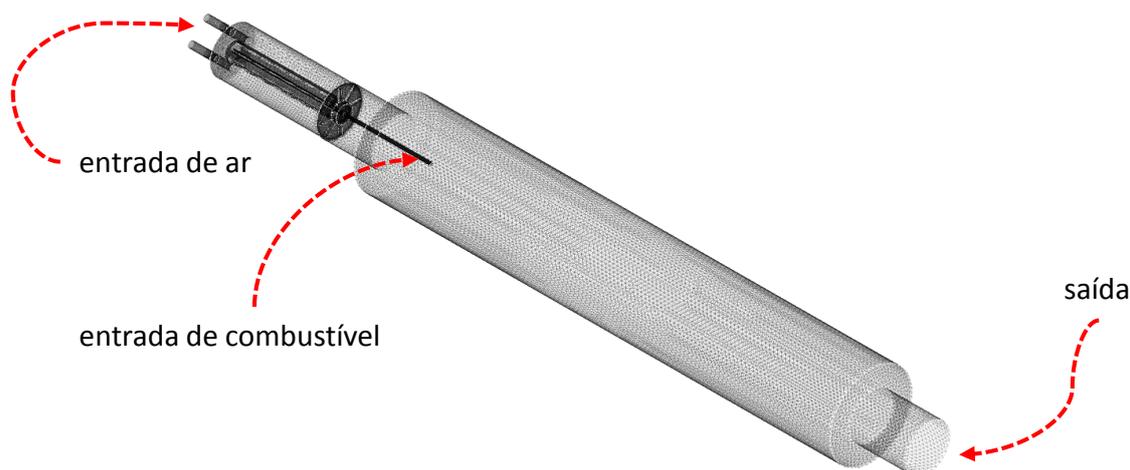


Figura 6: Posicionamento de principais condições de contorno

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Todos os resultados aqui presentes estão exibidos em três planos que seccionam a câmara de combustão. Os três planos estão dispostos ao fim dos primeiro, segundo e terceiro quartos do comprimento total da câmara de combustão.

3.1. Campos de Velocidade

A Fig. 7 ilustra os campos de velocidade encontrados para as três geometrias simuladas. Nota-se que para o Queimador Convencional o campo de velocidade possui valores mais altos ao centro, o que é esperado devido à entrada estritamente axial do fluxo. Para o Queimador Rotacional 1 esta característica não se altera, permanecendo com valores mais altos no centro. Esse comportamento denota pouca eficiência na criação do swirl. Para o Queimador Rotacional 2, no entanto, nota-se que valores mais altos de velocidade localizam-se à periferia da secção, o que é esperado num escoamento que possua swirl significativo.

3.2. Campos de Pressão

A Figura 8 ilustra campos de velocidade para as geometrias simuladas. É clara a percepção de que para o Queimador Convencional a pressão numa determinada secção é praticamente constante. Esse fato elimina deslocamentos de fluido dentro de uma mesma secção, configurando o escoamento como estritamente axial. Para o Queimador Rotacional 1, mais uma vez, a situação permanece muito parecida com a encontrada para o Queimador Convencional, evidenciando sua ineficiência na produção de swirl. Apenas no plano 1, logo no início da câmara de combustão, nota-se uma variação de pressão num mesma secção transversal.

Para o Queimador Rotacional 2, no entanto, a situação é significativamente diferentes. Os gradientes de pressão dentro de uma mesma secção transversal são intensos, evidenciando o deslocamento radial, fundamental para a existência do swirl.

3.3. Vetores de Velocidade e Números de Swirl

Para o presente estudo o número de Swirl (S) foi definido como exibido pela equação (7):

$$S = \frac{G_{\varphi}}{G_x R^*} \quad (7)$$

Onde R^* é o raio de do bico do queimador, G_{φ} é o fluxo axial de momento angular e G_x é o empuxo axial. , G_{φ} e G_x são descritos pelas equações (8) e (9), respectivamente.

$$G_{\varphi} = \int_0^A W r \rho U \, dA \quad (8)$$

$$G_x = \int_0^A U \rho U \, dA + \int_0^A p \, dA \quad (9)$$

Onde U , W e p são, respectivamente, a componente axial da velocidade, a componente tangencial da velocidade e a pressão estática. A é a secção transversal de escoamento, onde o swirl se desenvolve e r é a distância radial ao centro da secção transversal.

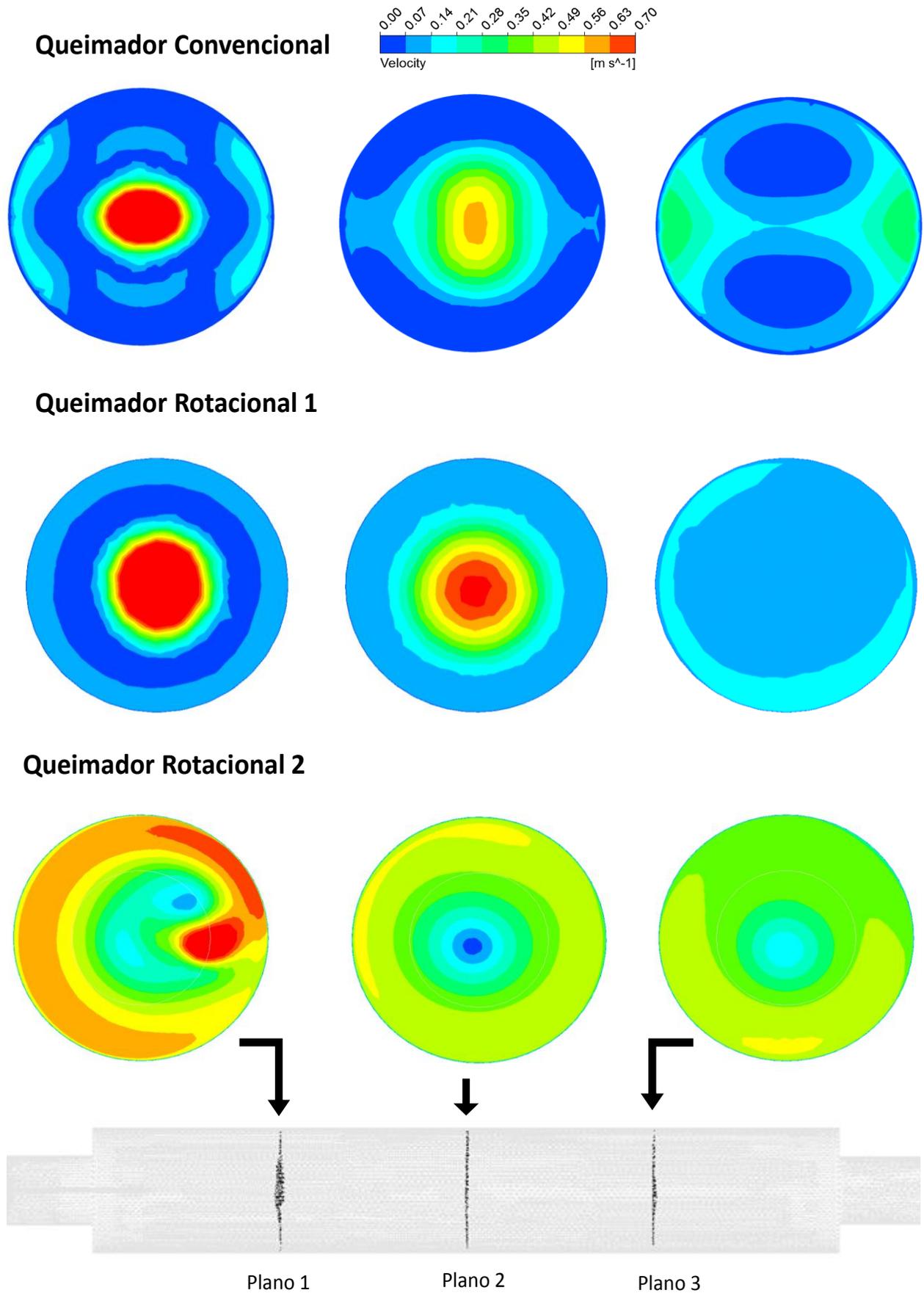


Figura 7: Campos de velocidade para os queimadores simulados.

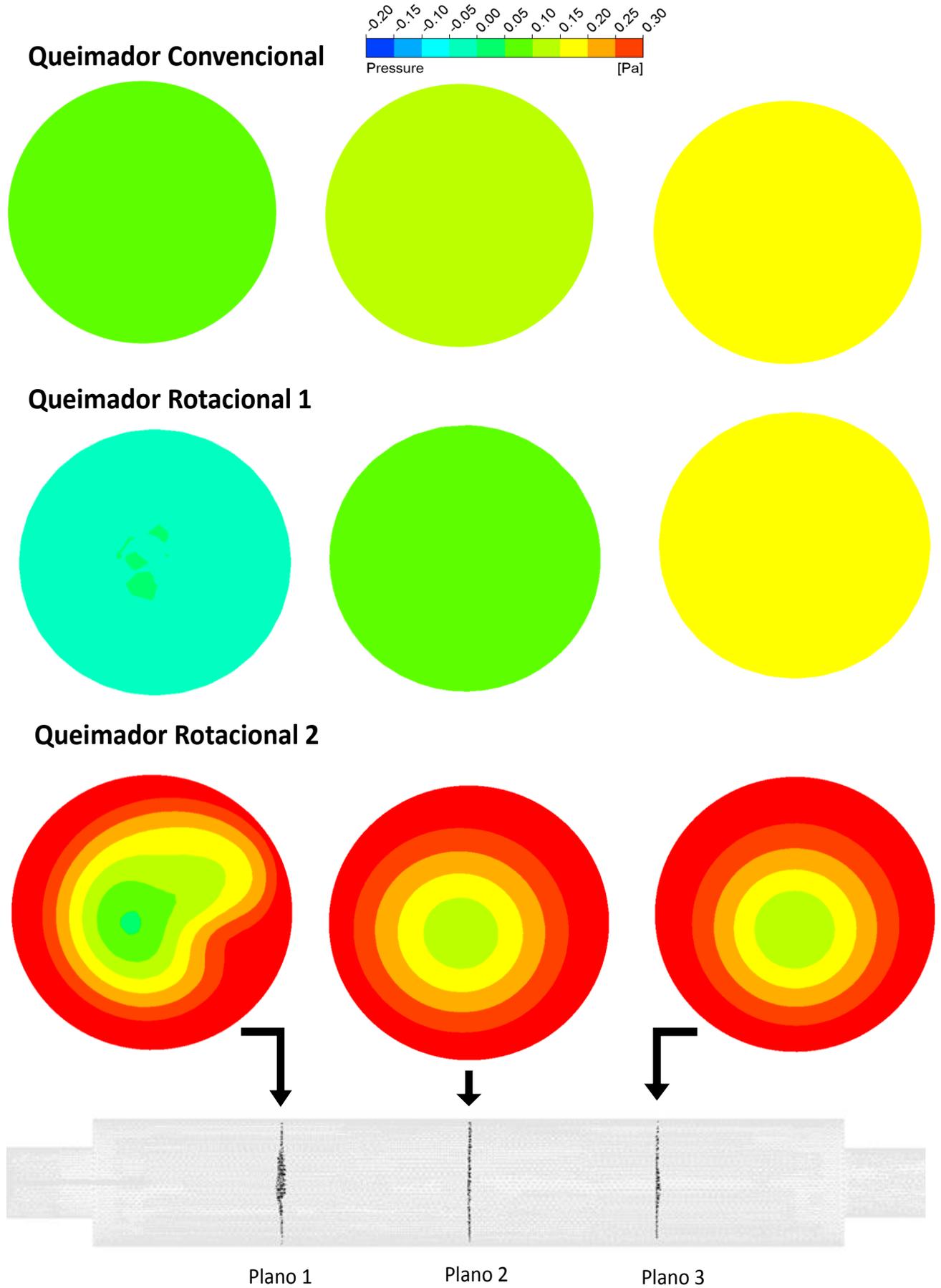


Figura 8: Campos de pressão para os queimadores simulados

A figura 9 ilustra os vetores de velocidade para os Queimadores Rotacionais e exibe os números de swirl calculados para cada seção também para essas geometrias. Não são exibidos vetores referentes ao Queimador Convencional uma vez que seu escoamento é totalmente axial.

Como os resultados já apresentados até aqui sugeriam, nota-se que a geometria do Queimador Rotacional 1 não é eficiente para a formação do swirl. Chega a haver escoamentos com componentes radiais mas esse escoamento não produz objetivamente o efeito de swirl. Observando os vetores de velocidade referentes ao Queimador rotacional 2, no entanto, percebe-se que com esta geometria o efeito de swirl é significativamente atingido mesmo nas seções que mais distam da entrada dos fluidos na câmara de combustão.

O gráfico do número de swirl em função da posição ao longo da câmara de combustão reflete com precisão as discussões tratadas até aqui. O Queimador Rotacional 1 não produz efeito significativo de rotação. O Queimador Rotacional 2 produz esse efeito com perceptível intensidade. Neste último queimador o decaimento do número de swirl com a distância das entradas era esperada, uma vez que forças dissipativas (como o atrito) agem diminuindo o momento angular do fluido que escoar.

3.4. Estudo de independência de malha

Para verificar e atestar a validade dos resultados foi realizado um estudo de convergência de malha para as simulações com os dois queimadores rotacionais simulados. Comparou-se os resultados apresentados até então com os provindos de uma malha mais refinada. A Tab. 1 expõe o número de elementos das malhas utilizadas. Para ambos os queimadores rotacionais a nomenclatura “malha 1” se refere à malha utilizada para produzir os resultados publicados e “malha 2” se refere à malha utilizada para verificação.

Tabela 1: Número de elementos das malhas utilizadas.

	Malha 1	Malha 2
Queimador 1	$2,13 \cdot 10^6$	$2,92 \cdot 10^6$
Queimador 2	$5,98 \cdot 10^6$	$6,14 \cdot 10^6$

A Fig. 10 exibe os resultados do número de swirl com as duas malhas simuladas para os mesmos três planos exibidos na figura 9. Nota-se que ambas as malhas produzem resultados semelhantes sobretudo quando analisados sob um viés qualitativo. Para ambas as malhas o Queimador Rotacional 1 não produz significativo swirl e o Queimador Rotacional 2 produz swirl que decai ao longo do comprimento da câmara.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se, a partir dos resultados apresentados, que diferentes dispositivos geradores de swirl podem ter eficácias significativamente diferentes. Para as vazões utilizadas o Queimador Rotacional 1 não produz efeitos significativos, sendo seu escoamento, sob diversos aspectos, muito semelhante ao escoamento do Queimador Convencional. O Queimador Rotacional 2 apresenta elevado número de swirl, demonstrando sua eficácia.

Abre-se, assim, espaço para investigação e desenvolvimento de geometrias que otimizem a geração do swirl e que permitam um controle sobre essa geração, de forma a deixa-la ótima para uma mais larga faixa de operação.

O trabalho também permite a compreensão do mecanismo de geração de swirl dentro de um queimador, identificando propriedades que, de forma indireta, levam à caracterização dessa geração.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) pelo apoio financeiro ao estudo.

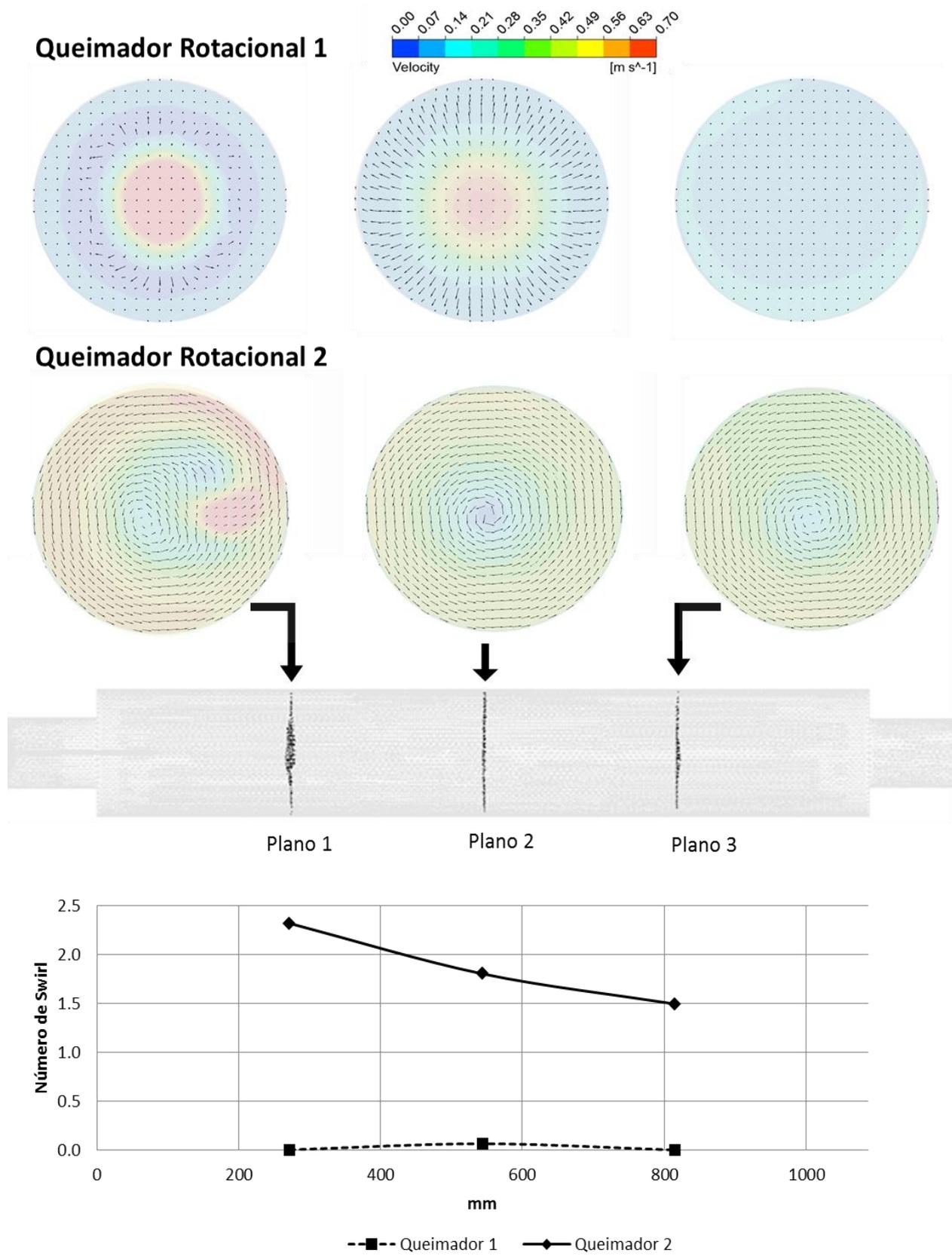


Figura 9: Vetores de velocidade e Números de Swirl para Queimadores Rotacionais.

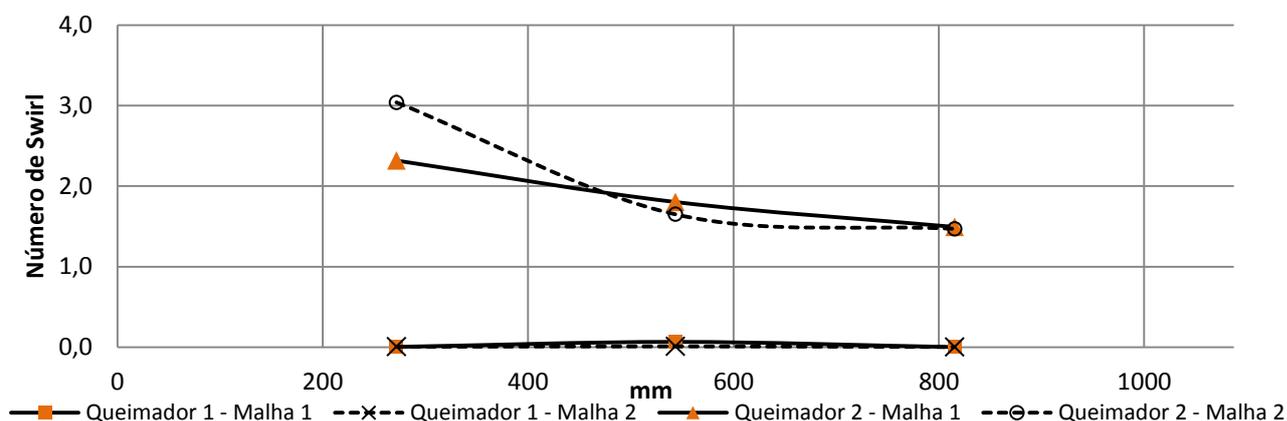


Figura 10: Resultados de estudo de independência de malha.

6. REFERÊNCIAS

- Abujelala, M.T., Lilley, D.G., 1983, "Confined swirling flow predictions", AIAA J., arc.aiaa.org.
- Beér, J. M., Chigier, N. A., 1974, "Combustion Aerodynamics", Ed. Applied Science Publis Ltd., 264 p
- Durox, D., Moeck, J.P., Bourguin, J-F., Morenton, P., Viallon, M., Schuller, T., Candel, S., 2013, "Flame dynamics of a variable swirl number system and instability control", Combustion and Flame, Vol. 160, no 9, pp. 1729-1742.
- Favaloro, S. C., Nejad, A. S., Ahmed, S. A., 1991, "Experimental and computational investigation of isothermal swirling flow in an axisymmetric dump combustor", Journal of Propulsion and Power.
- Fudihara, T.J., Goldstein, L. Jr., Mori, M., 2007, "A numerical investigation of the aerodynamics of a furnace with a movable block burner", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 24, No. 02, pp. 233 – 248.
- Fudihara, T.J., Goldstein, L. Jr., Mori, M., 2003, "The Three-Dimensional Numerical Aerodynamics of a Movable Block Burner", Brazilian Journal of Chemical Engineering, Vol. 20, pp. 391-401, 2003.
- Grech, N., Koupper, C., Zachos, P. K., Pachidis, V., Singh, R., 2012, "Considerations on the Numerical Modeling and Performance of Axial Swirlers Under Relight Conditions", Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 134, no 11, 111505.
- Gupta, A.K., Lilley, D.G., 1994, "Combustion and environmental challenges for gas turbines in the 1990s", Journal of Propulsion and Power.
- Kenbar, A. M. A., Beltagui, S. A., Maccallum, N. R. L., 1995, "Combustion Aerodynamics of a Gas-Fired Furnace with Peripheral Fuel Injection", Experimental Thermal and Fluid Science, Vol. 10, no 3, pp. 335-246.
- Lilley, D.G., 1977, "Swirl flows in combustion: A review", AIAA J., Vol. 15, no 8, pp. 1763-1778.
- Jones, W.P., Lentini, D., 2008, "A realisable non-linear eddy viscosity/diffusivity model for confined swirling flows", International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 29, no 6, pp. 1612-1627.
- Mafta, M.R., Fassani, F.L., Zanoelo, E.F., Bizzo, W. A., 2010, "Influence of swirl number and fuel equivalence ratio on NO emission in an experimental LPG-fired chamber", Applied Thermal Engineering, Vol. 30, pp. 928-934.
- Palies, P., Durox, D., Schuller, T., Morenton, P., Candel, S., 2009, "Dynamics of premixed confined swirling flames", Comptes Rendus Mécanique, Vol. 337, no 6-7, pp. 395-405.
- Palies, P., Durox, D., Schuller, T., Candel, S., 2011, "Nonlinear combustion instability analysis based on the flame describing function applied to turbulent premixed swirling flames", Combustion and Flame, Vol. 158, no 10, pp. 1980-1991.
- Ramadan, O.B., Gauthier, J.E.D., Hughes, P.M., Brandon, R., 2009, "Design Procedure of a Novel Microturbine Low NOx Conical Wire-Mesh Duct Burner", Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 131, no 6, 062301.
- Singh, A.V., Eshaghi, A., Yu, M., Gupta, A.K., Bryden, K.M., 2014, "Simultaneous time-resolved fluctuating temperature and acoustic pressure field measurements in a premixed swirl flame", Applied Energy, Vol. 115, pp. 116-127.
- Syred, N., Beér, J. M., 1974, "Combustion in swirling flows: A review", Combustion and Flame, Vol. 23, pp. 143–201.
- Yang, H., Kim, T., Lu, T., 2011, "Characteristics of annular impinging jets with/without swirling flow by short guide vanes", Science China Technological Sciences, Vol. 54:3, pp. 749-757.
- Yi, T., Santavicca, D., 2012, "Combustion Instability and Flame Structure of Turbulent Swirl-Stabilized Liquid-Fueled Combustion", Journal of Propulsion and Power, Vol. 28, no 5, pp. 1000-1014.
- Yi, F., Axelbaum, R.L., 2013, "Stability of spray combustion for water/alcohols mixtures in oxygen-enriched air", Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 34, no 1, pp. 1697-1704.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

COMPUTER SIMULATION OF THE INFLUENCE OF SWIRL IN PROJECTS BURNER FOR INDUSTRIAL APPLICATIONS

Turan Dias Oliveira, turan.oliveira@fieb.org.br¹

Caroline Silva Alves, carol.alves93@gmail.com¹

Alex Álisson Bandeira Santos, alex.santos@fieb.org.br¹

Luzia Aparecida Tofaneli, luzia.tofaneli@fieb.org.br¹

¹SENAI CIMATEC – Centro Integrado de Manufatura e Tecnologia, Avenida Orlando Gomes, 1845, Piatã, Salvador/BA, Brasil, CEP.: 41650-010.

Abstract. *Industrial burners, for better efficiency and flame control, have applications with swirl control (the number of rotation of the flow of oxidant) . However its effects on fluid dynamic projects burners are restricted to industrial applications - with restrictions of results to be trade secret - which does not allow a proper understanding of its operation. The simulation in CFD - computational fluid dynamics - can bring better understanding of the perspectives of burners projects by academia for better energy efficiency and development of functional prototypes with greater feasibility of industrial application . The work in question addresses the CFD simulation of natural gas burners with flow of oxidizing both parallel flow as coupled to the application of the technique to swirl , and the influence of fluid dynamic design requirements as changes in pressure , velocity field , among others.*

Keywords: *natural gas, combustion, swirl*



VIII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
UBERLÂNDIA - MG - BRASIL 10 A 15 DE AGOSTO DE 2014

I