

9.0 (mre)

13/02/00

Rodrigo Machado Ferronato

**Simulação Numérica de uma
Câmara de Combustão**

Trabalho apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção da
Graduação em Engenharia
Mecânica.

Área de Concentração:
Energia e Fluidos

Orientador:
Prof. Dr. Clemente Greco

São Paulo

2000

SUMÁRIO

Introdução.....	2
Descrição da câmara a ser simulada.....	3
Apresentação do programa utilizado.....	4
Malha utilizada.....	6
Resultados.....	9
Conclusões e comentários.....	43
Referências Bibliográficas.....	45

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600005963

INTRODUÇÃO

O objetivo do trabalho é desenvolver uma modelagem matemática de uma câmara de combustão e, através de simulações numéricas, observar o seu desempenho e fazer as alterações necessárias para otimizar o processo de geração de gases quentes. O programa utilizado neste trabalho foi o Phoenics.

A grande vantagem da modelagem é a facilidade de se analisar através de gráficos o comportamento da câmara sem os gastos da construção de um protótipo e da aquisição de aparelhos de medição.

DESCRIÇÃO DA CÂMARA A SER SIMULADA

A câmara escolhida para ser simulada opera em Paulínia na geração de gases quentes numa planta produtora de fertilizantes da Galvani S/A e atualmente está queimando óleo combustível. Uma troca de combustível poderia ser feita, por exemplo para gás natural, cuja oferta está aumentando no mercado devido ao gasoduto vindo da Bolívia. Alterações na geometria da câmara, na quantidade e no posicionamento dos furos de entrada de ar, na velocidade de injeção dos fluxos de ar e de gás, e outras mudanças poderiam ser feitas através desta modelagem para adaptá-la ao novo combustível.

O desenho em anexo mostra as dimensões da câmara. A malha definida para discretizar a câmara será apresentada mais adiante no trabalho.

APRESENTAÇÃO DO PROGRAMA UTILIZADO

O Phoenix foi criado em 1979-1980 por Brian Spalding e se mostra muito eficiente na resolução de problemas de escoamento de fluidos, transferência de calor, reações químicas e fenômenos relacionados.

Com ele, pode-se simular desde um trocador de calor por inteiro, como somente o banco de tubos, ou até mesmo, detalhes do escoamento dentro de um único tubo. Devido a sua grande confiabilidade este programa foi escolhido para realizar as simulações numéricas deste trabalho.

Quanto a sua estrutura, o Phoenix consiste de dois códigos essenciais e quatro auxiliares. Os essenciais são: um pré-processador chamado Satellite e um processador chamado Earth. Os auxiliares são pós-processadores chamados: Photon, Autoplot e Pinto, e um programa de ajuda chamado Guide.

O Satellite funciona como intérprete, a partir das instruções dadas pelo usuário ele cria um arquivo contendo as instruções necessárias para que o Earth trabalhe.

O Photon é o programa responsável pela interface gráfica. Com ele podemos observar o comportamento das variáveis em qualquer plano formado pela malha.

O Autoplot fornece gráficos de variação de uma ou mais variáveis em função de qualquer outra.

O Pinto é um código que torna possível a transferência dos dados do Phoenix de uma malha para outra de diferente detalhamento.

MALHA UTILIZADA

A definição da malha a ser utilizada, é um fator muito importante em uma simulação numérica. Quanto maior o número de elementos, mais tempo de máquina será necessário para executar a simulação, no entanto, um número pequeno de elementos pode gerar resultados irreais devido a falta de detalhamento. Além da quantidade, deve-se determinar também quais são as regiões da malha que devem ter maior refinamento, ou seja, elementos de menores volumes. Regiões críticas que devem ser mais detalhadas são as entradas e saídas de fluxos e proximidades de superfícies.

Nas primeiras iterações realizadas, como simplificação, a câmara de combustão foi considerada axialmente simétrica, assim a modelagem se torna bidimensional e resultados preliminares são obtidos mais rapidamente. Nesta fase, a injeção de ar secundário na pré-câmara já foi representada.

Na fase seguinte, uma malha tridimensional foi desenvolvida e a entrada singular de ar de diluição foi adicionada. Após vários testes, finalmente, as dimensões da câmara, dos furos de injeção de ar e de combustível foram acertados para o valor definitivo. A Fig. 1 mostra isometricamente a malha utilizada nas simulações deste trabalho. A malha possui 42 elementos na direção x (tangencial), 20 na direção y (radial) e 22 na direção z (axial). Detalhes da confecção da malha podem ser vistos na listagem do programa em anexo.

A região mais detalhada na parte esquerda da Fig. 1 concentra todas as entradas de ar e de combustível. A Fig. 2 mostra o plano yz (longitudinal) da malha da câmara. Pode-se observar que além do detalhamento das entradas da câmara, sua saída também possui elementos menores. Outras regiões detalhadas são aquelas próximas às paredes internas da pré-câmara e da câmara em si.

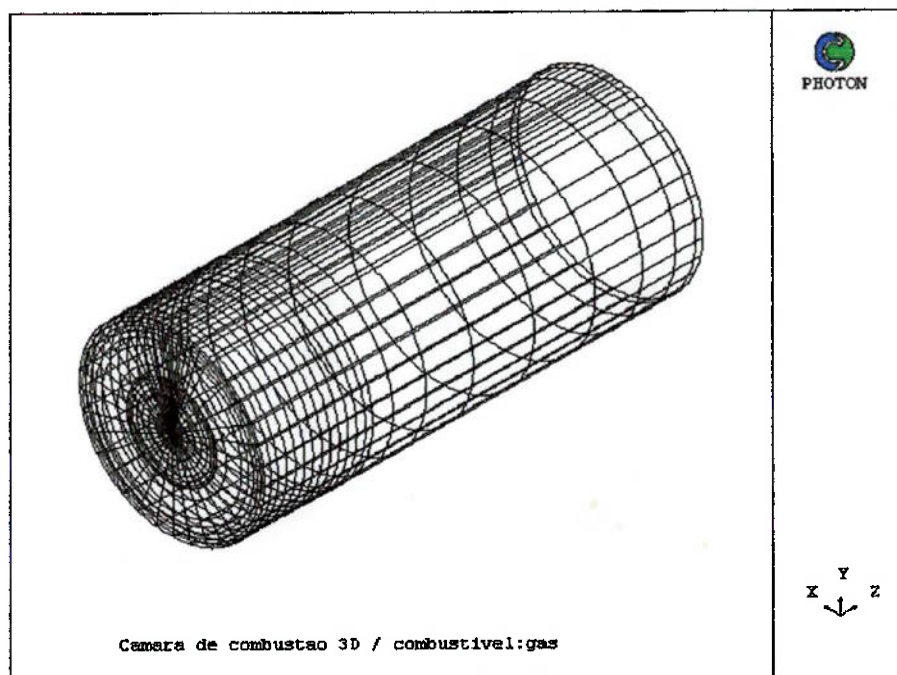


Fig. 1. Malha utilizada nas simulações

A Fig. 3 mostra uma seção transversal da malha. Nela, pode-se observar que os gomos que formam a câmara não têm tamanho uniforme apenas no alto da mesma. Isto foi feito para que as figuras geradas no Photon não ficassem com uma faixa nessa junção sem representação. Na verdade, tal faixa ainda pode ser notada nas figuras colocadas ao longo do trabalho, mas bem diminuta.

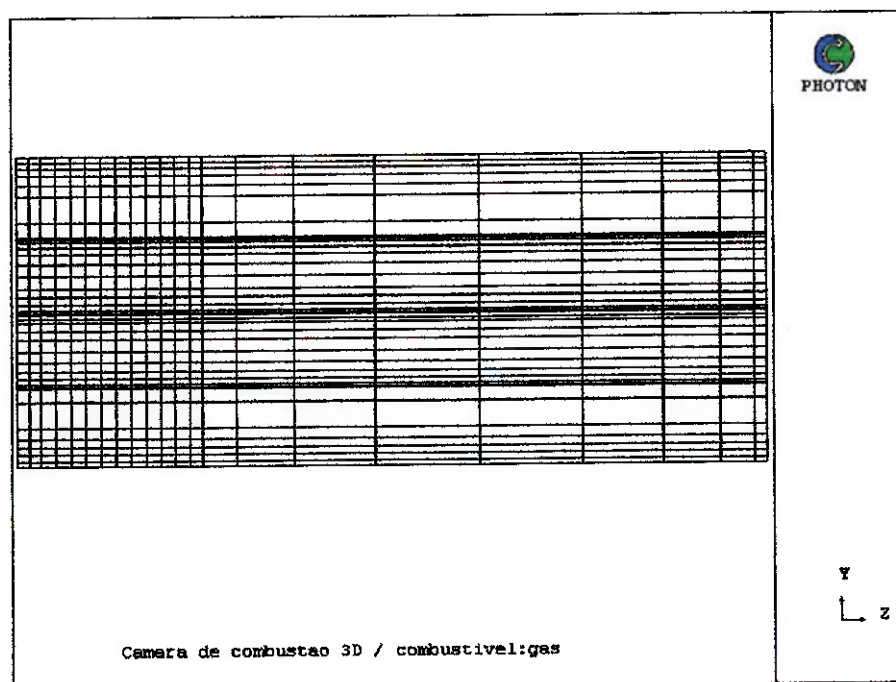


Fig. 2. Malha no plano yz

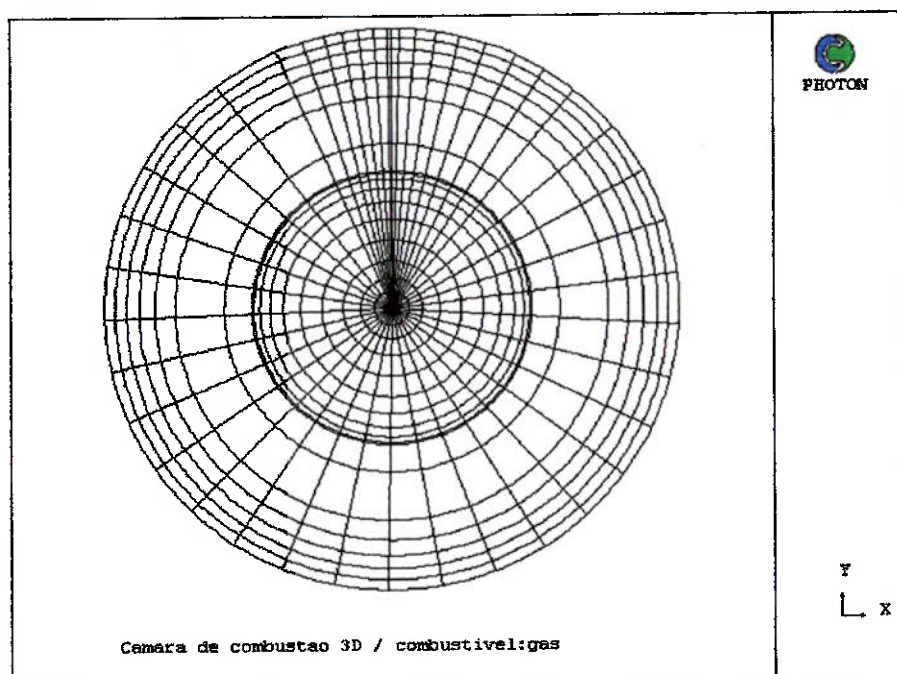


Fig. 3. Malha no plano xy

RESULTADOS

Primeira Configuração

Ao longo do desenvolvimento do trabalho inúmeros resultados foram obtidos, a maior parte sem os parâmetros ou as dimensões definitivos. Não convém discutir neste trabalho tais resultados intermediários. A primeira simulação discutida foi feita com os seguintes parâmetros:

Vazão de gás natural: 1.166 kg/h;

Vazão de ar primário: 20.677 kg/h;

Vazão de ar secundário: 2.358 kg/h;

Vazão de ar de diluição: 20.235 kg/h;

Velocidade axial do combustível: 75 m/s;

Velocidade axial do ar primário: 45 m/s;

Velocidade tangencial do ar primário: 35 m/s;

Velocidade radial do ar secundário: 20 m/s;

Velocidade tangencial do ar secundário: 20 m/s;

Velocidade radial do ar de diluição: 10 m/s;

Velocidade tangencial do ar de diluição: 10 m/s.

É importante lembrar que a câmara de combustão simulada existe e opera queimando cerca de 1300 kg/h de óleo combustível e que suas dimensões foram mantidas nesta modelagem. Portanto, para que possa ser feita uma comparação entre o uso de óleo combustível e de gás natural, a carga térmica foi mantida e a partir desse valor a vazão do novo combustível

em teste foi determinada. As vazões de ar e velocidades foram determinadas de modo que se obtivesse uma boa combustão dentro da câmara.

Primeiramente, serão mostrados os perfis de velocidades no interior da câmara. A Fig. 4 mostra o comportamento da velocidade axial w_1 ao longo da câmara.

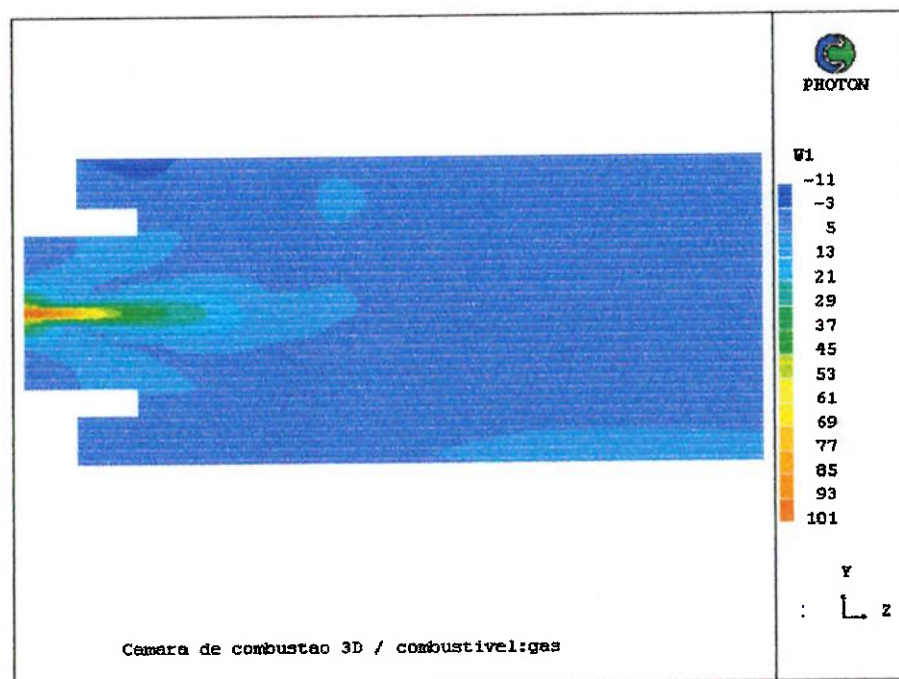


Fig. 4. Velocidade axial w_1 em m/s

Nesta figura pode-se notar que as maiores velocidades estão concentradas no centro da câmara, na região de injeção de combustível, e que os valores variam de 101 m/s até -11 m/s. Obviamente, o sinal negativo significa que está ocorrendo uma recirculação, neste caso nas proximidades da entrada de ar de diluição. A Fig. 5 mostra vetorialmente a direção e a magnitude das velocidades no plano que divide a câmara ao meio verticalmente.

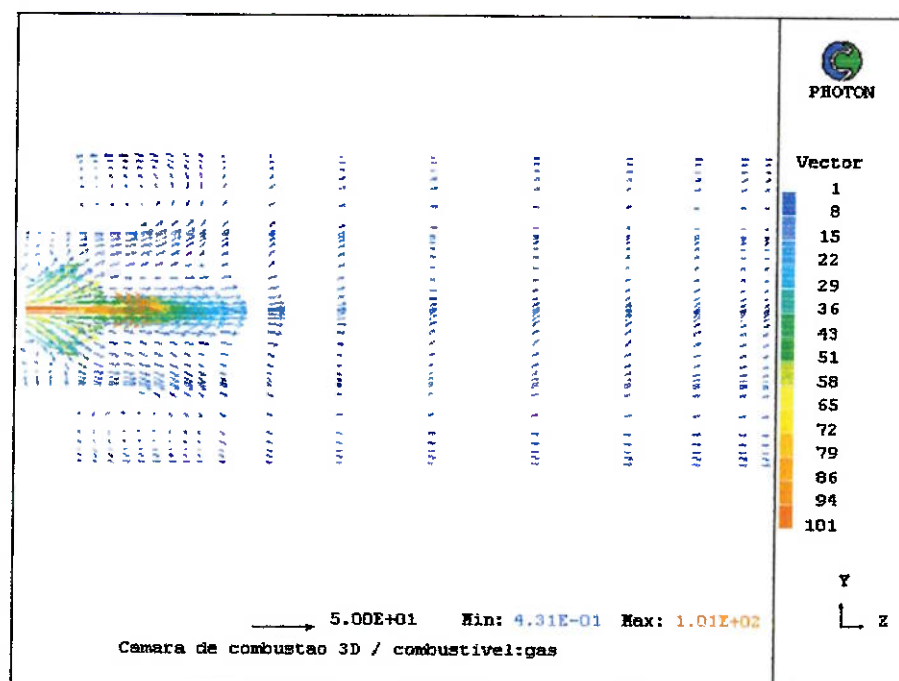


Fig. 5. Velocidades no plano yz em m/s

A Fig. 6 a velocidade radial v_1 no plano yz. Pode-se observar que as velocidades são baixas na maior parte da câmara, entre 0 e 3 m/s. Apenas na região de injeção de gás, as velocidades ultrapassam 30 m/s. Analisando-se as figuras 5 e 6, pode-se notar que a partir do meio da câmara o fluxo de gases tende a subir um pouco (a região azul na Fig. 6 determina uma velocidade negativa, ou seja, que vai em direção ao centro da câmara).

Na verdade, outras regiões com componentes radiais de velocidade são disfarçadas pela escala de cores, então, para evidenciar as entradas de ar secundário na pré-câmara e de ar de diluição, foram feitas as figuras 7 e 8, respectivamente.

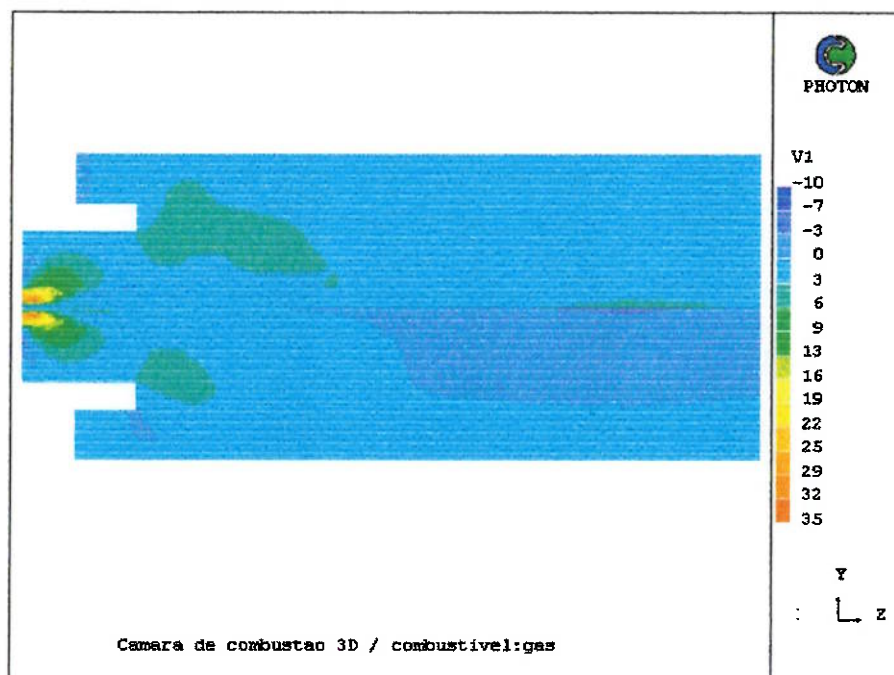


Fig. 6. Velocidade radial v_1 em m/s

Na Fig. 7 nota-se, claramente, as seis entradas de ar secundário na pré-câmara. A Fig. 8 mostra a seção transversal da câmara na região onde o ar de diluição é injetado. A área azul na parte superior direita da figura possui velocidades radiais negativas, caracterizando bem a entrada de ar de diluição. A coroa branca concêntrica à câmara representa a parede de refratários que delimita a pré-câmara dentro da câmara de combustão. Nota-se que no interior da pré-câmara, os gases têm velocidade radial positiva devido ao aumento de volume gerado pela combustão.

O perfil das velocidades tangenciais u_1 ao longo da câmara está representado na Fig. 9. O sentido positivo de rotação dos gases é o horário para quem está olhando a câmara do lado do queimador.

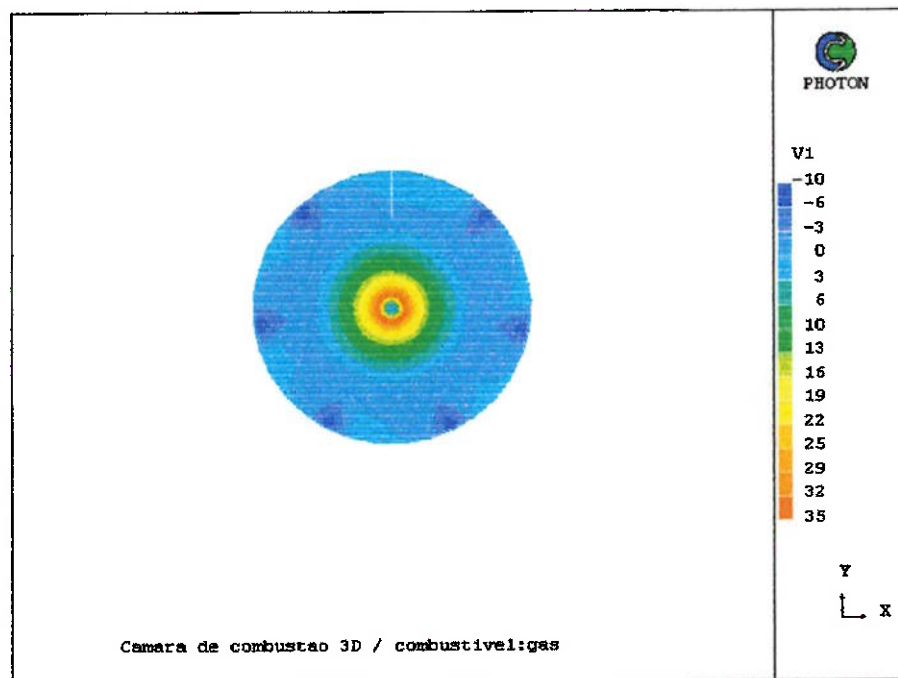


Fig. 7. Velocidade radial v_1 em m/s no plano transversal $z=2$

No centro da câmara, há uma região com velocidade negativa junto a uma de velocidade positiva, isto ocorreu porque não houve formação de um vórtice concêntrico à câmara. Este fato pode ser melhor observado na Fig. 10. Nota-se a formação de um vórtice na metade superior da câmara e outro na metade inferior.

A distribuição das velocidades tangenciais no plano transversal onde o ar de diluição é injetado está representada na Fig.11. A Fig.12 mostra os vetores das velocidades neste plano. Como esta seção é anterior à seção mostrada na Fig.10, pode-se notar que os vórtices ainda estão em formação. A entrada de ar de diluição está posicionada na região de maiores velocidades na periferia da câmara, na parte superior direita da figura.

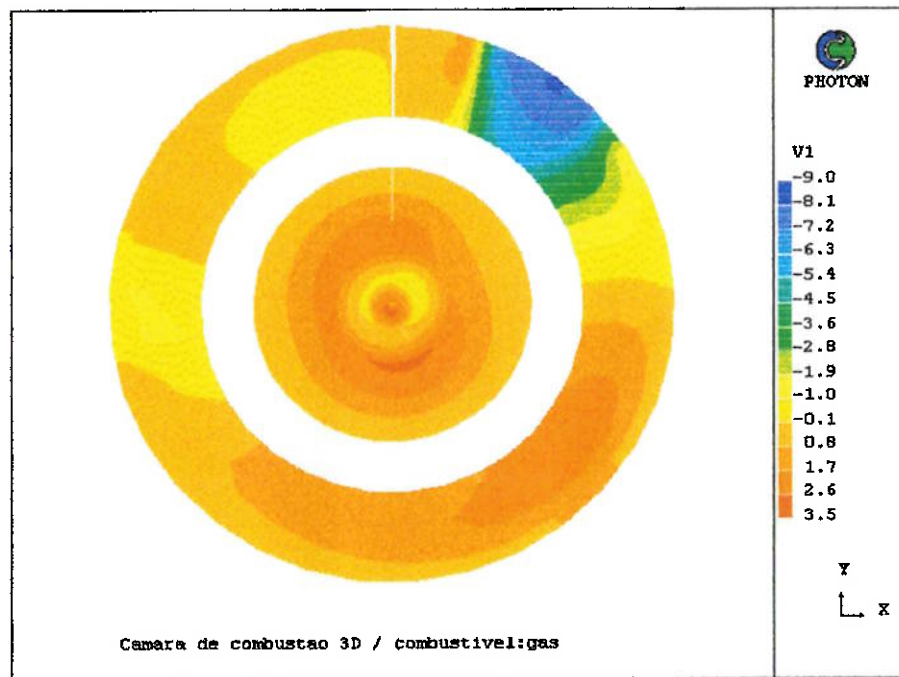


Fig. 8. Velocidade radial v_1 em m/s no plano de injeção de ar de diluição ($z=7$)

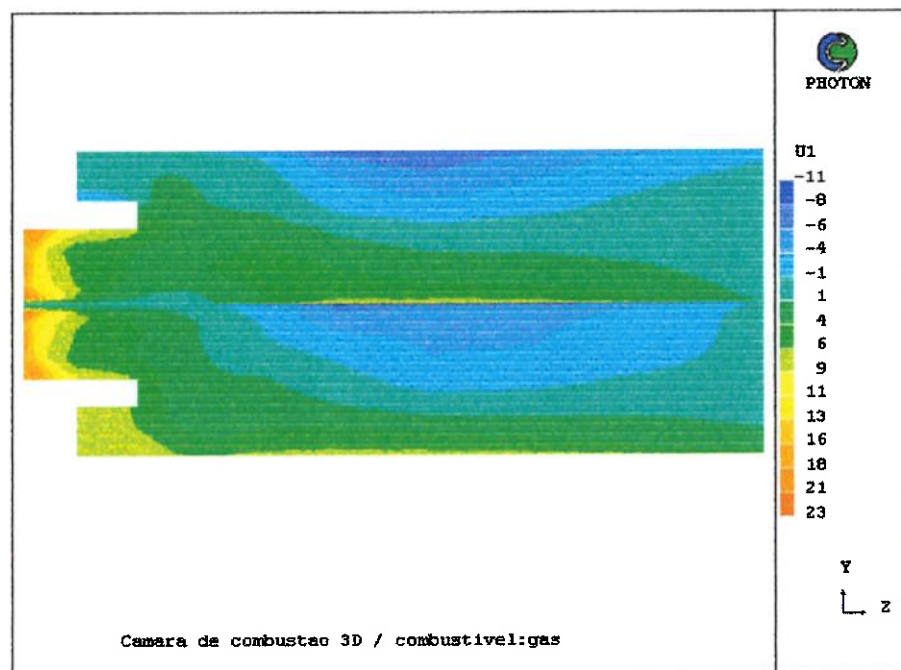


Fig. 9. Velocidade tangencial u_1 em m/s

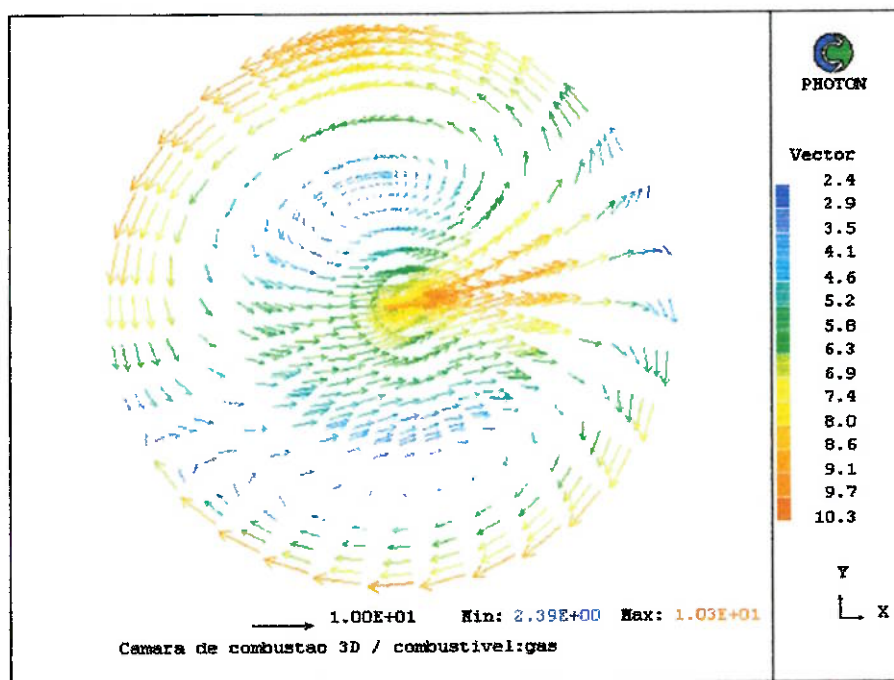


Fig. 10. Vetores de velocidade em m/s no plano z=17

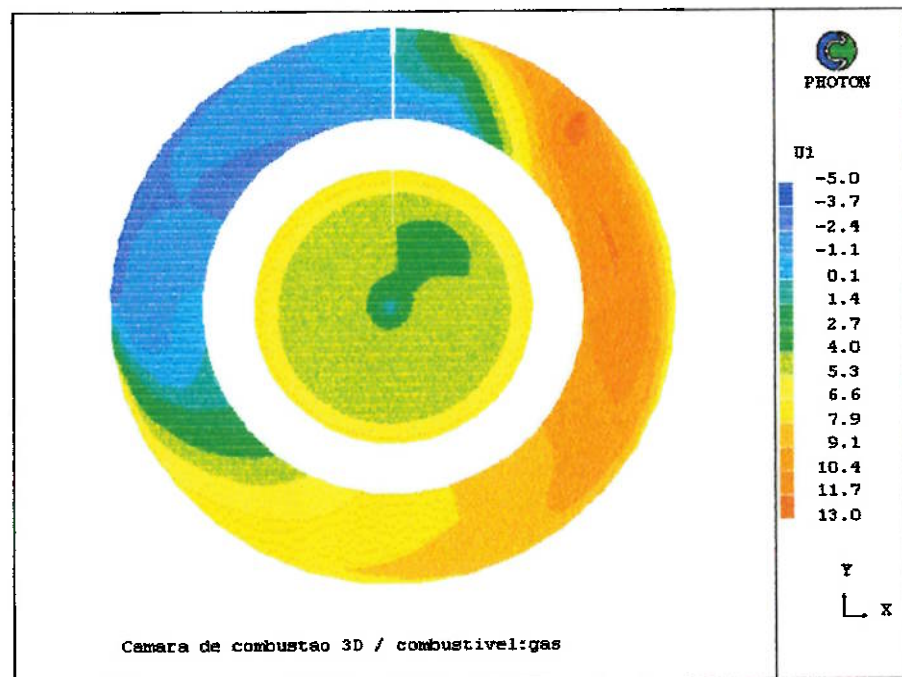


Fig. 11. Velocidade tangencial em m/s no plano z=7

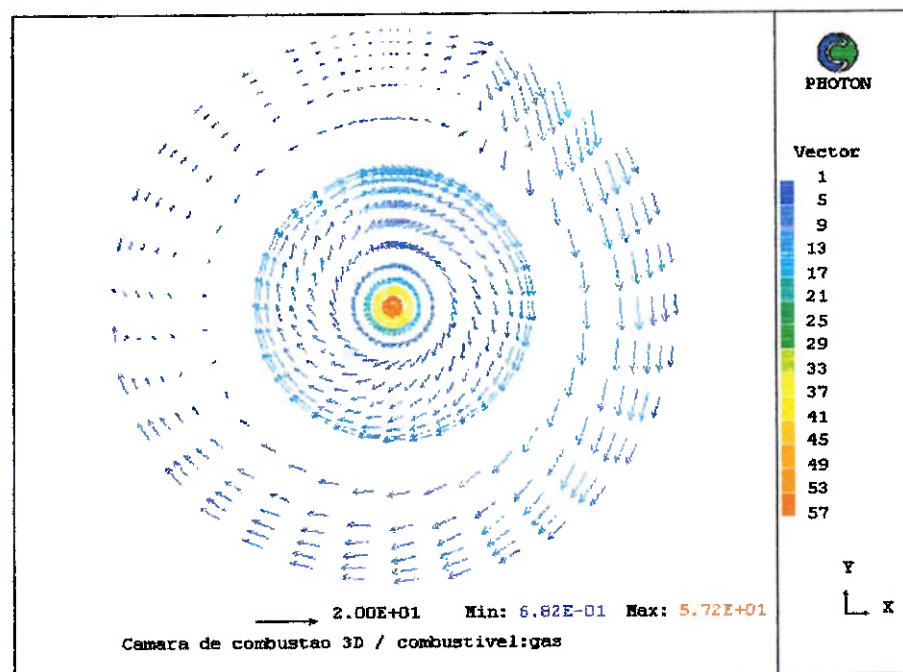


Fig. 12. Vetores de velocidade em m/s no plano z=7

Outra variável a ser analisada é a concentração de combustível no interior da câmara. A Fig. 13 mostra a distribuição de tal variável.

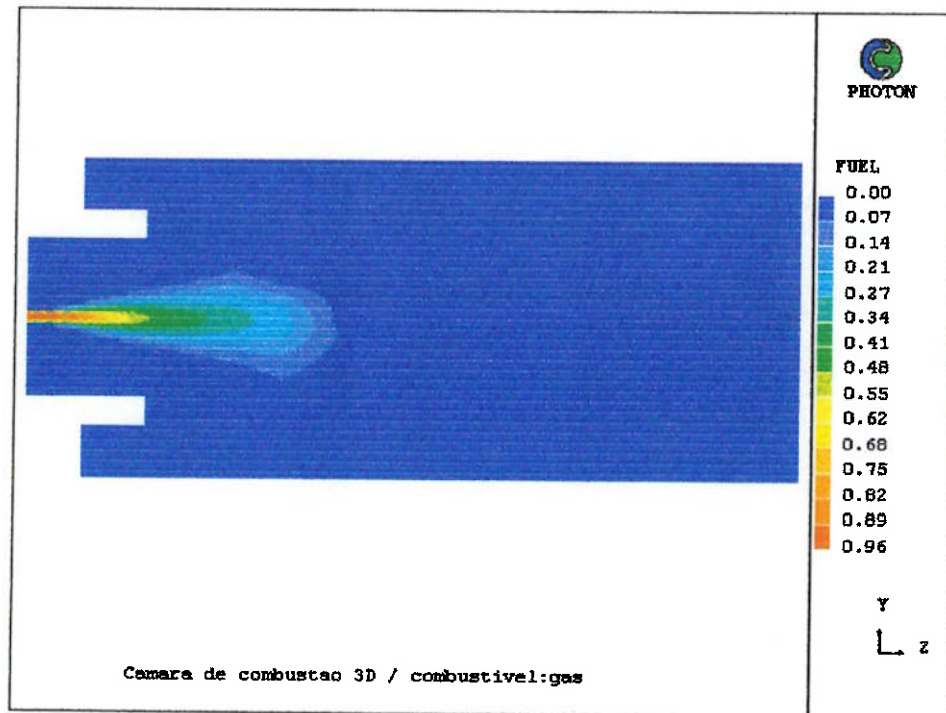


Fig. 13. Concentração de combustível

Pode-se notar que quase todo o combustível é consumido antes de chegar na metade da câmara. Para se estudar a quantidade de ar de excesso nos gases, deve ser observada a fração de mistura, dada pela fórmula:

$$\text{mixf} = \frac{\text{fuel} + \text{prodi}}{\text{ar} + \text{fuel} + \text{prodi}}$$

onde mixf é a fração de mistura, fuel é a quantidade de combustível, prodi é a quantidade de produtos de combustão incompleta, e ar é a quantidade de ar de excesso.

A Fig. 14 mostra a fração de mistura na câmara. A semelhança com a figura anterior é devida ao fato de que a única diferença entre a fórmula que calcula o mixf e a de concentração de combustível é a adição dos produtos no numerador da fórmula do mixf.

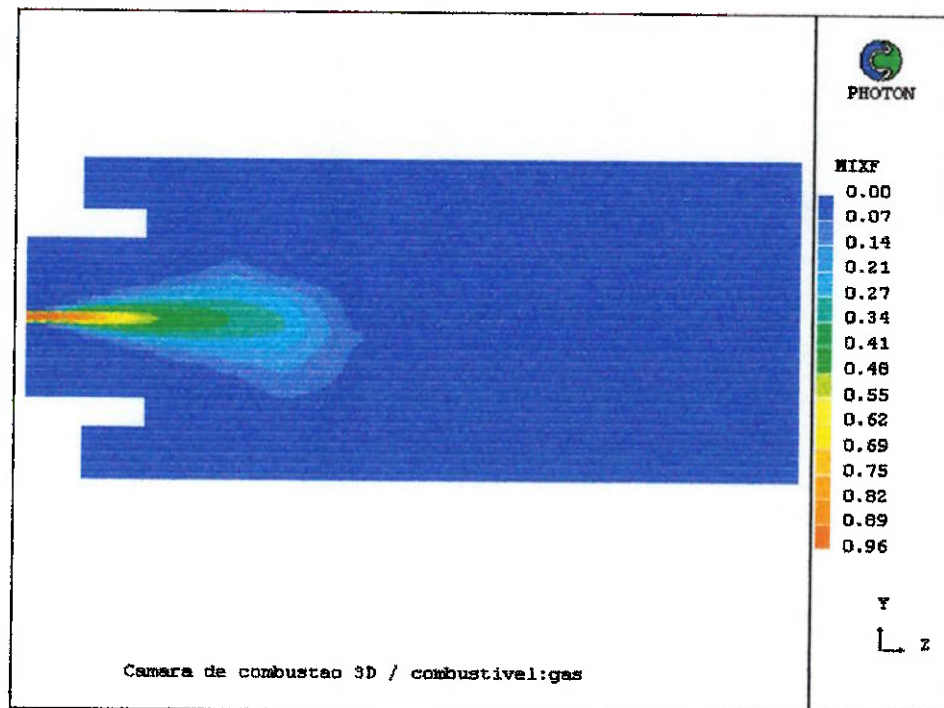


Fig. 14. Fração de mistura

A energia cinética dos gases está representada na Fig. 15. Como as maiores energias cinéticas estão concentradas no centro da câmara, pode-se dizer que não haverá problemas relacionados com erosão na superfície do concreto refratário que recobre o interior da câmara.

A concentração de produtos pode ser observada na Fig. 16. Através desta figura é possível imaginar o formato da chama; nota-se que devido à entrada superior singular de ar de diluição o perfil da chama não é simétrico.

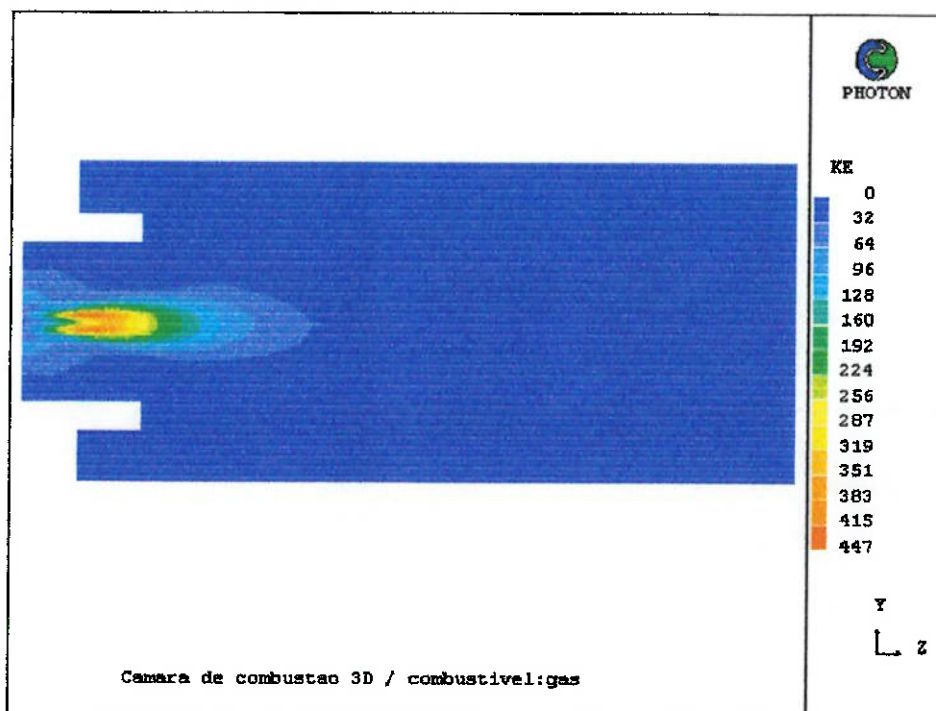


Fig. 15. Energia cinética dos gases

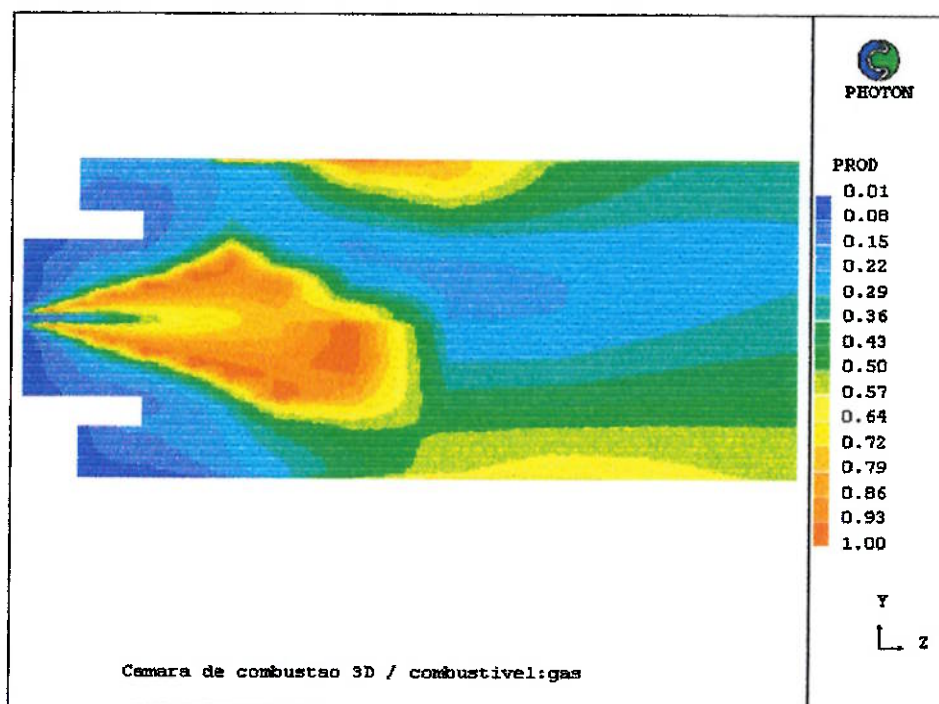


Fig. 16. Concentração de produtos de combustão

O perfil de temperaturas, que se mostra muito parecido com o de produtos, está representado na Fig.17. Os gases saem da câmara sem se

misturar completamente e a temperatura média deles está em torno de 770 K, ou seja, 500°C. Portanto, a temperatura atingida está abaixo do esperado: 900°C. Além disso, a temperatura atingida na parte superior central da câmara é muito alta, cerca de 2200°C, e isto é prejudicial ao concreto refratário.

O surgimento de uma região fria no centro da câmara (aproximadamente 120°C) só aconteceu devido a ausência de radiação no modelo usado nessas simulações.

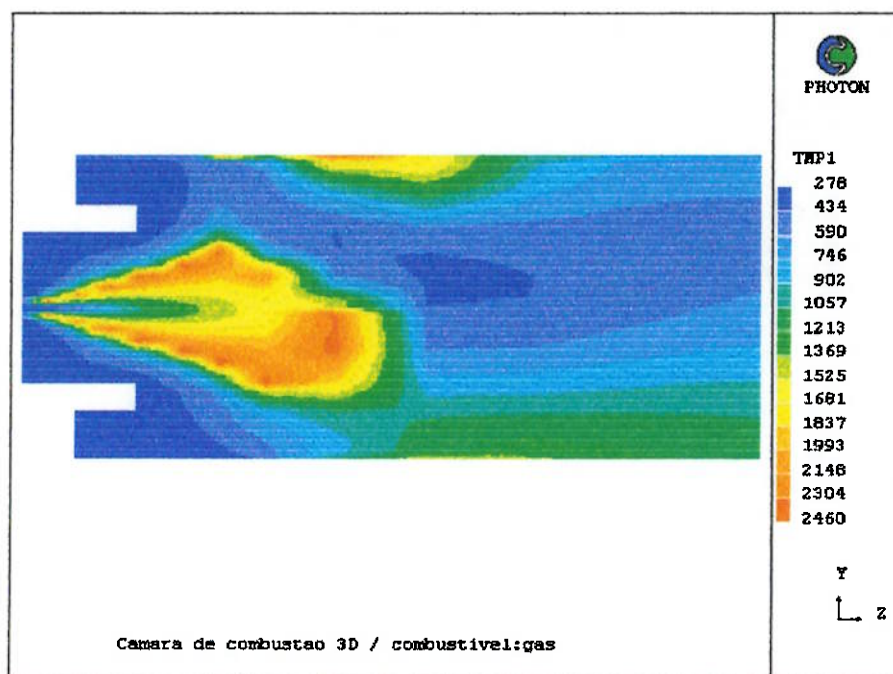


Fig. 17. Distribuição de temperaturas

Para verificar qual o tamanho da região de alta temperatura junta à parede, um corte transversal foi feito nessa posição. Através da Fig.18 observa-se que cerca de um quarto do perímetro da câmara nesta seção possui altas temperaturas.

A Fig.19 mostra a concentração de produtos nesta mesma seção. Nota-se que as altas temperaturas são atingidas devido a alta concentração de produtos nesta região.

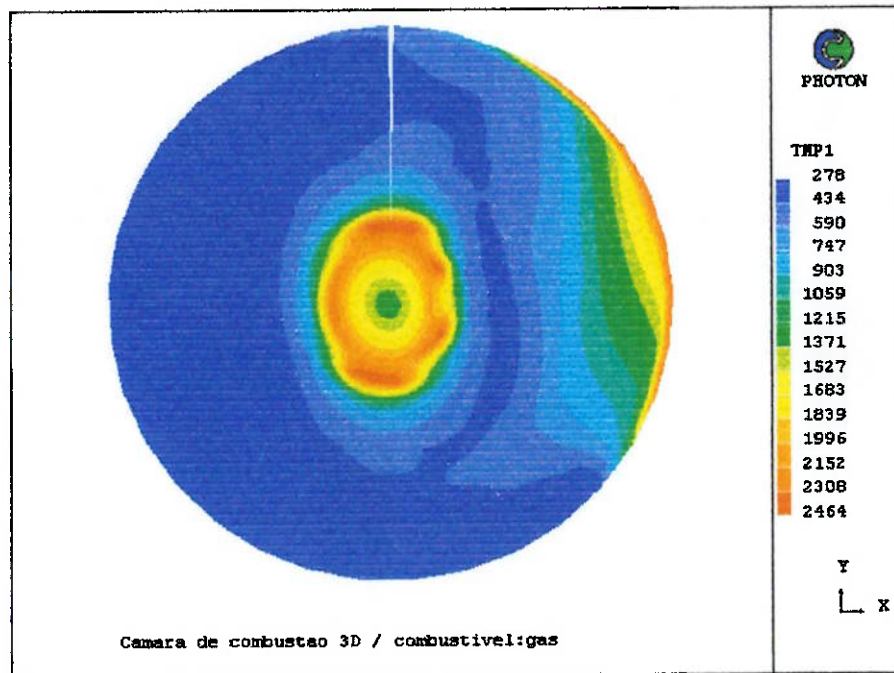
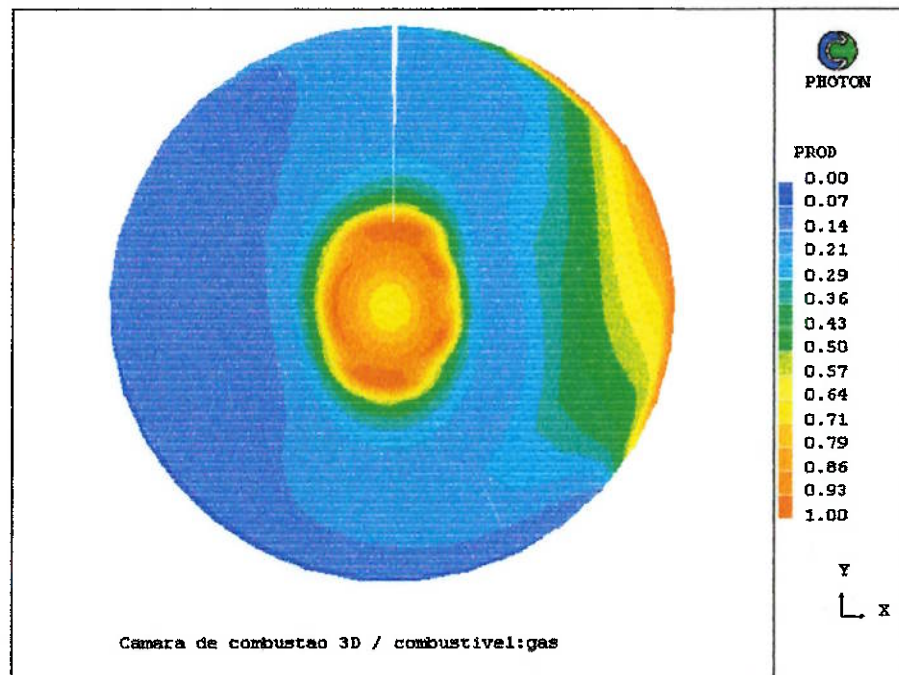
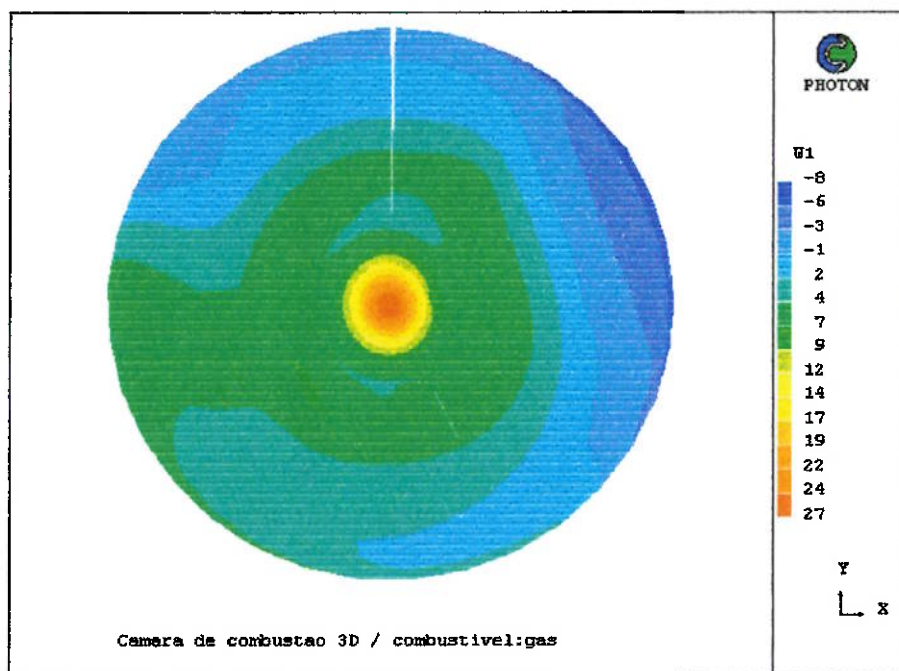


Fig. 18. Distribuição de temperaturas no plano $z=12$

Para se analisar a causa da concentração de produtos, os perfis de velocidades da seção foram feitos. A Fig.20 mostra o comportamento da velocidade axial w_1 .

Fig. 19. Concentração de produtos no plano $z=12$ Fig. 20. Velocidades axiais no plano $z=12$

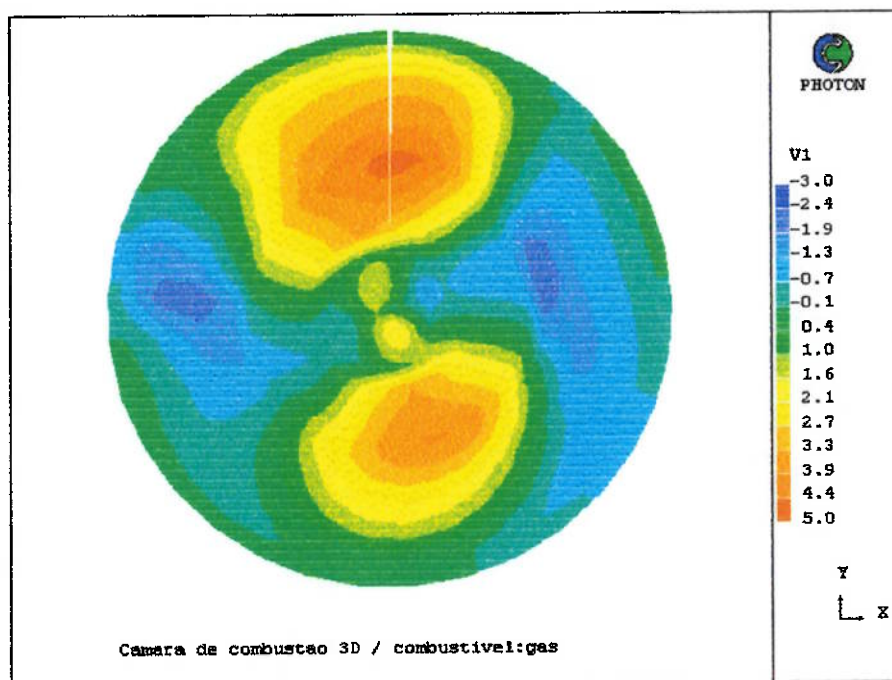
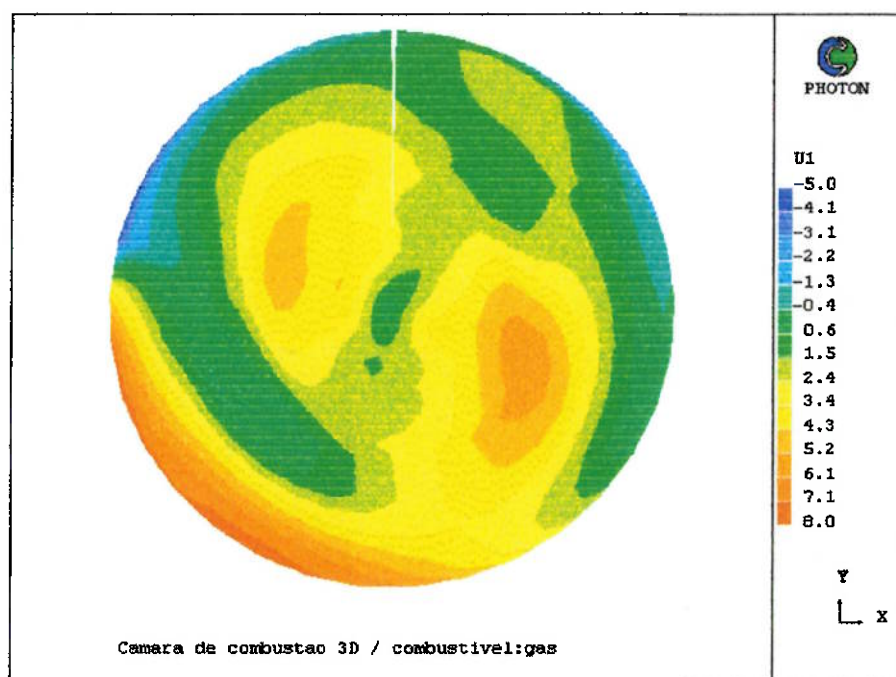
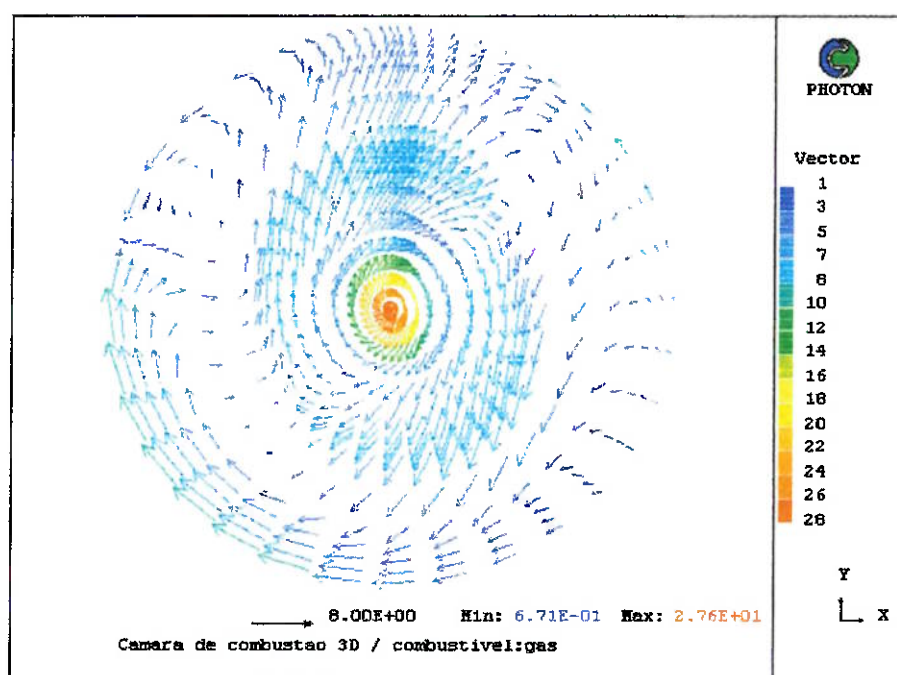


Fig. 21. Velocidade radial no plano $z=12$

Exatamente na região superaquecida as maiores velocidades negativas são atingidas. A velocidade radial $v1$ está representada na Fig.21. Nota-se que na região superaquecida a velocidade radial é praticamente nula. O mesmo acontece com a velocidade $u1$, cujo perfil está mostrado na Fig.22.

Para que se compreenda melhor o comportamento do fluxo de gases nesta seção, a Fig.23 foi feita. Nela, observa-se os vetores de velocidade em cada um dos elementos presentes na seção, deste modo, é mais simples perceber as recirculações. Novamente, nota-se que as menores velocidades estão na região superaquecida.

Fig. 22. Velocidade tangencial no plano $z=12$ Fig. 23. Vetores de velocidade no plano $z=12$

Outra característica do fluxo dos gases, que pode ser observada através de figuras feitas pelo Photon, são as linhas de corrente. A Fig.24 mostra algumas linhas de corrente em uma vista isométrica.

As mesmas linhas de corrente são vistas lateralmente na Fig.25, e por trás da câmara na Fig.26. Com estas três figuras e com todas as outras representando velocidades, é mais fácil imaginar como se comporta o fluxo de gases no interior da câmara.

Uma vez que a temperatura dos gases na saída da câmara está abaixo do esperado e existe uma região onde o concreto refratário seria agredido fortemente pela alta temperatura localizada, outras simulações foram feitas com valores diferentes de vazão de ar primário e com duas entradas de ar de diluição, em vez de uma.

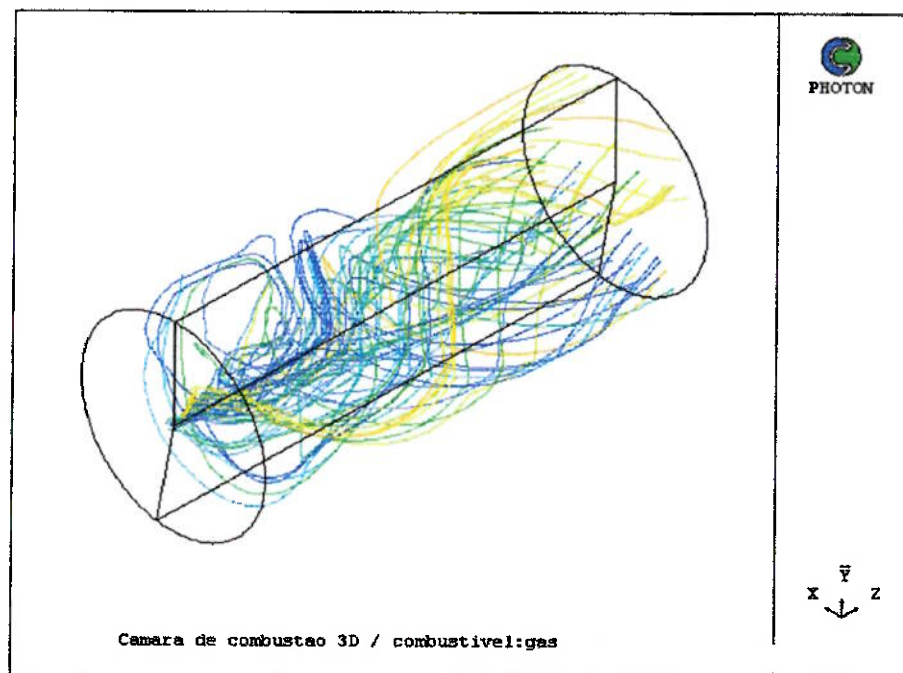
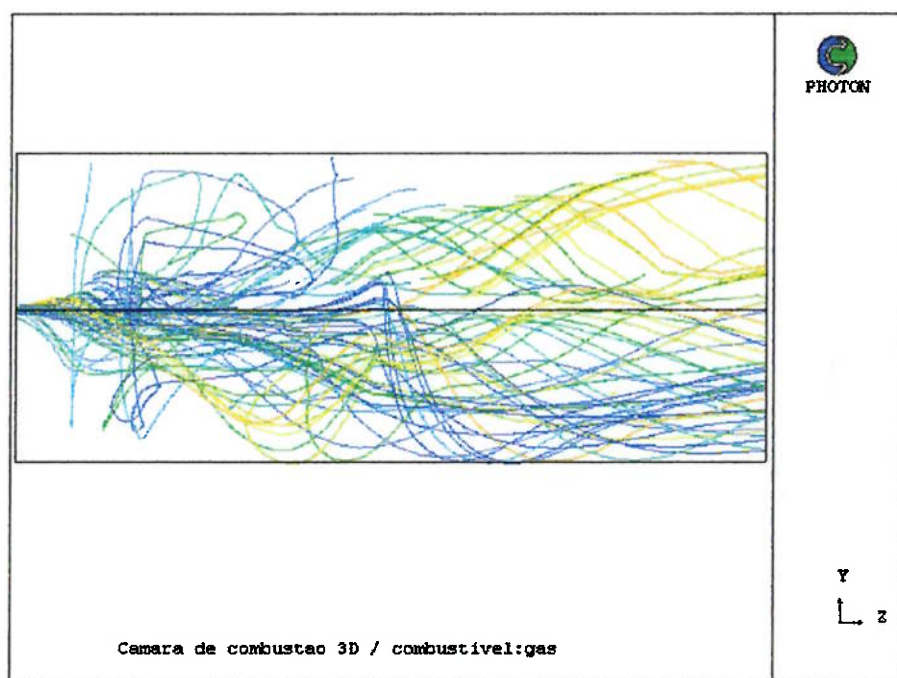
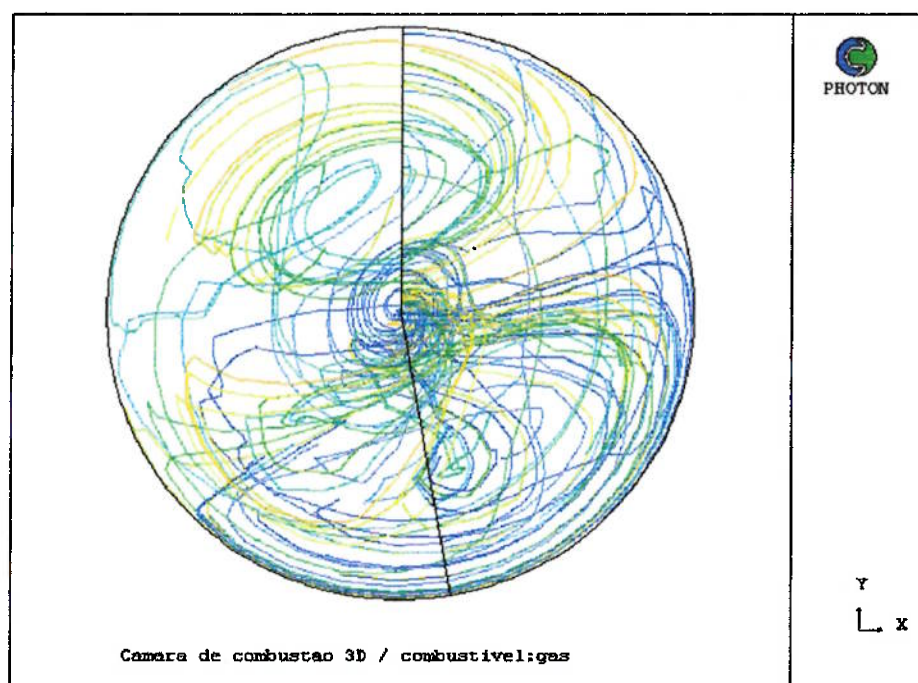


Fig. 24. Linhas de corrente

**Fig. 25.** Linhas de corrente (vista lateral)**Fig. 26.** Linhas de corrente (vista do lado do queimador)

Segunda Configuração

Uma outra configuração foi testada para tentar sanar o problema de superaquecimento do refratário. As seguintes modificações foram feitas:

Velocidade do ar de diluição: 5 m/s (cada entrada);

Velocidade axial do ar primário: 75 m/s;

Velocidade tangencial do ar primário: 25 m/s;

Vazão de ar primário: 34.462 m/s.

Uma nova entrada de ar de diluição foi adicionada, desta maneira, a chama se tornaria mais simétrica e as velocidades de injeção poderiam ser menores. Após a convergência do sistema sob as novas condições, novas figuras foram obtidas. A Fig. 27 mostra o comportamento da velocidade w_1 ao longo da câmara. Com esta regulagem, as velocidades, em geral, aumentaram, pois o volume de ar injetado é maior.

As velocidades radiais estão representas na Fig.28. A região azul (negativa), na saída da câmara, significa que o fluxo de gases tende a subir. A Fig.29 mostra as velocidades tangenciais neste mesmo plano. Os vetores de velocidade estão representados na Fig.30.

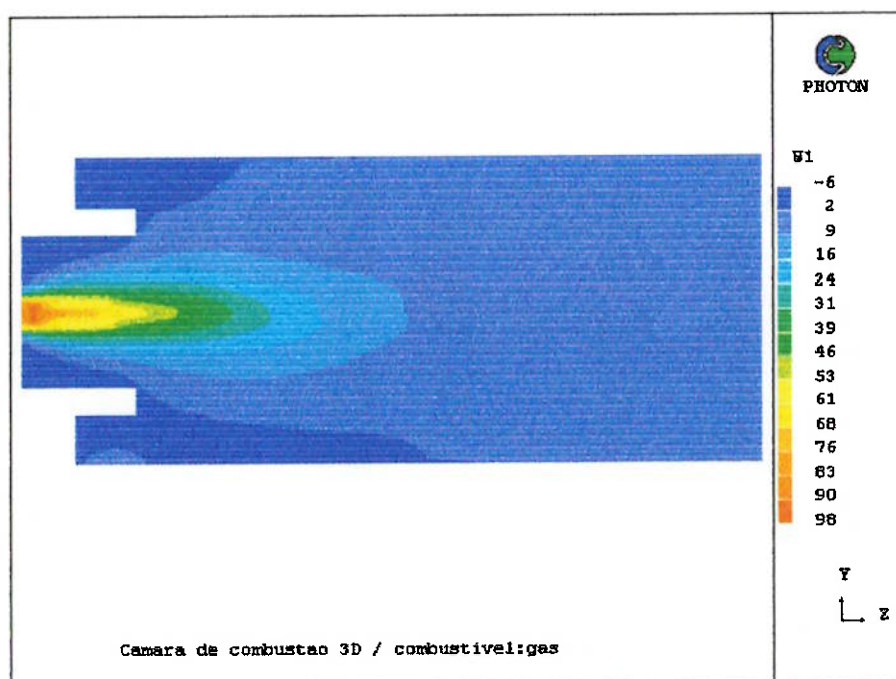


Fig. 27. Velocidades axiais em m/s

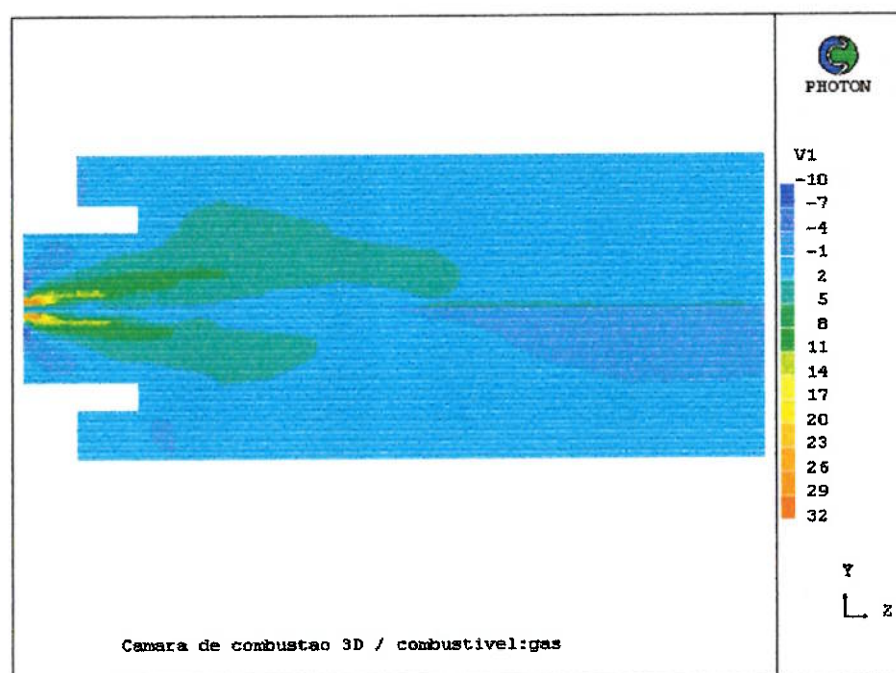


Fig. 28. Velocidades radiais em m/s

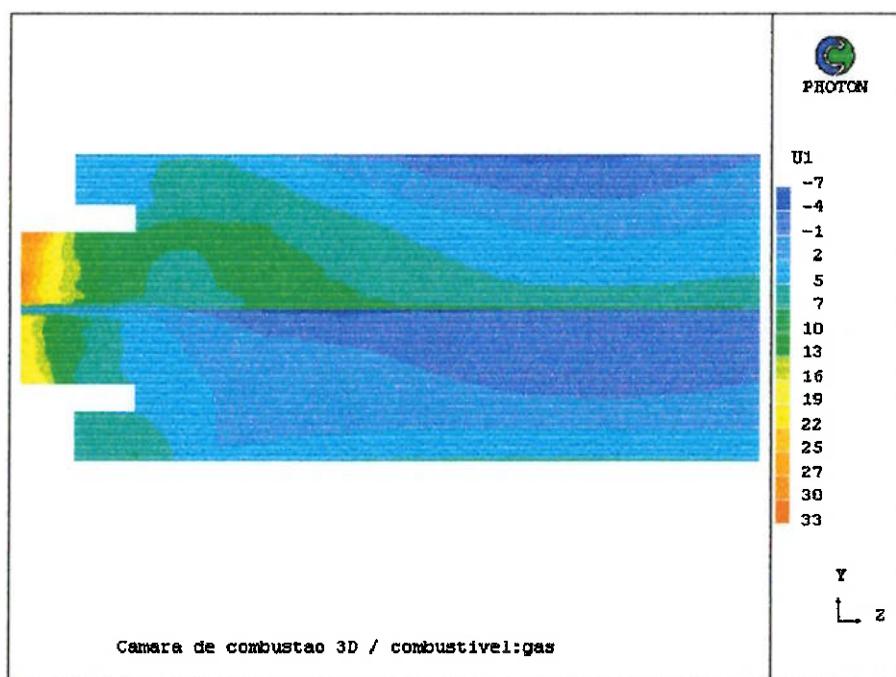


Fig. 29. Velocidades tangenciais em m/s

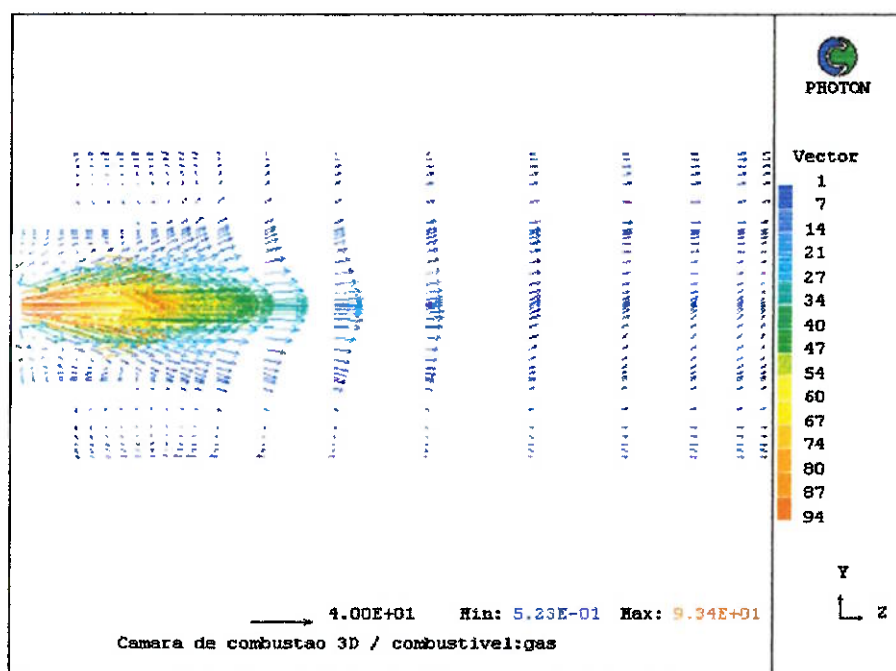


Fig. 30. Vetores de velocidades em m/s

Novamente, o perfil de velocidades tangenciais mostra uma junção de velocidades positivas com negativas. Para que seja possível entender melhor o comportamento das velocidades, foram feitas duas seções transversais nessa região. A Fig.31 mostra o comportamento da velocidade tangencial u_1 no plano $z=16$. As velocidades radiais v_1 estão representadas na Fig.32 e a composição entre u_1 e v_1 , os vetores no plano xy , está representada na Fig.33.

A Fig.34 mostra as velocidades radiais no plano de entrada do ar diluição. As regiões azuis representam as duas entradas. As velocidades tangenciais podem ser vistas na Fig.35. A Fig.36 mostra os vetores de velocidades no mesmo plano.

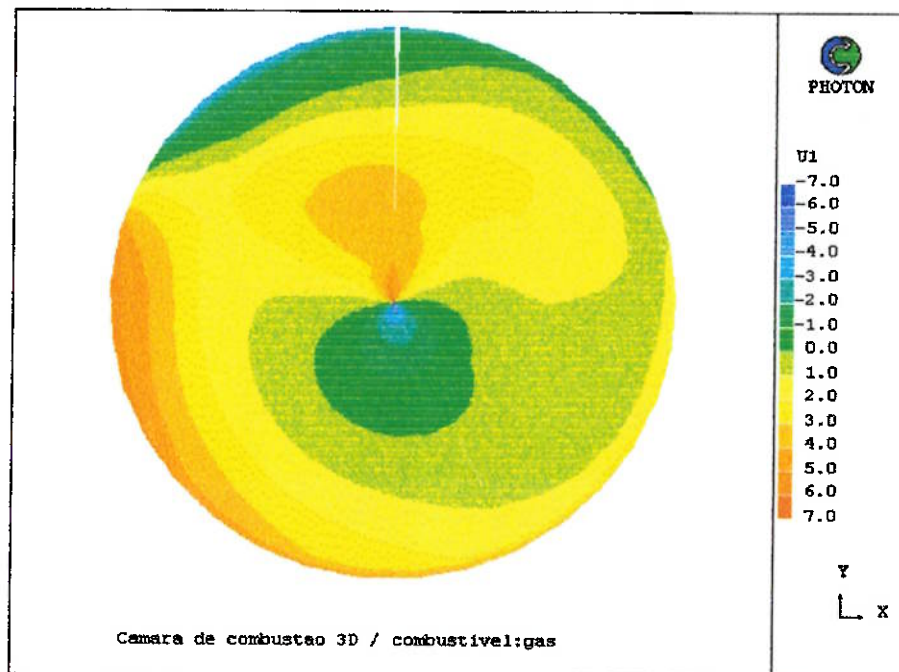


Fig. 31. Velocidades tangenciais no plano $z=16$, em m/s

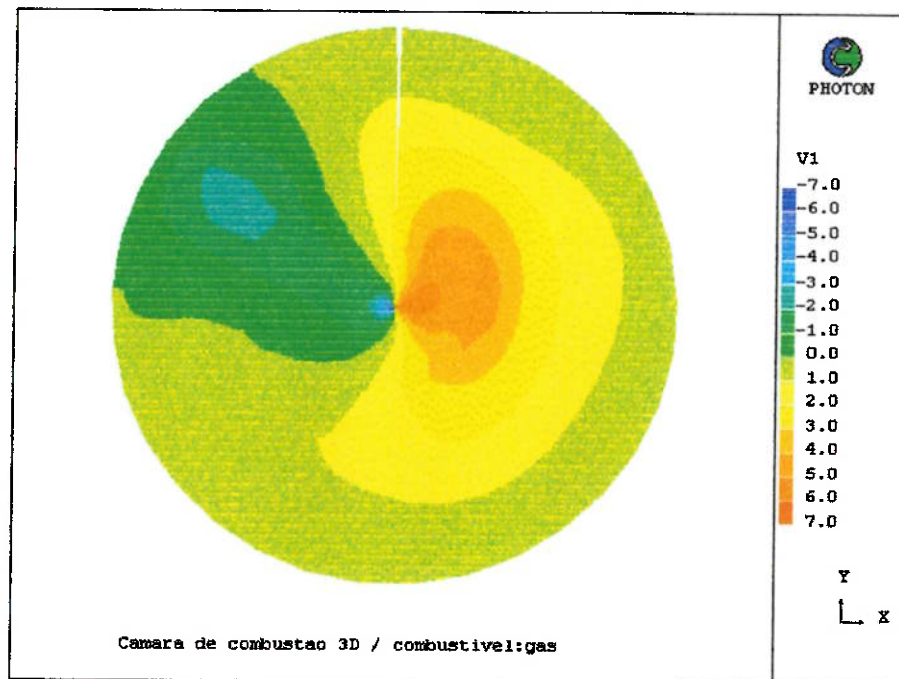


Fig. 32. Velocidades radiais no plano $z=16$, em m/s

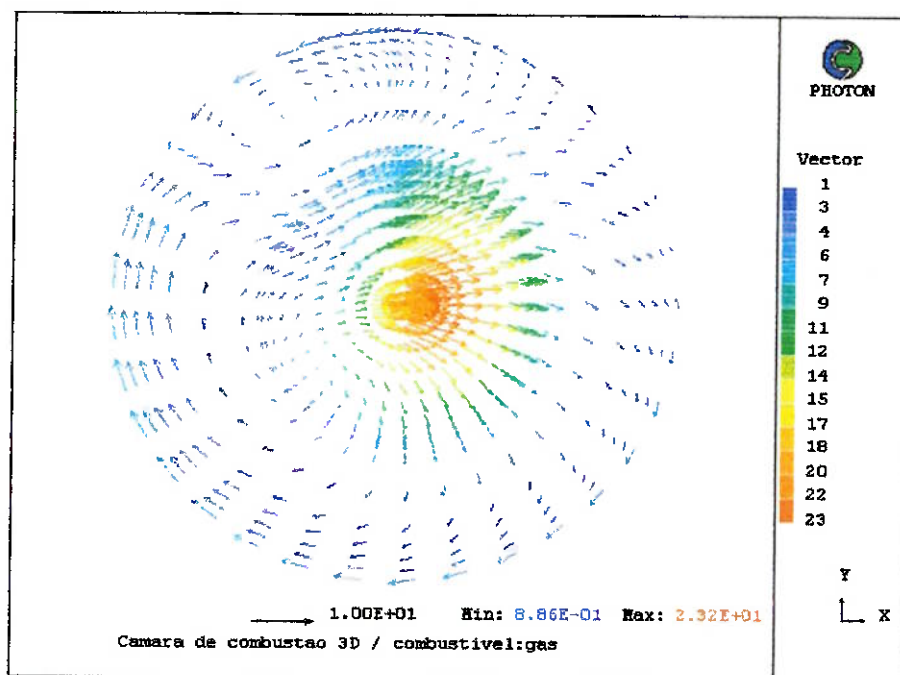


Fig. 33. Vetores de velocidades no plano $z=16$, em m/s

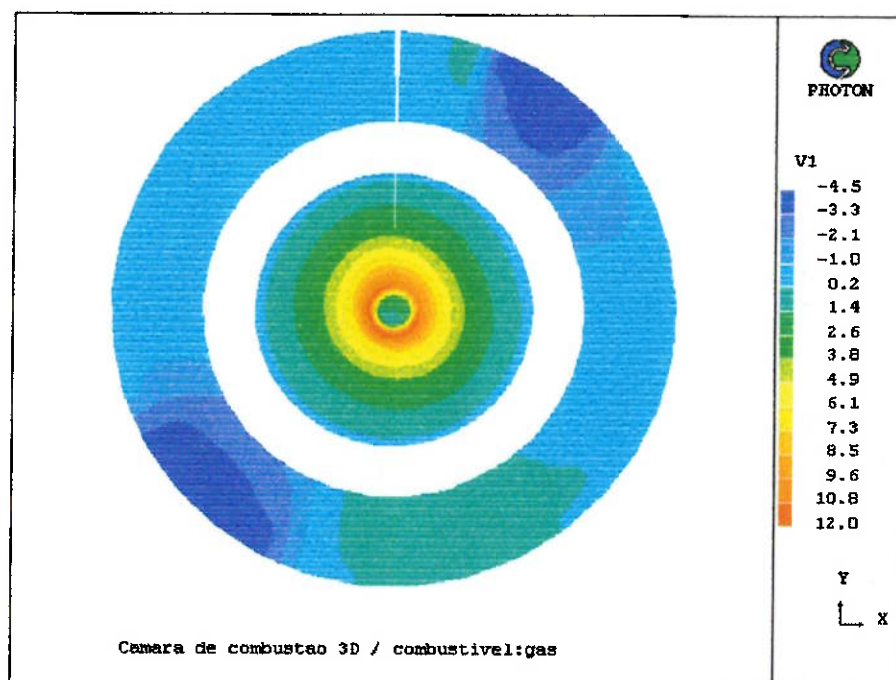


Fig. 34. Velocidades radiais no plano $z=7$, em m/s

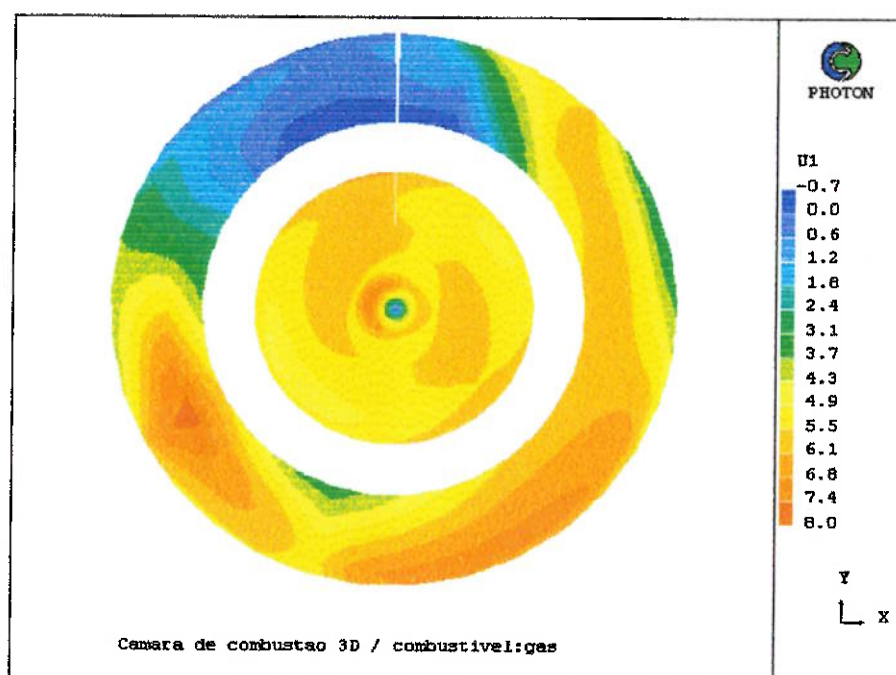


Fig. 35. Velocidades tangenciais no plano $z=7$, em m/s

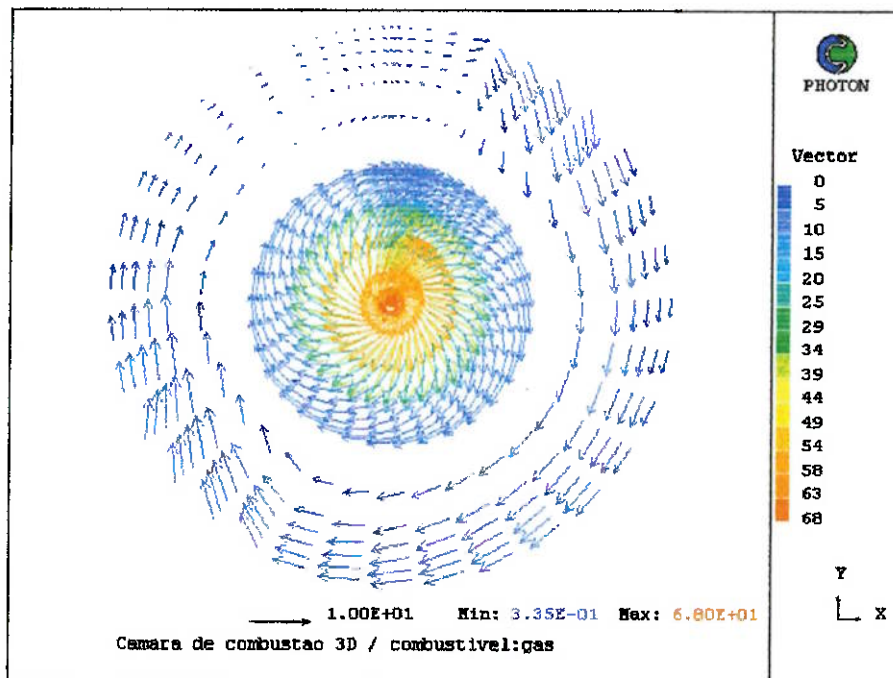


Fig. 36. Vetores de velocidades no plano $z=7$, em m/s

Na Fig.36 pode-se observar a rotação do fluxo de gases e as duas entradas de ar de diluição.

A concentração de produtos está mostrada na Fig.37. Nota-se que a chama está mais simétrica com duas entradas de ar de diluição. As temperaturas atingidas no interior da câmara estão representadas na Fig.38. Observa-se que não existe mais uma região de altas temperaturas junto à parede de concreto refratário. Isto comprova a melhora da nova configuração de operação, no entanto, a temperatura de saída dos gases continua baixa, na faixa de 780 K.

Para tentar solucionar este problema, uma terceira configuração foi testada.

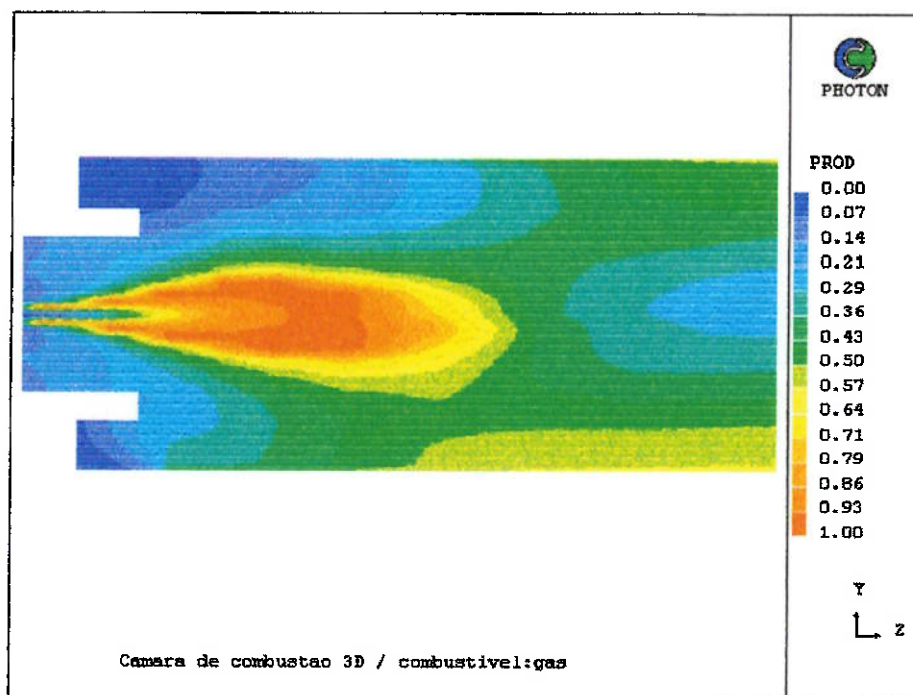


Fig. 37. Concentração de produtos

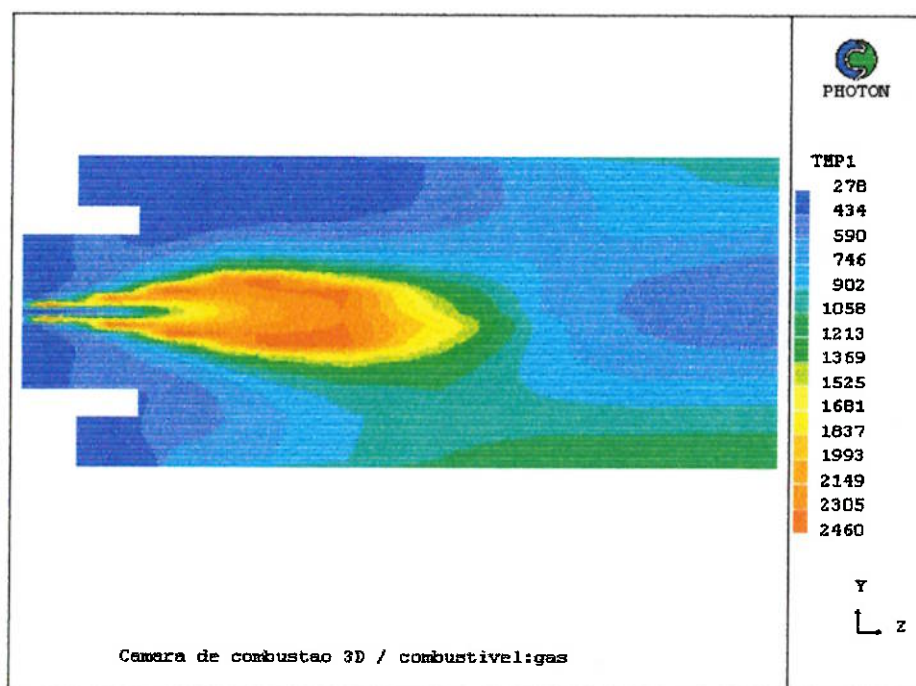


Fig. 38. Distribuição de temperaturas

Terceira Configuração

Todos os parâmetros foram mantidos iguais aos regulados na primeira configuração, exceto:

Velocidade do ar de diluição: 5 m/s (cada entrada);

Velocidade axial do ar primário: 55 m/s;

Velocidade tangencial do ar primário: 45 m/s;

Vazão de ar primário: 25.272 m/s;

Vazão de ar de diluição (entrada superior): 9.940 kg/h;

Vazão de ar de diluição (entrada inferior): 14.025 kg/h.

As novas velocidades axiais obtidas estão mostradas na Fig.39. comparadas com as velocidades da configuração anterior, estas são um pouco menores. Isto era esperado, pois agora há menos ar primário entrando na câmara.

A Fig.40 mostra as velocidades radiais ao longo da câmara. Novamente, os gases tendem a subir na saída da câmara. As velocidades tangenciais podem ser observadas na Fig.41. Desta vez, nota-se a formação de um vórtice concêntrico à câmara, exceto na sua parte final, onde ainda há contraste entre velocidades positivas e negativas.

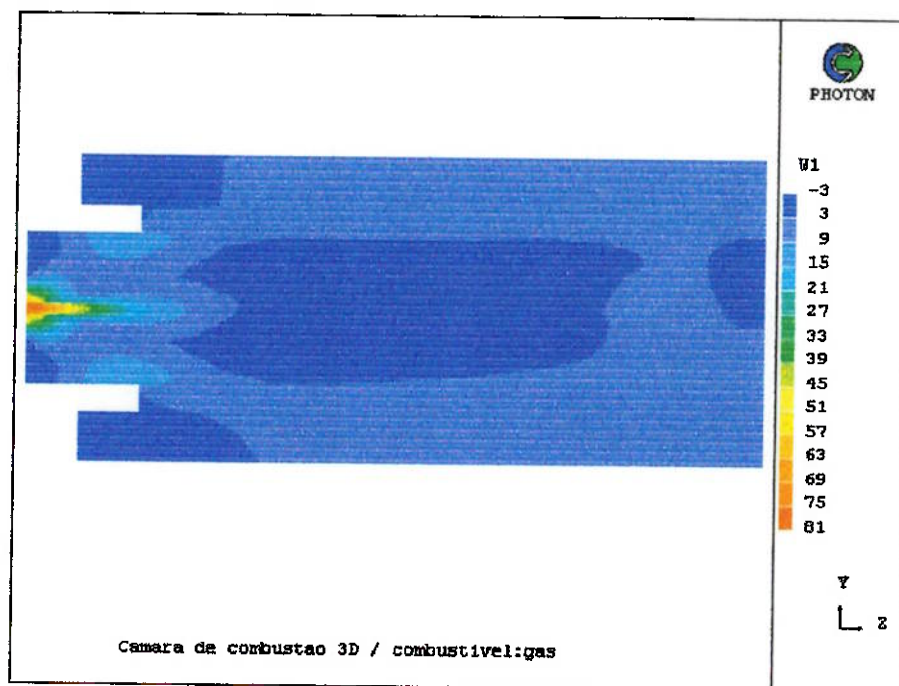


Fig. 39. Velocidades axiais em m/s

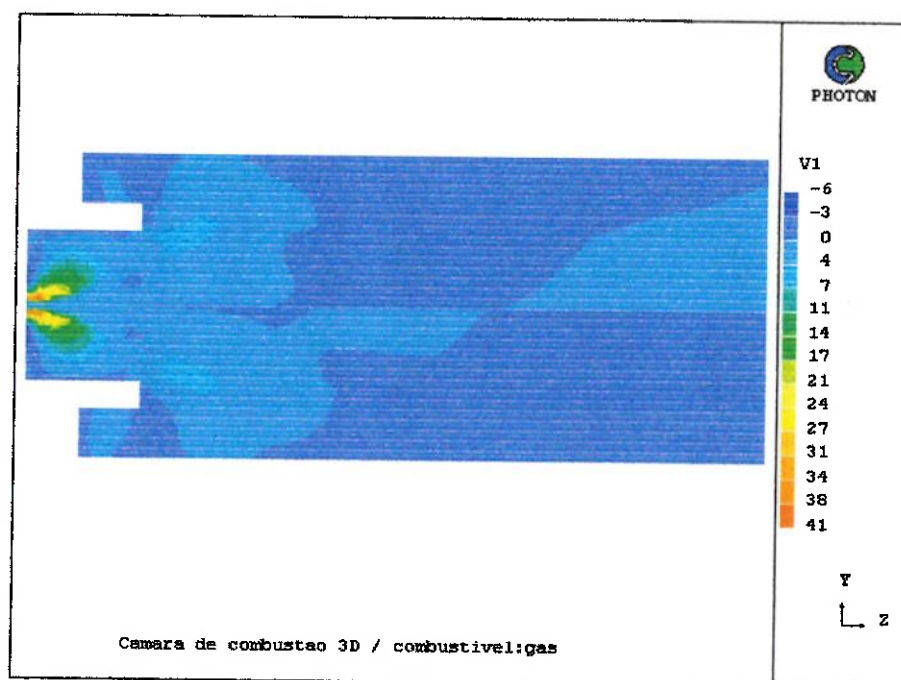


Fig. 40. Velocidades radiais em m/s

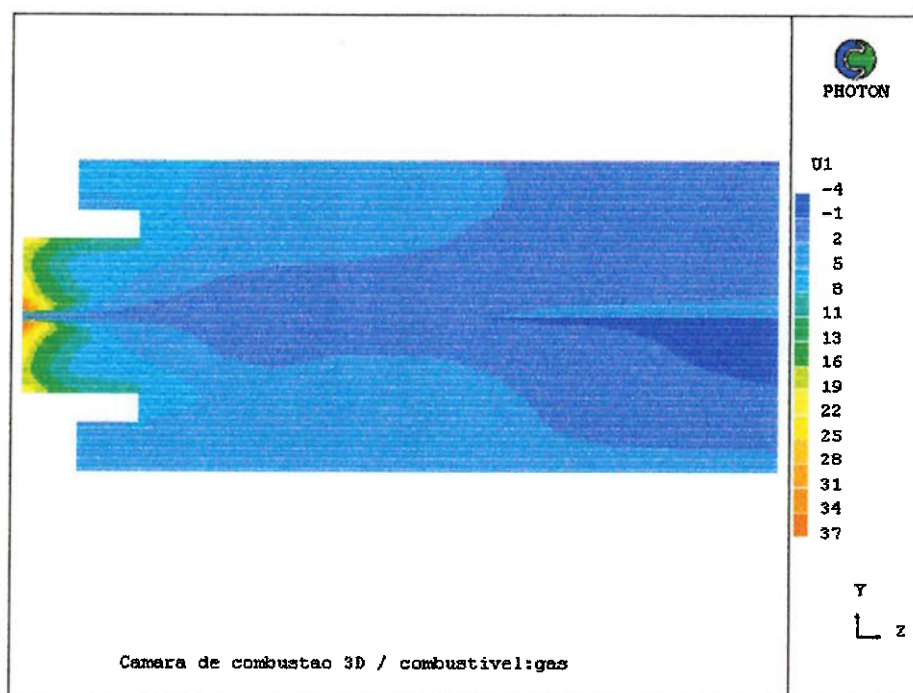


Fig. 41. Velocidades tangenciais em m/s

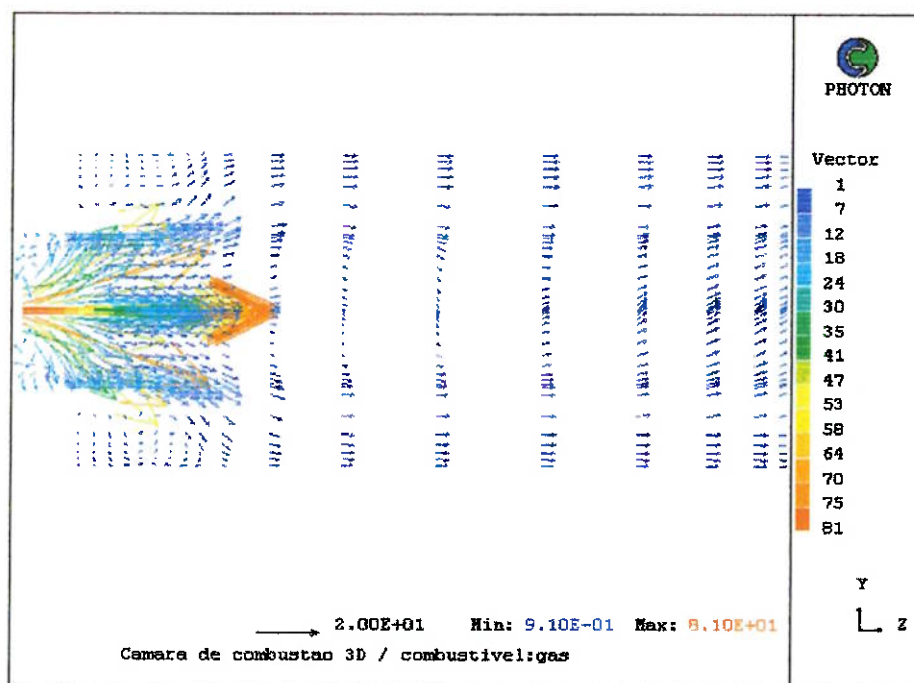


Fig. 42. Vetores de velocidades em m/s

A Fig.42 mostra os vetores de velocidades da nova configuração. Convém dizer, que cada figura destas possui a sua própria referência para determinar o comprimento de cada vetor, tal referência está posicionada na parte esquerda inferior da figura.

A concentração de produtos pode ser observada na Fig.43. Nota-se, que desta vez a chama se tornou mais volumosa e a concentração de produtos ainda é grande mesmo na saída da câmara.

Para analisar a quantidade de ar de excesso, a Fig.44 foi construída. Observa-se que há pouco ar de excesso na câmara, pois a fração de mistura apresenta valores significativos até o meio da câmara.

Para verificar se não há combustível saindo junto aos gases, foi feita a Fig.45. Nela, observa-se que há uma pequena concentração ainda no meio da câmara, então, para refinar a escala de cores, foi feita outra figura mostrando apenas a região azul escura da figura anterior. Na Fig.46 é possível verificar que não há combustível saindo junto aos gases.

O perfil de temperaturas está representado na Fig.47. Observa-se que neste plano não há nenhuma região de altas temperaturas junto às paredes, e que a temperatura de saída dos gases está muito próxima da ideal.

Para verificar se não há outro plano onde possa existir altas temperaturas junto às paredes, a Fig.48 foi feita. Nota-se que não há nenhuma região onde isto ocorra e que a chama está bem centrada.

Através da Fig.49 é possível estimar qual é a temperatura média dos gases na saída, cerca de 1260 K.

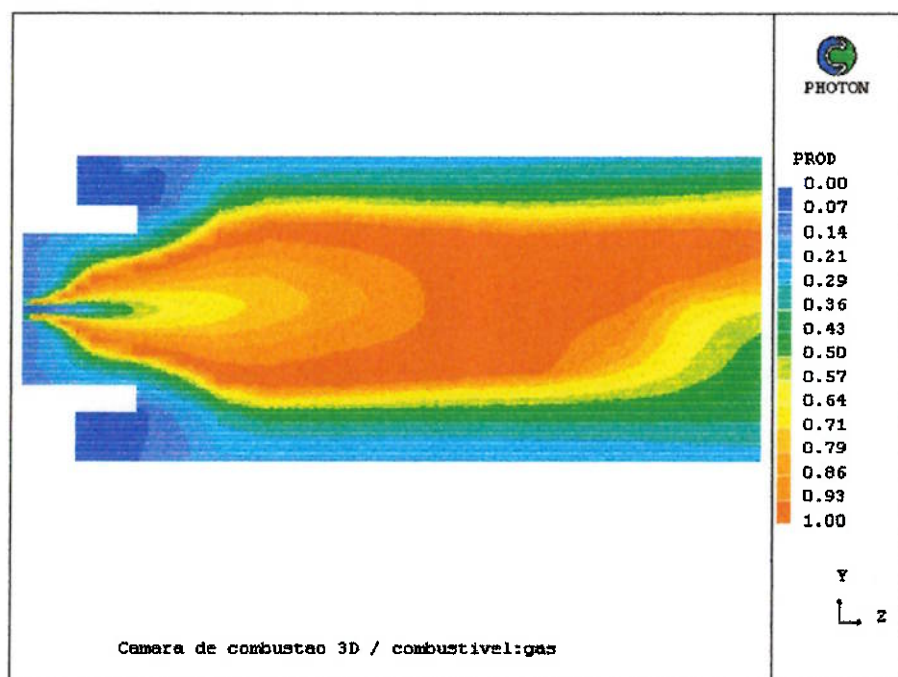


Fig. 43. Concentração de produtos

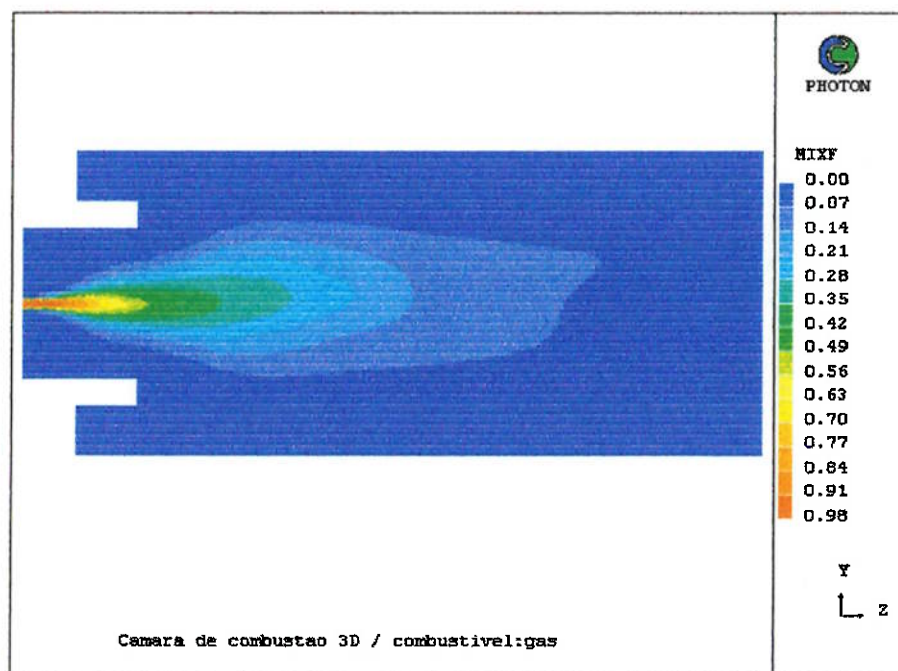


Fig. 44. Fração de mistura

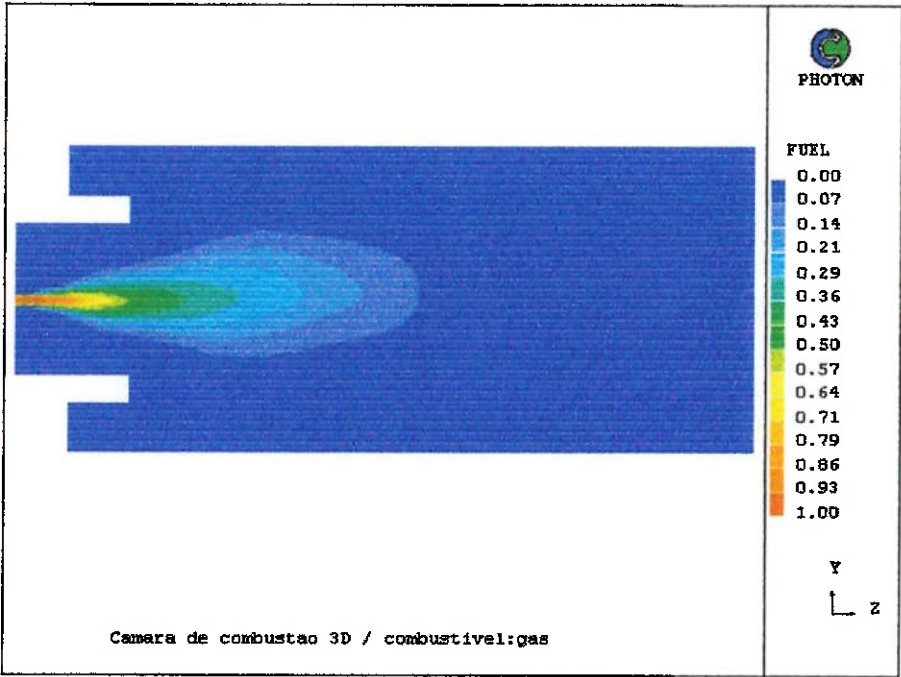


Fig. 45. Concentração de combustível

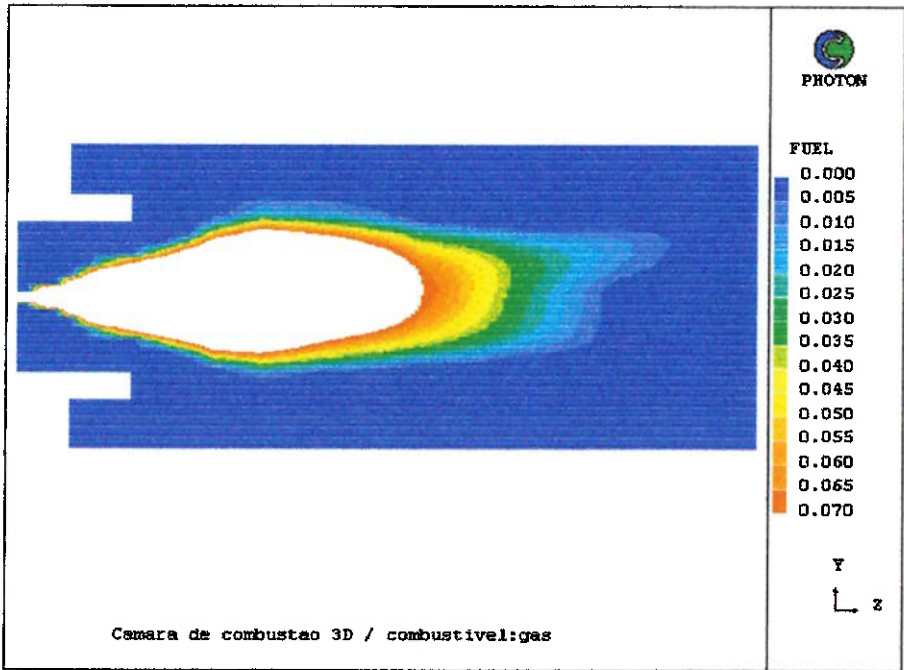


Fig. 46. Detalhe da concentração de combustível

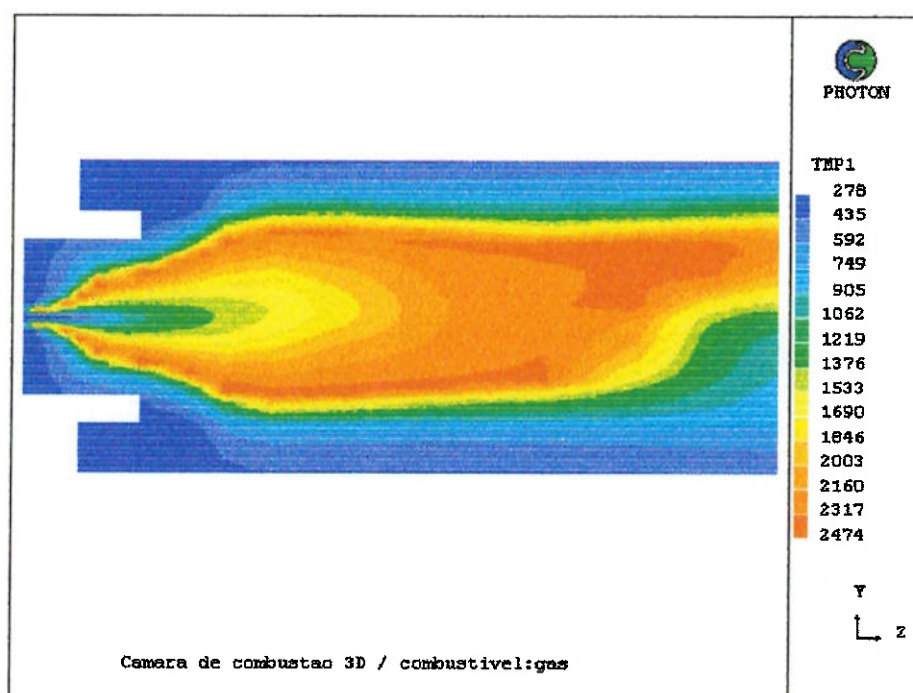


Fig. 47. Distribuição de temperaturas

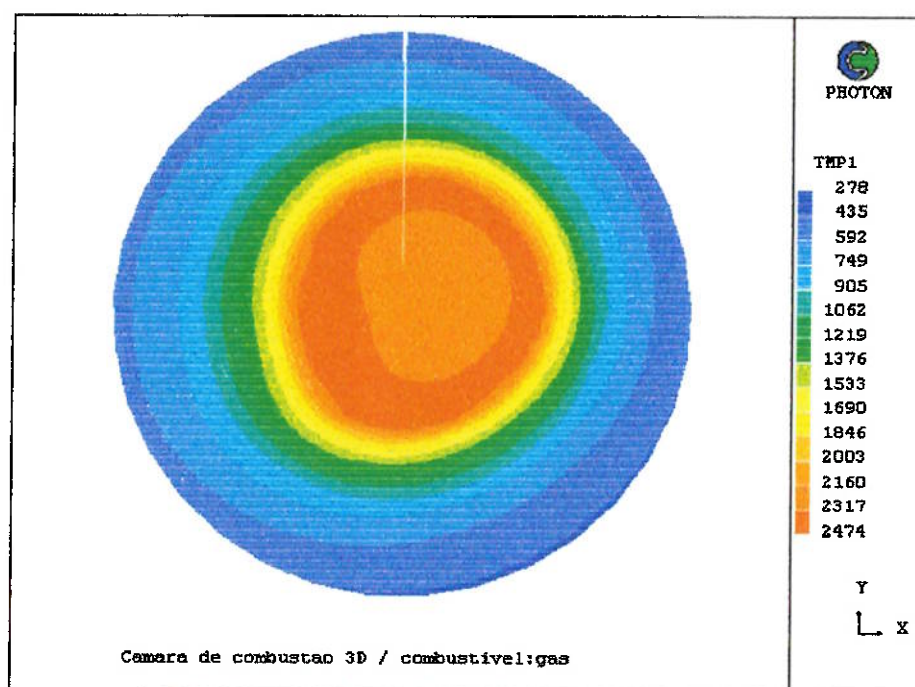


Fig. 48. Distribuição de temperaturas no plano z=17

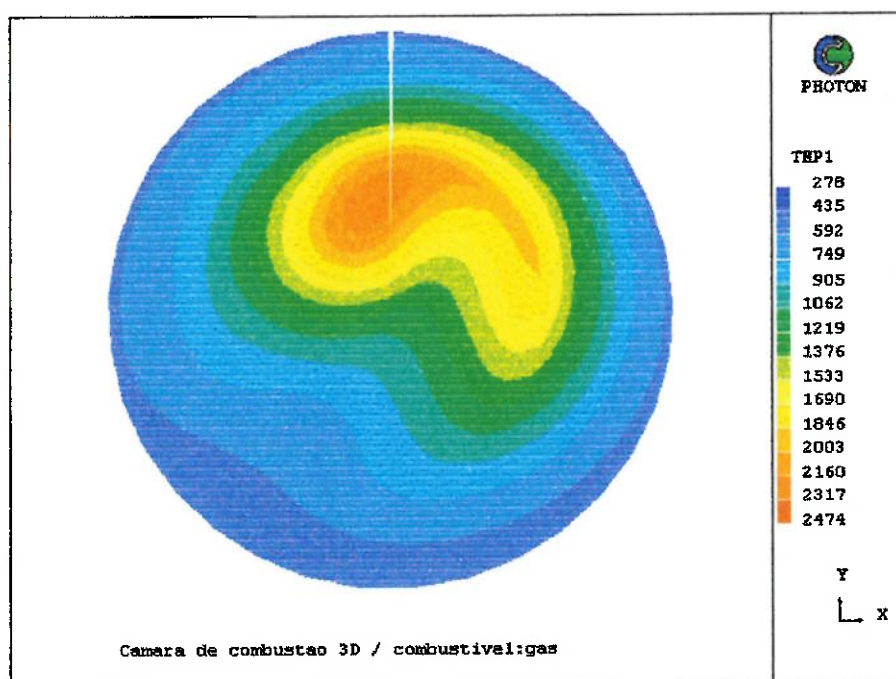


Fig. 49. Distribuição de temperaturas no plano $z=22$

CONCLUSÕES

Observando as figuras obtidas nas simulações, conclui-se que os resultados obtidos foram satisfatórios. A malha construída conseguiu representar bem a câmara real e no geral, verificou-se que a câmara poderia ser operada com gás natural em vez de óleo combustível.

As velocidades obtidas ficaram dentro de um padrão esperado nas três diferentes operações expostas. Na primeira configuração, como só havia uma entrada de ar de diluição, a chama ficou assimétrica e houve a formação de uma região de concentração de produtos. Este acúmulo seria prejudicial para a vida útil do concreto refratário que recobre a câmara internamente, pois gerou altas temperaturas na região.

Na segunda configuração, outra entrada de ar de diluição do mesmo tamanho foi adicionada, mantendo-se a vazão de ar de diluição total aproximadamente constante e diminuindo-se a velocidade de injeção pela metade. A velocidade axial do ar primário foi aumentada e a tangencial diminuída para modificar o formato da chama. O perfil de temperaturas no interior da câmara melhorou, não havendo mais regiões de altas temperaturas junto às paredes, mas a temperatura de saída dos gases continuou baixa, cerca de 500°C.

Na terceira configuração, apenas as velocidades do ar primário foram alteradas em relação a anterior: a axial foi diminuída para reduzir o ar de

excesso e a tangencial foi elevada. Com esta regulação, o comportamento da câmara melhorou, sendo obtida a temperatura desejada na saída dos gases, cerca de 1000°C. O perfil das temperaturas na saída não ficou homogêneo, mas para este tipo de aplicação, em secadores de fertilizantes, isso não é necessário.

Como sugestões para futuras melhorias do modelo estudado, a inclusão da radiação nos cálculos seria interessante. A malha poderia ser melhor definida na região de união dos extremos na direção x, para que as figuras possam ser feitas sem nenhuma região sem cor. As sub-regiões dentro da malha em cada direção também poderiam ser melhor definidas, para, caso sejam feitas alterações na geometria, não ocorram problemas de deformação e mudanças de área de entrada indesejadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHAM Development Team, *The Phoenix Reference Manual TR/200a*, London, 1991;

Etherington, H. & Etherington, G., *Modern Furnance Tecnology*, Charles Griffin & Co.Ltd, London, 1961;

Khalil, E.E., *Modeling of Furnances and Combustors*, Abacus Press, Hampshire, 1982;

Spalding, D.B., *A Guide to the Phoenix Input Language TR/100*, London, 1992.

TALK=T;RUN(1, 1)

** LOAD(14) from the PHOENICS Input Library
Special-14: Always-valid character declarations and settings

NODEF=T

Declarations

CHAR(ASK,ANS,CLS,PAUSE,UNIGRID)

CHAR(SPELL,EXPRT,EQUALVEL,SOLIDMAT,FLUIDMAT,USE_PROPS,IMMERSOL,MFM)

CHAR(GENTRA,SOLVEL,SOLTEM,GRAVITY,SOLSTR,ASLP0,FLUID,CPVNAM,SPPNAM)

char(solvem)

char(northwall,southwall,eastwall,westwall,highwall,lowwall)

Settings

ASK=Y; ANS=N; solvem=n; EQUALVEL= \$W100; PAUSE=\$13

UNIGRID=\$50

SPELL=\$20; CLS=\$21; EXPRT=\$30; SOLIDMAT=\$70; FLUIDMAT=\$71

USE_PROPS=\$72; SOLVEL=\$73; IMMERSOL=\$R001;MFM = \$L099

GENTRA=\$G001; GRAVITY=\$74; SOLSTR=\$S001; SOLTEM=\$51;

ASLP0=\$P030

FLUID=FIINIT(PRPS)

NODEF=F

LIBREF= 14

TEXT(Camara de combustao 3D / combustivel:gas natural
TITLE

noxdbegin

ns 7

nr 3

jxdbc 1

jydbc 9

jzdbc 18

jsdbc 10

gn2ox 0.767

gn2pr 0.725

gco2pr 0.151

gh2opr 0.124

crkbug f

dbgnox f

noxdend

Variable declarations

REAL(CMOL,HMOL,NMOL,OMOL,O2MOL,N2MOL,CH4MOL,H2OMOL,COMOL,CO2MOL)

REAL(NOMOL,OHMOL,OXMOL,FUMOL,PRMOL)

REAL(CO2PRF,H2OPRF,N2OXF,N2PRF,O2OXF,CH4MFU)

** Massas moleculares

CMOL = 12.01115;HMOL=1.00797;NMOL=14.0067

OMOL = 15.9994;CH4MOL=CMOL+4.0*HMOL;O2MOL = 2.0*OMOL

N2MOL = 2.0*NMOL;H2OMOL=2.0*HMOL+OMOL

COMOL = CMOL+OMOL;CO2MOL= 2.0*OMOL+CMOL

NOMOL = NMOL+OMOL;OHMOL = OMOL+HMOL

```

*
** Fracoes de massa

O2OXF = 0.233;N2OXF = 0.767;CO2PRF= 0.151
H2OPRF= 0.124;N2PRF = 0.725;CH4MFU= 1.0
OXMOL = O2OXF*O2MOL + N2OXF*N2MOL
FUMOL = CH4MOL
PRMOL = CO2PRF*CO2MOL + H2OPRF*H2OMOL + N2PRF*N2MOL

** Constantes & inicializacao

REAL(GASCON,TFUEL,TADIAB,TOX,CPOX,CPFU,CPPR,STOIC,FSTOI)
REAL(SETMIN,HFU,HOX,HFUEL,WINOX,WINFU,RHOOX,RHOFU)
INTEGER(NS,NR)
GASCON=8314.0;PRESS0=1.E5
NS=7;NR=3
REAL(FLOWFU,FLOWOX,EQUIV,RINFU,AREAFU,AREAOX,PI)
PI=3.141592

```

** EQUIV is the equivalence ratio

```

EQUIV=1.1;WINFU =75
TFUEL = 278;TOX = 278.0
HFU = 4.19E7;STOIC=17.24
FSTOI=1./(1.+STOIC)
CPOX = 1050.0 ; CPPR = 1600.0 ; CPFU = 2130.0
HOX = CPOX*TOX;HFUEL= CPFU*TFUEL + HFU
RHOOX = PRESS0*OXMOL/(GASCON*TOX)
RHOFU = PRESS0*FUMOL/(GASCON*TFUEL)
rhoox
rhofu
TADIAB=(HFU+HFUEL+STOIC*HOX)/(CPPR*(1.+STOIC))
SETMIN=1.E-10

```

GROUP 3. X-direction grid specification

```

CARTES=F
** NX=42
nregx=3
iregx=1;grdpwr(x,8,0.68809265359,1.5)
*iregx=2;grdpwr(x,26,4.907,1)
iregx=2;grdpwr(x,26,4.94,1)
iregx=3;grdpwr(x,8,0.68809265359,0.5)
** REAL(XR,XAR)
** XULAST=2*PI
** XFRAC(1)=-42;XFRAC(2)=0.0238
** XR=(XULAST-XAR)/2;XAR=XULAST/3

```

GROUP 4. Y-direction grid specification

```

REAL(ROUTER,Rinfu);ROUTER=1.6475;RINFU=0.8
INTEGER(NYFU,NYOX);NYFU=12;NYOX=6;
NREGY=3
IREGY=1;GRDPWR(Y,-NYFU,RINFU,2)
IREGY=2;GRDPWR(Y,1,0.160,1)
IREGY=3;GRDPWR(Y,NYOX,ROUTER-Rinfu-0.160,0.5)

```

GROUP 5. Z-direction grid specification

```

NregZ=3;
iregz=1;GRDPWR(Z,2,0.24,1)
iregz=2;GRDPWR(Z,10,1.56,1)
iregz=3;GRDPWR(Z,-10,6,2)
*nz=20;zwlast=6

```

GROUP 7. Variables stored, solved & named

```

boolean(noxcal)
noxcal=f
IF(NOXCAL) THEN
+ STORE(P1,U1,V1,W1,KE,EP,MIXF,H1)
ELSE
+ SOLVE(P1,U1,V1,W1,MIXF,H1)
+ SOLUTN(P1,Y,Y,Y,P,P,P)
+ TURMOD(KEMODL)
ENDIF
STORE(TMP1,RHO1,OXID,PROD,FUEL,ENUT)
IF(NOXCAL) THEN
+ SOLVE(XNO,XN)
ELSE
+ STORE(XNO,XN)
ENDIF
STORE(XH,XO,XOH,XO2,CRKT,NOSR)

```

GROUP 8. Terms (in differential equations) & devices

```
TERMS(H1,N,Y,Y,N,Y,N)
```

GROUP 9. Properties of the medium (or media)

```

RHO1 = 3GASES ; RHO1A=FUMOL ; RHO1B=OXMOL ; RHO1C=PRMOL
TMP1 = SCRSEQ ; TMP1A=CPFU ; TMP1B=CPOX ; TMP1C=CPPR
tmp2a= FSTOI ; tmp2b=HFU

```

GROUP 10. Inter-phase-transfer processes and properties

GROUP 11. Initialization of variable or porosity fields

**** fuel flow rate for the solution domain**

```

AREAFU=0.5*XULAST*RINFU*RINFU
FLOWFU=RHOFU*WINFU*AREAFU
flowfu

```

**** stoichiometric air supply**

```
FLOWOX=STOIC*FLOWFU
```

**** actual air supply**

```

FLOWOX=EQUIV*FLOWOX
flowox
** AREAOX=0.5*XULAST*ROUTER*ROUTER-AREAFU
WINOX=85
** winox
FIINIT(W1) = WINFU; FIINIT(H1) = HFUEL
REAL(KEINF,EPINF,KEINOX,EPINOX)
KEINF=(0.05*WINFU)**2

```

```

EPINF=0.1643*KEINF**1.5/(0.1*RINFU)
KEINOX=(0.05*WINOX)**2
EPINOX=0.1643*KEINOX**1.5/(0.1*(ROUTER-RINFU))
FIINIT(KE)=KEINF;FIINIT(EP)=EPINF

```

GROUP 13. Boundary conditions and special sources

```

XCycle=T
IF(NOXCAL) THEN
+ PATCH(NOXSR,FREEVL,1,NX,1,NY,1,NZ,1,1)
+ COVAL(NOXSR,XNO,fixflu,GRND);COVAL(NOXSR,XN,GRND,GRND)
+ PATCH(FUELNOX,LOW,1,NX,1,NY/2+1,1,1,1,1)
+ COVAL(FUELNOX,XNO,RHOFU*WINFU,0.0)
+ COVAL(FUELNOX,XN,RHOFU*WINFU,0.0)
+ PATCH(AIRNOX,LOW,1,NX,NY/2+1,NY,1,1,1,1)
+ COVAL(AIRNOX,XNO,RHOOX*WINOX,0.0)
+ COVAL(AIRNOX,XN,RHOOX*WINOX,0.0)
ELSE
+ CONPOR(BLK1,0,CELL,1,NX,13,13,1,8)
+ CONPOR(BLK2,0,CELL,1,NX,14,NY,1,4)

```

* fuel inlet

```

+ PATCH(INLETF,LOW,1,NX,1,2,1,1,1,1)
+ COVAL(INLETF,P1,fixflu,RHOFU*WINFU)
+ COVAL(INLETF,W1,ONLYMS,WINFU)
+ COVAL(INLETF,H1,ONLYMS,HFUEL)
+ COVAL(INLETF,MIXF,ONLYMS,1.0)
+ COVAL(INLETF,KE,ONLYMS,KEINF)
+ COVAL(INLETF,EP,ONLYMS,EPINF)

```

* ar de diluicao

```

+ REAL(UIN,VIN,UIN,RHOIN);VIN=-5;UIN=5;RHOIN=1;
+ INLET(INLD,NORTH,6,9,ny,ny,6,9,1,LSTEP)
+ VALUE(INLD,P1,-RHOIN*VIN);VALUE(INLD,V1,VIN)
+ VALUE(INLD,U1,UIN)

```

* ar de diluicao

```

+ REAL(UINd,VIND,UIND,RHOIN);VINd=-5;UIND=5;RHOIN=1;
+ INLET(INLD2,NORTH,24,27,ny,ny,6,9,1,LSTEP)
+ VALUE(INLD2,P1,-RHOIN*VIND);VALUE(INLD2,V1,VIND)
+ VALUE(INLD2,U1,UIND)

```

* ar da pre-camara

```

+ REAL(UIN1,VIN1,RHOIN1);VIN1=-20;UIN1=15;RHOIN1=1.2;
+ INLET(INL1,NORTH,9,9,12,12,2,2,1,LSTEP)
+ VALUE(INL1,P1,-RHOIN1*VIN);VALUE(INL1,V1,VIN1)
+ VALUE(INL1,U1,UIN1)

```

* ar da pre-camara

```

+ REAL(UIN2,VIN2,RHOIN2);VIN2=-20;UIN2=20;RHOIN2=1.2;
+ INLET(INL2,NORTH,14,14,12,12,2,2,1,LSTEP)
+ VALUE(INL2,P1,-RHOIN2*VIN);VALUE(INL2,V1,VIN2)
+ VALUE(INL2,U1,UIN2)

```

* ar da pre-camara

```
+ REAL(UIN3,VIN3,RHOIN3);VIN3=-20;UIN3=15;RHOIN3=1.2;
+ INLET(INL3,NORTH,19,19,12,12,2,2,1,LSTEP)
+ VALUE(INL3,P1,-RHOIN3*VIN);VALUE(INL3,V1,VIN3)
+ VALUE(INL3,U1,UIN3)
```

* ar da pre-camara

```
+ REAL(UIN4,VIN4,RHOIN4);VIN4=-20;UIN4=20;RHOIN4=1.2;
+ INLET(INL4,NORTH,24,24,12,12,2,2,1,LSTEP)
+ VALUE(INL4,P1,-RHOIN4*VIN);VALUE(INL4,V1,VIN4)
+ VALUE(INL4,U1,UIN4)
```

* ar da pre-camara

```
+ REAL(UIN5,VIN5,RHOIN5);VIN5=-20;UIN5=20;RHOIN5=1.2;
+ INLET(INL5,NORTH,29,29,12,12,2,2,1,LSTEP)
+ VALUE(INL5,P1,-RHOIN5*VIN);VALUE(INL5,V1,VIN5)
+ VALUE(INL5,U1,UIN5)
```

* ar da pre-camara

```
+ REAL(UIN6,VIN6,RHOIN6);VIN6=-15;UIN6=20;RHOIN6=1.2;
+ INLET(INL6,NORTH,34,34,12,12,2,2,1,LSTEP)
+ VALUE(INL6,P1,-RHOIN6*VIN);VALUE(INL6,V1,VIN6)
+ VALUE(INL6,U1,UIN6)
```

* ar primario

```
+INLet(ina,LOW,1,NX,3,4,1,1,1,1)
+ value(ina,P1, RHOOX*60)
+ value(ina,u1, 45)
+ value(ina,W1 , 55)
+ value(ina,H1 , HOX )
+ value(ina,MIXF, 0.0 )
+ value(ina,KE,KEINOX)
+ value(ina,EP,EPINOX)
```

* outlet boundary

```
+ PATCH(OUTLET,CELL,1,NX,1,NY,NZ,NZ,1,1)
+ COVAL(OUTLET,P1 , FIXP , 0.0)
+ COVAL(OUTLET,H1 ,ONLYMS,SAME)
+ COVAL(OUTLET,MIXF,ONLYMS,SAME)
+ COVAL(OUTLET,FUEL,ONLYMS,SAME)
```

* wall boundary

```
+ WALL(WFNN,NORTH,1,NX,NY,NY,1,NZ,1,1)
ENDIF
```

GROUP 15. Termination of sweeps

```
FSWEEP=1;LSWEEP=2950
REAL(MDOT);MDOT=FLOWFU+FLOWOX
RESREF(P1)=MDOT*1.E-12
RESREF(W1)=(FLOWFU*WINFU+FLOWOX*WINOX)*1.E-12
RESREF(V1)=RESREF(W1)
```

```

RESREF(H1)=(FLOWFU*HFUEL+FLOWOX*HOX)*1.E-12
RESREF(KE)=RESREF(P1)*KEINF;RESREF(EP)=RESREF(P1)*EPINF
RESREF(MIXF)=FLOWFU*1.E-12
RESREF(XNO)=RESREF(P1);RESREF(XN)=RESREF(P1)
LITER(P1 )=40

```

```
selref=t;resfac=1e-2
```

GROUP 17. Under-relaxation devices

```

REAL(DTF);DTF=ZWLAST/WINOX/NZ
real(klin);klin=0.4
RELAX(P1 ,LINRLX,klin)
RELAX(u1,FALSDT,0.1*DTF*klin)
RELAX(V1,FALSDT,0.1*DTF*klin)
RELAX(W1,FALSDT,DTF*klin)
RELAX(KE,FALSDT,DTF*klin);RELAX(EP,FALSDT,DTF*klin)
RELAX(H1,FALSDT,10.*DTF*klin);RELAX(MIXF,FALSDT,10.*DTF*klin)
RELAX(RHO1,LINRLX,0.1*klin);RELAX(XNO,FALSDT,DTF*0.25)

```

GROUP 18. Limits on variables or increments to them

```

VARMIN(TMP1)=TFUEL
* VARMAX(TMP1)=3000
VARMIN(p1)=-1e4; VARMAX(P1)=1e4
VARMAX(OXID)=1.0;VARMIN(OXID)=1e-12
VARMAX(PROD)=1.0;VARMIN(PROD)=1e-12
VARMAX(MIXF)=1.0;VARMIN(MIXF)=0.0
VARMAX(FUEL)=1.0;VARMIN(FUEL)=1e-12
*VARMAX(ke)=1e3;VARMAX(ep)=1e4
VARMAX(RHO1)=50.0;VARMIN(RHO1)=0.001
VARMAX(XNO )=1.0;VARMIN(XNO)=0.0
VARMAX(XN)=1.0;VARMIN(XN)=0.0

```

GROUP 19. Data communicated by satellite to GROUND

```
LSG63=NOXCAL
```

GROUP 22. Spot-value print-out

```

IXMON=1;IYMON=4;IZMON=4
NPRMON=1

```

GROUP 23. Field print-out and plot control

```

ITABL=3;IPLTL=LSWEEP
IPLTF=FSWEEP;YZPR=T;NPRINT=LSWEEP
NZPRIN=1;NUMCLS=5;NPLT=5
IF(NOXCAL) THEN
+ OUTPUT(XNO,Y,Y,Y,Y,Y);OUTPUT(XN,Y,Y,Y,Y,Y)
ELSE
+ OUTPUT(XH,N,N,N,N,N,N);OUTPUT(XO,N,N,N,N,N,N)
+ OUTPUT(XOH,N,N,N,N,N,N);OUTPUT(XO2,N,N,N,N,N,N)
+ OUTPUT(CRKT,N,N,N,N,N,N)
+ OUTPUT(XNO,N,N,N,N,N,N);OUTPUT(XN,N,N,N,N,N,N)
+ OUTPUT(NOSR,N,N,N,N,N,N)
+ OUTPUT(tmp1,y,y,y,y,y,y)
ENDIF

```

GROUP 24. Dumps for restarts

```
** IF(NOXCAL) THEN
RESTRT(ALL)
** fiinit(pl)=1e0
** fiinit(u1)=10
** fiinit(w1)=10
** fiinit(ke)=100
** fiinit(ep)=1000

** LSWEEP=2250
** ENDIF
** FIINIT(XNO)=READFI;FIINIT(XN)=READFI
** FIINIT(XH)=READFI;FIINIT(XO2)=READFI
** FIINIT(XO)=READFI;FIINIT(XOH)=READFI
** FIINIT(CRKT)=READFI
TSTSWP=-1;DENPCO=f
** DISTIL=t
** IF(NOXCAL) THEN
** EX(P1 )=5.065E+01;EX(V1 )=2.814E-02;EX(W1 )=1.095E+01
** EX(KE )=7.682E-01;EX(EP )=2.113E+02;EX(H1 )=6.619E+06
** EX(NOSR)=4.996E+03;EX(CRKT)=1.967E+03;EX(FUEL)=7.205E-02
** EX(PROD)=7.303E-01;EX(OXID)=1.977E-01;EX(RHO1)=7.279E-01
** EX(TMP1)=2.059E+03;EX(MIXF)=1.121E-01
** ELSE
** EX(P1 )=5.065E+01;EX(V1 )=2.814E-02;EX(W1 )=1.095E+01
** EX(KE )=7.682E-01;EX(EP )=2.113E+02;EX(H1 )=6.619E+06
** EX(FUEL)=7.205E-02;EX(PROD)=7.303E-01;EX(OXID)=1.977E-01
** EX(RHO1)=7.279E-01;EX(TMP1)=2.059E+03;EX(MIXF)=1.121E-01
** ENDIF
STOP
```