



EFEITOS DA DIVERGÊNCIA DOS RAIOS DE LUZ NA ANÁLISE TOMOGRÁFICA DE CHAMAS

Fernando de Souza Costa

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, INPE
Caixa Postal 01 - Cachoeira Paulista – 12630-000 – SP

Armando Caldeira Pires

Instituto Superior Técnico, Departamento de Engenharia Mecânica
1096 Lisboa Codex, Portugal

***Resumo.** É implementado um novo algoritmo algébrico para reconstrução tomográfica a ser empregado como ferramenta de diagnóstico em processos reativos com chamas axissimétricas, utilizando-se imagens obtidas de câmeras digitais. São realizados experimentos numéricos, comparando-se as reconstruções obtidas a partir de projeções analíticas de uma função radial pré-definida, considerando-se diferentes distâncias do objeto à câmara digital. Em seguida são apresentadas reconstruções obtidas a partir das emissões dos radicais CH e C₂ de chamas axissimétricas. A técnica algébrica desenvolvida permite uma melhor resolução em relação aos métodos usuais aplicados na inversão da integral de Abel. Outros aspectos considerados foram o estudo da influência da resolução da imagem sobre a qualidade da reconstrução, a eliminação de ruídos da imagem e o estudo dos efeitos do alisamento das projeções. O método desenvolvido permite a correção total dos efeitos da divergência dos raios de luz nos casos de chamas esféricas e faz a correção de grande parte dos efeitos da divergência dos raios de luz no caso de chamas axissimétricas.*

***Palavras-chave:** Tomografia, Chamas, Diagnóstico, Divergência*

1. INTRODUÇÃO

A motivação para o presente trabalho é a aplicação de uma nova técnica de inversão tomográfica para o estudo de escoamentos reativos, considerando-se a divergência dos raios de luz emitidos pela chama. A eficiência do método é avaliada através de simulações numéricas de chamas com simetria radial e, em seguida, aplicado à reconstrução da distribuição dos radicais CH e C₂ em chamas de um combustor LPP, com potenciais aplicações em turbinas aeronáuticas.

Os gases de combustão, incluindo UHC, NO_x, SO_x e CO_x, afetam bastante o meio ambiente. Em turbinas a gás aeronáuticas, as exigências de preservação da camada de ozônio da estratosfera, aliadas às limitações da tecnologia convencional, têm incentivado o desenvolvimento de tecnologias para a redução das emissões de NO_x. Neste contexto, foram feitos progressos consideráveis nos últimos 20 anos, seja pela indústria norte-americana (e.g.

Bahr, 1995), seja a nível europeu (e.g. Joos e Pellischeck, 1995), possibilitando identificar conceitos com maior probabilidade de sucesso na redução do impacto ambiental das aeronaves. Espera-se que a tecnologia de pré-mistura e pré-vaporização do combustível com pós-queima e excesso de ar (LPP) permita reduções de cerca de 90% nos níveis de NO_x, em relação à tecnologia atual.

Este trabalho dá continuação à análise tomográfica da zona de reação em câmaras de combustão de turbinas a gás (Costa et al., 1998). É apresentado um método para caracterização experimental da radiação de chamas, baseado na aquisição da radiação emitida pelos radicais livres CH e C₂, através de um sensor CCD, no interior de um modelo físico de simulação de uma turbina a gás tipo LPP. A imagem projetada por estas espécies químicas é adquirida a partir da coleção de luz monocromática nos comprimentos de onda característicos, respectivamente 431nm e 514nm. Estas projeções são posteriormente tratadas por um algoritmo de reconstrução tomográfica de forma a obter-se a distribuição tridimensional da emissão radiativa destes compostos. Os radicais são utilizados como indicadores da zona de reação.

2. ALGORITMO DE RECONSTRUÇÃO TOMOGRÁFICA

O primeiro passo na aplicação de técnicas de reconstrução tomográfica para o estudo de sistemas de combustão com simetria radial consiste na aplicação da inversa da transformada de Abel. A expressão clássica da fórmula de inversão da integral de Abel é dada pela equação (1) a seguir e é válida para a reconstrução de objetos axissimétricos ou esférico-simétricos. Hildebrand (1965) apresenta técnicas de obtenção da equação (1).

$$f(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{\infty} \frac{\partial P(p)}{\partial p} (p^2 - r^2)^{-1/2} dp \quad (1)$$

A determinação da transformada inversa de Abel impõe o cálculo numérico de uma integral e de uma derivada, uma vez que para imagens de chama adquiridas a partir de câmaras CCD, a expressão exata da função de projeção $P(p)$ não é conhecida. A variável p é a coordenada de cada pixel. A função $f(r)$ reconstruída corresponde proporcionalmente às concentrações de radicais na chama. A implementação da inversão de Abel produz erros devidos ao cálculo numérico da integral e da derivada. Existem na literatura algumas soluções que melhoram a qualidade da solução numérica, como os métodos de Nestor-Olsen e de Barr (Correia et al., 1997). Estes métodos, apesar de apresentarem resultados qualitativamente superiores à inversão da transformada de Abel, introduzem erros, com uma amplificação cumulativa para a região com coordenada radial próxima ao eixo de simetria. A utilização das técnicas de reconstrução algébrica (TRA) possibilitam ultrapassar essas restrições, conforme descrito por Correia et al. (1997).

Técnicas de Reconstrução Algébrica (TRA)

Nos modelos usando TRA é considerado que cada pixel da câmara CCD integra a radiação emitida pela chama ao longo de cada linha de visada, conforme se mostra no esquema da Figura 1. A região da chama é dividida em anéis concêntricos de mesma espessura, sendo a reconstrução feita da camada mais externa até a mais interna, em um método conhecido como *onion peeling* (Hughey e Santavicca, 1982). Considera-se que em cada anel concêntrico a radiação emitida seja constante e uniforme e que os raios de luz emitidos pela chama sejam paralelos e de mesma espessura, com a câmara posicionada a uma distância infinita do objeto.

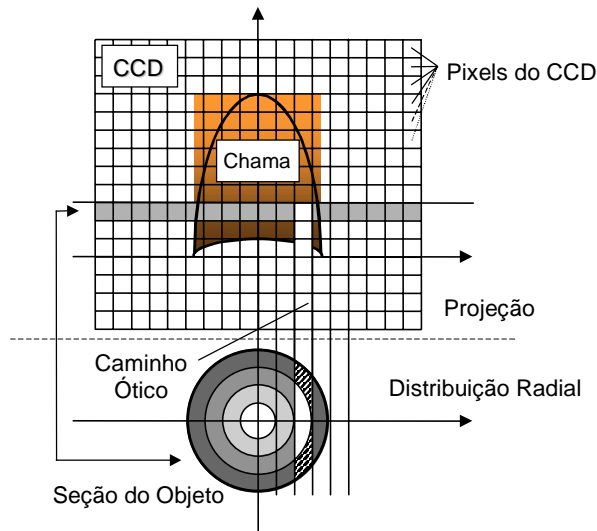


Figura 1 – Modelo de reconstrução tomográfica por raios paralelos.

No presente modelo, esquematizado na Figura 2, considera-se que a câmera esteja a uma distância finita do objeto e, conseqüentemente, os raios de luz são divergentes a partir de cada ponto de emissão. Em decorrência, os anéis concêntricos em que se decompõe o objeto têm espessura variável, contrariamente ao caso de raios paralelos. Considera-se também que em cada anel concêntrico a radiação emitida seja constante e uniforme. Desta forma, do mesmo modo que na técnica de raios paralelos, a intensidade luminosa no perfil central pode ser conhecida da periferia para o interior.

A reconstrução do pixel da periferia ρ_1 é dada pela divisão do pixel p_1 pela área a_{11} . Conhecido ρ_1 e conhecido $a_{21} = a'_{21} + a''_{21}$ e a_{22} calcula-se ρ_2 : $\rho_2 = (p_2 - a_{21} \cdot \rho_1) / a_{22}$ e assim consecutivamente. Este algoritmo é efetuado em cada linha da matriz \mathbf{P} de pixels a reconstruir. A reconstrução da chama exige então a construção da matriz das áreas \mathbf{A} e a resolução de um sistema de equações. A matriz das áreas \mathbf{A} é triangular inferior de dimensão $n \times n$ em que n é o número de colunas da projeção a reconstruir.

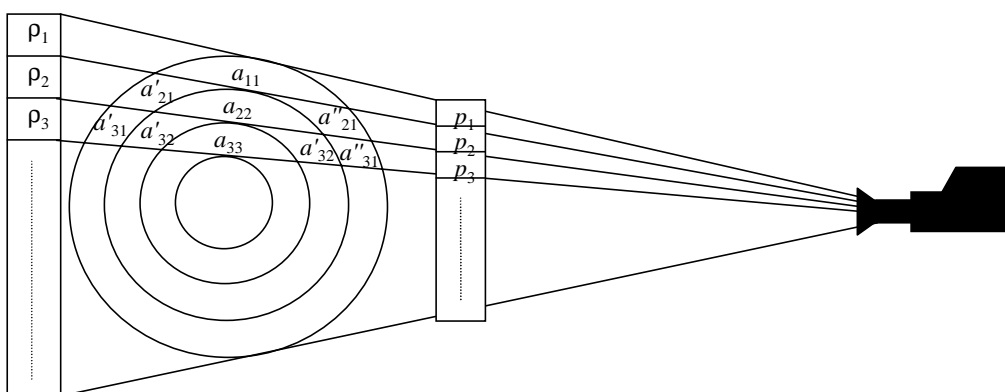


Figura 2 – Modelo de reconstrução tomográfica para raios divergentes.

Após obtida a matriz \mathbf{A} , a reconstrução é realizada linha por linha da projeção, correspondendo cada linha a um vetor \mathbf{P} , cujos elementos são ilustrados na Figura 2. Como resultado é obtido um vetor $\boldsymbol{\rho}$, que corresponde à reconstrução de uma linha de imagem.

$$2[\mathbf{A}][\mathbf{p}] = [\mathbf{P}] \quad (2)$$

A resolução do sistema de equações é direto e envolve reduzido esforço computacional uma vez que a matriz \mathbf{A} é triangular inferior. Para testar o algoritmo escolheu-se a função radial $f(r)$, dada por

$$f(r) = \begin{cases} (t/m)r & , 0 < r < m \\ -(t/m)r + 2t & , m < r < 2m \\ (t/m)r - 2t & , 2m < r < 3m \\ -(t/m)r + 4t & , 3m < r < 4m \end{cases} \quad (3)$$

onde $t = 0.25$ e $m = 20$. A projeção de $f(r)$ sobre um píxel a uma distância p da origem é obtida da expressão

$$P(p) = 2 \int_x^{\infty} \frac{f(r)rdr}{\sqrt{r^2 - p^2}} \quad (4)$$

cuja fórmula de inversão é a equação (1). No caso da função linear $f(r) = ar + b$, obtém-se

$$P(p) = (ar + b)(r^2 - p^2)^{1/2} + ap^2 \ln\left(\frac{r + (r^2 - p^2)^{1/2}}{p}\right) \quad (5)$$

Cada função radial requer a determinação da resolução adequada à sua reconstrução tomográfica. Observa-se uma boa resolução para a função testada com 100 píxeis.

Caso não sejam considerados os efeitos da divergência dos raios de luz, são gerados erros de reconstrução significativos. A figura (4) mostra os resultados obtidos ao se adotar um algoritmo de reconstrução considerando raios paralelos sobre projeções de $f(r)$ obtidas a diferentes distâncias, para uma resolução de 100 píxeis.

As projeções ou imagens de $f(r)$ mostradas à esquerda na fig. (3) variam com a distância da câmara. Observa-se que quanto maior a distância da câmara, menores são os efeitos da divergência dos raios de luz, melhorando-se a reconstrução tomográfica. A fim de comparar os resultados obtidos de uma forma sistemática, definiu-se o erro quadrático médio da reconstrução paralela pela expressão

$$erro = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(y_i - f(r_i))^2}{N-1} \right]^{1/2} \quad (6)$$

onde y_i são os valores nos pontos r_i obtidos fazendo-se uma reconstrução com raios paralelos e N é o número de píxeis considerado. O erro médio quadrático é mostrado na figura (4) para a faixa dos píxeis de 1 a 40 e para a faixa dos píxeis de 41 a 80. Pelo gráfico verifica-se que o erro decai inversamente com a distância entre a câmara e o objeto. A uma distância igual a 200, o erro médio quadrático dos píxeis de 41 a 80 é superior a 0,03, equivalendo a 25 % do valor médio de $f(r) = 0,125$.

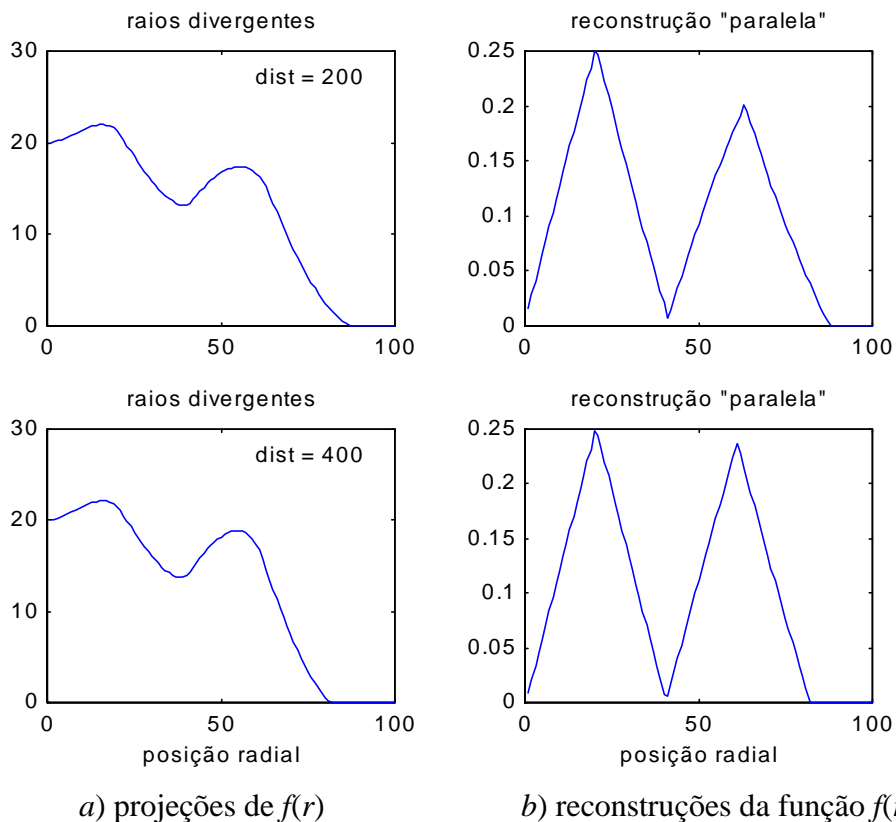


Figura 3 – Efeitos da distância do objeto sobre reconstruções de $f(r)$ com raios paralelos.

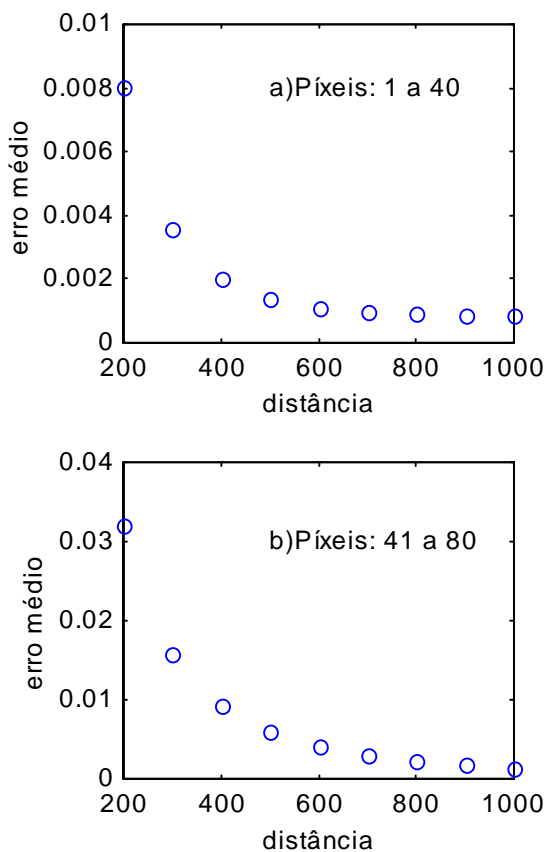


Figura 4 – Erro médio quadrático para reconstruções com raios paralelos.

3. MÉTODOS E TÉCNICAS EXPERIMENTAIS

A figura 5 apresenta um desenho esquemático do modelo utilizado no estudo de novas câmaras de combustão, o qual compreende uma pré-câmara de vaporização e de mistura do combustível e do ar, e a câmara de combustão propriamente dita onde ocorre a reação química. O ar de reação pode ser alimentado com diversos níveis de rotação, e pré-aquecido até 480K. A pré-câmara de mistura está envolvida por um tubo de Pirex para permitir acesso ótico ao escoamento. Na região de entrada da câmara de combustão existe um cone divergente a 54° para facilitar a estabilização da chama. A câmara de combustão é constituída por um tubo de quartzo e por um tubo de aço, conforme descrito por Costa et al. (1998).

O projeto desta câmara foi condicionado pelas limitações da tecnologia de pré-mistura e pré-vaporização do combustível, especificamente por questões associadas a: *i*) auto-ignição; *ii*) retorno da chama na câmara de pré-mistura; *iii*) promoção de instabilidades de chama para misturas muito pobres e/ou instabilidades acústicas para razões de equivalência moderadas (Anacleto, 1993, Anacleto e Heitor, 1997).

As chamas foram obtidas pela utilização de propano comercial (C₃H₈-95%) e ar aquecido a 130°C, para duas razões de equivalência, $\phi = 0,6$ e $0,8$, e dois ângulos de rotação (“swirl”) do ar de combustão, 0° e 40°. A Tabela 1 apresenta as condições experimentais referentes aos diferentes escoamentos estudados.

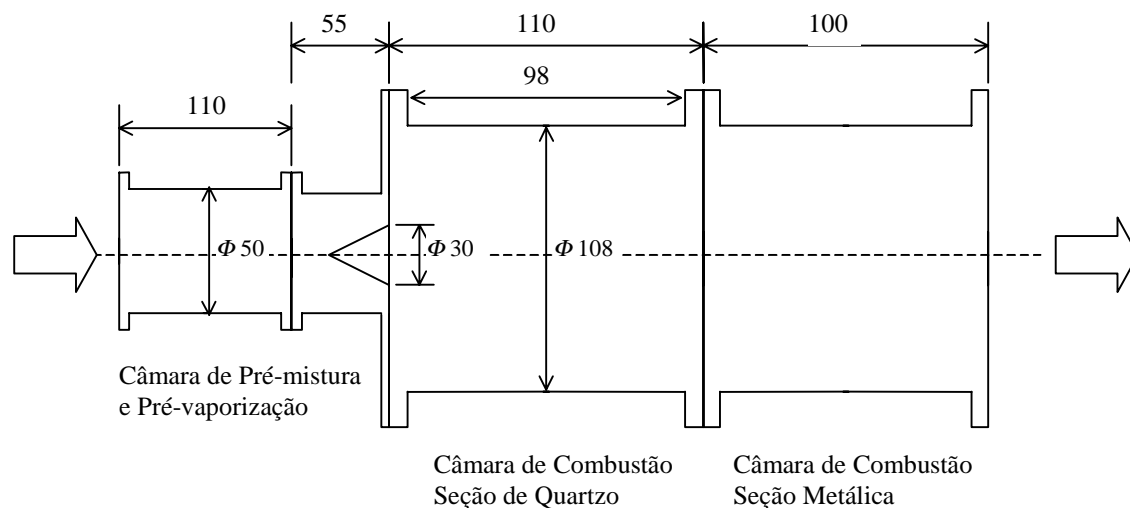


Figura 5 - Desenho Esquemático da Câmara de Combustão

As emissões dos radicais CH e C₂ das chamas foram caracterizadas através de imagens obtidas por uma câmara de vídeo, com resposta espectral entre 400 e 1100nm, através da utilização de filtros comerciais. Estas imagens foram depois submetidas a um tratamento de reconstrução tomográfica do campo tridimensional de emissão de cada um dos dois radicais livres analisados, e relacionados entre si de forma a obter-se o campo tridimensional da razão C₂/CH. A Figura 6 mostra um esquema do sistema de aquisição de imagens.

Tabela 1 - Condições Experimentais dos Escoamentos

Teste	Q _{ar} (g/s)	Q _{fuel} (g/s)	Swirler (°)	ϕ
1	42	1.22	0	0,8
2	42	1.22	40	0,8
3	42	1.02	0	0,6
4	42	1.02	40	0,6

Além da análise das imagens monocromáticas, em trabalhos anteriores foram apresentados resultados sobre os campos de temperatura turbulenta e da concentração média das principais espécies químicas presentes no escoamento, caracterizado respectivamente através da utilização de termopares de fios finos de Pt/Pt-13%Rh e da análise dos gases de combustão coletado por uma sonda de aspiração (Anacleto, 1993, Anacleto e Heitor, 1997).

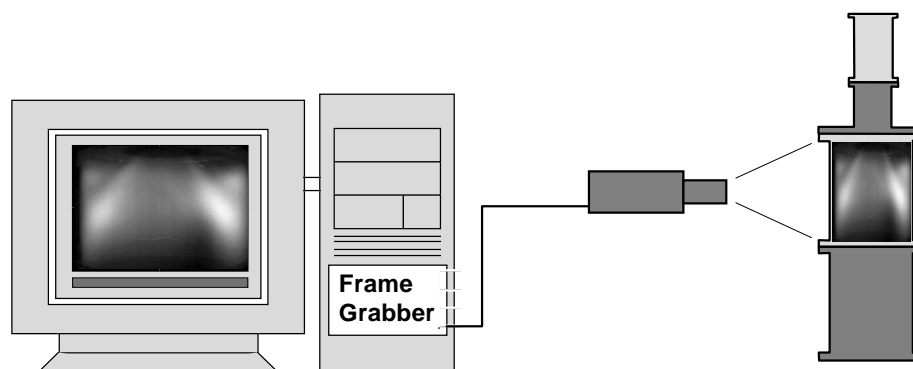


Figura 6 - Instalação Experimental para aquisição de imagem.

Antes da reconstrução tomográfica, as imagens capturadas necessitaram de um tratamento prévio, devido à presença de ruídos e à descontinuidade nos valores dos píxeis, inteiros de 0 a 255. A figura 7 mostra o resultado ao se filtrar e alisar uma linha de uma imagem. Foi utilizado um filtro de medianas, considerando-se uma matriz 3x3 ao redor de cada píxel. O fator de alisamento adotado foi $als = 4$, ou seja, foi feita uma média entre valores dos 4 píxeis à direita e à esquerda de cada píxel.

Para fins de comparação e estudo dos efeitos da divergência dos raios, foram feitas reconstruções utilizando-se diferentes distâncias da câmara.

A figura 8 mostra reconstruções tomográficas da emissão do radical CH no teste 2 para distâncias equivalentes a 2 e 3 vezes a largura da imagem. É difícil distinguir visualmente a diferença entre os dois casos.

A figura 9 mostra a reconstrução do radical C_2 para o caso paralelo e para o caso divergente, considerando-se agora a distância correta da câmara, correspondente a 4 vezes a largura da imagem. Como a visualização da imagem e da reconstrução não é boa, vai-se selecionar uma das linhas destas imagens e comparar os resultados.

A figura 10 mostra as diferenças (Δ) nas reconstruções tomográficas da emissão do radical C_2 no teste 2, para píxeis da linha 100, entre reconstruções com raios paralelos e com raios divergentes. Pode-se notar que as diferenças aumentam para píxeis afastados da origem, correspondendo a abcissas com valores próximos de zero, similarmente ao caso da função $f(r)$ pré-definida. Isto decorre do fato de que quanto mais longe do centro da chama observada maior o ângulo de divergência. Os valores máximos de intensidades diferem de mais de 10%, distorcendo o resultado final.

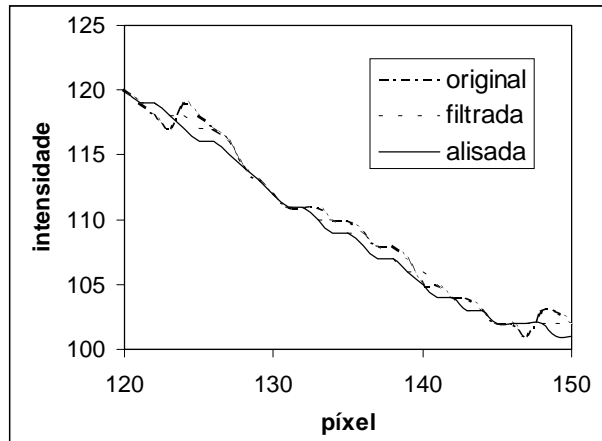


Figura 7 – Efeitos do filtro e do alisamento sobre a intensidade dos píxeis ($als=4$).

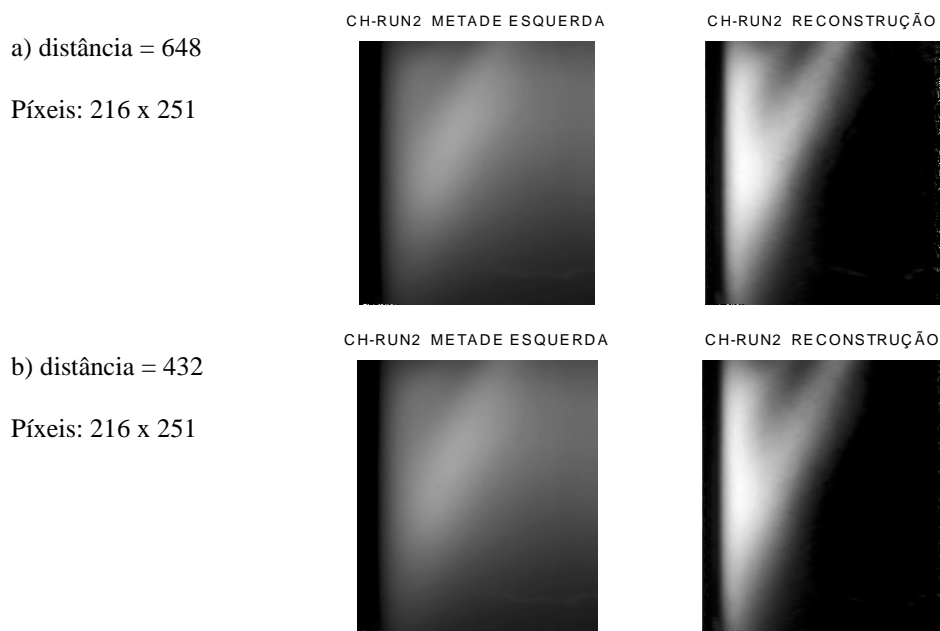


Figura 8 – Efeitos da divergência na tomografia do radical CH (teste 2).

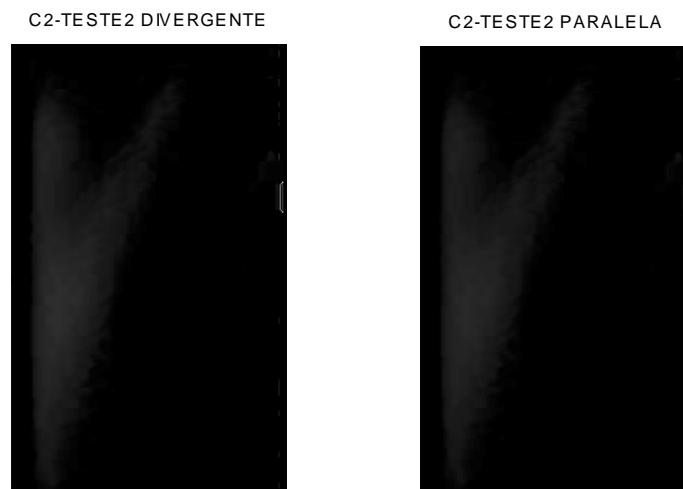


Figura 9 – Diferenças na reconstrução tomográfica da emissão do radical C2 para o teste 2, considerando raios paralelos e raios divergentes.

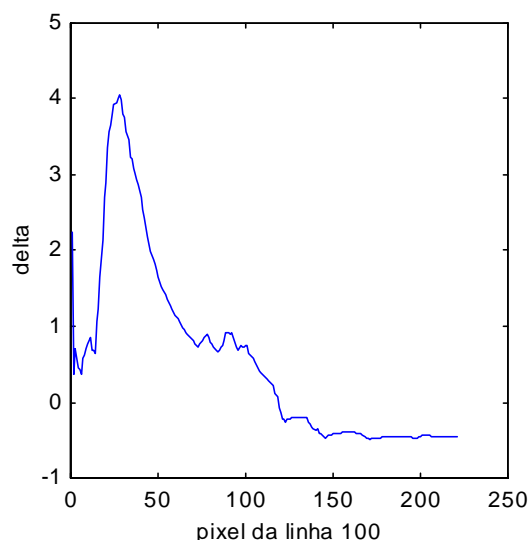


Figura 10 – Diferenças nas reconstruções tomográficas da emissão do radical C_2 no teste 2, para pixels da linha 100, considerando raios paralelos e raios divergentes.

4. CONCLUSÕES

Experimentos numéricos permitiram comparar reconstruções tomográficas obtidas a partir de projeções analíticas de uma função radial pré-definida, considerando-se diferentes distâncias do objeto à câmara digital. Observou-se que a não consideração dos efeitos da divergência dos raios de luz pode causar erros significativos, de mais de 25 % em certas regiões da reconstrução, a depender da distância da câmara até a chama. Comparando-se os efeitos para uma dada distância, verificou-se que apesar dos erros produzidos pelo uso de um algoritmo de raios paralelos na reconstrução tomográfica dos radicais CH e C_2 , a razão CH/ C_2 no combustor LPP apresenta erro pequeno em virtude do cancelamento de grande parte dos erros produzidos por cada espécie. O método desenvolvido permite a correção total dos efeitos da divergência dos raios de luz nos casos de chamas esféricas e faz a correção de grande parte dos efeitos da divergência dos raios de luz no caso de chamas axissimétricas, especialmente no caso de chamas planas radiais. Deve-se observar, no entanto, que outros efeitos, como a curvatura dos raios de luz causada pelo gradiente de densidade da chama, refração e difração da luz pela ótica da câmara, necessitariam ser avaliados para uma correção total das distorções existentes.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro da FAPESP, pelo projeto temático 96/10310/0, e ao CNPq.

REFERÊNCIAS

- Anacleto, P., 1993, "Análise Experimental de uma Câmara de Combustão Axissimétrica com Pré-vaporização e Pré-mistura de Reagentes", Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal.
- Anacleto, P. & Heitor, M.V., 1997, Câmaras de Combustão com baixa Produção de Poluentes para Turbinas a Gás, *Ingenium*, **15**, pp. 66-70.
- Bahr, D., 1995, Aircraft turbine engine NOx emission abatement, *Unsteady Combustion*, eds. F. Culick, M.V. Heitor e J. Whitelaw, Kluwer Academic Publ., NATO ASI Series, Vol. E306, pp. 243-264.
- Chain, R.S., Shepard, C.G.W. and Whitelaker, M., 1976, A Note on Carbon Monoxide with Particular Reference to Gas Turbine Combustion, *Comb. Sci. Tech.*, **12**, pp. 245-247.
- Chou, T. e Patterson, D.J., 1995, In-Cylinder Measurement of Mixture Maldistribution in a L-Head Engine, *Combustion and Flame*, 101(1/2), pp. 45-57.
- Correia, D.P., Caldeira-Pires, A. , Ferrão, P., 1997, 3D Flame Temperature Measurements using a Combined Tomography/Radiation-Extinction-Model Technique. Submetido à *Combustion and Flame*.
- Costa, F.S., Caldeira-Pires, A., Anacleto, P., Carvalho-Jr, J.A., 1998, Análise de Chamas por Tomografia: Caracterização de Turbinas a Gás LPP, *Anais do VII Encit*, Rio de Janeiro, Vol. 1, pp. 138-142.
- Hildebrand, F.B., 1965, *Methods of Applied Mathematics*, Prentice-Hall, Inc., N.J., EUA.
- Hughey, B.J., Santavicca, D.A., 1982, A Comparison of Techniques for Reconstructing Axisymmetric Reacting Flow Fields from Absortion Measurements, *Combustion Science and Technology*, Vol. 29, pp 167-190.
- Joos, A. e Pelischeck, G., 1995, Low Emission Combustor Technology, *Advances in Engine Technology*, Ed. Dunker, Willy & Sons Ltd, pp. 105-149.

EFFECTS OF LIGHT RAYS DIVERGENCE ON TOMOGRAPHIC RECONSTRUCTION OF FLAMES

Fernando de Souza Costa

Laboratório Associado de Combustão e Propulsão, INPE, SP, Brazil

Armando Caldeira Pires

Departamento de Engenharia Mecânica, IST, 1096 Lisboa Codex, Portugal

Abstract. *It is implemented a new algorithm for tomographic reconstruction of axisymmetric flows to be employed as a diagnostic tool of reactive processes, by using images, or projections, obtained from digital cameras. Numerical experiments are performed, comparing reconstructions obtained from analytical projections of a pre-defined function, considering different distances from the object to the camera. Reconstructions of CH and C2 radical emissions from images of axisymmetric flames are presented next. The new algebraic technique allows a better resolution compared to the usual methods utilized for inversion of the Abel Integral. Several aspects were considered for the improvement of reconstruction quality, such as number of pixels, noise reduction and smoothing. The new method, an onion peeling technique for divergent rays, allows a complete correction of the rays divergence effects for spherical and planar radial flames and a significant correction of the rays divergence effects for axisymmetric flames.*

Keywords: *Tomography, flames, diagnostics, divergence.*