

Sistema Avançado de Otimização da Queima de Combustíveis Fósseis em Termelétricas - SAO TERMELÉTRICA

A. Caldeira-Pires, UnB, A. C. P. Brasil Jr., UnB,
C. G. Veras, UnB, J. V. Gallo, ELN, C. Antunes, ELN

1) Resumo – Este projeto teve como objetivo geral a otimização do processo de combustão de uma câmara de combustão com tecnologia LPP de turbinas estacionárias. Esta otimização foi efetuada, através de três etapas distintas: 1) a caracterização da influência dos parâmetros geométricos do queimador típico de unidades termelétricas da ELETRONORTE nos processos de mistura turbulenta e de oxidação do combustível fóssil; 2) a minimização da formação de NO_x, com a identificação da cinética química da formação de óxidos de nitrogênio, através dos principais mecanismos relevantes (o térmico e o prompt) na queima de combustíveis fósseis; e 3) o desenvolvimento, em escala laboratorial, dos procedimentos para otimização do processo de combustão e para a determinação indireta da formação de NO_x, através de técnicas óticas de diagnóstico e monitoramento.

Palavras-chave— combustão, NO_x, emissão de poluentes, turbinas estacionárias LPP, termelétrica.

I. INTRODUÇÃO

A Indústria Brasileira da Geração de Energia Elétrica está enfrentando novos desafios impostos pela elevada competitividade a um custo mínimo, e pelos cada vez mais exigentes regulamentos de Proteção Ambiental no País e no estrangeiro. Os limites de eficiência na queima dos combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica, no caso das termelétricas, têm sido estendidos de forma a permitir uma **otimização multi-objetivo**, especificamente à **maximização da eficiência da combustão** aliada a uma **minimização da formação de poluentes**.

Assim é que, como é fortemente conhecida, a política dos países com os quais o Brasil mantém suas principais relações comerciais tende a regular crescentemente a reciclagem de produtos e o teor das emissões dos poluentes relacionadas aos processos industriais de queima de combustíveis fósseis. Em particular, os regulamentos americanos e euro-

peus estão se tornando ou ficarão mais severos para a quantidade de NO_x que pode ser emitido através de sistemas de combustão.

De uma forma geral, a indústria de processos que possui um forte componente econômico baseado na queima de combustíveis fósseis tem atuado de forma empírica para assegurar um controle da combustão e para reduzir a quantidade de NO_x produzida. Medidas secundárias tem sido usadas após a queima para alcançar mais baixos níveis de emissões de NO_x, como por exemplo a denitrificação através de redução de amônia. Porém os investimentos e custos de operação requeridos poderiam afetar a competitividade no mercado mundial. Outras soluções, baseadas na combustão com ar enriquecido com oxigênio implicam em novas condições de operação, o que condiciona significativamente um processo já existente, além do custo do oxigênio refletir-se significativamente em aumentos do custo do produto.

Uma solução alternativa consiste na implementação de medidas primárias de redução de NO_x, o que implica no uso de tecnologias de queima que adaptem os queimadores atuais de forma a limitar a quantidade de NO_x formada durante a combustão. É importante notar que os investimentos envolvidos seriam modestos, e o custo operacional desprezível. Em simultâneo, serão necessárias tecnologias avançadas de monitoração do NO_x formado dentro dos ambientes de combustão, o que permitirá intervenções com menor tempo de resposta e minimizará a formação de NO_x no local de formação.

É neste quadro de desenvolvimento tecnológico que o projeto **SAO TERMELÉTRICA** se inseriu, e que foi caracterizado por dois **objetivos** principais: **I) a otimização do processo de queima de combustíveis fósseis em um queimador típico das unidades termelétricas da Eletronorte; e II) a minimização da formação de NO_x neste tipo de queimador.**

O primeiro objetivo incluiu a caracterização da influência dos parâmetros geométricos e de escoamento a jusante da chama, mais especificamente os parâmetros relativos à saída de combustível e de ar primário de combustão. O estudo utilizou técnicas óticas de diagnóstico baseadas tomografias por laser do escoamento a jusante do queimador.

Em paralelo, o segundo objetivo caracterizou os mecanismos de formação de NO_x, em conjunto com a identificação das espécies químicas que estejam diretamente relacionadas à sua produção e que emitam na região UV e visível do espectro. A influência dos parâmetros geométricos e de

Este trabalho foi apoiado pela Eletronorte, pela Fundação da Universidade de Brasília e pela FINATEC.

A. Caldeira-Pires trabalha no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (email: armandcp@unb.br),

A. C. P. Brasil Jr. trabalha no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (email: brasiljr@unb.br),

C. G. Veras trabalha no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (email: gurgel@unb.br)

J. V. Gallo trabalha na Eletronorte (email: gallo@eln.gov.br),

C. Antunes trabalha na Eletronorte (email: cidhorta@eln.gov.br).

escoamento na produção de NOx foi igualmente avaliada. Esta etapa do estudo também utilizou técnicas óticas de medida, baseadas na quantidade de luz emitida pelas espécies químicas relacionadas à formação do óxido de nitrogênio. Algoritmos de reconstrução tomográfica foram aplicados às imagens adquiridas de forma a caracterizar quali- e quantitativamente a produção de NOx no espaço tridimensional. Ambos os objetivos trataram da aplicação de técnicas de diagnóstico não intrusivas à otimização de chamas de combustíveis fósseis.

De fato, um ponto de importância estratégica da proposta nos seus dois objetivos foi o seu potencial de contribuição no desenvolvimento de um sensor de baixo custo para o monitoramento do processo de combustão em termelétricas, o que permitiu a aprovação de um novo projeto no Ciclo 2003-2004.

II. METODOLOGIA

O Projeto foi dividido em três etapas, iniciando-se com uma atividade de definição dos modelos físicos a serem simulados em computador e reproduzidos em laboratório. As duas etapas seguintes envolveram, respectivamente, a análise do conjunto queimador identificado através da simulação da cinética química e da dinâmica do escoamento com reação, e através de um conjunto de medidas experimentais nas condições de escoamento mais relevante para caracterização específica.

Etapa 1 - Instalação do Modelo Laboratorial do Queimador

Etapa 2 - Modelagem Matemática do Queimador. Esta etapa foi decomposta em duas linhas de ação:

- Identificação da cinética química da formação de NOx, através dos principais mecanismos relevantes na queima de gás natural descritos na literatura
- Modelagem Matemática da Geometria do Queimador, identificado na Etapa 1

Etapa 3 - Otimização Experimental do Processo de Combustão, também dividida entre a:

- Identificação do Efeito dos Parâmetros Geométricos do Queimador e do Escoamento no Processo de Combustão
- Caracterização Experimental da Formação de NOx. Identificação das espécies químicas, com emissões radiativas na faixa UV e visível do espectro, relevantes à formação de NOx

III. PRINCIPAIS RESULTADOS

Este projeto de pesquisa foi realizado no âmbito de uma parceria entre uma empresa pública e uma universidade federal. Este perfil caracterizou a forma como o projeto foi efetuado, principalmente no sentido que os resultados foram obtidos com a utilização de mão-de-obra estudantil, de diversos níveis de graduação.

Dessa forma, nesta seção são apresentados os principais resultados gerados neste estudo, que por sua vez indicam o documento científico acadêmico no qual o objetivo, metodologia e resultados específicos estão detalhadamente des-

critos.

Nesse contexto, a transferência de conhecimento para a sociedade foi efetuada em sua forma plena, especificamente:

- Formação de Engenheiros e Mestres especializados nas áreas afins ao projeto, e por conseguinte, ao parceiro empresarial;
- Disseminação do conhecimento para a sociedade através dos mecanismos de transferência de conhecimento científico, revistas especializadas e congressos científicos.

Por fim cabe ressaltar que os estudos aqui efetuados não encontram similar no território Nacional, e que as ferramentas científicas adquiridas no âmbito deste projeto colocam a UnB e a Eletronorte na fronteira da pesquisa científica nesta área do conhecimento.

A. Etapa 1 - Instalação do Modelo Laboratorial do Queimador

1) Identificação do modelo de queimador de termelétrica a ser implementado em laboratório e no modelo matemático

O principal resultado desta etapa foi a construção e montagem de um laboratório para testes de processos de combustão em chamas pré-misturadas, constando de uma instalação laboratorial simulando de uma câmara de combustão LPP (lean premixed prevaporized). Algumas fotos do laboratório encontram-se na **Figura 1**.



Figura 1 Fotografias do Laboratório de Combustão do LEA/ENM/UnB

2) Aquisição dos equipamentos especificados para a fase experimental

Esta etapa foi aquela que utilizou a maior parte dos recursos financeiros do projeto, especificamente 45% do orçamento total disponibilizado pela Eletronorte. Estes recursos foram utilizados na construção civil e aparelhamento de um

laboratório especificamente detalhado para os experimentos do projeto, bem como dos equipamentos científicos necessários à caracterização dos processos com combustão a serem analisados.

B. Etapa 2 - Modelagem Matemática do Queimador

1) Modelagem Matemática da Geometria do Queimador

A proposta para esta etapa do projeto foi a de simular escoamentos isotérmicos em torno de ancoradores de chama em câmaras de combustão LPP, para escoamentos com e sem swirl induzido. A simulação foi baseada na resolução das equações de transporte transientes com o código comercial CFX e utilizando o método dos volumes finitos para a malha. O domínio foi modelado de acordo com o modelo laboratorial existente no laboratório de combustão do LEA. Os resultados obtidos mostraram concordância com resultados experimentais, sendo que estes resultados podem ser encaixados em tipos de escoamentos que foram determinados experimentalmente. A eficácia e escolha de modelos de turbulência e de malhas para a câmara LPP são discutidas.

Modelos de turbulência e metodologias de simulação foram estudados em um caso de validação retirado do trabalho experimental de Taylor e Whitelaw (1984), que analisa o escoamento turbulento em um ancorador na forma de um disco confinado em um duto. Este caso foi útil em mostrar a eficiência do código CFX, que previu com precisão a variação da zona de recirculação causada pela mudança do disco para um cone de mesma área e com a mudança de área do disco. Os resultados numéricos denotaram grande concordância com os dados experimentais e podem-se apontar os modelos $k\epsilon$ e SST para a câmara LPP, sendo que aqui, apenas o $k\epsilon$ foi utilizado, para avaliar metodologias de simulação.

A câmara LPP foi simulada inteira e utilizando a condição de contorno de par periódico, que simula apenas uma parte do domínio, partindo da assertiva de que o escoamento na geometria inteira era axissimétrica. As simulações mostraram concordâncias com dados experimentais de geometria análoga e, em certas situações, o par periódico denotou discrepâncias com os demais resultados, Figura 2 e Figura 3. Esta diferença se deve ao fato de que nestas situações, o escoamento era tridimensional, portanto, não foi possível utilizar a condição de par periódico.

Simulou-se também a câmara com um gerador de swirl, onde este resultado mostrou intensa recirculação em torno do ancorador. Também foi feito um estudo de malha para determinar qual a melhor malha, sendo que esta malha deverá ser refinada na região correspondente à metade inicial da região de combustão.

Os resultados obtidos mostraram concordância com resultados experimentais, sendo que estes resultados podem ser encaixados em tipos de escoamentos que foram determinados experimentalmente. A Figura 4 apresenta os resultados das simulações comparados a uma imagem real da chama no interior da câmara de combustão.

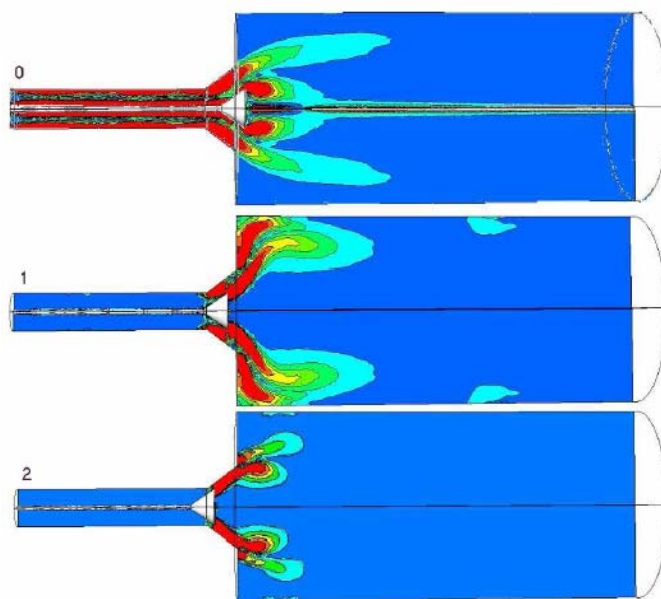


Figura 2 Níveis de vorticidade - par periódico

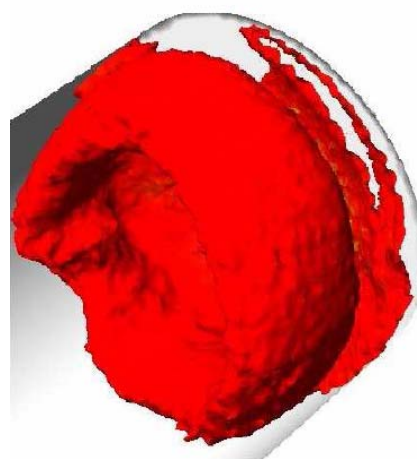


Figura 3 Isosuperfície de vorticidade da posição 2 (completa)

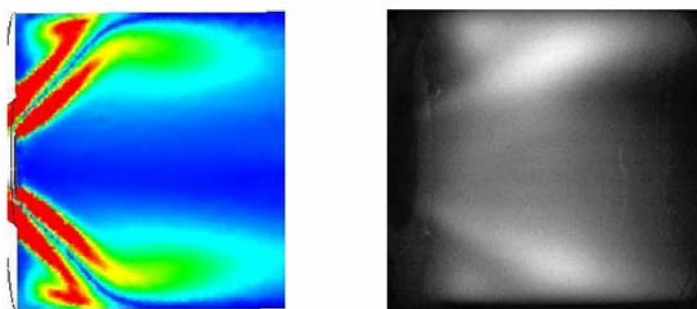


Figura 4 Resultados da simulação para o escoamento isotérmico da câmara de combustão LPP do laboratório do LEA/ENM/UnB (esquerda: simulação; direita: visualização experimental)

2) Identificação da cinética química da formação de NO_x

Na interpretação de resultados experimentais é importante se utilizar modelos teóricos que possam, com alguma precisão, prever a dinâmica do processo reativo. Uma impor-

tante ferramenta, utilizada na pesquisa avançada da combustão, principalmente de hidrocarbonetos é o código computacional CHEMKIN. Este código é sistematicamente empregado na modelagem simplificada de combustores em geral, como por exemplo, turbinas a gás tanto convencionais quanto LPP, motores de combustão interna, reatores em geral. Tal ferramenta, se baseia em mecanismos detalhados de conversão de reagentes em produtos para alguns tipos de combustíveis. Uma vez que é grande o número de equações a serem integradas, mais de 50 para o gás natural, o programa torna-se valioso quando a aerodinâmica do escoamento guarda semelhança com reatores bem misturados, escoamento tipo tampão, entre outros. Tais simplificações permitem que se possam empregar mecanismos com inúmeras espécies e reações químicas em combustores idealizados onde uma cadeia pode ser implementada na caracterização do escoamento, total ou parcial, no interior de tais dispositivos. A **Figura 5** ilustra a fração molar do NO ao longo de uma câmara de combustão com escoamento tipo tampão, operando com metano e ar a razão de equivalência de 0,65, típica de reatores com queima pobre.

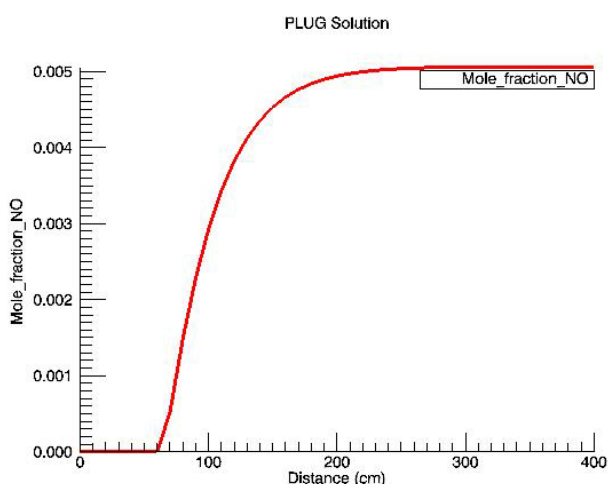


Figura 5: Fração molar de NO ao longo da câmara LPP, $\phi = 0,65$, com gás metano.

Para melhor interpretação dos resultados experimentais, a partir de técnicas óticas não intrusivas, verifica-se o perfil do radical CH no interior da câmara (**Figura 6**). É importante observar que tal radical participa ativamente na formação de NO, pelo mecanismo de Fenimore (“prompt”), mas apresenta fração molar imperceptível, para a maioria das instalações experimentais.

O mecanismo detalhado empregado nesta simulação é o GRI mech 3.0 com 52 espécies químicas e 325 reações concorrentes. Deste total 95 reações envolvem compostos nitrogenados responsáveis pela formação de NO_x pelas rotas mais comuns.

Tais mecanismos podem ser reduzidos com auxílio de medidas experimentais e códigos numéricos auxiliares. Este processo demanda investimentos vultosos de tempo, pessoal e recursos financeiros. Alguns grupos de pesquisa se dedicam exclusivamente a estas tarefas e os resultados são divulgados em trabalhos científicos. Alguns destes mecanis-

mos foram testados e os resultados indicaram uma boa aproximação com o mecanismo original. A **Tabela 1** mostra um exemplo de mecanismo reduzido para a queima de metano.

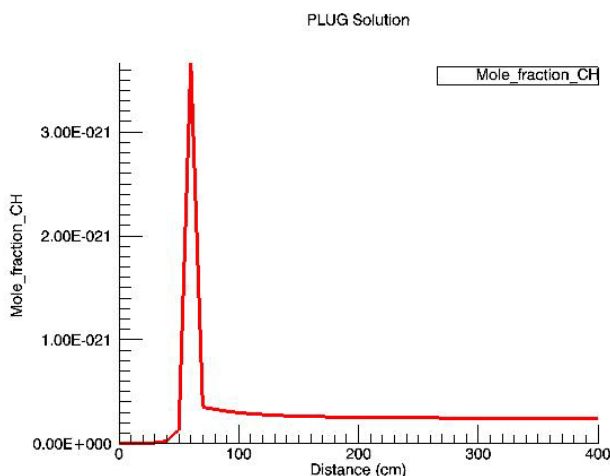


Figura 6: Fração molar de do radical CH ao longo da câmara LPP, $\phi = 0,65$, com gás metano.

Tabela 1: Mecanismo reduzido para queima de metano obtido do GRI mech 3.0.

REACTIONS CONSIDERED	(k = A T ^a exp(-E/RT))		
	A	b	E
1. O+CH3<=>H+CH2O	5.06E+13	0.0	0.0
2. O+CH4<=>OH+CH3	1.02E+09	1.5	8600.0
3. O2+CH2O<=>HO2+HCO	1.00E+14	0.0	40000.0
4. H+O2<=>O+OH	2.65E+16	-0.7	17041.0
5. H+CH4<=>CH3+H2	6.60E+08	1.6	10840.0
6. H+CH2O(+M)<=>CH3O(+M)	5.40E+11	0.5	2600.0
Low pressure limit:	0.22000E+31	-0.48000E+01	0.55600E+04
TROE centering:	0.75800E+00	0.94000E+02	0.15550E+04
H2	Enhanced by	2.000E+00	
H2O	Enhanced by	6.000E+00	
CH4	Enhanced by	2.000E+00	
CO	Enhanced by	1.500E+00	
CO2	Enhanced by	2.000E+00	
C2H6	Enhanced by	3.000E+00	
7. OH+CH4<=>CH3+H2O	1.00E+08	1.6	3120.0
8. OH+CH2O<=>HCO+H2O	3.43E+09	1.2	-447.0
9. HO2+CH3<=>OH+CH3O	3.78E+13	0.0	0.0
10. CH3+O2<=>O+CH3O	3.59E+13	0.0	30480.0
11. CH3+O2<=>OH+CH2O	2.31E+12	0.0	20315.0
12. CH3+CH2O<=>HCO+CH4	3.32E+03	2.8	5860.0
13. HCO+O2<=>HO2+CO	1.34E+13	0.0	400.0
14. CH3O+O2<=>HO2+CH2O	4.28E-13	7.6	-3530.0
15. N+NO<=>N2+O	2.70E+13	0.0	355.0
16. O+CH3=>H+H2+CO	3.37E+13	0.0	0.0

NOTE: A units mole-cm-sec-K, E units cal/mole

Pode-se verificar que a cinética dos compostos nitrogenados do mecanismo original, com 95 reações, foi toda agrupada na reação 15. Verifica-se também, que com a utilização deste mecanismo não é mais possível se determinar a fração molar de radicais como CH, por exemplo. Estes mecanismos, contudo, são mais fáceis de se implementar em códigos numéricos de CFD (“computational fluid dynamics”) como o CFX 5.6.

Como parte deste projeto, foram coletados diversos mecanismos detalhados para a queima de hidrocarbonetos com número de carbono superior a três, adicionalmente aos mecanismos para propano e etanol.

A formação de NO_x em câmaras de combustão tipo LPP e convencionais, com cinética química detalhada, em suporte às predições numéricas realizadas pelo código CFX 5.6 se encontram nos anexos. A utilização do pacote CHEMKIN requer uma certa experiência e tais trabalhos apresentam

detalhes de como preparar arquivos de entrada para as rotinas mais importantes. Tais trabalhos cobrem uma vasta aplicação do código.

C. Etapa 3 - Otimização Experimental do Processo de Combustão

1) Identificação do Efeito dos Parâmetros Geométricos do Queimador e do Escoamento no Processo de Combustão

A geração de vórtices no escoamento de ar da entrada de câmaras de combustão apresenta-se como o principal mecanismo para ancorar a chama em câmaras de combustão LPP. Esta vorticidade no escoamento é formada por meio de um dispositivo chamado Swirler, composto de pás que introduzem uma componente tangencial no escoamento.

O swirler é composto por; difusor, corpo rombudo, carcaça, sistema de transmissão de torque, pás e cone de exaustão; **Figura 7**. Abaixo, descrição dos componentes:

- Difusor: responsável por proporcionar aumento da pressão estática sem descolamento da camada limite, além de conectar o swirler à tubulação de ar.
- Corpo rombudo e Cone de exaustão: têm função de recuperar a energia do escoamento dissipada ao passar pelas pás. O cone de exaustão possui seis entradas radiais para receber o combustível gasoso.
- Carcaça: estrutura (formada por duas peças) que envolve parte do corpo rombudo. Possui o sistema de engrenagens acoplado a ele.
- Sistema de transmissão de torque: responsável por variar o ângulo das pás. É composto por vinte engrenagens cônicas, vinte eixos e uma coroa de dupla conexão.
- Pás: responsáveis por adicionar a componente radial ao escoamento.

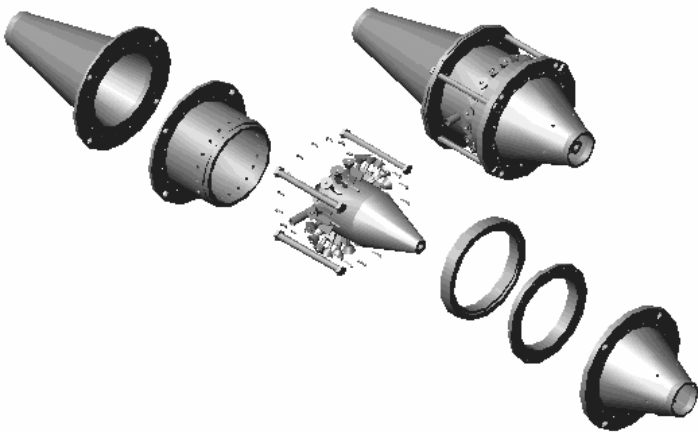


Figura 7 Vista Explodida em diagonal do Swirler

2) Caracterização Experimental da Formação de NO_x. Identificação das espécies químicas, com emissões radiativas relevantes à formação de NO_x

Esta fase final do projeto compreendeu duas atividades complementares. Em primeiro lugar, foi construído um algoritmo para análise das imagens obtidas na câmara de combustão. Este algoritmo para reconstrução tomográfica das imagens permitiu a avaliação do campo tridimensional

de emissão quimiluminescente a serem obtidas das chamas na câmara de combustão. A **Figura 8** apresenta o fluxograma deste algoritmo.

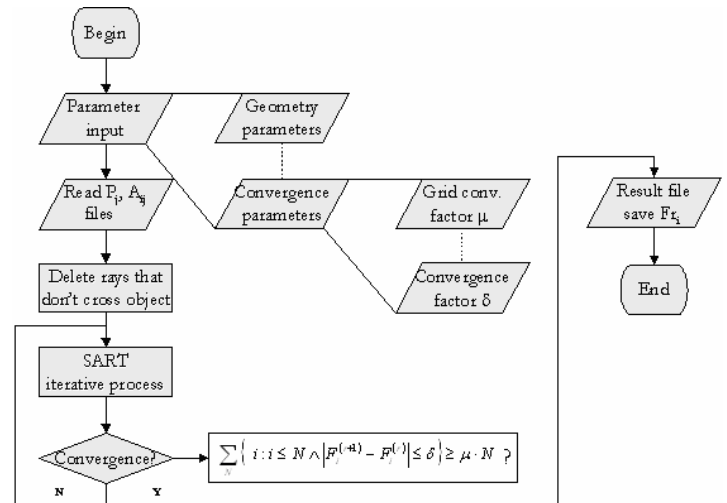


Figura 8 Fluxograma do algoritmo de reconstrução tomográfica em implantação

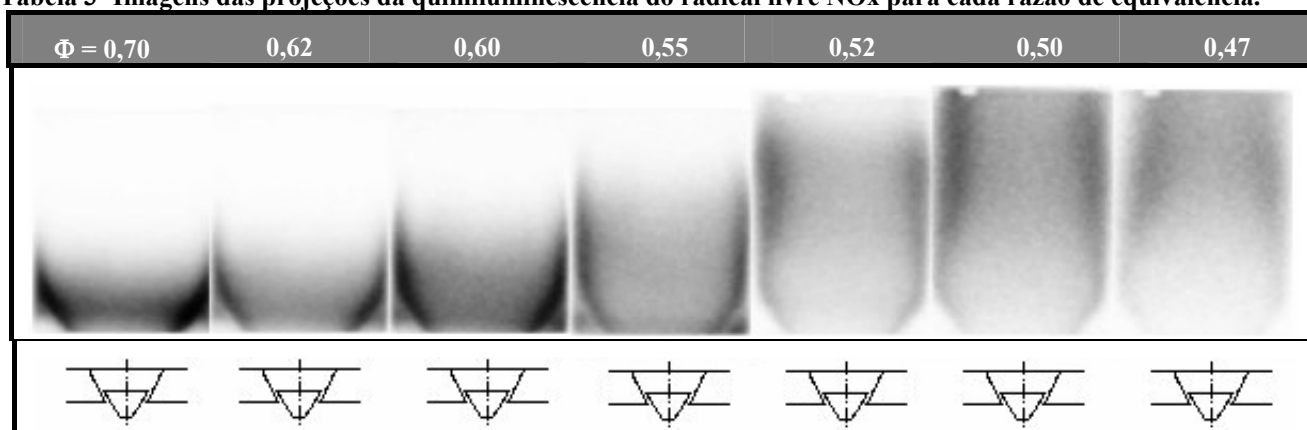
Em segundo lugar, foi efetuada a análise da distribuição espacial da formação de NO_x em uma chama pré-misturada, confinada e assimétrica em condições de baixa razão de equivalência (< 0,7), através da caracterização das emissões quimiluminescente de NO_x formado pelo mecanismo *prompt* e caracterizar a dependência do mecanismo *prompt* na formação dos radicais livres CH, C₂, OH, CN e NH.

Para alcançar estes objetivos foram utilizadas técnicas de diagnóstico baseadas na visualização dos radicais livres usando uma câmara CCD monocromática, filtros centrados a um determinado comprimento de onda e um sistema de intensificação de imagens. Os resultados experimentais incluem imagens da projeção e sua reconstrução tomográfica dos radicais livres envolvidos no mecanismo de cinética química de formação de NO_x denominado “prompt”. A Tabela 2 e a **Tabela 3** apresentam os principais resultados deste estudo.

Tabela 2 Imagens da chama para cada razão de equivalência.

Φ	Imagem da chama, Vista frontal e lateral
0,7	
0,5	

Tabela 3 Imagens das projeções da quimiluminescência do radical livre NOx para cada razão de equivalência.



IV. RESULTADOS OBTIDOS

Os seguintes resultados foram alcançados no desenvolvimento deste projeto:

Resultado 1: Otimização do processo de combustão, através da caracterização da influência dos parâmetros geométricos do queimador típico de unidades termelétricas nos processos de mistura turbulenta e de oxidação do combustível fóssil.

Resultado 2: Minimização da formação de NOx, com a identificação da cinética química da formação de óxidos de nitrogênio, através dos principais mecanismos relevantes (o térmico e o *prompt*) na queima de combustíveis fósseis;

Resultado 3: Desenvolvimento, em escala laboratorial, dos procedimentos para a **manutenção de uma elevada eficiência do processo de combustão** e para a **determinação indireta da formação de NOx**, através de técnicas óticas de diagnóstico e monitoramento.

V. TRABALHOS PUBLICADOS

A. Trabalhos publicados em Revistas Científicas

- MANFREDI, Cristiane; PIMENTA, Amílcar P.; CARVALHO, João Andrade de; PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; FERREIRA, Marco A. CH and C2 radicals characterisation in natural gas turbulent diffusion flames. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, 2003. **Cristiane Manfredi – doutoranda em co-orientação no ITA-INPE/LCP. Artigo submetido.**
- PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; CORREIA, D P; LACAVALA, P; MAIA, P; HEITOR, M V. Influence of Burner-port Geometry in Hydrocarbon Oxidation and NOx Formation Mechanisms in Methane/Air Flames. *Fuel*, Elsevier, v. 81, p. 771-783, 2002. **Duarte P. Correia – doutorando em co-orientação no IST – Portugal, com tese defendida em Dezembro/2002.**

B. Trabalhos apresentados em congressos

No âmbito deste projeto apresentados artigos no 17º.

Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica-COBEM2003, no 10º. Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas-ENCIT2004, e no 7th APISCEU -SEVENTH ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION AND ENERGY UTILIZATION-APISCEU2004. Eles foram preparados em co-autoria com os alunos de graduação e pós-graduação sob orientação deste pesquisador:

- Camargo, J.C., Toledo, R., Gurgel Veras, C.A., CFD Analysis and Reactor Network Study Applied to a Gas Turbine Combustor. . In: 7TH APISCEU -SEVENTH ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION AND ENERGY UTILIZATION, 2004, Hong Kong. 2004
- PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; GONÇALEZ, Himilsys Hernandes. NO Free Radical Chemiluminescence Imaging in Gas Turbine LPM Combustion Chamber. In: 7TH APISCEU -SEVENTH ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION AND ENERGY UTILIZATION, 2004, Hong Kong. 2004.
- TOLEDO, Ronne; VERAS, Carlos Alberto Gurgel; PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; BRASIL JR, Antonio Cesar. Modelagem Numérica de Câmaras de Combustão LPP Utilizando-se o Código CFX 5.6. In: 10TH BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING -ENCIT 2004, 2004, Rio de Janeiro. 2004.
- PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; ROQUE, Bruno Rodrigues; ARAÚJO, Marcelo Alves. 2D FAN TOMOGRAPHIC RECONSTRUCTION OF FLAME CHEMILUMINESCENT EMISSION. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECANICA, 2003, Sao Paulo. 17th International Congress of Mechanical Engineering. 2003.
- PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; GONÇALEZ, Himilsys Hernandes; FARIA, Hugo. DEVELOPMENT OF LABORATORIAL LPP COMBUSTION CHAMBER FOR NOX EMISSION CHARACTERIZATION IN GAS TURBINES. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA

- MECANICA, 2003, São Paulo. 17th International Congress of Mechanical Engineering. 2003.
- NOLETO, Luciano G; BRASIL JR, Antonio Cesar; PIRES, Armando de Azevedo Caldeira. FLUID FLOW AROUND A BLUFF-BODY INSIDE A LPP COMBUSTION CHAMBER - ISOTHERMAL FLOW. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECANICA, 2003, Sao Paulo. 17th International Congress of Mechanical Engineering. 2003.
 - PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; CARVALHO, João Andrade de; LACAVA, Pedro; MANFREDI, Cristiane. Termopares de Fios Finos para Estudo do Campo de Temperatura em Chamas Difusivas Turbulentas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECANICA, 2002, João Pessoa. Congresso Nacional de Engenharia Mecanica CONEM 2002. 2002. **Cristiane Manfredi – doutoranda em co-orientação no ITA-INPE/LCP.**
 - PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; GONÇALEZ, Himilsys Hernandes. NO Free Radical Chemiluminescence Imaging in Gas Turbine LPM Combustion Chamber. In: 7TH APISCEU -SEVENTH ASIA-PACIFIC INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON COMBUSTION AND ENERGY UTILIZATION, 2004, Hong Kong. 2004.
 - Santos, F.A., Pinheiro Jr., J.L., Camargo, J.C., Lima, R.D.C., Gurgel Veras, C.A., Modeling Gás Turbine Combustion Chamber with the CFX-5 and Chemkin 3.7 Packages. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECANICA, 2003, Sao Paulo. 17th International Congress of Mechanical Engineering. 2003.
 - TOLEDO, Ronne; VERAS, Carlos Alberto Gurgel; PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; BRASIL JR, Antonio Cesar. Modelagem Numérica de Câmaras de Combustão LPP Utilizando-se o Código CFX 5.6. In: 10TH BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING -ENCIT 2004, 2004, Rio de Janeiro. 2004.
 - PIRES, Armando de Azevedo Caldeira; CARVALHO, João Andrade de; LACAVA, Pedro; MANFREDI, Cristiane. Termopares de Fios Finos para Estudo do Campo de Temperatura em Chamas Difusivas Turbulentas. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECANICA, 2002, João Pessoa. Congresso Nacional de Engenharia Mecanica CONEM 2002. 2002. **Cristiane Manfredi – doutoranda em co-orientação no ITA-INPE/LCP.**

VI. FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS PARA A PESQUISA

tipo	bolsista	projeto
Mestrado	Alessandro do Vale Reis	Investigação Experimental Do Desempenho De Motores Do Ciclo Diesel Com Etanol Hidratado No Modo Duplo Combustível.
Estágio	Bruno Rodrigues Roque e Marcelo Alves Araujo	Desenvolvimento de algoritmos computacionais para reconstrução tomográfica das emissões quimiluminescentes oriundas das chamas
Doutorado (co-orientação)	Cristiane Andraus – INPE/LCP	Análise não-intrusiva de NOx prompt e térmico em chamas turbulentas CH4/Ar/H2
PIBIC	Gustavo Lima Carneiro	Estudos em sistemas de controle da formação de nox em camaras de combustão LPP - Estudo experimental da utilização de quimiluminescencia CH para determinação indireta de NOx em chamas pré-misturadas
Mestrado	Himilsys Hernandez Gonzalez	Otimização da Formação de NOx em um Modelo Laboratorial de uma Câmara de Combustão LPP
Projeto de Graduação	Hugo Moura de Faria	Desenvolvimento de um modelo laboratorial de uma câmara de combustão LPP
Projeto de Graduação	Leonardo Ivo	Desenvolvimento de um Sistema de Rotação do Escoamento (Swirler) à entrada de uma Câmara de Combustão LPP
Projeto de Graduação	Luciano Gonçalves Noleto	Estudo numérico de escoamentos isotérmicos em ancoradores de chama de câmaras de combustão lpp
PIBIC	Rafael Davidson Cova Lima	Modelagem Computacional da Cinética Química da Formação de NOx.
Projeto de Graduação	Renata Maery de Lima Mendonça e Rafael Davidson	Dimensionamento, Construção e Teste de uma Câmara de Combustão LPP.
Pesquisador Visitante	Ronne Toledo	Modelagem Numérica de Câmaras de Combustão LPP com o Emprego do Código CFX 5.6
PIBIC	Wagner Brito Vaz de Oliveira	Estudos em sistemas de controle da formação de nox em camaras de combustão LPP - Instrumentalização de uma Camara de Combustão LPP para controle das Emissões de NOx

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Altemark, D., and Knauber, R., VDI Berichte, No. 645, pp.299-311, 1987.
- [2] Anacleto, P. and Heitor, M.V., 1997, "Combustion Chamber for Low Pollutant Emission (In Portuguese)", *Ingenium*, 15, pp. 66-70.
- [3] Blauwens, J., Smets, B. and Peeters, J.; *16th Symposium International Combustion*. pp. 1055-1064, The Combustion Institute, Pittsburgh 1973
- [4] Caldeira-Pires, A., 2001, "Free Radical Imaging Techniques applied to Hydrocarbon Flames Diagnosis", *J. of Thermal and Fluid Sciences*, **10(2)**, pp. 132-145.
- [5] Chou C.P., Miller S.F., Chemkin Collection-Release 3.7, Reaction Design, Inc., San Diego, CA, 2002.
- [6] Cline, M.C., Yang, S.L., Nguyens, H.L., Numerical analysis of the flowfield in a staged gas turbine combustor, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 11, n. 5, pp.894-898, 1995.
- [7] Environmental Protection Agency / EPA. Boletín Técnico. Nitrogen oxides: Why and how can they be controlled? United States. 1999.
- [8] Fenimore, C. P. *13th Symposium (International) of Combustion*. Pp. 373-379, The Combustion Institute, Pittsburgh, 1971.
- [9] Fenimore, C.P., "Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames", Thirteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 373-380, The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1971.
- [10] González, H. H. Characterization of NO Radical Chemiluminescence in a LPM Combustion Chamber (In Portuguese). Master Thesis, Department of Mechanical Engineering, University of Brasilia, DM 74/2004, Brasília-DF/Brazil. 2004.
- [11] Gupta, A.K., Ramavajjala, M.S., and Chomiak, J., Burner geometry effects on combustion and nox emissions characteristics using a variable geometry swirl combustor, *Journal of Propulsion*, Vol. 7, n. 4, pp.473-480, 1991.
- [12] Heberling, P.V., "Prompt NO Measurements at High Pressures", Sixteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 159-168, , The Combustion Institute, Pittsburgh, PA, 1976.
- [13] Heitor, M.V. and Whitelaw, J. H., Velocity, temperature, and species characteristics of the flow in a gasturbine combustor, *Combustion and Flame*, Vol. 64, pp.1-32, 1986.
- [14] Jones, W.P., and Toral, H., Temperature and composition measurements in a research gas turbine combustion chamber *Combustion Science and Technology*, Vol. 31, pp.249-275, 1983.
- [15] Konnov, A.A., Development and validation of a detailed reaction mechanism for the combustion of small hydrocarbons, 28th Symposium (International) on Combustion, Edinburgh, Abstract Symposium, pp.317, 2000. (<http://homepages.vub.ac.be/~akonnov/>).
- [16] Koutmos P. and McGuirk J.J., Isothermal modeling of gas turbine combustors: computational study, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 7, n. 6, pp.1064-1071, 1991.
- [17] Lefebvre, A. H., "Gas Turbine Combustion", 2nd ed., Ed. Edwards Brothers, Ann Arbor, MI, 400 p, 1998.
- [18] Legier, J.P., 2001, "Numeric Simulation of Combustion Instabilities in Aeronautic Turbines (In French)", Ph.D. Thesis, CERFACS, INPT, Toulouse, France.
- [19] Leonard, G., and Stegmaier, J., "Development of an Aeroderivative Gas Turbine Dry Low Emissions Combustion System", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 116, pp. 542-546, 1993.
- [20] Miller, J. A.; Bowman, C. T.. Mechanics and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion. *Prog. Energy Comb. Sci.*, vol. 15, pp. 287-338, 1989.
- [21] Nicol, D., Malte, P.C., Lai, J., Marinov, N.N. and Pratt, D.T., "NOx Sensitivities for Gas Turbine Engines Operated on Lean-Premixed Combustion and Conventional Diffusion Flames", ASME Paper 92-GT-115, 1992.
- [22] Nicol, D.; Malte, P.C.; Lai, J.; Marinov, N.N.; Pratt, D.T. NOx Sensitivities for Gas Turbine Engines Operated on Lean-Premixed Combustion and Conventional Diffusion Flames. ASME Paper 92-GT-115, 1992.
- [23] Rink, K.K., and Lefebvre, A.H., "The influence of Fuel Composition and Spray Characteristics on Nitric Oxide Formation", *Combustion, Science and Technology*, Vol. 68, pp. 1-14, 1989.
- [24] Rizk, N.K., and Mogia, H.C., "Three-Dimensional NOx Model for Rich-Lean Combustor", AIAA Paper 93-0251, 1993.
- [25] Sarofim, A. F.; Flagan, R. C. NOx Control For Stationary Combustion Processes. *Prog. Energy Comb. Sci.*, vol. 2, jan/25. 1976.
- [26] Swithenbank T.J., Turan A., Felton P.G., Spalding D.B., fundamental modelling of mixing, evaporation and kinetics in gas turbine combustors, Proceedings of the AGARD Conference, n. 275, Combustor Modelling, pp.1-21, 1979.
- [27] Tolpadi A.K., Correa S.M., Burrus D.L., Mongia H.C., Monte carlo probability density function method for gas turbine combustor flowfield predictions, *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 13, n. 2, pp.218-225, 1997.
- [28] Turns S.R., An introduction to combustion – concepts and applications, Mc-Graw-Hill, 1996.