

ESTUDO DE CONDIÇÕES DE INSTABILIDADES EM CÂMARAS DE COMBUSTÃO DE MICRO-TURBINAS A GÁS

Natália Bernardi Ghisi

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
natalia.ghisi@poli.usp.br

Guenther C. Krieger Filho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
guenther@usp.br

Resumo. O objetivo deste trabalho é obter um modelo que avalie as condições de instabilidades na câmara de combustão de uma micro-turbina a gás, em função das vazões de ar e de combustível.

O modelo é obtido através da utilização de modelos de reatores existentes no software comercial Chemkin, onde será implementada a cinética detalhada do processo de combustão que ocorre no interior da câmara.

Para a avaliação das variações da taxa de turbulência no interior da câmara de combustão é feito um acoplamento com o software comercial de mecânica dos fluidos computacional Fluent. Os parâmetros da turbulência do escoamento no interior da câmara, obtidos com o Fluent, são utilizados como dados de entrada do modelo termodinâmico a ser simulado em Chemkin.

Posteriormente às simulações utilizando o Chemkin, seus resultados serão comparados com dados provenientes das observações da operação da micro-turbina a gás instalada no LETE. Essa comparação permitirá uma validação do modelo obtido.

Palavras chave: combustão, micro-turbinas a gás, simulações numéricas.

1. Introdução

A utilização de micro-turbinas a gás é muito interessante no atual cenário, onde a demanda de energia vem aumentando e são necessárias formas alternativas de geração de energia elétrica.

Micro-turbinas a gás caracterizam uma classe chamada de “geração distribuída”, onde a geração de energia se dá no local onde ela será consumida, reduzindo assim os custos com linhas de transmissão. Os motores a diesel também fazem parte dessa classe de geração, porém as micro-turbinas apresentam vantagens sobre esses, como uma maior razão peso/potência.

Estudos sobre a geração de potência para acionamento de um gerador elétrico a partir de uma micro turbina a gás estão sendo realizados no Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental (LETE) da Escola Politécnica da USP. Esses estudos são multidisciplinares, abrangendo várias frentes da engenharia mecânica, como o projeto aerodinâmico do segundo estágio da turbina, projeto mecânico dos componentes do conjunto, análise estrutural e dinâmica do rotor, simulações em CFD da câmara de combustão e, finalmente o estudo das instabilidades da câmara de combustão, objetivo desse trabalho.

Esse trabalho será desenvolvido paralelamente com a construção do segundo estágio para a micro-turbina atualmente instalada no laboratório. Essas instalações, representadas na Fig.(1), e os trabalhos de outros alunos envolvidos com o projeto serão utilizados como apoio para o desenvolvimento de modelos e experimentos necessários para a realização desse trabalho de formatura.



Figura 1. Equipamento atualmente instalado no LETE.

A micro-turbina a gás funciona de acordo com o ciclo Brayton. Ar atmosférico é admitido por um compressor e, após a compressão, segue para a câmara de combustão. Os gases quentes resultantes da queima são encaminhados para a turbina, onde ocorre a expansão e a conversão em trabalho de eixo.

Na câmara ocorre a reação de combustão, que tem como objetivo aumentar a entalpia dos gases a serem expandidos na turbina.

Uma boa estabilidade do processo de combustão garante uma melhor operação da turbina, maiores rendimentos e diminuição na emissão de poluentes.

A câmara de combustão da micro-turbina a ser estudada é constituída por quatro componentes, como esquematizado na Fig.(2).

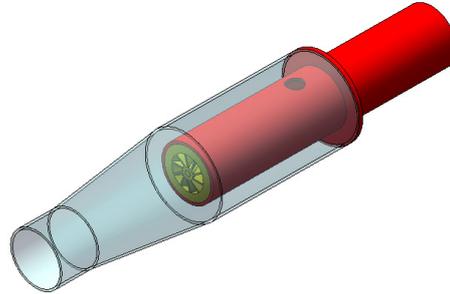


Figura 2. Esquema da câmara de combustão estudada.

- *Liner*-vermelho
- Difusor e *casing*-transparente
- *Swirler*-amarelo
- Injeção de combustível-amarelo

Seu funcionamento se dá da seguinte forma: a combustão ocorre no *liner*, utilizando ar primário que foi misturado com o fluxo de combustível através do *swirler*. Ar secundário é utilizado para baixar a temperatura dos gases de saída da câmara, limitada pelo material construtivo da turbina. O difusor é utilizado para diminuir a velocidade e aumentar a pressão dos gases na entrada do *liner*.

Uma boa mistura ar/combustível é imprescindível para a estabilidade da combustão. Estudos realizados anteriormente sobre essa câmara de combustão mostraram que o método que proporciona uma melhor mistura é o *swirler*.

2. Objetivos

Esse trabalho tem como objetivo a obtenção de um modelo que avalia as condições de instabilidades na câmara de combustão de uma micro-turbina a gás, em função das vazões de ar e de combustível.

O modelo será obtido através do software comercial Chemkin, que apresenta vários modelos de reatores que serão estudados a fim de se determinar o mais adequado para o estudo em questão.

O tipo de reator escolhido deverá ser estudado com o objetivo de compreender seu funcionamento para assim obter melhores resultados com as simulações.

Além de simulações utilizando o Chemkin, o software comercial de mecânica dos fluidos Fluent será utilizado para a obtenção dos parâmetros da turbulência do escoamento no interior da câmara de combustão, que serão utilizados como entradas para o modelo de combustão. As simulações em Fluent serão realizadas por outros alunos do LETE, paralelamente a este trabalho.

Posteriormente à obtenção desse modelo e às simulações serão coletados dados das condições de operação da micro-turbina a gás instalada no LETE com o objetivo de verificar a veracidade do modelo.

3. Discussão Inicial

Inicialmente a intenção desse trabalho era obter um modelo termodinâmico da câmara de combustão que pudesse fornecer as variações de pressão causadas pelas instabilidades em função das vazões de ar e combustível.

Esse modelo foi desenvolvido aplicando-se o balanço de massa e energia em várias regiões nas quais a câmara foi dividida. A equação obtida através do balanço de massa e energia da região de combustão seria integrada no tempo para a obtenção das variações de pressão que indicariam as instabilidades.

Após análises concluiu-se que essa abordagem era muito simplificada não levando em conta uma cinética química detalhada e também não proporcionando uma fiel representação da câmara de combustão. Dessa forma a abordagem do trabalho foi direcionada para simulações numéricas utilizando os modelos de reatores químicos disponíveis no software Chemkin.

4. Modelos de reatores

Os modelos de reatores que poderão ser utilizados na simulação da câmara de combustão são os seguintes:

- Reator de pressão constante e massa fixa;
- Reator de volume constante e massa fixa;
- Reator perfeitamente misturado (PSR);
- Reator parcialmente misturado (PaSR).

4.1. Reator de pressão constante e massa fixa

Esse reator considera uma reação homogênea e perfeitamente misturada com pressão constante. As propriedades que variam com o tempo nesse modelo são a temperatura e o volume.

Para reações de combustão exotérmicas, a temperatura e o volume irão aumentar com o tempo e poderá existir uma transferência de calor do reator para o exterior. O funcionamento desse reator é similar a um conjunto cilindro-pistão.

A partir da conservação da energia aplicada a um sistema de massa constante, considerando o modelo de gás perfeito, é possível obter equações que regem esse reator, mostradas abaixo.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{V}\right) - \sum_i(\bar{h}_i \cdot \dot{w}_i)}{\sum_i([X_i] \bar{c}p_i)} \quad (1)$$

$$\frac{d[X_i]}{dt} = \dot{w}_i - [X_i] \left\{ \frac{\sum \dot{w}_i}{\sum_i [X_i]} + \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} \right\} \quad (2)$$

Onde:

- \dot{Q} é o calor produzido pela combustão
- T é a temperatura no interior do reator
- V é o volume do reator
- \bar{h}_i é a entalpia da espécie i
- \dot{w}_i é a taxa de produção da espécie i
- $[X_i]$ é a concentração molar da espécie i
- $\bar{c}p_i$ é o calor específico da espécie i

4.2. Reator de volume constante e massa fixa

Considera uma reação homogênea, perfeitamente misturada. As propriedades que variam no tempo para esse modelo são temperatura e pressão. Nesse modelo de reator não existe trabalho.

A partir da conservação da energia em um sistema da massa fixa e admitindo o comportamento de gás perfeito, é possível obter as equações que regem esse reator.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\left(\frac{\dot{Q}}{V}\right) + R_u \cdot T \sum_i \dot{w}_i - \sum_i(\bar{h}_i \cdot \dot{w}_i)}{\sum_i\{[X_i](\bar{c}p_i - R_u)\}} \quad (3)$$

$$\frac{dP}{dt} = R_u \cdot T \cdot \sum_i \dot{w}_i + R_u \cdot \sum_i [X_i] \frac{dT}{dt} \quad (4)$$

4.3. Reator perfeitamente misturado (PSR)

Esse modelo considera uma reação perfeitamente misturada, ocorrendo num volume de controle fixo, com um fluxo de massa constante e em regime permanente.

Como esse reator opera em regime permanente, as equações que o regem não são dependentes do tempo, são equações algébricas obtidas através da conservação da massa e da energia.

As equações que regem esse modelo são:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \left(\sum_i Y_{i,out} \cdot h_i(T) - \sum_i Y_{i,in} \cdot h_i(T) \right) \quad (5)$$

$$Y_i = \frac{[X_i] \cdot MW_i}{\sum_j [X_j] MW_j} \quad (6)$$

$$h_i(T) = h_{f,i}^0 + \int_{T_{ref}}^T c_{p,i} dT \quad (7)$$

Onde:

- Y_i é a fração mássica da espécie i
- MW_i é o peso molecular da espécie i
- $[X_j]$ é a concentração molar da espécie j
- MW_j é o peso molecular da espécie j

Nesse reator, a composição dos produtos é governada pela cinética química. O fator que controla a ocorrência ou não da reação de combustão é o chamado tempo de residência, definido pela Eq.(8). Caso o tempo de residência seja maior que o tempo de cinética química, a reação ocorre, caso contrário, não há combustão.

$$t_r = \frac{\rho \cdot V}{\dot{m}} \quad (8)$$

4.4. Reator parcialmente misturado (PaSR)

O reator parcialmente misturado é representado por uma câmara adiabática com N entradas de combustíveis e oxidantes e uma saída de produtos. Como é considerado que não existem acúmulos de massa no interior do reator, pela equação da continuidade, o fluxo de massa na saída é a soma dos fluxos de massa nas entradas. O reator possui volume constante e não apresenta variações de pressão.

Quando a taxa de mistura turbulenta não é suficientemente rápida em relação à cinética química, o grau de mistura entre o combustível e o oxidante é um fator determinante para a reação de combustão. A principal característica do modelo PaSR é representar esse perfil parcialmente misturado de fluxos reativos num nível molecular.

O modelo PaSR admite que as propriedades termo-químicas no interior do reator são homogêneas, porém são parcialmente misturadas no nível molecular, ou seja, pontualmente seus valores são diferentes, mas a média é a mesma em todo o reator.

O processo de mistura no interior do reator é descrito por um tempo de mistura que, por sua vez, é modelado através de uma *escala de tempo turbulenta*. A obtenção da *escala de tempo turbulenta* é feita através da dinâmica de fluidos, aplicada a câmara de combustão em questão que, nesse caso, terá seu escoamento simulado no software comercial Fluent.

Além da escala de tempo turbulenta, outro parâmetro importante para a simulação no PaSR é o tempo de residência, variável similar à utilizada no modelo PSR, descrita pela Eq.(8).

Como mencionado anteriormente a temperatura e composição química de cada ponto do PaSR são distintas num nível molecular, a definição de seus valores pontuais é feita por uma função densidade de probabilidade(PDF). Uma vez que o campo de velocidades no interior do reator é considerado homogêneo e as flutuações de velocidades são ignoradas, a PDF utilizada envolve apenas escalares.

Os métodos PDF são largamente utilizados para simulações de escoamentos reativos. Devido à dependência não linear entre a composição química e a temperatura, a utilização da média das concentrações das espécies e da média da temperatura para calcular a média das taxas de reação não é suficiente, produzindo erros significativos, dessa forma, a utilização de uma PDF conjugada para as variáveis escalares do escoamento se torna interessante.

4.4.1. Parâmetros utilizados no PaSR

O tempo de mistura utilizado nas simulações do PaSR é definido por

$$t_{mix} = C_D \frac{\tilde{k}}{\tilde{\epsilon}} \quad (9)$$

Onde:

- C_D é uma constante que depende do tipo de escoamento
- \tilde{k} é a energia cinática turbulenta média
- $\tilde{\epsilon}$ é a dissipação da energia cinética turbulenta média

Nesse caso, os parâmetros \tilde{k} e $\tilde{\epsilon}$ serão obtidos através das simulações do escoamento no interior da câmara de combustão realizadas em Fluent.

Os modelos de mistura implementados pelo software Chemkin utilizam os parâmetros das Eq.(8) e Eq.(9) para calcular uma nova variável, a chamada “não-misturabilidade” (nm).

A “não-misturabilidade” de um escoamento reativo é um valor que varia entre 0 e 1, onde 0 significa a total segregação e 1 significa o estado perfeitamente misturado.

O valor da “não-misturabilidade” é descrito pela seguinte equação:

$$nm = \frac{\langle \overline{f''f''} \rangle}{(1 - \langle \tilde{f} \rangle) \langle \tilde{f} \rangle} \quad (10)$$

Onde:

- f é a fração de mistura oxidante/combustível
- \tilde{f} é a média de Favre de f
- f'' é a flutuação de f

Existem dois modelos de mistura disponíveis no Chemkin, Curl's e LMSE (Linear Mean Square Estimation). Esses modelos são matematicamente distintos e complexos. Os valores para a “não-misturabilidade” em cada um desses modelos, para um estado estatisticamente estável é:

$$Curl's \rightarrow nm = \frac{1}{1 + t_{res}/t_{mix}} \quad (11)$$

$$LMSE \rightarrow nm = \frac{1}{1 + C_{\phi} t_{res}/t_{mix}} \quad (12)$$

5. Análise dos modelos de reatores

O modelo PaSR apresenta-se como o mais adequado para o problema em questão, uma vez que é capaz de verificar a ocorrência da reação de combustão em função da mistura turbulenta.

Com a utilização do tempo de mistura e do tempo de residência, o PaSR permite que a dinâmica dos fluidos controle a mistura de combustível e oxidante no nível molecular e assim comande as reações químicas. Dessa forma, simulações realizadas em Fluent são de grande importância para o fornecimento de parâmetros fundamentais a serem utilizados como entradas no PaSR, como mostra a Fig.(3)

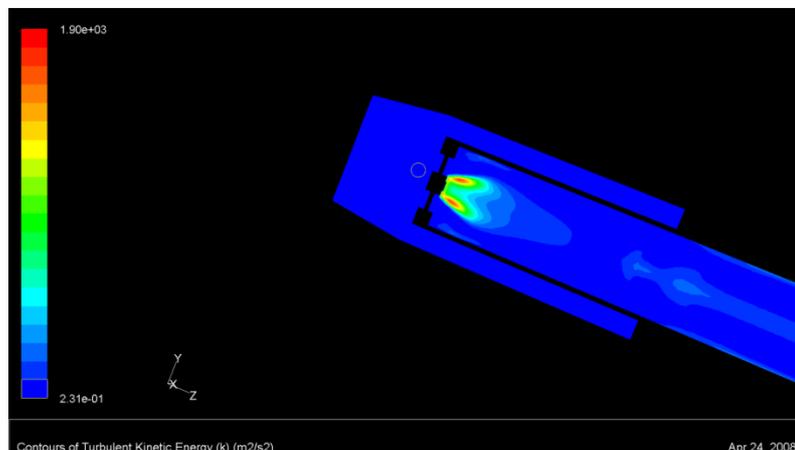


Figura 3. Valores de k no interior da câmara de combustão.

6. Métodos PDF para escoamentos turbulentos reativos

Como mencionado anteriormente, os métodos PDF são largamente utilizados para a determinação das várias propriedades de um fluido ao longo de um escoamento turbulento e reativo. A principal vantagem da utilização dos métodos PDF para a descrição de escoamentos turbulentos e reativos é que todas as estatísticas das propriedades de cada ponto do escoamento são descritas e que os processos convectivos e de produção química são tratados de forma exata.

O cálculo dessas propriedades é uma tarefa difícil uma vez que ocorrem variações de densidade, pressão, efeitos convectivos e reativos e também forças de campo e corpo. Os métodos numéricos envolvendo PDFs conjugadas das propriedades do fluido ao longo do escoamento tornam esses cálculos viáveis, porém uma PDF conjugada pode chegar a ter muitas variáveis independentes, o que torna a resolução de sua equação de transporte uma tarefa complicada e muitas vezes impraticável, mesmo computacionalmente. Uma forma de resolver a equação de transporte da PDF conjugada é através de métodos estocásticos, utilizando a técnica de Monte Carlo, como é feito pelo Chemkin.

Além de obter uma PDF conjugada das propriedades do fluido, é necessário transportá-la ao longo do escoamento e do tempo. Para isso é obtida a equação de transporte da PDF conjugada. O ponto de partida para a obtenção dessa equação de transporte são as equações da continuidade, do transporte da quantidade de movimento, do transporte da fração em massa, das espécies químicas e da energia.

A PDF da velocidade $f(\vec{v}; \vec{x}, t)$ é transportada ao longo do escoamento através da utilização da equação de Navier-Stokes. Através de derivações matemáticas é possível obter a equação descrita abaixo.

$$\frac{\partial f}{\partial t} + u_i \frac{\partial f}{\partial x_i} = - \frac{\partial}{\partial v_i} \left(f \cdot \left\langle \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x_i} + v \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_i} \right\rangle | \vec{v} \right) \quad (13)$$

No caso das simulações utilizando o Chemkin, a variável de interesse não é a velocidade, mas sim as propriedades termodinâmicas e as concentrações de cada espécie química para os pontos do reator. Dessa forma, a PDF a ser transportada é uma PDF de escalares, e seu transporte ao longo do reator não será feito com a utilização da equação de Navier-Stokes, mas sim com a utilização da equação de transporte dos escalares, a Eq. (14).

$$\frac{D\phi}{Dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + u_i \frac{\partial \phi}{\partial x_i} = \Gamma \nabla^2 \phi + S_\phi \quad (14)$$

Note que para essa equação o termo fonte S_ϕ está fechado, ou seja, ele é exatamente determinado através da cinética química, sem a necessidade de modelagens. Fato esse que torna a utilização da equação de transporte da PDF dos escalares ainda mais interessante para o estudo de escoamentos reativos.

Dado um campo vetorial $\phi(x, t) = [U(x, t), Y(x, t), h(x, t)]$ como sendo o conjunto do campo de velocidade, de fração mássica das espécies e da entalpia, temos que $f_\phi(\psi; x, t)$ é sua PDF, contida num espaço amostral tridimensional V, Γ, H e definida num ponto x num instante de tempo t .

Após complicadas derivações matemáticas é possível obter a equação de transporte para a PDF conjugada $f_\phi(\psi; x, t)$ dos escalares e da velocidade, mostrada abaixo.

$$\rho(\psi) \left[\frac{\partial f_\phi(\psi; x, t)}{\partial t} + V_j \frac{\partial f_\phi(\psi; x, t)}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial [\rho(\psi) \langle A_j | \psi \rangle f_\phi(\psi; x, t)]}{\partial V_j} - \frac{\partial [\rho(\psi) \langle C_k | \psi \rangle f_\phi(\psi; x, t)]}{\partial \Gamma_k} - \frac{\partial [\rho(\psi) \langle C_h | \psi \rangle f_\phi(\psi; x, t)]}{\partial H} \quad (15)$$

Essa equação indica que a PDF conjugada $f_\phi(\psi; x, t)$ evolui no espaço real x devido às flutuações da velocidade V , no espaço de fase da velocidade devido ao termo da aceleração condicionada $\langle A_j | \psi \rangle$, no espaço das frações mássicas devido ao termo da difusão/reação condicionada $\langle C_k | \psi \rangle$, e no espaço de fase de entalpia total devido ao termo da difusão/fonte condicionada de $\langle C_h | \psi \rangle$.

Como no caso do PaSR o reator opera em regime permanente e a velocidade é considerada constante, é utilizada uma equação de transporte da PDF conjugada que envolve somente o campo escalar. Dessa forma sua equação é mais simples que a Eq. (15), porém a abordagem de transporte de PDF somente no campo escalar exige que o modelo de transporte da turbulência seja acoplado no método de resolução para fornecer o campo de velocidades. Felizmente para o cálculo de escoamentos turbulentos e reativos a escolha do modelo de turbulência não influi de maneira drástica na determinação das estatísticas dos escalares. Dessa forma o estudo desses modelos não será abordado por esse trabalho.

A equação do transporte da PDF conjugada dos escalares, para um caso particular de densidade ρ constante, viscosidade dinâmica constante e coeficiente de difusividade Γ constante, para uma espécie α , é da seguinte forma:

$$\frac{\partial f_\phi(\psi; x, t)}{\partial t} + \frac{\partial [\langle U_j | \psi \rangle f_\phi(\psi; x, t)]}{\partial x_j} = - \frac{\partial [\langle \Gamma_\alpha \nabla^2 \phi_\alpha | \psi \rangle f_\phi(\psi; x, t)]}{\partial \psi_\alpha} - \frac{\partial \left[\frac{1}{\rho} S_\alpha(\psi) f_\phi(\psi; x, t) \right]}{\partial \psi_\alpha} \quad (16)$$

Analisando a equação (16) é possível perceber que a PDF dos escalares evolui sob influência do transporte convectivo devido à velocidade U_j condicionada a um valor de ψ contido no campo dos escalares, do transporte no espaço da composição devido à mistura molecular condicionada e do termo de produção química da espécie α S_α .

Além de não possuir informações sobre as flutuações da velocidade, a equação de transporte da PDF dos escalares também não contém nenhuma informação sobre a taxa de dissipação do escalar e seu acoplamento com o campo turbulento. Dessa forma é necessário um modelo de mistura para obter o efeito da difusão molecular. Como dito anteriormente existem dois modelos para a mistura disponíveis no Chemkin, o IEM e o Curl'.

A equação (16) pode ser simplificada para aplicação no PaSR, considerando que os efeitos convectivos estão relacionados com a vazão através do reator e com o tempo de residência, descrito pela equação (8), e que as propriedades ao longo do reator são uniformes, apesar de diferentes a nível molecular, podemos obter a seguinte expressão:

$$\frac{\partial f_{\phi}(\psi; t)}{\partial t} = \frac{1}{\tau_r} [f_{\phi}^e(\psi; t) - f_{\phi}^s(\psi; t)] - \frac{\partial [\langle \Gamma_{\alpha} \nabla^2 \phi_{\alpha} | \psi \rangle f_{\phi}(\psi; t)]}{\partial \psi_{\alpha}} - \frac{\partial \left[\frac{1}{\rho} S_{\alpha}(\psi) f_{\phi}(\psi; t) \right]}{\partial \psi_{\alpha}} \quad (17)$$

Na equação (17), o primeiro e o terceiro termos representam, respectivamente, os efeitos da convecção e da reação química. Já o segundo termo representa o efeito da mistura, a ser modelado por Curl's ou IEM.

A equação (17) é, por fim, a equação a ser resolvida pelo Chemkin utilizando o método de Monte Carlo e adotando um dos dois modelos de mistura expostos acima.

Segundo *Orbegoso, 2007*, o modelo de mistura IEM é o mais adequado para esse estudo uma vez que ele é o único que apresenta um acoplamento direto entre a reação e a mistura e, por isso, esse será o modelo utilizado nas simulações realizadas.

A resolução da Eq.(17) por métodos analíticos é impossível uma vez que ela deve ser resolvida num espaço de mais de 17 dimensões, isso porque existem 17 espécies químicas envolvidas no mecanismo de reação, e além da concentração de cada uma delas, também devem ser levadas em conta outras variáveis, como a temperatura, pressão e o volume do reator.

Conforme explicado anteriormente, uma vez sendo impossível uma resolução analítica da equação do transporte da PDF para os escalares, a utilização de métodos numéricos se faz necessária. O método utilizado pelo Chemkin é o método de Monte Carlo.

O método de Monte Carlo consiste em resolver problemas matemáticos com a utilização de simulações de variáveis randômicas. Basicamente são geradas variáveis randômicas que são observadas de modo a gerar uma função densidade de probabilidade (PDF) a partir da qual a propriedade de interesse será analisada.

6. Resultados

A câmara de combustão da turbina a gás estudada foi projetada para operar com GLP e gás natural, dessa forma serão simuladas reações com o propano e metano.

O mecanismo encontrado para a reação do propano com ar foi considerado inadequado para uma correta representação da câmara de combustão. Essa conclusão foi obtida após simulações utilizando o modelo PSR que acusaram que a temperatura necessária para a ocorrência de reação, tanto na entrada dos gases, como no interior do reator deveria ser superior a 1400K, fato que não condiz com as condições de operação da micro-turbina a gás estudada.

As simulações feitas com metano empregando o PSR constataram a ocorrência de reação para temperaturas iniciais da câmara da ordem de 1400 K, mas com temperaturas de entrada dos gases da ordem de 300 K, condizendo assim com as condições reais de operação da câmara. Dessa forma o mecanismo para metano foi considerado adequado e partiu-se para simulações empregando o PaSR.

Primeiramente foram utilizados os mesmos dados de entrada do PSR, e foi *setado* somente um problema de equilíbrio no PaSR. Conforme esperado, para um problema somente de equilíbrio, o PaSR representou o PSR, caracterizando a ocorrência da combustão.

Desligando o problema de equilíbrio e empregando o problema de reação química, já não ocorreu a reação. Dessa forma, imaginou-se que o problema era o tempo de mistura que poderia estar muito alto.

Diminuindo o tempo de mistura, não foram observadas mudanças nos resultados, continuando sem reagir. Passou-se então a alterar os outros parâmetros, um de cada vez, com o objetivo de determinar qual o parâmetro mais influente para a ocorrência da reação.

Não foi detectada a ocorrência de reação para dados coerentes com a realidade de operação da câmara de combustão da micro-turbina a gás. As primeiras simulações que reagiram contavam com fluxos mássicos extremamente baixos, da ordem de 0,07 g/s, enquanto o fluxo real é da ordem de 70 g/s. Já os outros parâmetros dessas simulações estavam próximos aos encontrados na realidade.

Empregando valores reais para o fluxo mássico na entrada do reator e mantendo os outros valores também dentro de faixas condizentes com a realidade, não foi possível obter a reação de combustão.

O volume foi alterado uma vez que não era possível garantir qual porção da câmara de combustão seria adequadamente representada pelo modelo PaSR. Mesmo após várias alterações no volume também não foi observada a ocorrência da combustão.

Posteriormente foram modificadas as temperaturas, tanto de entrada como inicial do reator. Mantendo as temperaturas dentro de valores próximos à realidade não foi observada a combustão, somente quando os valores de entrada e iniciais atingiam 1400 K foi detectada a ocorrência de combustão.

Foi também observada uma falha no programa Chemkin que implicava na ocorrência de erros para temperaturas na faixa de 1412 K a 1460 K. Além disso, não foi possível plotar os gráficos das PDFs dos escalares desejados, o que

dificultou muito algumas análises sobre o comportamento do reator. Através desses gráficos seria possível verificar se a reação simplesmente não ocorreu, ou não pode ser mantida.

Através das muitas simulações realizadas com o software Chemkin foi possível concluir que o modelo de reator PaSR não é capaz de simular corretamente a câmara de combustão da micro-turbina a gás estudada.

As simulações feitas com valores próximos da realidade acusaram que não ocorre a combustão, contradizendo com o fato de a câmara estar operando adequadamente com esses dados.

O modelo PSR, no entanto, está mais próximo de uma correta modelagem da câmara de combustão, apesar de não apresentar correlações com a mistura turbulenta, uma vez que apresentou a reação de combustão para os dados de entrada nos quais a combustão ocorreu no aparato experimental. Os resultados para a simulação mais condizente com a realidade são apresentados nas tabelas abaixo.

| ENTRADAS | |
|--------------------------------|--------------------------|
| Tipo de Simulação | Eq. Da Energia dos Gases |
| Fluxo mássico | 70 g/s |
| Pressão | 2 bar |
| Temperatura Inicial | 1500 K |
| Temperatura Entrada | 320 K |
| Volume | 3980 cm ³ |
| CH ₄ (fração molar) | 0,095 |
| O ₂ (fração molar) | 0,19 |
| N ₂ (fração molar) | 0,71 |
| Tempo de Simulação | 1s |

Tabela 1. Entrada de dados para o PSR

| SAÍDAS | |
|--------------------------------|------------|
| Temperatura | 2199,9 K |
| Fluxo mássico | 70 g/s |
| CH ₄ (fração molar) | 9,10 E-6 |
| O ₂ (fração molar) | 0,074 |
| N ₂ (fração molar) | 0,9 |
| CO ₂ (fração molar) | 0,708 |
| CO(fração molar) | 0,081 |
| H ₂ O(fração molar) | 0,012 |
| H ₂ (fração molar) | 0,049 |
| Consumo de CH ₄ | 0,33 mol/s |

Tabela 2. Saída de dados para o PSR.

Infelizmente não foi possível entender o porquê das simulações utilizando o PaSR não apresentarem reação de combustão para os dados reais da câmara. Dessa forma essa investigação é proposta para trabalhos futuros, uma vez que o modelo de reator PaSR ainda é considerado muito interessante para o estudo de mistura turbulenta.

Como contribuição geral desse trabalho, pode-se citar a grande quantidade de estudos realizadas sobre o funcionamento do PaSR, os modelos matemáticos envolvidos em suas simulações e, principalmente, os métodos PDF para o estudos de escoamentos turbulentos e reativos. Esses estudos foram compilados nesse relatório e espera-se que possam ser úteis para futuras simulações e aplicações do PaSR por outros alunos.

Por fim, deve ser citado que apesar de não apresentar resultados satisfatórios para a simulação da câmara de combustão, o software Chemkin é uma poderosa ferramenta para análises de reações químicas. Seria interessante também propor estudos futuros para obter o gráfico da PDF dos escalares e assim analisar melhor as simulações, e assim tentar entender o motivo pelo qual o PaSR não se mostrou a ferramenta adequada para representar a câmara de combustão.

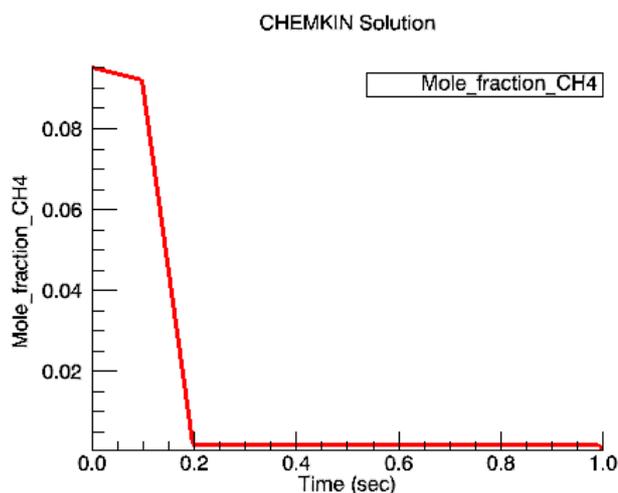


Figura 4. Consumo de CH₄ no reator PaSR utilizando fluxo mássico de 0,07 g/s.

7. Agradecimentos

Agradeço ao Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental (LETE) com toda sua equipe pelo oferecimento dos recursos necessários para o presente trabalho e a ANP pelo financiamento.

Ao Prof.º Guenther pela paciência, apoio, dedicação e empenho incessantes, sem os quais este trabalho não seria possível.

Ao Prof.º Fernando pelas aulas que tanto colaboraram para o entendimento dos métodos PDF.

A todos que direta, ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

8. Referências

Chemkin Theory Manual-Reaction Design-2004.

Fukumaso, N. K. e Krieger Filho, G. C.-Projeto Aero-termodinâmico de uma câmara de combustão para micro-turbina a gás derivada de um turbocompressor automotivo-Escola Politécnica da USP-2006.

Krieger Filho, G. C. -A Turbulent Combustion Model Based on Large Scale Motion Coupled to Perfectly Stirred Reactor Compared to a Partially Stirred Reactor-COBEM-2005.

Narayanaswami, L e Richards, G. A.- Pressure Gain Combustion-Journal of Engineering for gas Turbines and Power-1996.

Orbegoso, E.M.M. e Figueira da Silva, L.F.- Estudo de Modelos de Mistura Estocásticos para Combustão em Escoamentos Turbulentos-PUCRJ-2007.

Pope, S. B. - PDF Methods for Turbulent Reactive Flows-Pergamon Press-Prog. Energy Combust. Sci.-1985, Vol 11, pp 119-192.

Pope, S. B. - Turbulent Flows-Cambridge University Press-2000.

Turns, R.S.-An Introduction to Combustion-McGraw-Hill-1999.

Van Wylen, G.J. , Borgnakke, C. e Sonntag E. R.-Fundamentos da Termodinâmica-Edgard Bluncher-2003.

Versteeg H.K., Malalasekera W. - Introduction to Computational Fluid Dynamics. The Finite Volume Method-Longman-1995.

www.fluentusers.com- consultado em 10/08/08 e 17/11/08.

www.reactiondesign.com- consultado em 9/06/08, 10/10/08, 12/11/08 e 17/11/08.

9. Direitos autorais

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

STUDY OF CONDITIONS OF INSTABILITY IN COMBUSTION CHAMBER OF MICRO GAS TURBINES

Natália Bernardi Ghisi

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
natalia.ghisi@poli.usp.br

Guenther C. Krieger Filho

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
guenther@usp.br

Abstract. *The purpose of this work is to obtain a model that measures the conditions of instability in the combustion chamber of a micro gas turbine, depending on the flow rate of air and fuel.*

The model is obtained through the use of existing models of reactors in the commercial software Chemkin, where will be implemented by detailed kinetics of the combustion process that occurs inside the chamber.

For the evaluation of the variations in the rate of turbulence inside the combustion chamber, the commercial software of computational fluid mechanics Fluent is used. The parameters of turbulence of the flow of combustion chamber are used as data entry of the thermodynamic model to be simulated in Chemkin.

After obtaining such a model, will be carried out experimental studies where will be observed the operational conditions of the micro gas turbine installed at LETE. With this data the validation of the model will be done and its constants will be adjusted for improving the representation of the chamber.

Keywords. *combustion, micro gas turbines, numeric simulation.*