



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INFLUÊNCIA DO TEMPO CARACTERÍSTICO DO MOMENTO ANGULAR DE UMA GOTA DE COMBUSTÍVEL NA TAXA DE EVAPORAÇÃO

**RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
(PIBIC/CNPq/INPE)**

Rafael Baldini Barud (UMC, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: barudinho@hotmail.com

Dr. Jeronimo dos Santos Travelho (LAC/CTE/INPE, Orientador)
E-mail: jeff@lac.inpe.br

COLABORADORES

Israel Borges Sebastião (UMC, Bolsista PIBIC/CNPq)

Julho de 2008



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**INFLUÊNCIA DO TEMPO CARACTERÍSTICO DO MOMENTO
ANGULAR DE UMA GOTA DE COMBUSTÍVEL NA TAXA DE
EVAPORAÇÃO**

Rafael Baldini Barud

Relatório Final do Projeto de Iniciação Científica orientada pelo Dr.
Jeronimo dos Santos Travelho

INPE
São José dos Campos, SP
2008

“A dúvida é o princípio da sabedoria”.

(Aristóteles).

Aos meus familiares...

AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer ao Dr. Jeronimo dos Santos Travelho (LAC/CTE/INPE) pela orientação realizada neste trabalho, cujo foi parcialmente suportado pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica do INPE e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (PIBIC/CNPq/INPE).

RESUMO

A utilização da energia proveniente de combustíveis é de fato um assunto presente nas mais diversas áreas, e não é preciso ir longe para perceber a sua importância, podemos observar inúmeras aplicações em indústrias, automóveis, e até mesmo na área aeroespacial e militar. Frente à importância das aplicações desses combustíveis na forma de spray, faz-se necessário o entendimento dos fenômenos governantes, bem como o impacto de cada um dos fatores envolvidos no processo de queima. Neste projeto se pretende definir um tempo característico de resposta da gota às flutuações de velocidade e estudar como a razão entre os tempos característicos da turbulência e o tempo de resposta da gota influencia na taxa de evaporação. Para realizar esta análise buscou-se definir analiticamente a dimensão característica dos vórtices de Hill presentes no interior da gota, e com qual impacto este afetava o tempo de difusão da vorticidade para a gota em movimento. Além disso, foram utilizados tempos característicos da turbulência retirados de resultados de alguns experimentos presentes na literatura para efetuar a comparação citada anteriormente. Os resultados mostram que diferente das descrições encontradas na maioria dos artigos, a comparação entre os dados analíticos e experimentais torna-se mais consistente quando o tempo de vorticidade leva em conta a viscosidade do gás e da gota.

Palavras-chave: Gotas, taxa de evaporação, turbulência, vórtice de Hill.

ABSTRACT

The use of energy from fuel is a matter that really is in the most diverse areas, and there is no need to go far to realize its importance, we can see its applications in many ways as industries, cars, and even in aerospace and military areas. Facing the importance of the applications of these fuels in the spray form, it is necessary to understand the governing phenomena, as well as the impact of each factor involved in the burning process. This project intend to set a characteristic time for response of the drop to fluctuations of speed and study as the ratio between the characteristic turbulence time and the characteristic response time affect the evaporation rate in the drop. To conduct this analysis was analytically defined the characteristic Hill vortex size present inside the drop, and its impact in the characteristic vorticity time for the drop in motion. Moreover, were used characteristic turbulence times taken from some experiments results presents in the literature to make the comparison mentioned above. The results show that differences from the descriptions found in most articles, the comparison between the experimental and analytical data becomes more consistent when the characteristic vorticity time takes into account the viscosity of the gas and drop.

Keywords: Droplets, evaporation rate, turbulence, Hill vortex.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	09
2 - ATIVIDADES REALIZADAS.....	11
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	12
4 - METODOLOGIA.....	22
5 - RESULTADOS E ANÁLISES.....	23
6 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	34

1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia proveniente de combustíveis é de fato um assunto presente nas mais diversas áreas, e não é preciso ir longe para perceber a sua importância, podemos observar inúmeras aplicações em indústrias, automóveis, e até mesmo na área aeroespacial e militar. Essas fontes de energia são na maioria dos casos utilizadas na forma líquida, devido à facilidade em transportá-las em condições com pressão e temperatura ambientes. Contudo, para otimizar o processo de combustão, esses líquidos geralmente são pulverizados em forma de pequenas gotas dentro de uma câmara de combustão, com isso a área de contato entre a gota e ar circunvizinho é aumentada, contribuindo assim para o aquecimento e evaporação da mesma, cujos são fenômenos superficiais.

Frente à importância das aplicações desses combustíveis na forma de spray, faz se necessário o entendimento dos fenômenos governantes, bem como o impacto de cada um dos fatores envolvidos no processo de queima, como por exemplo, pressão, o tamanho e as propriedades termo-físicas da gota, velocidade do escoamento de ar, as dimensões da câmara de combustão, etc. Porém de uma maneira geral, a temperatura, turbulência do ambiente (escoamento) e o tempo de residência do combustível, o qual determina a magnitude da câmara de combustão são os três fatores (*3-T factors*) principais na eficiência da combustão.

Embora a evaporação e combustão de gotas sejam estudadas por quase um século, a complexidade desse fenômeno fez com que muitas questões ainda permaneçam abertas. Uma delas é a variação da taxa de evaporação devido à turbulência. Em um recente artigo de revisão Birouk e Gökalp (2006) mostram diversos estudos e a colaboração de seus grupos em descrever o fenômeno. Os trabalhos que são dedicados a esse tema só recentemente (MASOUD e

SIRIGNANO, 2000) têm se dedicado a análises detalhadas da interação entre turbulência e evaporação. Os anteriores, tais como nos trabalhos de Maisel e Sherwood (1950), abordavam o problema de maneira global a partir de dados experimentais. Em nenhum desses trabalhos foi levado em conta o tempo que os vórtices internos (ou melhor, o vórtice) à gota levam para responder às variações da velocidade ao redor da gota devido à turbulência. Neste projeto se pretende definir um tempo característico de resposta da gota às flutuações de velocidade e estudar como a razão entre os tempos característicos da turbulência e o tempo de resposta da gota influencia na taxa de evaporação, a qual é uma propriedade fundamental para o estudo e otimização dos processos de combustão.

Para realizar esta análise buscou-se definir analiticamente a dimensão característica dos vórtices de Hill presentes no interior da gota, e com qual impacto este afetava o tempo de difusão da vorticidade para a gota em movimento. Além disso, foram utilizados tempos característicos retirados de resultados de alguns experimentos presentes na literatura para efetuar a comparação citada anteriormente.

2 ATIVIDADES REALIZADAS

Segue um breve resumo das atividades executadas na iniciação científica para atingir os resultados apresentados nas seções seguintes.

O período de agosto a Janeiro foi dedicado à revisão de conceitos de cálculo diferencial e vetorial e ao estudo dos fundamentos de mecânica dos fluidos, dando ênfase à Dinâmica dos fluidos elementar – equação de Bernoulli, na cinemática dos fluidos e análise com volumes de controle finitos.

Nesse mesmo período foi iniciada a leitura detalhada dos artigos “On steady laminar flow with closed streamlines at large Reynolds number” do autor G. K. Batchelor, “Theory of convective droplet vaporization with unsteady heat transfer in the circulating liquid phase” e “Liquid fuel droplet heating with internal circulation” dos autores S. Prakash e W. A. Sirignano.

Já em 2008, num primeiro instante foi realizado um estudo da evaporação de uma gota em repouso e o estudo do escoamento de uma gota em escoamento laminar, etapa esta que forneceu diversos e importantes conceitos para o prosseguimento do trabalho. Em seguida foram definidos alguns dos tempos característicos da gota fazendo correlações entre os dados da literatura sobre evaporação de gotas e os tempos característicos da gota. Finalmente, os resultados e conclusões importantes foram organizadas na forma de relatório.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aqui são apresentados alguns conceitos básicos sobre o escoamento de gotas, cujo foram estudados durante o projeto.

3.1 ESCOAMENTO LAMINAR E TURBULENTO

Conforme o estudo da estrutura interna dos escoamentos apresentada pelo cientista Osborne Reynolds, pioneiro neste tipo de estudo, é simples o entendimento dos escoamentos. Conforme Reynolds, apenas injetando um filete de corante em um escoamento de água interno a um tubo de vidro transparente circular, e observando o comportamento do filete de corante ao longo do tubo, foi possível identificar duas características comportamentais distintas, conforme demonstra a figura abaixo.

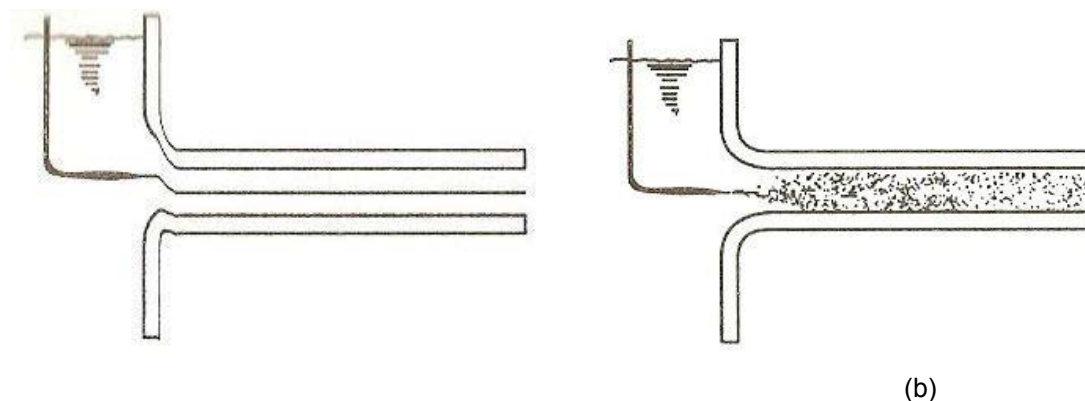


Fig. 1. Experimento de Reynolds, a)Escoamento Laminar b)Escoamento turbulento

a) O filete permanece íntegro e essencialmente retilíneo ao longo do escoamento. Não há processo de mistura transversal macroscópico. Qualquer mistura ocorre apenas em nível molecular, pelo processo de difusão molecular. Nesta situação, dois filetes de corante próximos não se misturam e pode-se dizer que o escoamento ocorre como se lâminas de fluido escoassem

paralelamente. Sendo assim, esse regime de escoamento recebeu o nome de *Regime Laminar*.

b) O filete desagrega-se rapidamente, com sua massa espalhando-se por toda a seção transversal do tubo, como consequência de intensa mistura no sentido transversal do escoamento. Percebem-se movimentos aleatórios em todas as direções da massa fluídica que se desloca. Nessa situação não é apenas o movimento molecular que provoca o deslocamento de moléculas entre as diferentes “lâminas” de fluido. Nesse regime, denominado *Regime Turbulento*, há transferência de volumes macroscópicos de fluido entre as diferentes regiões do escoamento.

Alguns estudos chamaram a atenção para a existência de um limite de velocidade acima para o qual o comportamento do movimento que estava sendo estudado era alterado para um movimento desordenado, e outros observaram que o aparecimento da turbulência além de depender da velocidade do escoamento e da viscosidade do fluido, também dependia, nos escoamentos em tubos, do diâmetro dos mesmos, e ainda em qual estado o movimento turbulento deixava de existir quando o valor de alguma das três variáveis (ou todas em conjunto), ultrapassava determinado limite.

Assim, pode-se dizer que a estrutura laminar ou turbulenta de um escoamento depende de suas próprias condições e propriedades, estas que são avaliadas pelo número adimensional de Reynolds que consiste em uma razão entre as forças inerciais e as forças viscosas de uma mesma porção de fluido. Para escoamentos em tubos, por exemplo, o surgimento da turbulência se dá em valores de Reynolds de aproximadamente 2700.

Tanto o escoamento laminar, cujas linhas de corrente comportam-se de maneira regular ao longo do escoamento, quanto o turbulento que apresenta uma vorticidade aleatória tridimensional das componentes de velocidade, possui

importantes papéis nos fenômenos físicos envolvidos no escoamento. Por exemplo, em processos onde a mistura de espécies e a transferência de calor são aspectos importantes, o escoamento turbulento sem dúvida será mais eficiente que o laminar, pois nesta situação, os processos de mistura e troca térmica ocorrem principalmente devido ao movimento irregular do fluido (convecção) e em menor parcela à difusividade molecular, que no caso dos escoamentos laminares são a principal causa dos processos de troca. Por outro lado, o escoamento laminar é desejável quando a perda de carga e os processos citados anteriormente devem ser minimizados.

A turbulência é uma característica do escoamento e não do fluido, além disso, suas propriedades não são controladas em grande parte pelos processos moleculares. Devido à sua natureza macroscópica aleatória, torna-se impossível uma aproximação determinística do problema, justificando assim o uso de métodos estatísticos.

3.2 ESCOAMENTO EXTERNO E INTERNO

O escoamento externo ocorre sempre quando a superfície analisada não tem barreiras adjacentes, dessa forma a camada limite não tem qualquer tipo de obstrução ao longo da superfície, como, por exemplo, placas planas e esferas.

No escoamento interno, o fluido encontra-se restrito a uma superfície, por exemplo, um tubo, onde a camada limite não tem como se desenvolver sem ser restringida.

3.3 MOVIMENTO DA GOTA

A fim de se aprofundar no estudo do processo de combustão, cujo é basicamente função a interação gás-gota e da energia liberada, neste processo de queima, muitos estudos visaram descrever apenas o movimento convectivo da gota na fase de gás relacionando-o a taxa de evaporação, porém outros estudiosos além do movimento global da gota causado pelas forças de arrasto também introduziram a idéia de um movimento interno à gota na forma de vórtices, os quais são causados pelas forças viscosas nas superfícies das partículas que são idealizadas como simetricamente esféricas. Estas forças surgem devido à uma diferença entre a velocidade do escoamento (gás) e a velocidade da gota (líquido), pois uma vez que exista uma flutuação na velocidade do gás a gota leva um determinado tempo para que sua velocidade tenda a mesma velocidade do escoamento de gás, esse tempo geralmente é chamado de tempo de resposta ou de adaptação (τ_R).

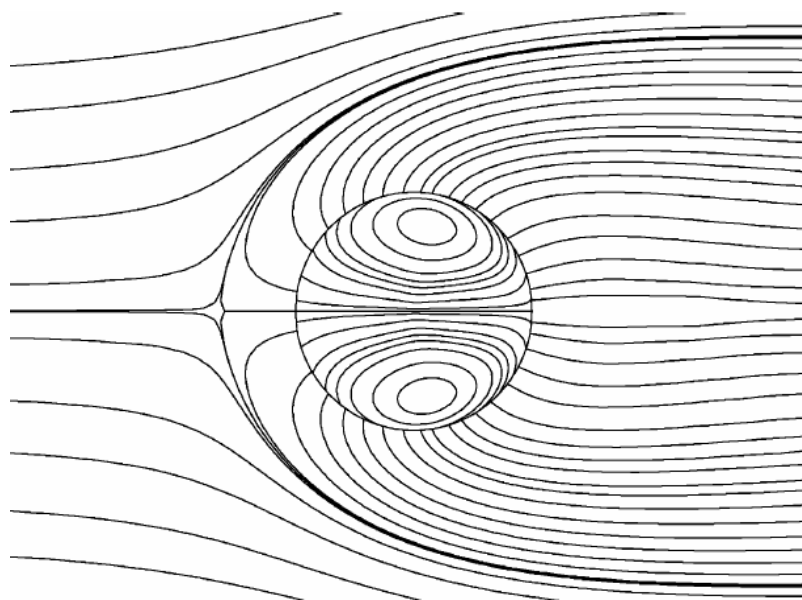


Fig. 2. Contorno típico da vaporização e movimento interno de uma gota em ambiente convectivo.

Fonte: Zhang, (2003).

A figura anterior visa reforçar os fenômenos citados, e com esta pode se observar que além das linhas de corrente do gás e da evaporação da gota, há também um movimento rotacional na fase líquida que é conhecido como vórtices de Hill (*Hill Vortex*). Podemos atribuir os vórtices à força viscosa na superfície da gota cuja tende a deslocar o fluido da superfície externa à montante da gota para as regiões a jusantes nas quais o fluido retorna ao centro da partícula devidas às forças de inércia. Com esse movimento a distribuição de temperatura é fortemente alterada, e conseqüentemente a taxa de evaporação também.

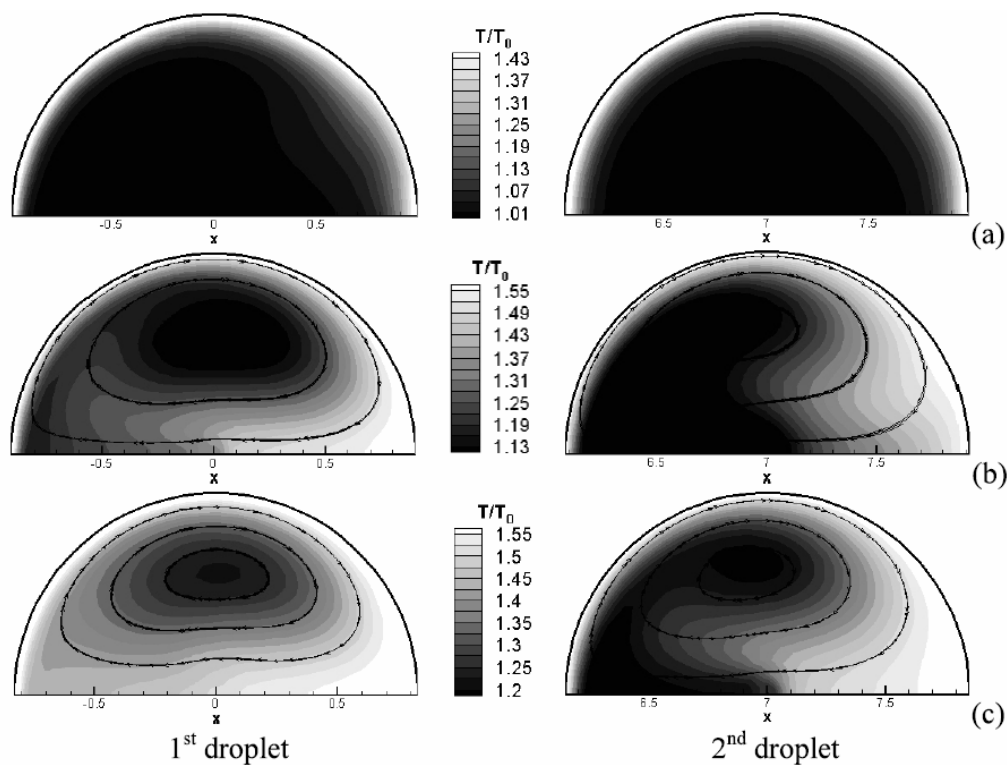


Fig. 3. Evolução temporal do campo de temperatura de duas gotas.

Fonte: Kim et al., (2005).

Com base nos trabalhos de Kim et al. (2005), pode-se dizer que a região central dos vórtices são as menos aquecidas, e este fato não é nenhuma surpresa uma vez que o calor provém do gás circunvinho e o centro do vórtice apresenta movimento praticamente nulo.

3.4 IMPORTÂNCIA DA TURBULÊNCIA NA COMBUSTÃO

Praticamente todo combustor em spray, compartilha energia com a turbulência do meio convectivo (gás) envolvido, essa aleatoriedade segundo a maioria dos recentes trabalhos presentes na literatura é um fator governante na combustão, o qual afeta não apenas a concentração (mistura) e dispersão das gotas, como também na distribuição do tamanho das partículas e a taxa de vaporização, cuja é afetada pelo tempo de vida da gota (τ_{Life}), cujo pode ser definido pela equação a seguir (PRAKASH E SIRIGNANO, 1977):

$$\tau_{Life} = R^2 / k(1 + 0.3\sqrt{Re}.\sqrt[3]{Pr}) \quad (3.1)$$

Onde R , k , Re , Pr representam o raio e a condutividade térmica da gota, e o número de Reynolds e de Prandtl do gás respectivamente.

A seguir são apresentados alguns esquemas que visam evidenciar a influência da turbulência e suas magnitudes, bem como as principais características envolvidas.

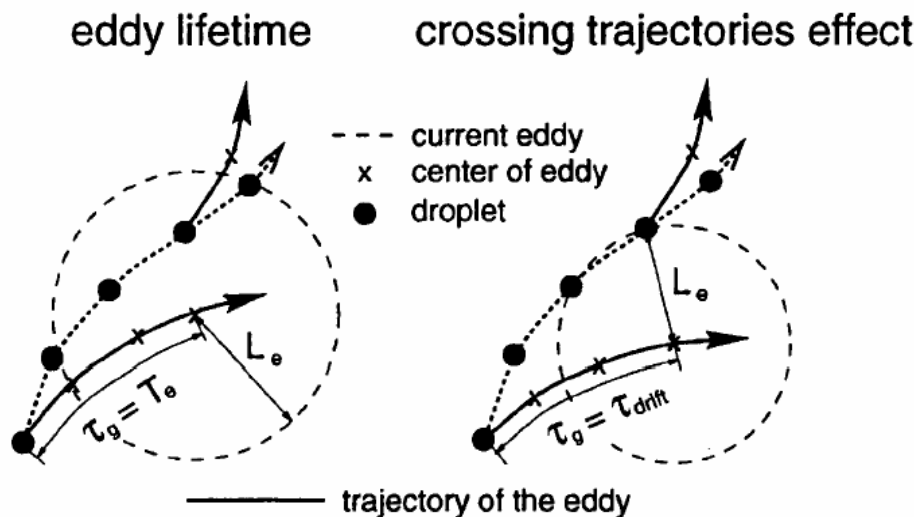


Fig. 4. Estimativa dos efeitos da interação “eddy”-gotas.

Fonte: Klose et al., (2001).

Na figura acima é representada a interação de um vórtice no escoamento de gás (eddy) e uma gota, a qual terá a sua velocidade alterada após o fim desta interface. O tempo efetivo de interação é representado nesta figura como τ_g , é uma função dos valores mínimos do comprimento característico L_e e do tempo de vida T_e do vórtice, em outras palavras o tempo de interação ocorrerá desde que a gota ocupe uma posição menor que o raio do vórtice ou imaginando o sistema de referência na gota, o tempo que o vórtice levaria para atravessá-la completamente.

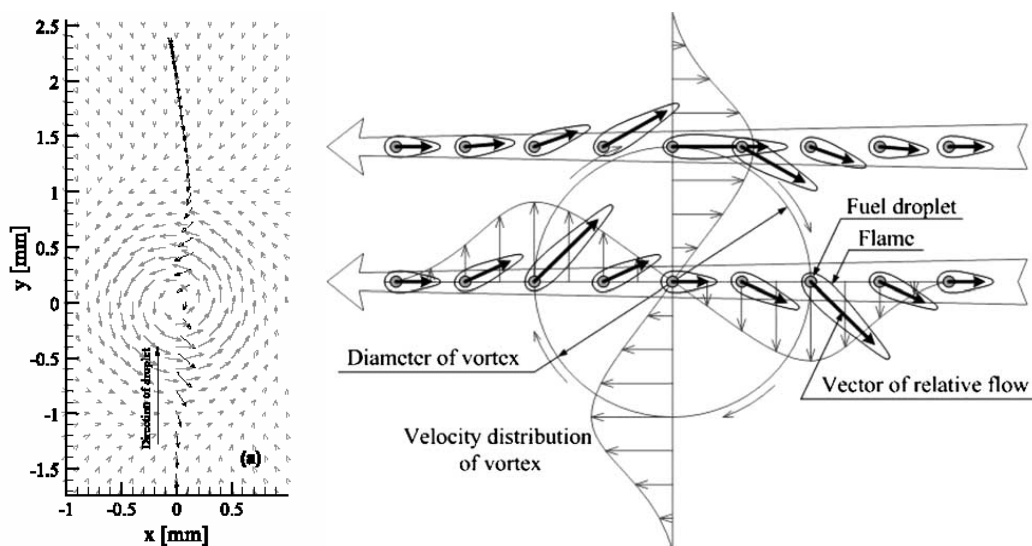


Fig. 5. Distribuição de velocidade do vórtice, e velocidades de resposta da gota.

Fonte: Mitsuya et al., (2005).

Mitsuya et al. (2005) simulou as interações vórtice-gota em ambientes de micro-gravidade, a fim de eliminar os efeitos de convecção natural da turbulência. O esquema e cálculo do movimento de uma gota com 50 μm de diâmetro proposto em seu trabalho são apresentados acima. Na figura do lado direito a seta maior que indica para esquerda representa a direção do movimento do vórtice, o qual vai de encontro à gota.

No trabalho de Sornek et al. (2000) foi estudada a consequência, na taxa de evaporação, das gotas que eram “absorvidas” nos movimentos circulares dos vórtices presentes no escoamento turbulento. Em seu estudo a eficiência da

evaporação era baseada na capacidade dos vórtices de aumentar ou diminuir o espaçamento entre as gotas, as quais por ação da força centrípeta são direcionadas para a periferia do vórtice. Segundo suas análises, gotas muito próximas saturavam a região circunvizinha com o vapor do combustível, limitando a taxa de vaporização, ou seja, deveria haver uma distância média entre as gotas cuja fornecesse um rendimento máximo na evaporação, e essa distância era basicamente função da força centrípeta dos vórtices que era medida pelo número de Stokes centrípeta.

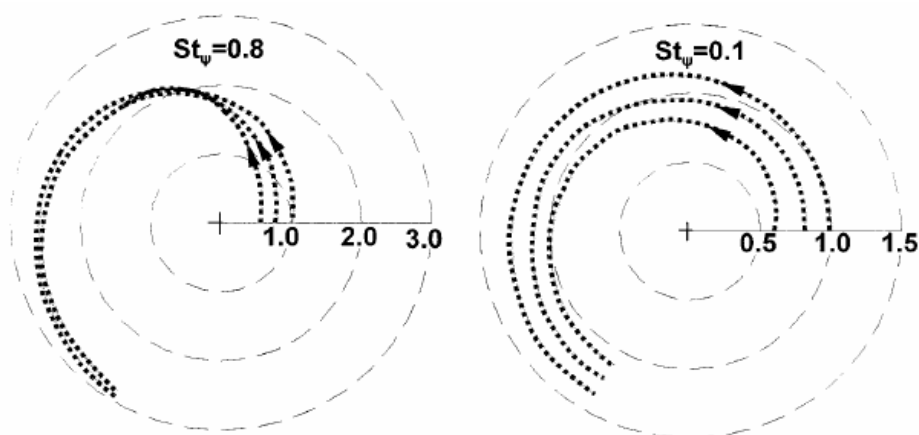


Fig. 6. Trajetória das partículas para diferentes números de Stokes centrípeta.

Fonte: Sornek et al., (2000).

E resumo, como já visto, sabe-se a velocidade do escoamento afeta o movimento interno da gota (vórtices de Hill) e conseqüentemente a sua distribuição de calor e taxa de evaporação, assim como apresentado nesta seção, quando esta gota interagir com os vórtices presentes na turbulência do escoamento de gás o movimento interno da gota também sofrerá mudanças, e ai está a importância em estudar os fenômenos da turbulência, como por exemplo, a frequência e dimensão dos vórtices que interagem com a gota, como a esta irá se comportar durante e após a interação, entre outros fatores que afetarão na eficiência da combustão analisada.

3.5 APARATO EXPERIMENTAL

Abaixo segue uma breve descrição dos dispositivos que possibilitaram a realização dos experimentos estudados neste trabalho, é importante ressaltar que o esquema apresenta abaixo é uma configuração específica para um caso, porém a idéia geral do demais experimentos é seguida.

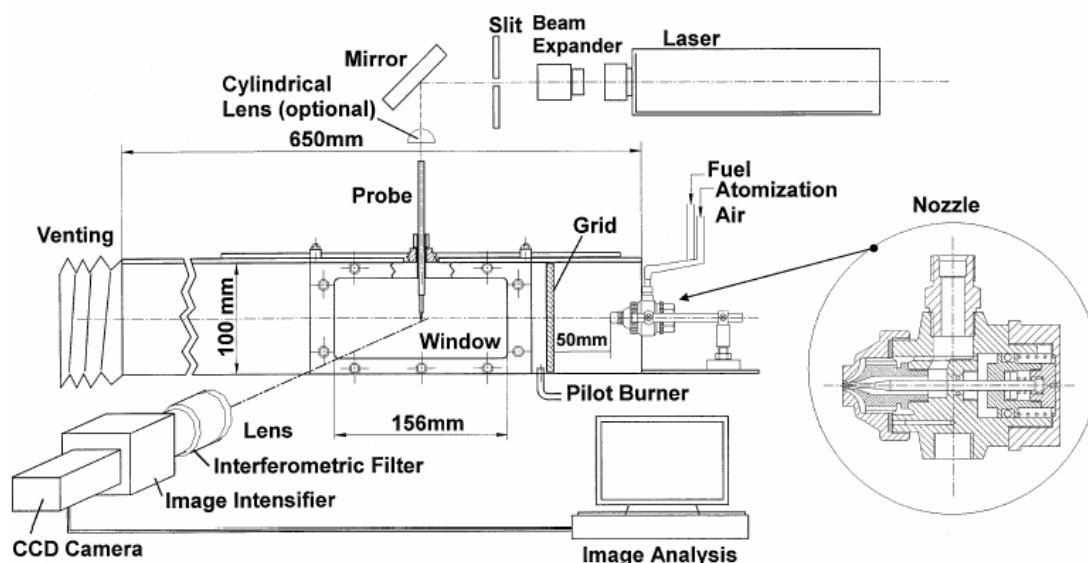


Fig. 7. Distribuição de velocidade do vórtice, e velocidades de resposta da gota.

Fonte: Sornek et al., (2000).

Assim de uma maneira geral, os experimentos consistiam, em duto que na maioria dos casos era de seção quadrada da ordem de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ por onde o combustível pulverizado com ar atravessava um dispositivo, que no caso da figura acima é uma malha (peneira), o objetivo desta era possibilitar diferentes intensidades de turbulência ao se alterar as dimensões da malha. Em seguida o spray sofria a ignição inicial por um queimador piloto. Com uma janela de acesso transparente a distribuição de gotas era monitorada qualitativamente por uma câmera CCD (Charge-Coupled-Device), e as dimensões e velocidades da gota e do escoamento era medidas através de um sistema PDAP (Phase-Droplet-Particle-Analyzer). O comprimento destas tubulações era da ordem 1 metro e em todos os casos os produtos da

combustão eram direcionados para um sistema de exaustão. Na maioria dos trabalhos analisados os experimentos foram executados em pressões de até 3 vezes o valor atmosférico.

4 METODOLOGIA

O surgimento de um anel de vórtice em uma gota em um escoamento se deve às forças viscosas tangenciais à superfície da gota. Essas forças aplicam uma distribuição de torque em relação ao centro da gota modificando a distribuição de momento angular da gota até se atingir o equilíbrio. No equilíbrio o torque devido às forças viscosas internas é compensado pelo torque das forças viscosas da interface gás-gota. Além disso, a gota é acelerada pelo arrasto e tende a ter a velocidade igual ao do gás ao seu redor. Será feita a comparação dos tempos característicos desses dois fenômenos e será verificado qual é o menor. O menor dos tempos será comparado com os tempos característicos da turbulência em diversas situações experimentais, disponíveis na literatura.

Busca-se identificar se existe alguma relação na modificação da taxa de evaporação em relação a algumas dessas relações (tempo característico da gota e tempo característico da turbulência). Em geral, a modificação da taxa de evaporação é medida como a razão entre a taxa de evaporação em um escoamento turbulento e a taxa de evaporação em um escoamento laminar com velocidade igual à velocidade média do escoamento turbulento.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Como proposto neste capítulo se divide em duas etapas principais, na primeira define-se analiticamente a dimensão característica de um vórtice de Hill e encontra-se um razão entre o tempo de resposta do movimento interno da gota às flutuações de velocidade do escoamento quando esta está em repouso e após já ter iniciado o movimento, além disso, é definido o tempo de resposta da velocidade da gota para a velocidade do gás. Na segunda etapa são feitas comparações entre diferentes tempos característicos da turbulência obtidos experimentalmente e presentes na literatura. Finalmente, se analisa a relação da taxa de evaporação com os dois tipos de tempo encontrados (vorticidade e turbulência).

5.1 TEMPO DE RESPOSTA À VORTICIDADE INTERNA

De acordo com Prakash e Sirignano (1977), o tempo característico aproximado para uma gota estabelecer um movimento interno (vórtice de Hill) estável, ou próximo disso, é dado pela seguinte razão:

$$\tau_v = R^2/\nu_l \quad (5.1)$$

Onde R e ν_l representam o raio e a viscosidade cinemática da gota (líquido).

Ainda utilizando os estudos dos pesquisadores citados acima, utilizamos a função corrente em coordenadas esféricas do núcleo de uma gota submetida a um escoamento de velocidade não perturbada U_∞ .

$$\Psi_0 = -1/2 \cdot Ar^2 (R^2 - r^2) \cdot \sin^2 \theta \quad (5.2)$$

Onde a constante A representa a intensidade do vórtice de Hill, r um raio qualquer e θ um ângulo conforme indicado abaixo:

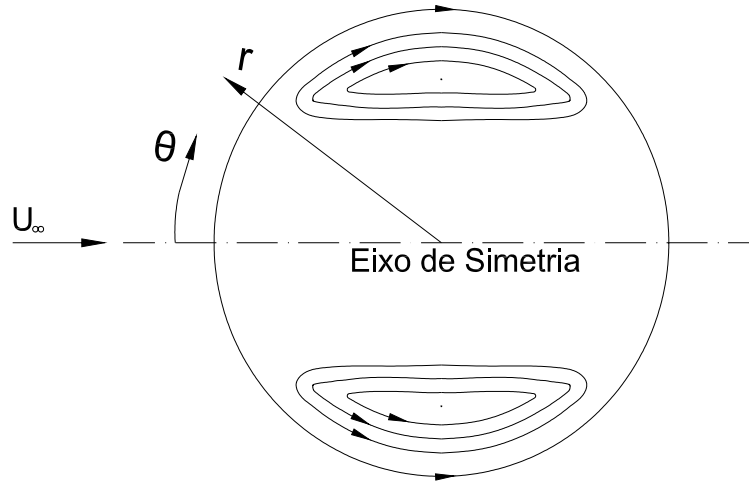


Fig. 8. Linhas de Corrente em um vórtice de Hill.

Fonte: Prakash e Sirignano, (1977).

Derivando a função anterior, obtemos as componentes de velocidade q do vórtice de Hill.

$$q_{\theta_0} = -A(R^2 - 2r^2)\sin\theta \quad (5.3)$$

$$q_{r_0} = A(R^2 - r^2)\cos\theta \quad (5.4)$$

Agora sabendo que para uma solução invíscida $A = 3.U_\infty/2R^2$, teremos a partir das equações acima:

$$\frac{q_{\theta_0}}{-A\sin\theta} = (R^2 - 2r^2) \Rightarrow r = \sqrt{\frac{R^2}{2} + \frac{q_{\theta_0}}{2A\sin\theta}} \quad (5.5)$$

$$\frac{q_{r_0}}{A\cos\theta} = (R^2 - r^2) \Rightarrow r = \sqrt{R^2 - \frac{q_{r_0}}{A\cos\theta}} \quad (5.6)$$

E ainda que no centro do vórtice a velocidade deve ser nula ($q = 0$), a equação 5.5 fica:

$$r = \sqrt{\frac{R^2}{2} + \frac{0}{2A\sin\theta}} \Rightarrow r = \frac{R\sqrt{2}}{2} \quad (5.7)$$

Logo encontramos a posição do centro do vórtice de Hill, e conseqüentemente a dimensão característica R_{HV} (nesse caso o raio) do mesmo conforme demonstrado a seguir:

$$R_{RV} = R - \frac{R\sqrt{2}}{2} \Rightarrow R_{RV} = R(1 - \sqrt{2}/2) \quad (5.8)$$

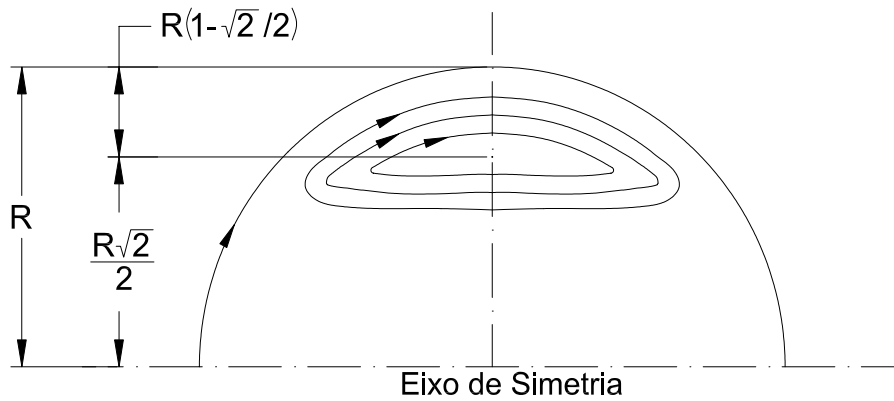


Fig. 9. Dimensão característica do vórtice de Hill.

Assim como Prakash e Sirignano (1977) haviam previsto em suas análises, e foi aqui confirmado analiticamente a dimensão característica para o cálculo do tempo de vorticidade passa de R para $R(1 - \sqrt{2}/2)$, i.e., aproximadamente um terço do raio inicial da gota.

$$\tau_v = \frac{R^2}{\nu_l} \Rightarrow \tau_v = \frac{[R(1 - \sqrt{2}/2)]^2}{\nu_l} \Rightarrow \tau_v = \frac{R^2(3 - 2\sqrt{2})}{2\nu_l} \quad (5.9)$$

Assim temos que τ_v com a gota em movimento (com vórtices de Hill) é cerca de 12 vezes menor que τ_v com a gota parada, como segue;

$$\frac{R^2(3 - 2\sqrt{2})}{2\nu_l} / \frac{R^2}{\nu_l} \cong \frac{1}{12} \quad (5.10)$$

Como o raio de uma gota e a viscosidade cinemática dos combustíveis é da ordem de 10^{-6} , significa dizer que com a gota em movimento os vórtices

internos atingem uma condição de equilíbrio num intervalo de tempo 12 vezes menor do que com relação às gotas que não ainda não possuem o vórtice formado, as quais o tempo característico deve ser da ordem de 10^{-6} segundos.

A mesma análise acima também é válida para o tempo de difusão térmica $\tau_{\text{difusão térmica}}$, que consiste no tempo característico que a gota leva para apresentar um campo de temperatura próximo do equilíbrio. Na equação abaixo α representa a difusividade térmica da fase líquida.

$$\tau_{\text{difusão térmica}} = \frac{R^2}{\alpha_l} \quad (5.11)$$

Apesar das análises acima que foram baseadas principalmente na função corrente do vórtice de Hill serem coerentes, ainda restou um certo ressentimento a respeito do fato do tempo de vorticidade depender apenas das condições geométricas e propriedades termo-físicas gota, ou seja, nas análises anteriores, as propriedades do gás não interferiam no tempo em questão. Esse fato tira de certa maneira a consistência na definição do tempo de vorticidade. Imagine uma gota de água sofrendo uma força de arrasto proveniente do ar escoando em uma condição de turbulência qualquer. É evidente que em um certo intervalo de tempo, os vórtices de Hill atingirão uma condição de equilíbrio conforme já explicado, pois a escoamento de ar externo à gota aplicará uma força viscosa tal que causará esse movimento na fase líquida. Agora imagine as mesmas condições anteriores, porém com a gota de água escoando sobre um gás mais viscoso que o ar do caso anterior. Nessa hipótese é de se esperar que pelo fato da viscosidade do gás ser maior, a força viscosa aplicada na superfície, a qual é proporcional, causará uma maior deformação na superfície da gota, i.e., os movimentos internos responderão de forma mais rápida à medida que não apenas a viscosidade da gota, mas também a viscosidade do gás seja maior.

Com base nos conceitos apresentados, foi definida uma nova expressão para o tempo característico de vorticidade interna da gota, a qual engloba tanto a viscosidade do gás quando a do líquido.

$$\tau_v = \frac{\rho_l R^2}{\sqrt{\mu_l \mu_g}} \quad (5.12)$$

Onde ρ e μ representam a massa específica e a viscosidade dinâmica respectivamente, R indica o raio característico, o qual para uma gota já em movimento deve ser substituído por R_{HV} , e os índices l e g se referem a fase líquida (gota) e a gasosa (escoamento).

5.2 TEMPO DE RESPOSTA À VELOCIDADE DO GÁS

Outra análise importante no movimento da gota é a determinação do tempo de resposta ou de adaptação (τ_R), cujo foi citado no capítulo 3, o qual consiste no tempo característico que a velocidade da gota necessita para se igualar à velocidade do escoamento quando este é submetido a uma variação. A seguir é feita uma dedução simplificada para o cálculo deste intervalo de tempo, lembrando que a literatura esta análise pode ser encontrada com pequenas alterações, porém a idéia geral é preservada.

Nomenclatura:

F Força resultante.

m Massa.

ρ Massa específica.

D Diâmetro da gota.

A_s Área de arrasto.

C_d Coeficiente de arrasto.

v Velocidade do gás.

l, g Índice: líquido e gás.

Aplicando a segunda lei de Newton na gota temos:

$$F = m.a \Rightarrow \rho_l \frac{\pi}{6} D^3 .a \quad (5.13)$$

Sendo a força de arrasto de um gás sobre uma esfera, onde $A_s = \frac{\pi D^2}{4}$, fica:

$$F = C_d \frac{1}{2} \rho_g v^2 A_s \Rightarrow F = C_d \rho_g v^2 \frac{\pi D^2}{8} \quad (5.14)$$

Logo:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{C_d \rho_g v^2 \frac{\pi D^2}{8}}{\rho_l \frac{\pi}{6} D^3} \Rightarrow a = \frac{3.C_d \rho_g v^2}{4.\rho_l D} \quad (5.15)$$

Os valores do coeficiente de arrasto são geralmente expressos em função do número de Reynolds, e acoplar essa relação é uma forma muito comum na literatura de se expandir a expressão acima, porém para este trabalho a dedução limita-se à este estágio. Os coeficientes de arrasto ainda podem ser encontrados em gráficos específicos para o fluido analisado, como por exemplo, aqueles presentes nos trabalhos de Schlichting (1960).

Com isso define-se o tempo característico de resposta ou de adaptação (τ_R):

$$\tau_R = \frac{v}{a} \Rightarrow \frac{4}{3.C_d} \frac{\rho_l D}{\rho_g v} \quad (5.16)$$

Como o diâmetro das gotas é geralmente da ordem de microns (10^{-6}), o coeficiente de arrasto e a velocidade da ordem de um, e a razão entre a massa específica do líquido e do gás é da ordem 10^3 , o tempo característico de adaptação será da ordem de 10^{-3} segundos.

5.3 INFLUÊNCIA DOS TEMPOS CARACTERÍSTICOS NA EVAPORAÇÃO

Nesta seção são apresentados gráficos que tentam demonstrar a influência ou a não influência na taxa de evaporação da razão entre os tempos de vorticidade definidos anteriormente (equação 5.9 e 5.12) e os tempos característicos da turbulência, os quais foram obtidos experimentalmente por outros autores (Birouk et al., 2000) e utilizados nesta etapa.

As principais informações do trabalho utilizado são: O diâmetro (D) médio das gotas era igual a 1,3 mm. O valor médio da dimensão característica da turbulência (L_e) era 8,6 mm. Os combustíveis utilizados bem como suas propriedades termo-físicas seguem abaixo:

Tabela 1: Propriedades Termo-físicas dos combustíveis.

Combustível	ρ_l (Kg/m^3)	μ_l ($Pa.s$)	ν_l (m^2/s)
Hexano	654.8	2.94E-04	4.49E-07
Heptano	684	3.86E-04	5.64E-07
Octano	703	5.42E-04	7.71E-07
Nonano	718	6.79E-04	9.46E-07
Decano	730	9.20E-04	1.26E-06

Com base nas propriedades acima, e no gráfico a seguir, cujo fornece a variação da taxa de queima média dos combustíveis (K), normalizada pelo diâmetro das gotas, que é basicamente a taxa de evaporação das gotas (pois só é queimada a fase vaporizada do combustível), em função da energia cinética de turbulência (q), onde esse último termo indica a parcela de energia do escoamento responsável pela formação e movimentação dos vórtices, podemos obter os tempos característicos de turbulência τ_t , com a flutuação de velocidade u' .

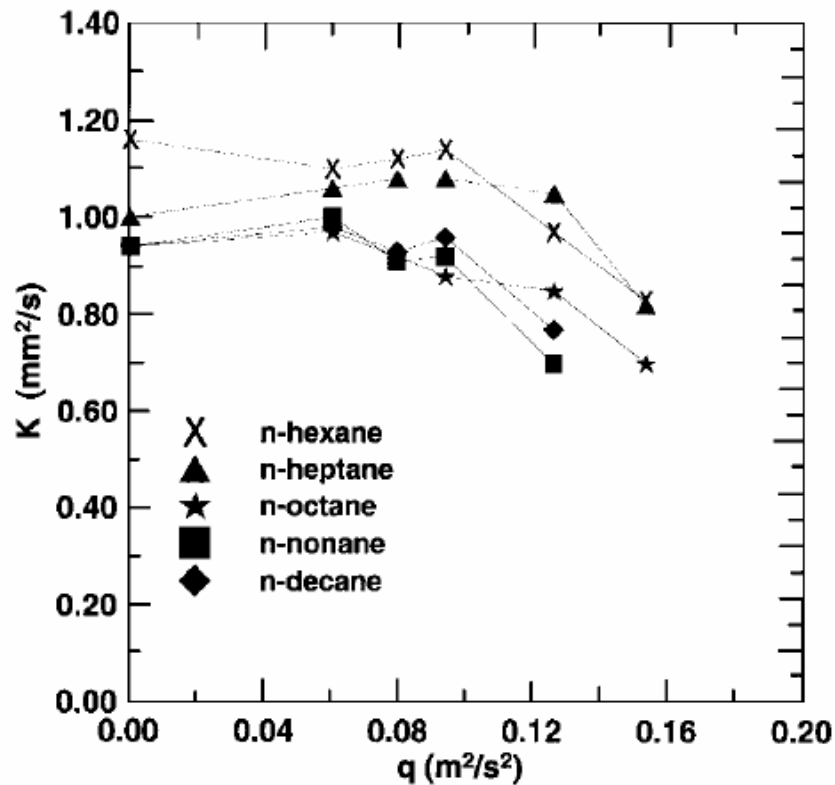


Fig. 10. Taxa de Combustão versus energia cinética de turbulência.

Fonte: Birouk et al., (2000).

Onde:

$$u' = \sqrt{3q/2} \quad (5.17)$$

$$\tau_t = L_e/u' \quad (5.18)$$

O gráfico (Figura 11) a seguir indica a taxa de evaporação das gotas em função da razão entre os tempos característicos de vorticidade e de turbulência, onde o primeiro é definido através da equação 5.9, a qual não leva em conta a viscosidade do gás cujo exerce força viscosa sobre a superfície da gota, conforme já descrito na seção 5.1. Nele pode ser observada uma certa dispersão entre os pontos, o que significa dizer que as considerações feitas na equação 5.9 podem não ser as que descreverem o fenômeno da maneira mais consistente com os experimentos executados.

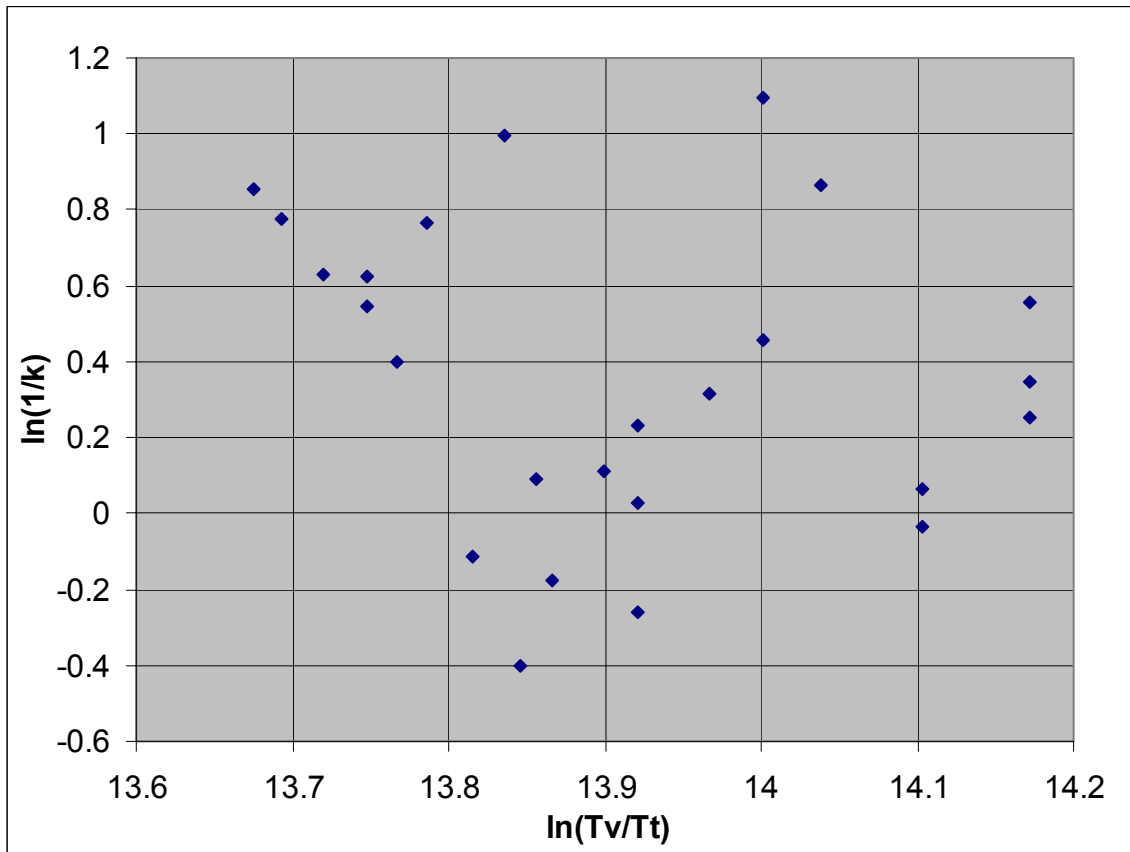


Fig. 11. Taxa de Combustão versus a razão entre os tempos característicos, onde $Tv = \tau_v$ (equação 5.9).

Por outro lado na figura 12, onde é plotada as mesmas relações do gráfico anterior, exceto pelo fato que nesse novo gráfico o tempo de vorticidade é inversamente proporcional à viscosidade tanto da gota quanto à do gás, assim como também descrito na seção 5.1 e na equação 5.12. Agora pode observar-se que os pontos estão mais agrupados, o que implica no fato de uma maior correlação entre a descrição analítica e os valores obtidos experimentalmente.

Se fosse necessário traçar uma curva média para os pontos apresentados nos dois últimos gráficos, sem dúvida no segundo os desvios percentuais dos pontos para a curva média seriam relativamente inferiores ao do primeiro caso.

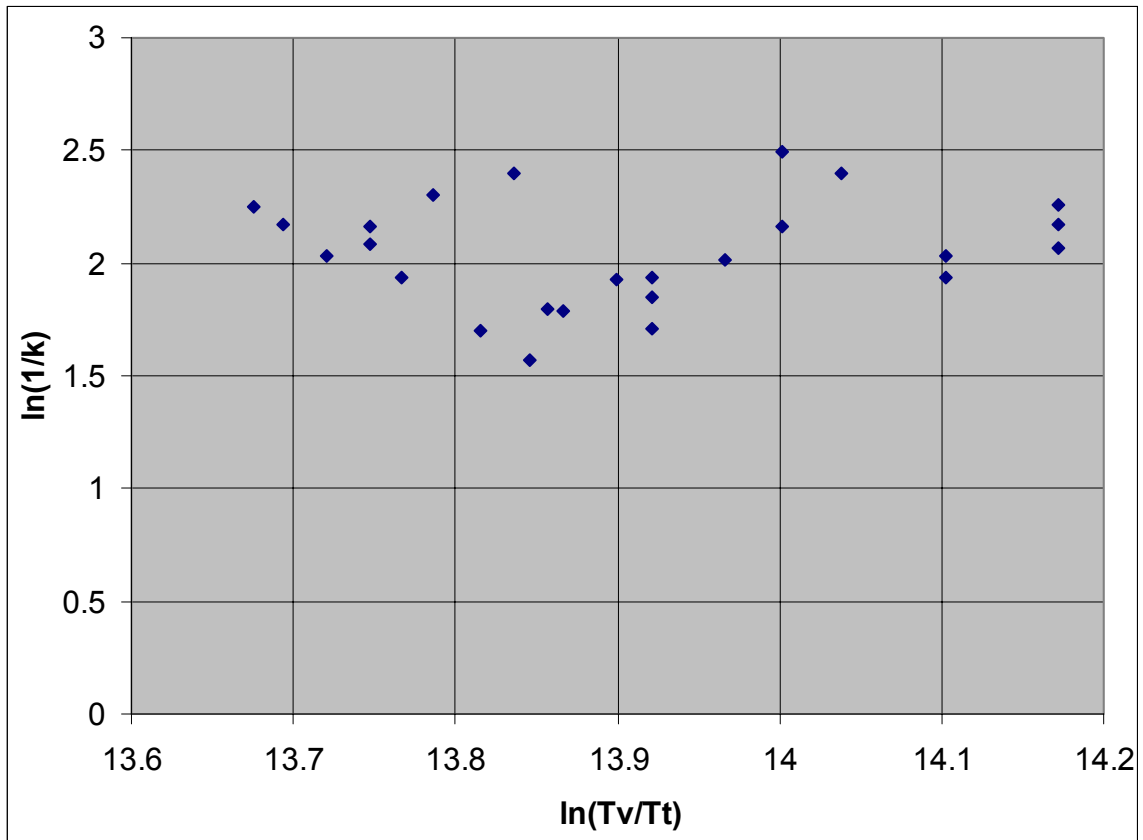


Fig. 12. Taxa de Combustão versus a razão entre os tempos característicos, onde $Tv = \tau_v$ (equação 5.12).

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Com base nos estudos e resultados obtidos neste trabalho podemos concluir que a turbulência possui um papel de grande importância para a taxa de evaporação, e que diferente das descrições encontradas na maioria dos artigos, a comparação entre os dados analíticos e experimentais torna-se mais consistente quando o tempo de vorticidade leva em conta a viscosidade do gás e da gota, o que confirmou as expectativas do início da pesquisa.

Para novos trabalhos, sugerem-se a modelagem do ambiente escoamento gás-gota com CFD's comerciais, como por exemplo, o CFX. Os resultados obtidos podem ser comparados às análises feitas neste trabalho de uma forma mais detalhada, uma vez que este estudo já foi iniciado, a fim de validar estes resultados. Em resumo realizar uma validação das análises através de experimentos, simulações e descrições analíticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BIROUK, M.; CHAUVEAU, C.; GÖKALF, I., Turbulence effects on the combustion of hydrocarbon droplets, **Proceedings of the Combustion Institute**, vol. 28, pp. 1015-1021, (2000).

CHEN, Y.-C.; STARNER, S. H.; MASRI, A. R., An detailed experimental investigation well-defined turbulent evaporating spray jets of acetone, **Int. Journal of Multiphase Flow**, vol. 32, pp. 389-412, (2006).

GAO, Z.; MASHAYEK, F., Stochastic modeling of evaporating droplets polydispersed in turbulent flows, **Int. Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 47, pp. 4339-4348, (2004).

KARPETIS, A. N.; GOMEZ, A., An experimental study of well-defined turbulent nonpremixed spray flames, **Combustion and Flame**, vol. 121, pp. 1-23, (2000).

KIM, H. Y.; CHO, C. P.; CHUNG, J. T., Correlation of burning rate of the interacting liquid droplets with internal circulation, **JSME International Journal**, vol. 48, pp. 293-299, (2005).

KLOSE, G.; REMBOLD, B.; KOCH, R.; WITTIG, S., Comparison of state-of-art droplet turbulence interaction models for jet engine combustor conditions, **Int. Journal of Heat and Fluid Flow**, vol. 22, pp. 343-349, (2001).

KUO, K. K., **Principle of Combustion**, John Wiley and Sons Inc., New York, 1986.

MASHAYEK, F.; PANDYA, R. V. R., Analytical description of particle/droplet-laden turbulent flows, **Progress in Energy and Combustion Science**, vol. 29, pp. 329-378, (2003).

MITSUAYA, M.; HANAI, H.; SAKURAI, S.; OGAMI, Y.; KOBAYASHI, H., Droplet combustion experiments in varying forced convection using microgravity environment, **Int. Journal of Heat and Fluid Flow**, vol. 26, pp. 914-921, (2005).

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKISHI, T. H., **Fundamentos da Mecânica dos Fluidos**, Edgar Blücher, 4° Ed., São Paulo, 2004.

PRAKASH, S.; SIRIGNANO, W. A., Liquid fuel droplet with internal circulation, **Int. Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 21, pp. 885-895, (1977).

PRAKASH, S.; SIRIGNANO, W. A., Theory of convective droplet vaporization with unsteady heat transfer in the circulating liquid phase, **Int. Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 23, pp. 253-268, (1979).

SCHLICHTING, H., **Boundary - Layer Theory**, McGraw Hill, New York, 1960.

SORNEK, R. J.; DOBASHI, R.; HIRANO, T., Effects of turbulence on dispersion and vaporization of droplets in spray combustor, **Proceedings of the Combustion Institute**, vol. 28, pp. 1055-1062, (2000).

SORNEK, R. J.; DOBASHI, R.; HIRANO, T., Effects of turbulence on vaporization, mixing and combustion of liquid-fuel sprays, **Combustion and Flame**, vol. 120, pp. 479-491, (2000).

WU, J.-S.; HSU, K.-H.; KUO, P.-M.; SHEEN, H.-J., Evaporation model of a single hydrocarbon fuel droplet due to ambient turbulence at intermediate Reynolds numbers, **Int. Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 46, pp. 4741-4745, (2003).

WU, J.-S.; LIU, Y.-J.; SHEEN, H.-J., Effects of ambient turbulence and fuel properties on the evaporation rate of single droplets, **Int. Journal of Heat and Mass Transfer**, vol. 44, pp. 4593-4603, (2001).