

Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Mecânica

Modelagem e Simulação de Evaporação e Combustão de Líquidos

Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título de
Graduação em Engenharia Mecânica
com ênfase em Energia e Fluidos

Elaborado por:
Hugo F. Decaro Schettini

Orientador:
Prof. Dr. Euryale J.G. de Jesus Zerbini

São Paulo
2001



SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	3
2. OBJETIVOS	5
3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	5
3.1 MODELAGEM DE EVAPORAÇÃO E COMBUSTÃO DE GOTAS	5
3.2 COMPORTAMENTO DE GOTAS ISOLADAS EM TÚNEL DE VENTO	10
3.3 MODELOS DE JATOS DE GOTAS.....	11
4. MODELOS PARA EVAPORAÇÃO	11
4.1 SPALDING	11
➤ <i>Conservação da massa na atmosfera</i>	11
➤ <i>Conservação das espécies químicas</i>	12
➤ <i>Variação do diâmetro da gota</i>	13
➤ <i>Primeira lei da termodinâmica</i>	14
4.2 FAETH.....	15
4.3 CORREÇÕES PARA A TAXA DE EVAPORAÇÃO	16
5. TRAJETÓRIA DA GOTA	18
6. MODELO PARA COMBUSTÃO.....	20
7. MODELO PARA JATOS DE GOTAS	21
8. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS	21
8.1 EVAPORAÇÃO DE ÁGUA EM TÚNEL DE VENTO	21
8.2 COMBUSTÃO DE JATO DE GOTAS DE HIDROCARBONETOS	21
9. VERIFICAÇÃO DE HIPÓTESE	21
10. NOMENCLATURA.....	21
11. BIBLIOGRAFIA.....	21
12. ANEXOS	21
TABELAS DE DADOS EXPERIMENTAIS:	21
TABELA DE RESULTADOS	21
CÓDIGOS DAS SIMULAÇÕES.....	21

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Este estudo foi motivado pela necessidade de modelar nebulizadores de óleos combustíveis, prevendo, a partir das condições dos fluidos de entrada, aspectos da chama como forma, comprimento, perfil de temperatura, estabilidade, emissividade, entre outros, além da conseqüente formação de poluentes.

A caracterização da nuvem depende fortemente da geometria interna do nebulizador das propriedades do líquido e do meio onde é descarregado. A figura abaixo mostra nebulizadores por pressão. A diferença na nuvem gerada é nítida, embora seja sutil a diferença na geometria.

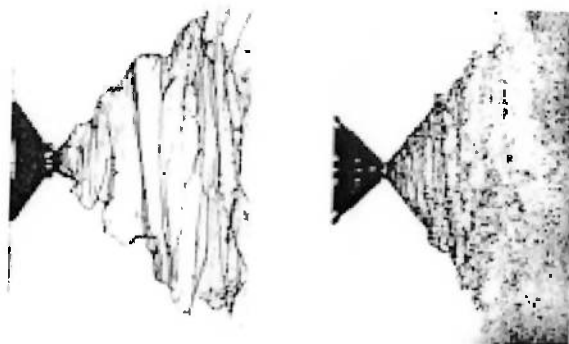


Fig.1 – Nebulização por pressão de glicerina

A seguir, serão apresentados, de forma bem sucinta, alguns tipos de nebulizadores:

- de simples orifícios: um ou vários orifícios nebulizam o líquido a altas pressões (20 a 60 bar).

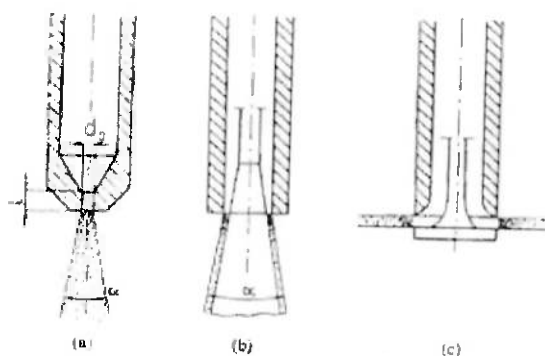


Fig.2 – Tipos de nebulizadores por pressão

- com câmara de rotação: o líquido é introduzido tangencialmente na câmara situada a montante do orifício.

com fluido auxiliar: a injeção de líquido é feita com pressões mais baixas, mas com auxílio de um fluido gasoso ou vapor.

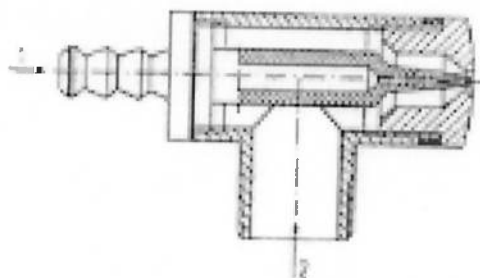


Fig.3 – Nebulizador com fluido auxiliar(2)

Entretanto, interessam neste trabalho os fenômenos que ocorrem na câmara de combustão e não no nebulizador. Assim, a nuvem estudada independe, em princípio, da geometria do nebulizador em questão, estando mais atentos ao que acontece após a desintegração de películas e formação das gotas, constituintes da nuvem.

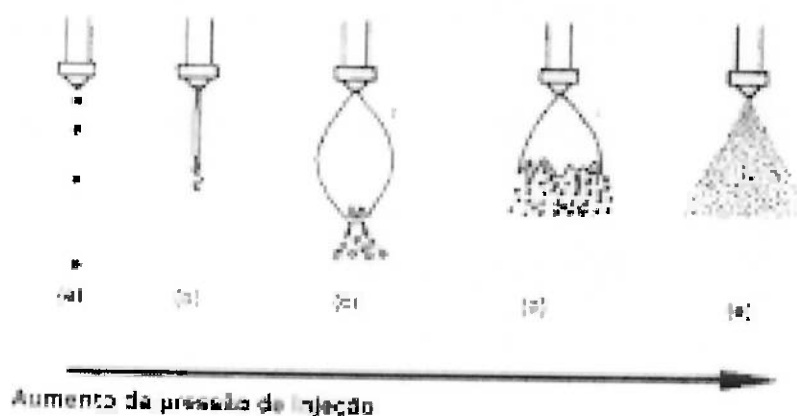


Fig.4 – Qualidade de nebulização x pressão

Dada a demasiada complexidade na modelagem do comportamento de uma chama partindo das condições de entrada dos fluidos e da geometria do queimador para um trabalho de formatura, escolheram-se alguns pontos que despertassem maior interesse.

2. OBJETIVOS

Este estudo se concentra nos seguintes tópicos:

- a) modelagem da evaporação e combustão de uma gota individual e isolada em atmosfera conhecida.
- b) trajetória e tempo de vida de uma gota inserida em um escoamento confinado de ar (túnel de vento).
- c) modelagem simples de jatos de gotas gerados a partir de bocais nebulizadores.

3. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Algumas considerações e hipóteses já identificadas serão expostas a seguir. É importante ressaltar que haverá a necessidade de ampliar o número de hipóteses e simplificações que ajudem na solução do problema no decorrer do trabalho. No final do estudo, serão expostas todas as simplificações e hipóteses adotadas na modelagem dos temas acima.

3.1 Modelagem de evaporação e combustão de gotas

Inicialmente, esta modelagem não se propõe a determinar o tempo necessário para que a gota inserida em um meio gasoso conhecido atinja a condição para sua ignição ainda no estado líquido.

Considera-se, então, que não há combustão na fase líquida, e sim apenas no vapor de combustível que deixa a superfície da gota. Esta fração de massa da gota no estado vapor será transferido para a atmosfera e queimará se encontrar temperatura e concentrações de oxidante suficientes para a reação química ocorrer.

É importante ressaltar que, neste trabalho, fenômenos como a transferência de calor, de massa, etc. provenientes de uma gota não são apreciavelmente afetados pelos mesmos fenômenos que ocorrem em uma gota próxima pertencente à nuvem. Não será considerado nenhum tipo de interação entre gotas. Esta hipótese é adotada para simplificar a modelagem dos fenômenos de transporte e os cálculos inerentes ao estudo de um jato de gotas mais próximo do real, como densidade de gotas, probabilidade de choque, comprimento de penetração da atmosfera externa ao jato, etc.. Embora esta

hipótese pareça bastante grosseira para o que se está propondo neste trabalho, será mostrado, a seguir, as condições para sua validade.

As referências (1), (2) e (3) tratam deste tema. A primeira apresenta, de forma muito superficial, quais são os fatores importantes que influenciam o fenômeno, como choques entre gotas, transferência de calor, massa e quantidade de movimento gota a gota e da nuvem com a atmosfera e algumas considerações sobre turbulência. A segunda referência adota um modelo bastante difuso e complexo, não chegando, ao que parece, a uma conclusão clara sobre o assunto.

A terceira, considerada a mais importante, trata de forma bastante geral tal modelagem, embora muito mais profunda que a referência (1), apresentando parâmetros importantes. Adotando um modelo de esferas de influência para nuvens de volume constante, Bellan afirma, conforme a figura abaixo, que, se a razão $R_2 = a/R$ for maior que 10, a nuvem é diluída o bastante para que possamos admitir a hipótese simplificadora para a combustão. Para Sirignano (11), R_2 vale 8,5.

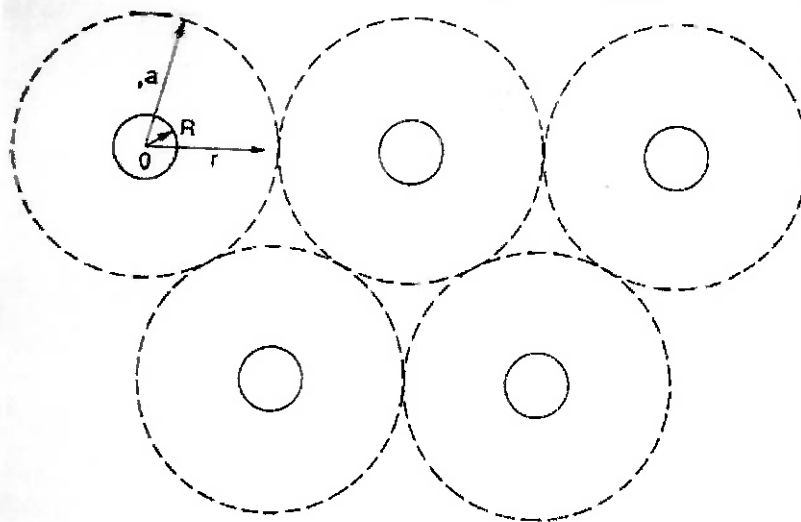


Fig.5 – Modelo de esferas de influência

O gráfico abaixo mostra a curva teórica obtida por Bellan:

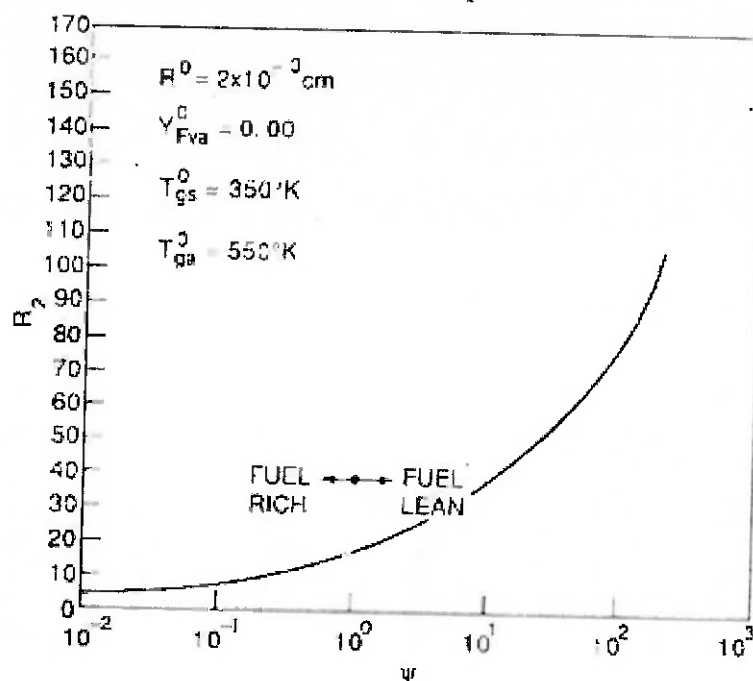


Fig.6 – Curva teórica de Bellan para nuvens

Em que:

$$\psi = AC/AC_s$$

AC: relação ar-combustível da nuvem

AC_s: relação ar-combustível estequiométrica

R₀: raio inicial da gota

Y_{vfa}: fração parcial do combustível em r=a

T_{ga}: temperatura da mistura (gás) em r=a

T_{gs}: temperatura da mistura (vapor de comb.) em r=s.

Conclui-se que a distância entre as gotas no presente estudo é, pelo menos, 10 vezes maior que o diâmetro delas, para que a nuvem seja considerada diluída.

Voltando às hipóteses sobre a gota isolada, a cinética química da reação de combustão será admitida muito veloz, de forma que os parâmetros que influenciam a evaporação e queima são exclusivamente os ritmos de transferência de calor do meio para a gota e a transferência de massa dos vapores gerados na superfície da gota para o meio existente entre a superfície líquida e a frente de chama. Esta última tem espessura desprezível e pode ser considerada também como uma superfície.

A figura abaixo esquematiza a combustão de uma esfera porosa alimentada com combustível à mesma taxa de consumo da reação química, modelo adotado por alguns

estudos como os de Faeth, Williams e Spalding para a validação do modelo de cálculo para a taxa de evaporação e combustão.

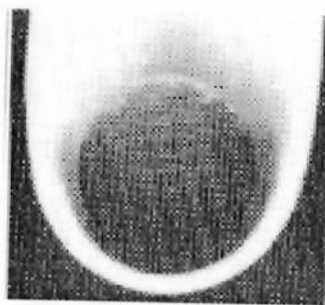


Fig.7 – Combustão da esfera porosa

Sobre a modelagem de evaporação e combustão de gotas isoladas foram lidas as referências de (4) a (8), sendo a última de pouco rigor físico no fenômeno da transferência de massa. As restantes diferem entre si em alguns detalhes importantes que serão apresentadas a seguir.

A referência 6 foi bastante interessante no início do trabalho pois mostra alguns modelos de evaporação e combustão de forma simples a saber:

- modelo condutivo puro
- modelo de Faeth
- modelo de Williams
- modelo de Spalding.

O primeiro modelo será descartado aqui pelo pouco rigor físico na interpretação do fenômeno. A referência 7 traz as hipóteses básicas adotadas em comum para os três modelos restantes que são mencionadas a seguir:

- i) Os produtos de combustão e o oxidante não se difundem na gota.
- ii) O oxidante é todo consumido na superfície (frente) da chama, não se difundindo para dentro da superfície esférica por ela formada. A cinética química é muito rápida.
- iii) A temperatura da gota é constante ao longo do processo e uniforme.
- iv) A temperatura num ponto suficientemente longe da gota é conhecida, bem como a composição dos gases.
- v) O combustível é todo consumido na zona da reação, sendo nula sua fração mássica ao longe. A cinética química é muito rápida.

vi) Desprezamos as trocas de calor entre a chama e o meio com a gota por radiação.

vii) Consideraremos que o escoamento em torno da gota é laminar, de forma que todo o calor transferido à gota, considerado o item anterior, é apenas transmitido por condução e convecção natural.

viii) O diâmetro da gota não varia. A taxa de combustível evaporado é fornecido continuamente à gota (modelo da esfera porosa) de modo que temos um regime permanente.

ix) Simetria esférica, desprezando qualquer movimento não radial na fase gasosa.

x) Regime quase-permanente na fase gasosa.

xi) As propriedades de transporte são independentes do raio. Tendo-se em vista as grandes variações de temperatura, esta é uma aproximação bastante grosseira. Serão adotados valores médios de referência na estimativa das propriedades.

xii) A reação de combustão ocorre entre dois reagentes formando apenas um produto (modelo de reação simples e homogênea).

xiii) A distância entre as gotas é grande o suficiente para não haver interação entre elas.

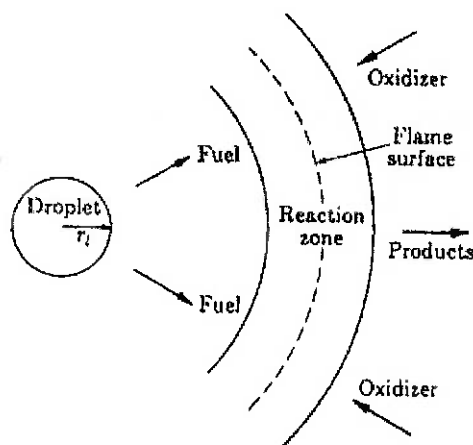


Fig.8 – Modelo de gota isolada

A referência 6 detalha matematicamente tais modelos, dando maior importância aos dois últimos da lista acima. Fica claro, ao ler o trabalho, que o modelo de Spalding é o mais adequado por ter maior rigor na modelagem do transporte de calor e massa que os outros três, além de admitir um número menor de simplificações, o que confere maior robustez ao modelo.

O modelo condutivo puro para evaporação de gotas, considera a transferência de massa desprezível comparada à transferência de calor. Além disso, ele não leva em conta os efeitos da difusão de massa na composição do fluxo de calor.

Já o modelo de Faeth para evaporação de gotas, considera os efeitos da transferência de massa no fluxo de calor, mas admite a hipótese simplificadora do número de Lewis unitário, ou seja, a difusão de calor e massa são equivalentes. O modelo de Williams segue o mesmo conceito que o de Faeth, mas é complementado pela reação de combustão.

A abordagem adotada por Spalding, em princípio, parece mais abrangente pois, apesar de seguir a mesmo raciocínio de Faeth, ela relaxa a hipótese de equivalência entre as transferências de calor e massa (Lewis unitário).

3.2 Comportamento de gotas isoladas em túnel de vento

Terminada a modelagem em (a), o próximo passo é colocar a gota em um escoamento de ar simples e paralelo, impondo a ela uma força de arrasto. Esta etapa incluirá, além da evaporação formulada em (a), a modelagem da troca de quantidade de movimento entre a gota e o escoamento gasoso. Serão, pois, três fenômenos de troca:

- transferência de massa.
- transferência de calor.
- transferência de quantidade de movimento

Analisando a referência (11), há um modelo proposto para a troca de quantidade de movimento. Assim, as transferências de calor e massa seguem o modelo de Spalding (4) e a transferência de quantidade de movimento segue o modelo de Sirignano (11).

Neste caso, no início do escoamento, a velocidade relativa entre a gota e o escoamento é alta, provocando, além da difusão, convecção forçada de massa e calor. Isto obriga a adicionar ao modelo de Spalding uma correção na taxa de evaporação da gota. Esta correção é sugerida por Sirignano e será utilizada nas simulações. Com o passar do tempo, a velocidade da gota será muito próxima à do escoamento, o que torna desprezível a velocidade relativa, provocando agora difusão e convecção natural de massa e calor.

3.3 Modelos de jatos de gotas

A modelagem de jatos de gotas gerado a partir de um bico nebulizador será feito individualmente, ou seja, uma única gota será inserida em um jato de ar, tendendo a seguir suas linhas de corrente. A gota, então, estará submetida à força de arrasto função do seu diâmetro, das velocidades relativas e das condições da atmosfera. O coeficiente de arrasto será obtido por relações empíricas que envolvem adimensionais como Reynolds por exemplo obtidas na referência (11).

4. MODELOS PARA EVAPORAÇÃO

4.1 Spalding

Colocadas algumas hipóteses e considerações, pode-se iniciar a modelagem da evaporação de uma gota isolada em uma atmosfera bi-componente (vapor + ar) com base nas referências (4), (7) e (11). A seguir, será exposto o modelo de Spalding,.

1.1.1 Conservação da massa na atmosfera

Para a fase gasosa, temos a seguinte distribuição do vapor ao longo do raio:

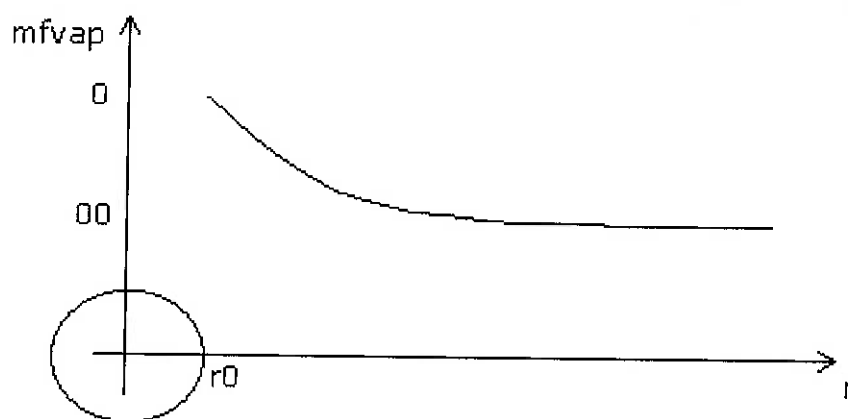


Fig.9 – Distribuição de mfv ao longo do raio

Toma-se, então, uma fatia dr da atmosfera como volume de controle, considerando os fluxos de vapor de entrada e saída:

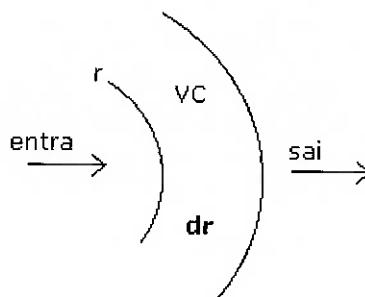


Fig.10- Volume de controle

Para o volume de controle (VC) acima, vale:

$$\text{Taxa de variação} = \text{fluxo que entra} - \text{fluxo que sai}$$

Chamando de G a massa de vapor por unidade de tempo por unidade de área que atravessa a casca esférica de raio r , ($G = \rho \cdot V$) temos:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot 4\pi r^2 \cdot dr) = G \cdot 4\pi r^2 - (G + (\partial G / \partial r)dr) \cdot 4\pi(r + dr)^2 \quad (1)$$

Considerando regime quase permanente e: $G = G_v + G_a$, chegamos a:

$$\frac{\partial(r^2 \cdot G_v)}{\partial r} + \frac{\partial(r^2 \cdot G_a)}{\partial r} = 0 \quad (2)$$

em que: G_v : fluxo de vapor

G_a : fluxo de ar

1.1.2 Conservação das espécies químicas

Para o mesmo VC anterior, observamos a conservação da espécie j , sendo R_j a taxa de geração de j por unidade de volume por reação química:

Taxa de variação de j = fluxo de j entra – fluxo de j sai + taxa de geração de j

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_j \cdot 4\pi r^2 \cdot dr) = G_j \cdot 4\pi r^2 - (G_j + (\partial G_j / \partial r)dr) \cdot 4\pi(r + dr)^2 + R_j \cdot 4\pi r^2 \cdot dr \quad (3)$$

Como não há reação química ($R_j=0$) e regime quase permanente, chegamos à eq.4:

$$\frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial(r^2 \cdot G_j)}{\partial r} = 0 \quad (4)$$

Como a gota não absorve ar (espécie a) não existe G_a na superfície da gota ($r=0$).
Da equação acima:

$$r^2.Ga = 0 \quad (5)$$

concluindo que $Ga=0$ em qualquer raio.

Se aplicarmos a eq.4 para o vapor, tem-se a eq.6:

$$r^2.Gv = r_0^2.Gvo \quad (6)$$

sendo: r_0 – raio da gota

Gvo – fluxo de evaporação na superfície da gota.

A transferência de massa da espécie j se dá por convecção e difusão (lei de Fick), como descrito na eq.7 abaixo:

$$Gj = m_{jf}.G + G_{diff} = m_{jf}.G - \Gamma_j \cdot \frac{\partial m_{jf}}{\partial r} \quad (7)$$

sendo: $\Gamma_j = \rho_{mist} \cdot D_{j,a}$

$D_{j,a}$: difusibilidade de j em a .

Aplicando as eq.6 e 7 para o vapor:

$$r^2.Gvo = r^2.(mfv.G - \Gamma_v \cdot \frac{\partial mfv}{\partial r}) \quad (8)$$

Integrando a equação acima desde a superfície da gota até o infinito, temos a eq.9:

$$Go = \frac{\Gamma_v}{r_0} \cdot \ln \left(1 + \frac{mfv_0 - mfv_\infty}{1 - mfv_0} \right) \quad (9)$$

Em que o termo entre parênteses chamado “driving force” é:

$$Bm = \frac{mfv_0 - mfv_\infty}{1 - mfv_0} \quad (10)$$

1.1.3 Variação do diâmetro da gota

Dado que:

$$\frac{dm}{dt} = -Go \cdot (4 \cdot \pi \cdot r_0^2) \quad (11)$$

deduz-se a eq.12:

$$\frac{dr_0}{dt} = -\frac{Go}{\rho_{liq}} \quad (12)$$

1.1.4 Primeira lei da termodinâmica

Falta, agora, calcular **mfvo** que depende da temperatura da gota (**To**). Se a temperatura fosse constante, bastaria apenas resolver o equilíbrio para **To** das fases líquido e vapor na saturação. Mas como nesta modelagem, **To** varia, aplicamos a primeira lei da termodinâmica ao mesmo volume de controle da fig.11 na atmosfera. Aqui, vale lembrar as hipóteses mencionadas anteriormente sobre simetria esférica dos fluxos de calor e massa e gotas relativamente distantes entre si (~10do).

Tomaremos, então, uma fatia **dr** da atmosfera como volume de controle, considerando os fluxos de calor de entrada e saída:

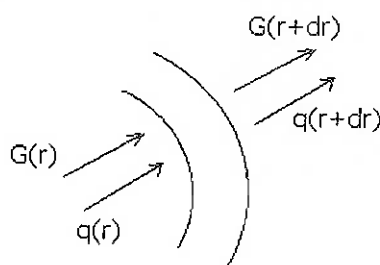


Fig.11-Volume de controle

Taxa de variação = fluxo que entra – fluxo que sai

Como não há fluxo líquido de ar ($G_a=0$) e sendo a eq.6 válida:

$$-k \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot r^2 + G_v \cdot h_v \cdot r^2 = cte = Q_o \cdot r_o^2 + G_o \cdot h_{vo} \cdot r_o^2 \quad (13)$$

em que: Q_o : fluxo específico de calor na superfície da gota

G_o : taxa específica de evaporação

Separando variáveis e integrando a equação anterior, chega-se à eq.14 válida para as seguintes condições de contorno:

- para $r=\infty$, $T=T_\infty$
- para $r=r_o$, $T=T_o$

$$Q_o = \frac{-cp_v \cdot G_o \cdot (T_\infty - T_o)}{\exp\left(\frac{G_o \cdot cp_v \cdot r_o}{k}\right) - 1} \quad (14)$$

Aplica-se, agora, a primeira lei para o volume de controle que acompanha a recessão da gota. Admitimos que a fração que deixa a gota **dm** seja positivo e que a temperatura da gota seja uniforme.

$$dq = mf.uf - mi.ui + dm.hv - p.(dm).v_{liq} \quad (15)$$

Desenvolvendo:

$$\frac{dq}{dt} = mi.cp_{liq} \cdot \frac{dT}{dt} + \frac{dm}{dt} . hv \quad (16)$$

Escrevendo para a superfície da gota a seguinte expressão: $Q_o = - G_o.hlv$

e colocando-a na equação de cima:

$$\frac{dT_o}{dt} = \frac{-3}{r_o \cdot \rho_{liq} \cdot c_{liq}} \cdot (Q_o + G_o.hlv) \quad (17)$$

Resumindo, obtém-se o seguinte sistema de equações que descrevem o fenômeno da evaporação segundo Spalding:

- 1) resolve-se o equilíbrio em T_o na superfície da gota para obter $mfvo$
- 2) aplica-se a eq.9 para obter a taxa específica de evaporação G_o
- 3) calcula-se o novo raio da gota (r_o) com a eq.12
- 4) chega-se a Q_o aplicando a eq.14
- 5) obtém-se T_o com a eq.17

Com T_o , resolve-se novamente o equilíbrio e o processo é repetido até que a gota desapareça.

4.2 Faeth

O modelo proposto por Faeth é equivalente ao modelo do Spalding se Lewis for considerado unitário, ou seja, a transferência de calor e de massa ocorrem com difusividades iguais. Assim, colocando G_o da eq.9 na eq.12, e Lewis unitário, chega-se à expressão do fluxo específico de calor na superfície da gota, Q_o , para Faeth (eq.18):

$$Q_o = \frac{-k \cdot \ln(1 + By) \cdot (T_\infty - T_o)}{r_o \cdot By} \quad (18)$$

Em que Lewis é definido como:

$$Le = \frac{k}{cp \cdot \Gamma v} = 1 \quad (19)$$

Por ser um modelo menos restritivo e mais robusto, é preferível simular a formulação de Spalding para a evaporação.

Estamos interessados, inicialmente, em estudar a evaporação de uma gota em um túnel de vento. Posto isto, apresentamos, a seguir, o modelo a ser utilizado para o

cálculo da trajetória da gota. Logo após, estudaremos a combustão de uma gota em atmosfera estagnada, modelagem esta bastante parecida com a desenvolvida para a evaporação.

4.3 Correções para a taxa de evaporação

É importante lembrar que a modelagem apresentada acima considera velocidade relativa nula entre a gota e a atmosfera além da transferência de calor e massa esfericamente simétricas. A rigor, temos velocidade relativa não nula e fenômenos de transporte que não são esfericamente simétricos. Além disso, em câmaras de combustão, Reynolds pode alcançar ordem de grandeza próxima a 100, evidenciando a necessidade de considerar convecção forçada logo após a gota ser lançada na atmosfera.

Outro ponto discutido por Sirignano é a maior uniformidade na distribuição de temperatura no interior da gota dada pelas recirculações provocadas pelas tensões de cisalhamento que só ocorrem quando há velocidade relativa entre gota e atmosfera.

Colocadas tais considerações, a taxa de evaporação na verdade é maior que a estimada por Spalding, o que diminui o tempo de vida da gota. As correções apresentadas a seguir procuram estimar melhor o tempo de vida da gota, multiplicando a taxa de evaporação esfericamente simétrica dada na eq.9 por um fator também dependente de Reynolds, Prandtl e Schmidt.

Admite-se, então, apenas simetria axial no problema, considerando a gota como esfera ($Weber \leq 1$), não levando em conta o que ocorre no interior da gota.

Recordando a eq.9 para a taxa de evaporação específica e a diferença de potencial ("driving force") segundo Spalding:

$$Go = \frac{\Gamma v}{r_0} \cdot \ln \left(1 + \frac{mf v_0 - mf v_\infty}{1 - mf v_0} \right) \quad Bm = \frac{mf v_0 - mf v_\infty}{1 - mf v_0}$$

Ranz e Marshall (11) propõem um multiplicador mais simples baseada no experimento da esfera porosa continuamente alimentada, não considerando transientes, recirculações e deformações na gota, condições diferentes das encontradas numa câmara de combustão (eq.19):

$$Goc = Go \cdot (1 + 0,3 \cdot Pr^{1/3} \cdot (2 \cdot Re)^{1/2}) \quad (19)$$

Sirignano traz três diferentes abordagens para corrigir a taxa de evaporação. Segundo ele, a expressão acima apenas é válida para fenômenos de transporte com

gradientes (B_m e B_h) pequenos, difícil de ocorrer em combustão de gotas. Será apresentada a abordagem mais simples.

O termo proposto por Abramzon e Sirignano (11) que multiplica Go esfericamente simétrico da eq.9 é:

$$Goc = Go \left(1 + \frac{k}{2} \cdot \frac{Sc^{1/3} \cdot Re^{1/2}}{F(Bm)} \right) \quad (20)$$

A correção se aplica melhor nos casos em que:

- $Re \geq 10$
- $Bm \leq 20$
- $Pr \leq 1$
- $Sc \leq 3$

Se Reynolds for menor que 10, o termo corretor é:

$$Goc = Go \left(1 + \frac{k}{2} \cdot \frac{(1 + 2 \cdot Re \cdot Sc)^{1/3} \cdot \max(1, 2 \cdot Re^{0.077}) - 1}{F(Bm)} \right) \quad (21)$$

Para os dois multiplicadores, vale:

$$Re = \frac{\rho_{\infty} \cdot \Delta u \cdot r_0}{\mu_{\infty}} \quad Sc = \frac{\mu_{mist}}{\rho_{mist} \cdot D_{AB}} \quad (22)$$

$$F(B_m) = (1 + B_m)^{0.7} \cdot \frac{\log(1 + B_m)}{B_m} \quad (23)$$

Resta, agora, definir o valor de k .

Sirignano propõe que o valor de k seja obtido igualando as expressões de Ranz e Marshall e Abramzon e Sirignano quando os gradientes (B_m e B_h) forem pequenos. Assim, chega-se ao seguinte valor:

$$k = 0,6 \cdot \sqrt{2} = 0,781 \quad (23)$$

Definida a modelagem adotada para a evaporação, parte-se agora para um modelo para a trajetória da gota com o objetivo de se obter a trajetória da gota.

5. TRAJETÓRIA DA GOTA

De forma simplificada, existem três forças atuando na gota:

- peso
- empuxo
- arrasto

Apenas o arrasto será incluído na modelagem da evaporação, já que o empuxo é desprezível neste caso em que a densidade da atmosfera é da ordem de 1000 vezes a densidade da gota. O peso não será considerado pois apenas interessa

Neste item, analisaremos expressões empíricas que estimam o coeficiente de arrasto **Cd** para o cálculo da Força de arrasto **Fd** em função das condições da atmosfera e da gota (eq.24):

$$F_d = \frac{C_d}{2} \cdot \rho_g \cdot (\pi \cdot r_0^2) \cdot |u_r| \cdot (-u_r) \quad (24)$$

Em que:

- ρ_g : densidade da gota
- U_r : velocidade relativa entre a gota e o escoamento (Uesc-Ugota)

Embora a referência (9) mostre expressões mais simples para o **Cd**, optou-se pelas expressões da referência (11) uma vez que as correções consideradas no item anterior também foram retiradas de Sirignano, procurando homogeneizar as referências para modelos de fenômenos diferentes.

A seguinte expressão indicada por Sirignano é válida para Reynolds menor que 30 para gotas esféricas(eq.25):

$$C_d = \frac{24}{Re_{m1/3} \cdot (1 + Bm)} \quad (25)$$

Este Reynolds especificamente é definido como:

$$Re_{m1/3} = \frac{\rho_\infty \cdot u_r \cdot (2 \cdot r_0)}{\mu_{m1/3}} \quad (26)$$

Sendo:

- $\mu(m1/3) = \mu_0 + 1/3(\mu_\infty - \mu_0)$
- μ_0 : viscosidade da atmosfera a T_0
- μ_∞ : viscosidade da atmosfera em T_∞

Sendo assim, com a eq.24, aplicamos a segunda lei de Newton para a gota, chegando ao valor da sua nova velocidade, permitindo calcular sua trajetória. As equações abaixo valem tanto para o eixo x (horizontal) quanto para o y (vertical). Para isto, é preciso admitir que a gota é esférica para utilizar a mesma eq.25 nos dois eixos.

$$Fd = \frac{dm_{gota}}{dt} \cdot u_{gota,0} + m_{gota} \cdot \frac{du_{gota}}{dt} \quad (26)$$

Sendo:

$$u_{gota} = u_{gota,0} + du_{gota} \quad x_{gota} = x_{gota,0} + u_{gota} \cdot dt \quad (27)$$

Resumindo, chega-se ao seguinte sistema de equações que descrevem o fenômeno segundo Spalding e Sirignano:

- 1) resolve-se o equilíbrio em T_o na superfície da gota para obter m_{fvo}
- 2) aplica-se a eq.9 para obter a taxa específica de evaporação G_o
- 3) calcula-se Reynolds e Schmidt, e aplica-se a correção da eq.20
- 4) através das eq.24 e 25, chega-se ao C_d e à nova velocidade da gota para o eixo x e y, admitindo o raio da gota (r_o) anterior, não considerando ainda a diminuição do raio devida à evaporação G_o .
- 5) calcula-se o novo raio (r_o) com a eq.12
- 6) chega-se a Q_o aplicando a eq.14
- 7) obtém-se T_o com a eq.17

Com T_o , resolve-se novamente o equilíbrio e o processo é repetido até que a gota desapareça.

6. MODELO PARA COMBUSTÃO

Um conceito utilizado na modelagem da combustão é o conceito de propriedade conservada no fenômeno.

Certa propriedade ϕ é conservada num fenômeno se a sua equação de balanço não apresentar termos de geração ou consumo de ϕ .

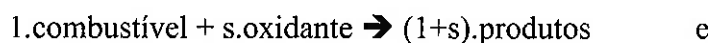
Para qualquer ϕ associada a um escoamento, temos o seguinte balanço:

$$\left(G \cdot \phi - \Gamma_{\phi} \cdot \frac{d\phi}{dr} \right) \cdot r^2 = \left(G_0 \cdot \phi_0 - \Gamma_{\phi} \cdot \left(\frac{d\phi}{dr} \right)_0 \right) \cdot r_0^2 \quad (28)$$

Como admitimos Γ_{ϕ} constante, podemos integrar a eq.28 para chegar à eq.29:

$$\frac{G_0 \cdot r_0}{\Gamma_{\phi}} = \ln \left(1 + G_0 \cdot \frac{(\phi_0 - \phi_{\infty})}{-\Gamma_{\phi} \cdot \left(\frac{d\phi}{dr} \right)_0} \right) \quad (29)$$

Supondo que a reação química seja simples e homogênea em que :



$$\Gamma_{fu} = \Gamma_{ox} = \Gamma_{fu,ox}$$

Escrevendo a equação da conservação para o combustível (fu) e o oxidante (ox) concluímos que a propriedade $\phi = m_{ffu} - m_{fox}/s$ obedece a definição de propriedade conservativa. Aplicando ϕ à eq. 29, chega-se a:

$$\frac{G_0 \cdot r_0}{\Gamma_{fu,ox}} = \ln \left(1 + \frac{(m_{ffu}_0 + m_{fox}_{\infty} / s)}{1 - m_{ffu}_0} \right) \quad (30)$$

Aplicando o mesmo raciocínio para $\phi = c \cdot T + H \cdot m_{fox}/s$ em que H é a entalpia de combustão e c é o calor específico a pressão constante do combustível, consegue-se acoplar os fluxos de calor e massa para definir a taxa de calor que entra na gota :

$$\frac{G_0 \cdot r_0}{\Gamma_{fu,ox}} = \ln \left(1 + \frac{c \cdot (T_{\infty} - T_0) + H \cdot m_{fox}_{\infty} / s}{Q_o / G_0} \right) \quad (31)$$

Igualando a eq. 30 à 31 e considerando conhecidas m_{fox}_{∞} , T_{∞} e a relação entre m_{ffu}_0 e T_0 pelo equilíbrio termodinâmico, determina-se a transferência de calor para a gota:

$$Q_0 = G_0 \cdot (h_{lv} + c_{p_l} \cdot (T_0 - T_{inj})) \quad (32)$$

A referência (7) traz uma avaliação para o tempo de vida de gotas, considerando valores médios para queima de hidrocarbonetos em ar. Se a temperatura ao longe for imposta e Q_0/G_0 for constante, admite-se aproximadamente que:

$$d_0^2 / t_{vida} \approx 10^{-6} \quad (m^2 / s) \quad (33)$$

A mesma referência traz a relação $a = r_{chama}/r_0$ para que a hipótese de gotas isoladas seja válida. A expressão abaixo admite a seguinte condição de contorno:

$$\phi_{chama} = m_{ffu} - m_{fox}/s = 0.$$

$$\frac{r_{chama}}{r_0} = \left(1 - \frac{\ln(1/(1 - m_{ffu_0}))}{\ln((1 + m_{fox_\infty}/s)/(1 - m_{ffu_0}))} \right)^{-1} \quad (34)$$

Admitindo para hidrocarbonetos queimando em ar $m_{fox_\infty}/s = 0,015$ calcula-se r_{chama}/r_0 em função da volatilidade m_{ffu_0} .

Comparando com a curva de Bellan para relação AC estequiométrica, m_{ffu_0} está próximo a 0,2 para que a relação entre raios seja da ordem de 10.

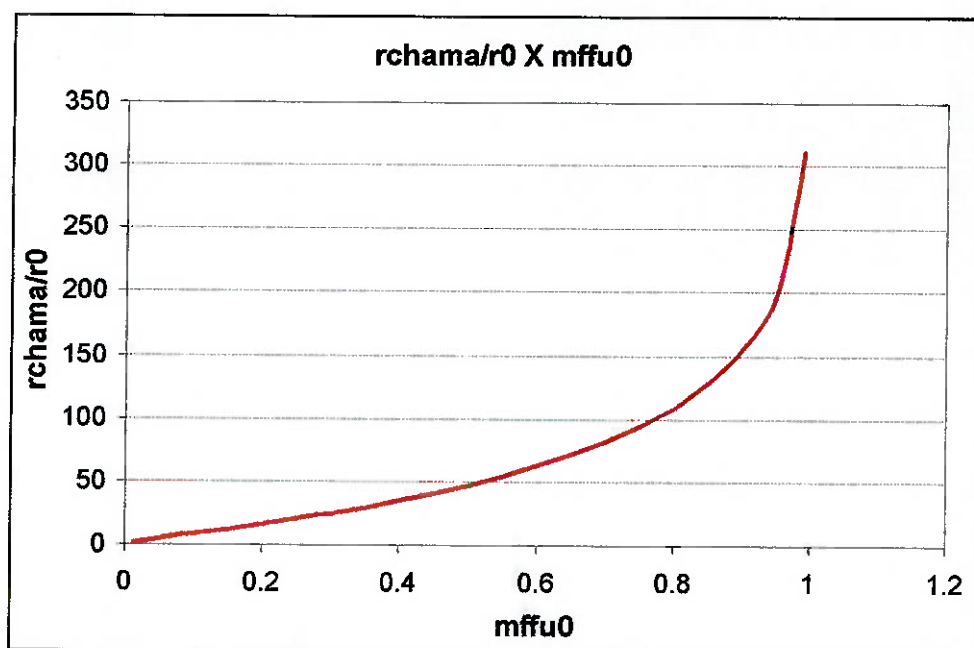


Fig.12 – Comportamento da eq. 19

7. MODELO PARA JATOS DE GOTAS

Como tem-se disponível um modelo para trajetória de gotas, pode-se, via simulação numérica, definir o contorno do jato a ser gerado por um bico nebulizador acoplando o modelo de evaporação ou combustão ao da trajetória da gota. Para simplificar, o jato será considerado bidimensional (x,y). Esquemáticamente, estão apresentados abaixo os parâmetros mais importantes.

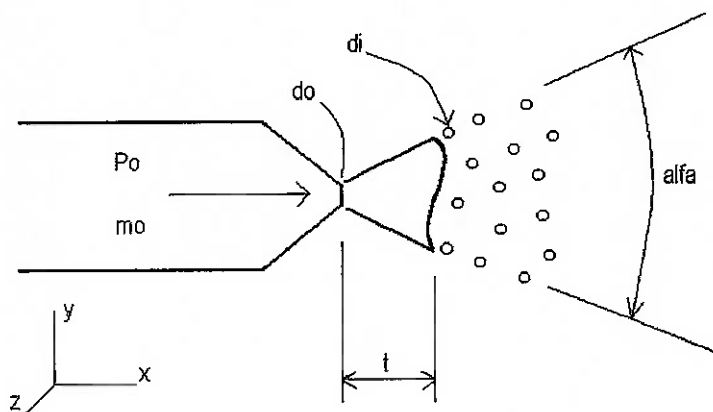


Fig.13 – Processo de nebulização

Precisa-se, então, de dados como pressão e vazão de entrada do líquido (respectivamente P_0 e m_0) e o diâmetro de descarga do bocal (d_0) para conhecer:

- diâmetro inicial das gotas (d_i)
- ângulo inicial do jato (α)
- comprimento de filme formado pelo nebulizador (t)
- velocidade inicial das gotas (V_{xi}, V_{yi})
- posição inicial das gotas (x_i, y_i)

Com estas informações consegue-se determinar a geometria do jato.

Dados fornecidos pela bancada de avaliação de sprays combustíveis do IPT, foram utilizados para o estudo. É importante ressaltar que o óleo lubrificante utilizado nos ensaios será modelado como um hidrocarboneto puro na simulação de combustão. As medições foram obtidas a partir de um bocal Steinen de vazão nominal **9GPM** ($\sim 30\text{kg/h}$) e diâmetro d_0 de 0.9mm

O diâmetro inicial de gotas foi obtido a partir de medições na bancada de nebulização do IPT realizadas a $Z = 250\text{mm}$ do bocal. Consideramos que a evaporação nesse espaço na câmara é desprezível, já que a velocidade do ar de exaustão da câmara

de ensaios é próxima a 2m/s, valor semelhante ao de uma câmara de combustão de caldeiras de pequeno porte.

O ângulo inicial do jato depende da pressão imposta ao bocal e de seu coeficiente de descarga. O comprimento de filme que se forma logo após o bocal depende do ângulo inicial e da tensão superficial do líquido. As velocidades iniciais das gotas dependem da vazão de líquido, coeficiente de descarga e ângulo inicial.

A metodologia de cálculo para ângulo inicial de jato, comprimento de filme e velocidade inicial das gotas é bastante extenso e foge do escopo central deste trabalho. Portanto, serão apenas apresentados os resultados finais.

O ângulo **alfa** da fig. 14 equivale a duas vezes o ângulo **teta** da mesma tabela. Como tem-se a vazão, densidade do óleo e a área de descarga do bocal, pode-se calcular a velocidade inicial da gota no eixo **x** (**V_{xi}**). Com **V_{xi}** e **alfa**, chega-se a **V_{yi}**, informações que nos permitem obter a trajetória de gotas, definido o fluxo de ar externo ao bocal.

Pela tabela 1, conclui-se que o comprimento do filme em todas as condições é tão pequeno que se pode considerar a posição inicial da gota (**x_i,y_i**) como sendo no próprio orifício de descarga do bocal (**0,0**).

Para definir a geometria do jato gerado pelo nebulizador, serão acoplados os modelos de combustão e trajetória de gotas verificando a variação do diâmetro do jato ao longo do eixo **x** e o seu comprimento.

8. SIMULAÇÕES E ANÁLISE DE RESULTADOS

8.1 Evaporação de água em túnel de vento

Inicialmente foram realizadas algumas simulações para o tempo de vida da gota que foram confrontadas com dados experimentais mostrados na figura abaixo que não estão completamente definidos quanto às condições de medição. Uma das indefinições é quanto a temperatura inicial da água. A outra é quanto a umidade do ar ao longe.

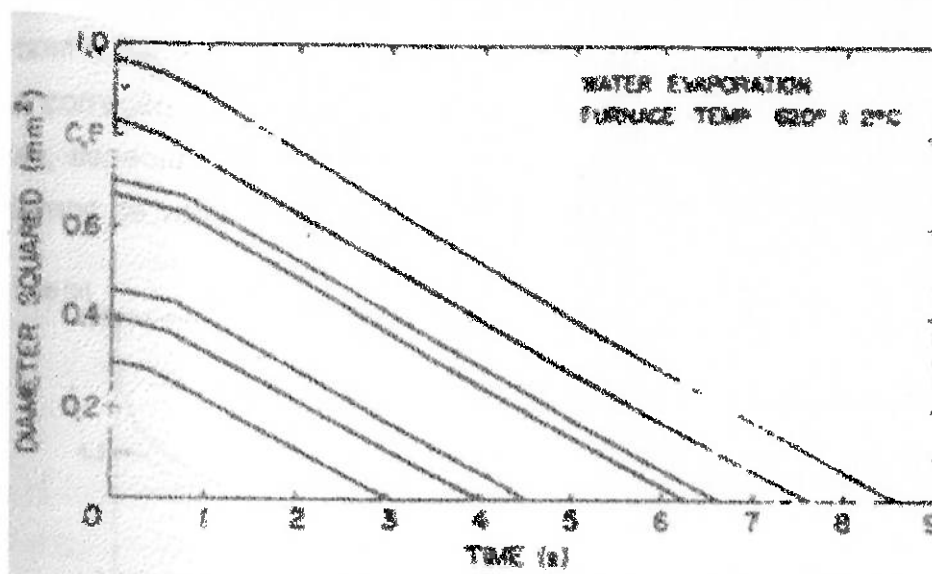


Fig.14 – Dados experimentais para água

Nas simulações para evaporação de água, a gota é considerada completamente consumida quando seu diâmetro é 1 micra, valor que não sabemos nos resultados experimentais.

Os gráficos abaixo mostram alguns resultados de simulação cujas entradas foram as mesmas dos dados experimentais disponíveis. A temperatura inicial da gota e a fração de água ao longe são provavelmente os utilizados no experimento para evaporação de gotas de água:

Diâmetro inicial da gota (micra).....632
 Temperatura inicial da gota(C):.....30
 Temperatura ao longe(C):.....620
 Fração em massa de vapor ao longe:.....0.0

Estes dados equivalem a uma gota parada em relação ao escoamento em que os dados experimentais resultam em um tempo de vida de 4 segundos. Na simulação realizada obteve-se 5.56 segundos (39% maior). Quando se impõe velocidades no

escoamento do ar de 10, 20 e 50m/s, obteve-se 5.42 segundos nos 3 casos, o que evidencia a pouca influência da velocidade do escoamento no tempo de vida da gota vida pois ela é levada à velocidade do escoamento muito rapidamente, amenizando o efeito da correção de Sirignano devida à velocidade relativa.

Considerando a mesma gota caindo, ou seja, movimentando-se apenas na direção y, o tempo de vida da gota cai para 4.07 segundos, valor muito próximo ao experimental. Esta diminuição se deve à correção para a taxa de evaporação.

O número de Lewis variou entre 0.83 e 0.85, valor próximo ao obtido na referência (6). Todas as simulações foram realizadas considerando-se diâmetro final de gota de 1 micra. O tempo de vida da gota é muito pouco influenciado pelo diâmetro final em que a gota é considerada extinta.

Considerando a gota parada e diâmetro inicial de gota de 500micra, por exemplo, temos que o tempo de vida da gota da simulação é 3.32 (15% maior) segundos, enquanto que o experimento nos dá aproximadamente 2.9segundos. Para a mesma gota caindo com a ação da gravidade, obtém-se 2.97 segundos, valor bastante próximo ao experimental.

Não é possível, entretanto saber com certeza se os resultados das simulações são confiáveis pela pobreza na descrição das condições em que os ensaios foram realizados. O resumo das simulações estão na tabela 3.

O gráfico abaixo mostra a taxa de evaporação corrigida. No final da vida da gota, a taxa aumenta bruscamente uma vez que o diâmetro da gota tende a zero. Este comportamento é idêntico à modelagem sem correção.

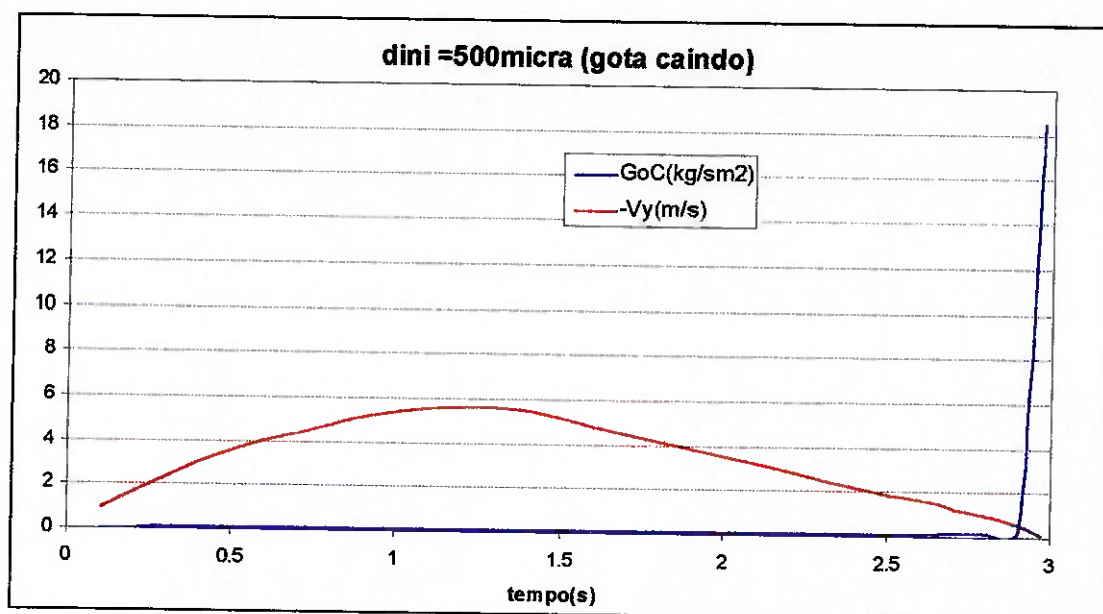


Fig.15 – Taxa de evaporação corrigida e Velocidade em y

Abaixo tem-se o valor da correção em azul aplicada à taxa de evaporação simetricamente esférica para simulação da gota de diâmetro inicial de 500 micra caindo. Em rosa está descrito o comportamento do número de Reynolds utilizado na correção. No início, o valor da correção fica entre 1.4 e 1.5 porque a velocidade relativa aumenta lentamente ao longo do tempo. Conforme a gota ganha velocidade chegando à velocidade terminal constante e o número de Reynolds ultrapassa o valor de 10, outra expressão para a correção é utilizada, o que resulta no patamar de 2.3 para a correção. Conforme o diâmetro e o peso da gota diminuem, a força de arrasto aumenta pela diminuição do Reynolds e torna-se maior que a força peso, o que diminui a velocidade da gota, o que por sua vez diminui Reynolds. Como Reynolds volta a ser menor que 10, a correção volta a estar próxima a 1.4 novamente.

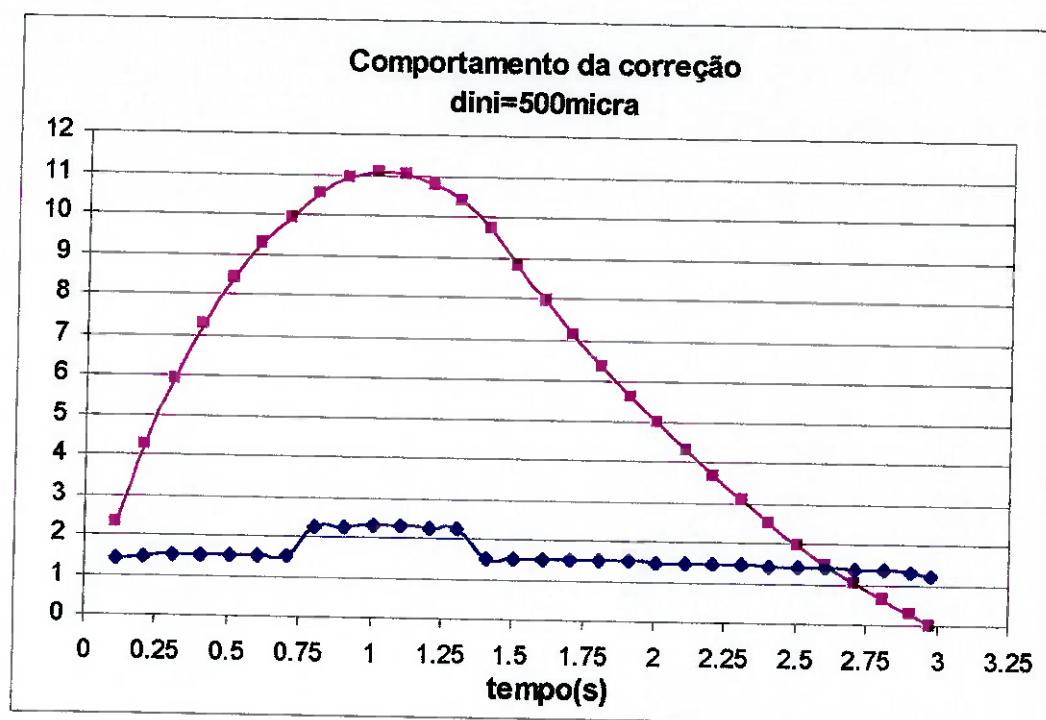


Fig.16 – Resultados para gota caindo: correção e Reynolds

É importante ressaltar que para várias simulações realizadas, constatou-se a validade das expressões para a correção da taxa de evaporação. Os intervalos obtidos para os adimensionais foram:

- Le variou entre 0.83 a 0.85.
- Sc ficou em torno de 0.57
- Bm varia conforme a fração em massa do vapor ao longe. Para água, o seu valor máximo foi de 0.2
- Reynolds calculado ao longe foi superior a 30 apenas nas primeiras iterações de cada simulação.

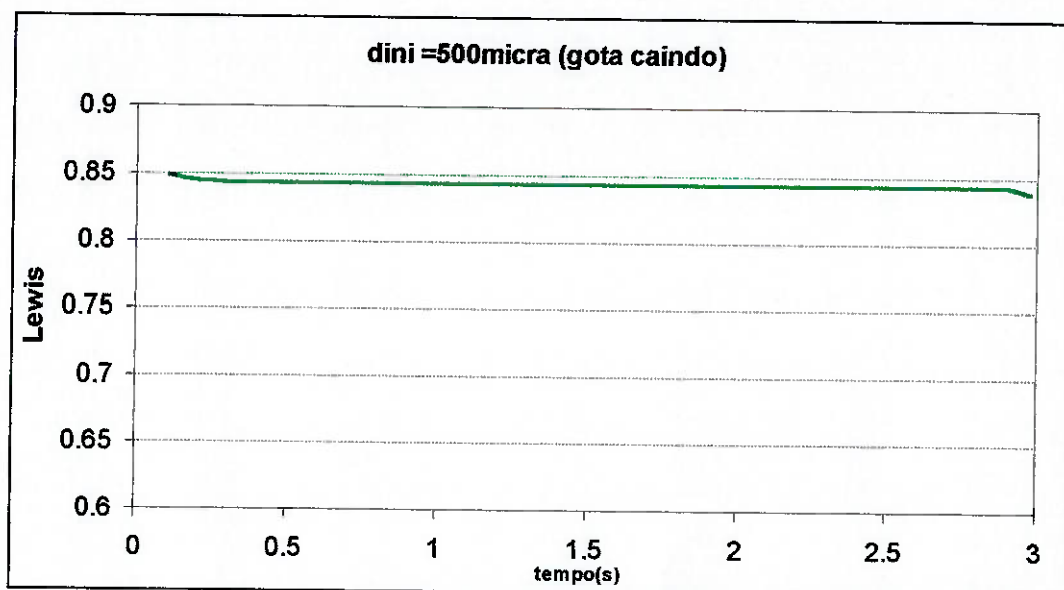


Fig.17 – Número de Lewis

8.2 Combustão de jato de gotas de hidrocarbonetos

Como dito anteriormente, o óleo lubrificante utilizado na obtenção dos dados experimentais será simulado como substância pura n-decano ($C_{10}H_{22}$). Isto se distancia da realidade uma vez que os óleos, em geral, são uma composição de hidrocarbonetos, sendo necessário introduzir um modelo de destilação para o óleo combustível, o que foge do escopo do trabalho.

As simulações foram realizadas nas seguintes condições:

- Temperatura inicial da gota.....140C
- Temperatura ao longe.....927C
- s (mols de oxidante / mols de comb.).....15.5
- Velocidade do ar (x,y) (m/s)..... (3,0)

Os dados restantes estão nas tabelas 1 e 2 do item 12.

Primeiramente, realizaram-se as simulações para a primeira coluna da tabela 1 com vazão nominal de 30kg/h. Analisando a tabela 1, as gotas presentes no centro do jato são menores que as da periferia. Isto ocorre porque o bico nebulizador fornece ao escoamento do líquido uma componente de velocidade rotacional chamada “swirl” que lança as gotas de maior diâmetro e inércia para a periferia do jato. As simulações realizadas não consideram esta parcela rotacional, embora é de se esperar que a forma da nuvem seja semelhante à letra “U” pela distribuição característica do tamanho de gotas.

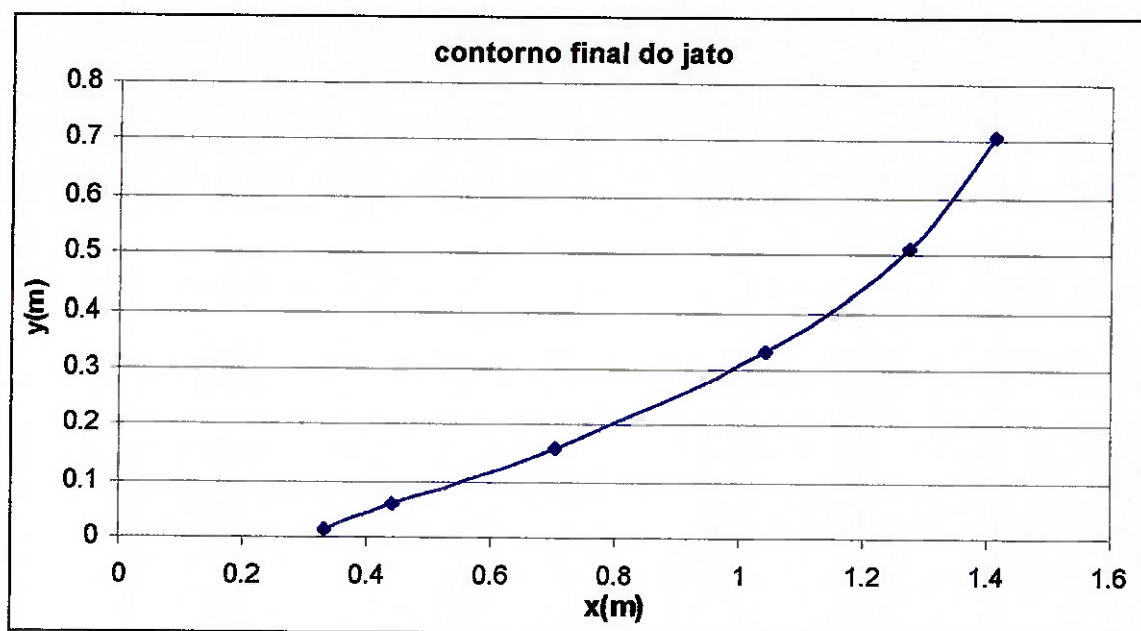


Fig.18 – Contorno final do jato para vazão de 30kg/h

O gráfico acima mostra metade do contorno final do jato em combustão, pois o jato é considerado simétrico, fato que não é verdade quando há movimentos rotacionais. Como se pode observar, se o gráfico acima for duplicado com relação ao eixo x , o desenho que se obtém é semelhante à letra “U”.

O gráfico abaixo também é resultado de simulações para 30 kg/h. Observa-se a trajetória das gotas no interior da nuvem conforme variam seus diâmetros e velocidades iniciais. Nestas condições, pode-se afirmar que a câmara de combustão para este nebulizador precisará, pelo menos de 0.7m de diâmetro e 1.5m de comprimento. Para cada ponto em cada uma das curvas equivale um intervalo de tempo de 0.01 segundos no sentido positivo do eixo .

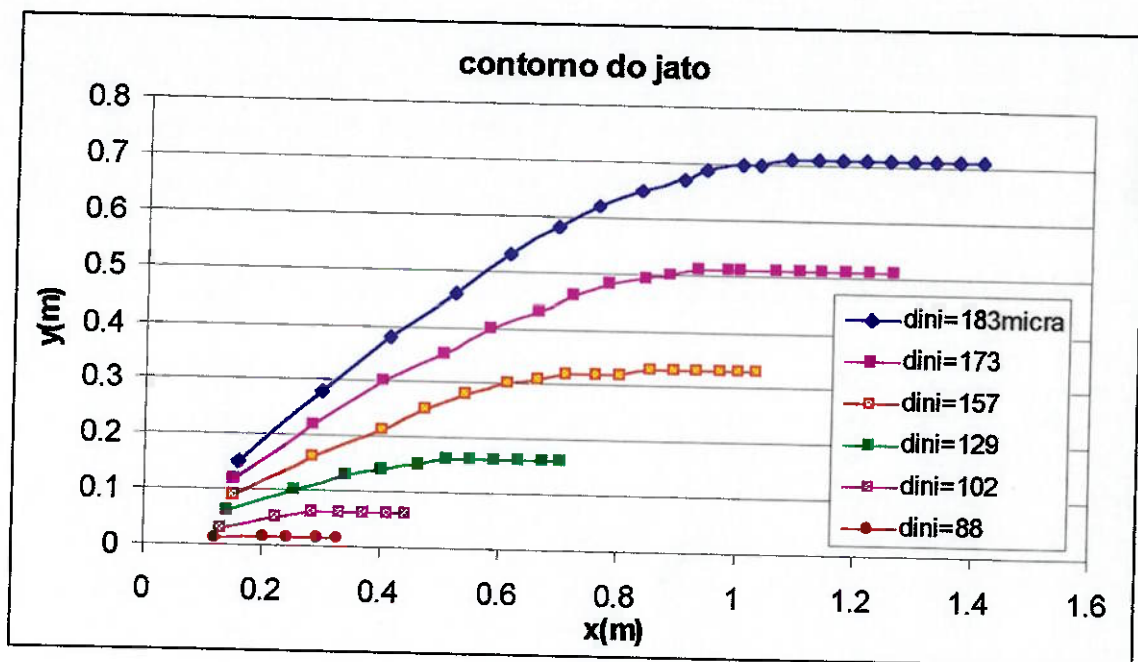


Fig.19 – Trajetórias de gotas no jato

Os dois gráficos seguintes mostram resultados de simulações para diâmetro de gota inicial de 183 micra e vazão de 30 kg/h nas mesmas condições das simulações acima.

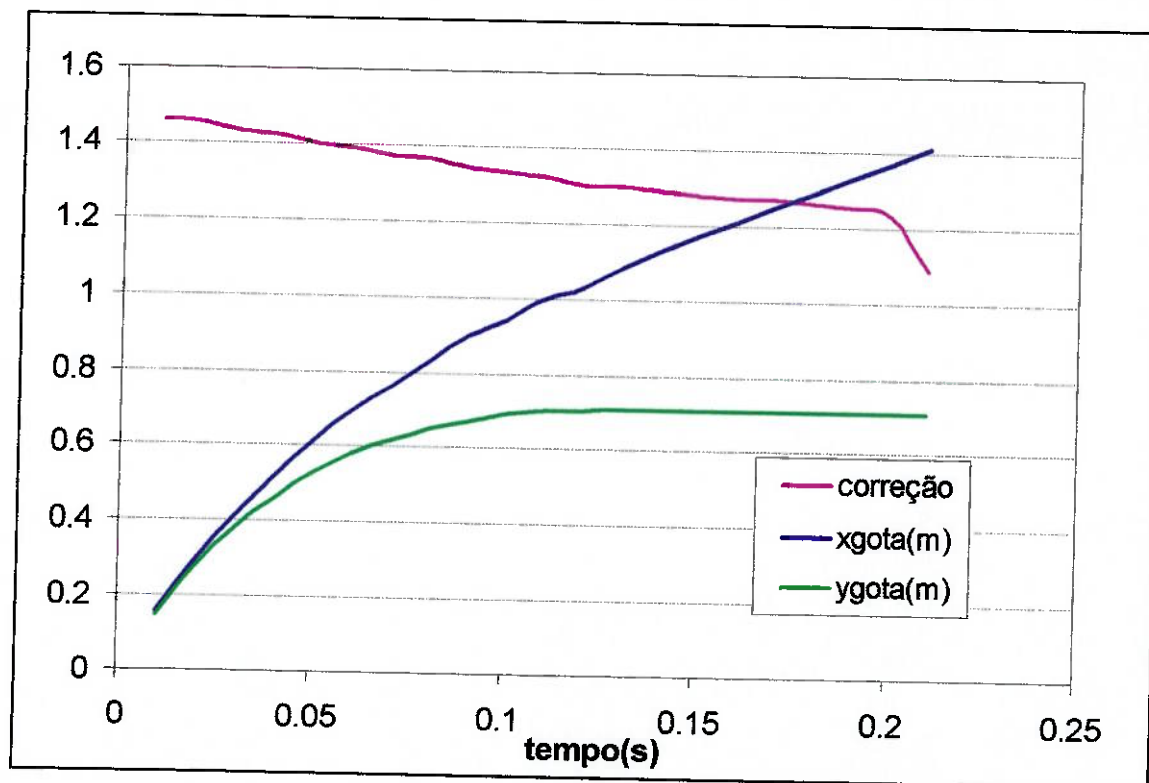


Fig.20 – Parâmetros de trajetória e combustão

No gráfico acima, observa-se que o patamar existente para a correção no caso da evaporação não se nota na combustão. Isto ocorre porque o número de Reynolds para a combustão é sempre menor que 10, como mostra a figura abaixo, já que a temperatura ao longe da atmosfera é bem maior comparada à condição da evaporação. Como o diâmetro da gota e as velocidades relativas diminuem, a correção também diminui ao longo do tempo.

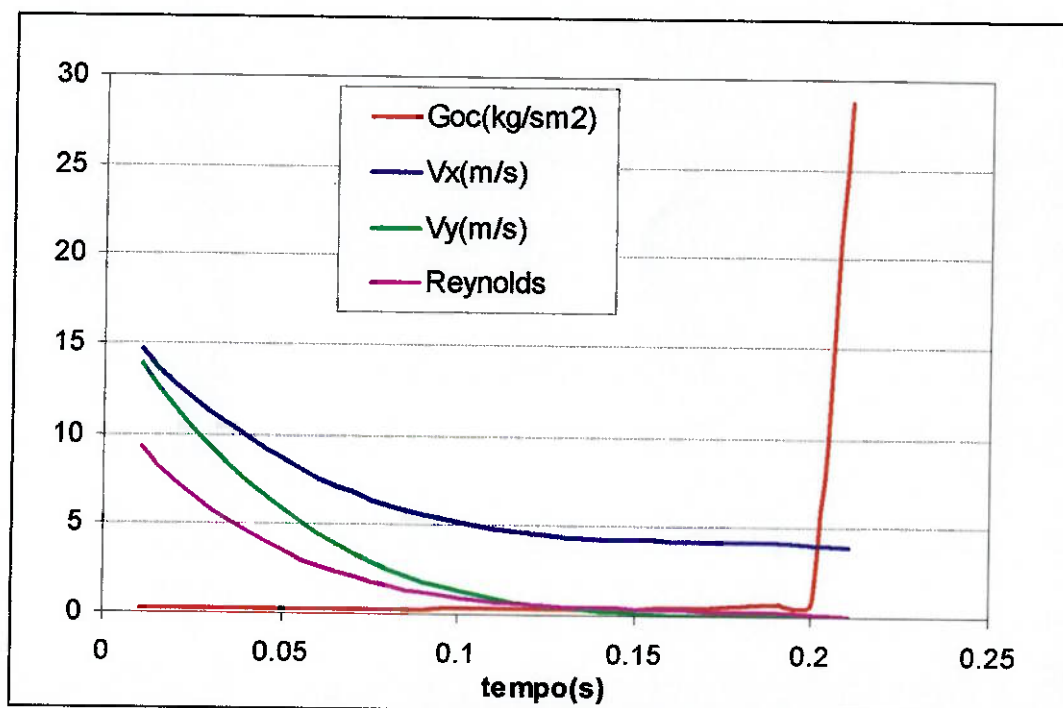


Fig.21 – Velocidades e taxa de combustão corrigida

O gráfico acima mostra o comportamento das velocidades, da taxa de combustão corrigida e do Reynolds ao longo do tempo. Conforme o tempo passa a velocidade em y tende a zero uma vez que a velocidade do escoamento de ar é nula e não há força peso. A velocidade em x tende à velocidade do escoamento, agora de 3m/s. Como as velocidades diminuem, o Reynolds também diminui. A taxa de combustão tem o mesmo comportamento em várias condições e diâmetros iniciais de gota como observado também na evaporação.

É importante ressaltar que para várias simulações realizadas, constatou-se a validade das expressões para a correção da taxa de evaporação. Os intervalos obtidos para os adimensionais foram:

- Le ficou em torno de 0.3
- Sc ficou em torno de 7.2

- Bm variou em torno de 1.7 e depende da fração em massa ao longe e a temperatura da gota.
- Reynolds calculado ao longe foi superior a 30 apenas nas primeiras iterações de cada simulação.

Como é difícil de se obter dados experimentais para trajetória e tempo de vida de gotas em combustão, os resultados obtidos podem ser apenas confrontados com a experiência de operadores e projetistas de nebulizadores.

9. VERIFICAÇÃO DE HIPÓTESE

A partir dos dados medidos em bancada apresentados na tabela 2, podem-se verificar uma das hipóteses iniciais que se refere à distância mínima entre gotas em que é possível analisar se o jato é diluto o suficiente para considerar válidos os modelos de evaporação e combustão de gotas isoladas.

O partenador da figura abaixo é utilizado para conhecer como a vazão de óleo se distribui no interior do jato. Como se pode observar, no centro da nuvem as gotas são pequenas e numerosas e na periferia são grandes e em menor número. Cada célula do partenador mede 18x18mm. Com esta informação, o diâmetro médio das gotas e a velocidade da gota nesta seção de medida (a 250mm do bocal) considerada a velocidade do ar na câmara (2m/s), consegue-se calcular a densidade de gotas nesta seção. Se tal densidade for menor do que a densidade máxima calculada pela hipótese de Bellan, tal hipótese é válida.



Fig.22 – Partenador do laboratório do IPT

A penúltima coluna da tabela 2 representa o número aproximado de gotas em 1mm^3 da nuvem em questão. A última coluna se refere ao número de gotas máximo permitido pela hipótese de Bellan em 1mm^3 para que o jato possa ser considerado diluto.

Assim, é possível calcular a cota a partir da qual a hipótese de Bellan é válida. Para este nebulizador operando com 30kg/h de óleo, tal distância é aproximadamente 140mm no eixo x a partir do bocal. Para vazões da ordem de 45kg/h a distância aumenta para 200mm . Estes cálculos supõe que o jato apresenta a forma de um triângulo, o que na prática não ocorre já que o fluxo de ar que confina a nuvem diminui sua área transversal.

10. NOMENCLATURA

B: diferença de potencial para evaporação ou combustão, “driving force”

By: diferença de potencial para o modelo de Faeth

c: calor específico

Cd: coeficiente de arrasto

d: diâmetro

dini: diâmetro inicial da gota

D: difusividade mássica

Fd: força de arrasto

G: fluxo mássico por unidade de área

h: entalpia específica

H: entalpia de combustão

k: condutividade térmica

Le: número de Lewis

mf: fração em massa

Pr: Prandtl

Q: fluxo de calor por unidade de área

r: raio

R: taxa de geração ou consumo (reação química)

Re: número de Reynolds

s: relação estequiométrica entre número de moles de oxidante (O_2) e número de moles de combustível

Sc: número de Schmidt

Ur: velocidade relativa entre a atmosfera e a gota

V: velocidade

x: coordenada horizontal

y: coordenada vertical

Símbolos gregos

Δu : velocidade relativa entre a atmosfera e a gota

ϕ : propriedade conservativa

Γ : $\rho_{mist} \cdot D$

μ : viscosidade dinâmica

ρ : densidade

Subscritos

∞ : infinito

0: na superfície da gota

a: atmosfera

AB: da espécie A em B

c: corrigida

inj: injeção

j: espécie química

líq: líquido

lv: líquido - vapor

m: massa

mist: mistura atmosfera vapor

v, vap: vapor

11. BIBLIOGRAFIA

1. Crowe, Clayton T., Numerical Approaches to Combustion Modeling (Cap 17). Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
2. Chiu, H.H., Advances and Challenges in Droplet and Spray Combustion. Progress in Energy and Combustion Science, Vol 26, 2000.
3. Bellan, J., Numerical Approaches to Combustion Modeling (Cap.18). Institute of Aeronautics and Astronautics, 1997.
4. Spalding, D.B., Convective Mass Transfer. McGraw-Hill Company, 1963.
5. Williams, F.A., Combustion Theory. The Benjamin/Cummings, 1985.
6. Barbosa, R.J., Modelagem e Simulação da Evaporação e Combustão de uma Gota de Combustível Líquido.
7. Zerbini, E.J.G.J., Notas de Aula do Curso: Processos e Sistemas de Combustão. Escola Politécnica da USP, 1998.
8. Incropera, F.P., de Witt, D.P., Fundamentos da Transferência de Calor e Massa. Editora Guanabara Koogan, 1992.
9. Williams, A., Combustion of Liquid Fuel Sprays. Butterworths, 1990.
10. Messias, L.S., Combustão de Líquidos. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Agrupamento de Engenharia Térmica, 2000.
11. Sirignano, William A., Fluid Dynamics and transport of droplets and sprays, Cambridge University Press, 1999.
12. Reid, Robert C., The Properties of Gases and Liquids, Mc Graw Hill, 1987.
13. Technical Data Book of Petroleum Refining, American Petroleum Institute, 1976.
14. Lefebvre, Arthur H., Atomization and Sprays, HPC, 1989.

12. ANEXOS

Tabelas de dados experimentais:

BOCAL STEINEN:

CONDIÇÃO N°	1	2	3	4
Pressão do óleo no bocal [bar]	5.0	7.5	14.7	20.0
Pressão do óleo no bocal [kPa]	500000.0	750000.0	1470000.0	2000000.0
Densidade do óleo [kg/m ³]	850.0	850.0	850.0	850.0
Vazão mássica de óleo [kg/h]	32	34	45	50
Temperatura do óleo no bocal [°C]	23.1	23.1	23.2	24.7
Viscosidade do óleo [cSt]	18	18	18	17
Tensão Superficial [kg/s ²]	0.0391	0.0391	0.0391	0.0387
Diâmetro médio de gota - D _(3,2)				
-99	183.81	134.87	110.75	106.41
-81	157.69	118.45	102.25	101.65
-63	142.37	106.13	95.57	91.29
-45	111.7	91.24	82.49	80.21
-27	92.02	76.66	58.51	54.49
-9	84.59	66.99	46.83	41.88
9	87.77	71.29	49.53	47.11
27	101.72	84.86	75.89	74.15
45	128.75	105.13	92.98	88.42
63	156.93	116.42	103.84	100.22
81	173.64	130.56	109.43	102.93
99	183.34		115.17	
Diâmetro médio pond. de gota na s	116.26	83.18	64.12	58.59
Diâmetro médio de gota no eixo do	86.18	69.14	48.18	44.495
Coefficiente de descarga	0.479	0.416	0.393	0.375
chute de X	0.33	0.38	0.4	0.415
Cd função de X (eq do caderno)	0.47553927	0.41557364	0.3927922	0.37614525
teta	44.7846381	47.9113566	49.1066468	49.9854019
espessura de filme inicial (mm)	0.17021749	0.15342344	0.14701779	0.14231803
area inicial do filme (mm ²)	0.33677845	0.31164573	0.30159264	0.29405282
raio inicial do filme (mm)	0.22978251	0.24657656	0.25298221	0.25768197
espessura de filme final (mm)	0.2197314	0.1572102	0.1211868	0.1107351
raio final do filme (mm)	0.1780037	0.24063721	0.30690541	0.33117584
comprimento do filme (mm)	0.17934714	0.21734609	0.26578789	0.27803376
posicao inicial da gota X (mm)	0.17934714	0.21734609	0.26578789	0.27803376
posicao inicial da gota Y (mm)	0.1780037	0.24063721	0.30690541	0.33117584
velocidade da gota X (m/s)	16.4381909	17.4655778	23.1162059	25.6846732
velocidade da gota Y (m/s)	16.3150566	19.3372142	26.6922954	30.5939222

Tab.1 – Geometria do jato

Bocal: STEINEN		18/04/00					
CONDIÇÃO No.		1					
Vazão de óleo - MO [kg/h]		30					
Pressão de óleo - POB [bar]		5					
Temperatura do óleo [oc]		Tamb.					
Tempo de coleta [m]		20,00					
Tubo coletor no.	Distância [mm]	Massa colet[gl]	fração colet.	D(3,2)-micra	Vgota (mm/s)	dens(n/mm3)	densmáx(n)
1	-99	41,00	0,0315	183,81	2000	0,11	0,56
2	-81	72,00	0,06	157,69	2000	0,31	0,93
3	-63	59,00	0,05	142,37	2000	0,35	1,26
4	-45	128,00	0,10	111,7	2000	1,56	2,62
5	-27	178,00	0,14	92,02	2000	3,87	4,66
6	-9	210,00	0,16	84,59	2000	5,88	6,02
7	9	185,00	0,14	87,77	2000	4,64	5,36
8	27	144,00	0,11	101,72	2000	2,32	3,47
9	45	122,00	0,09	128,75	2000	0,97	1,71
10	63	98,00	0,08	156,93	2000	0,43	0,94
11	81	50,00	0,04	173,64	2000	0,16	0,76
12	99	14,00	0,0108	183,34	2000	0,04	0,56
Massa total recolhida [gl]		1301,00	1,00				

Tab.2 – Distribuição da vazão de óleo no jato (partenador)

Tabela de resultados

- evaporação de água:

dini(micra)	500.00	632.00
experimental	2.90	4.00
parada	3.32	5.56
(% parada)	14.48	39.00
caindo	2.97	4.07
(%caindo)	2.41	1.75
Vx=10	3.00	5.42
Vx=20	3.00	5.42
Vx=50	3.00	5.42

Tab.3 - Tempos de vida (s) da gota para evaporação

- combustão de n-decano:

posição	dini(micra)	tvida(s)	xfinal(m)	yfinal(m)
99	183.3	0.21	1.41	0.71
81	173.6	0.19	1.27	0.51
63	157	0.157	1.04	0.33
45	128.75	0.107	0.7	0.16
27	101.7	0.067	0.44	0.06
9	87.7	0.05	0.33	0.015

Tab.4 – Resultados para combustão

tempo	Goc(kg/sm2)	correção	xgota(m)	ygota(m)	Vx(m/s)	Vy(m/s)
0.01	0.23	1.46	0.156	0.15	14.7	13.87
0.02	0.23	1.45	0.294	0.28	12.8	11.4
0.03	0.24	1.43	0.41	0.38	11.2	9.24
0.04	0.24	1.42	0.52	0.46	9.8	7.4
0.05	0.25	1.4	0.61	0.53	8.6	5.8
0.06	0.25	1.39	0.69	0.58	7.6	4.5
0.07	0.26	1.37	0.76	0.62	6.8	3.4
0.08	0.27	1.36	0.83	0.65	6.1	2.5
0.09	0.27	1.34	0.9	0.67	5.6	1.8
0.1	0.28	1.33	0.94	0.69	5.1	1.3
0.11	0.3	1.32	1	0.7	4.8	0.9
0.12	0.31	1.3	1.03	0.7	4.6	0.6
0.13	0.33	1.3	1.08	0.71	4.4	0.4
0.14	0.35	1.29	1.13	0.71	4.3	0.2
0.15	0.37	1.28	1.17	0.71	4.2	0.1
0.16	0.41	1.27	1.21	0.71	4.1	0
0.17	0.45	1.27	1.25	0.71	4.1	0
0.18	0.522	1.26	1.29	0.71	4.1	0
0.19	0.64	1.25	1.33	0.71	4.1	0
0.2	0.9	1.23	1.37	0.71	4	0
0.21	28.8	1.09	1.41	0.71	3.87	0

Tab.5 – Resultados para combustão de gota (dini=183 micra)

Códigos das simulações

Evaporação de água em túnel de vento:

Program evap

! EVAPORACAO DE GOTAS DE AGUA - difusao + conveccao nat + correcao + arrasto
use variaveis

! algumas entradas estão no arquivo entrada.txt. Outras estão aqui embaixo
! depois de call entrada

call entrada

! inicio
mfainf= 1-mfvinf
t0=tini
r0=dini/2

! constantes
pi= 3.14159
ptot=1.0e5
grav=9.81

tvida=0 ! tempo de vida da gota
icont=0
cont=0

dfinal=2*r0

do while((icont<=icontmax).and.(dfinal>1e-06))

tvida= tvida+delt

! prop. líquido (ÁGUA)
hlv= 2.2832e6*((1.0-t0/647.3)/0.439)**0.37
denliq=997-0.45*(t0-298)
cpliq=4178

!calcula mfv0,yv0,molmixt em fç de t0 e ptot
!está feita para molv=18 e mola=28.97.
!para mudar, tem que mudar na rotina, inclusive eq.de pvsat
call equilibrio

call propriedades

mgota= ((4*pi/3)*(r0**3))*denliq


```

use variaveis

real molmixt0

pvsat= exp(9.48654-3892.7/(t0-42.6776))*1e6
yv0= pvsat/ptot
ya0= 1-yv0
molmixt0= yv0*molv+ya0*mola
mfv0= pvsat*molv/(ptot*molmixt0)

mfa0= 1-mfv0

```

end subroutine equilibrio

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
subroutine propriedades

```

```

use variaveis

real numcond,dencond

! propriedades da mistura em trefprop
trefprop=t0+(tinf-t0)/rprop
mfvprop=mfv0+(mfvinf-mfv0)/rprop
mfaprop= 1-mfvprop
yvprop=mfvprop*mola/(molv*(1.0-mfvprop*(1-mola/molv)))
yaprop=1-yvprop
molmixtref=yvprop*molv+(1-yvprop)*mola
romixt=1.0e5*molmixtref/(8314.4*trefprop)
dvmixt=2.9e-5*(trefprop/313)**1.75
gama=romixt*dvmixt

! calor específico da mistura cpmixt
! em trefprop
taux=trefprop/100

cpvprop=(143.05-183.54*taux**0.25+82.751*taux**0.5-3.6989*taux)*1000/molv

if (trefprop <= 2000) then
    cpaprop= 0.1948*trefprop + 939.41
else
    cpaprop= 0.0015*(trefprop**2) - 6.2137*trefprop + 7766.1
end if

cpmixtprop= mfvprop*cpvprop + mfaprop*cpaprop

```

```

! em tinf
taux=tinf/100

cpvinf=(143.05-183.54*taux**0.25+82.751*taux**.5-3.6989*taux)*1000/molv

if (tinf <= 2000) then
    cpainf= 0.19412*tinf + 948.76
endif

if ((tinf>2000).and.(tinf<=2300)) then
    cpainf= 0.47*tinf + 397
end if

if (tinf>2300) then
    cpainf= 1.7829*tinf - 2622.6
endif

cpmixtinf= mfvinf*cpvinf + mfainf*cpainf

! prop. mistura em tinf
yvinf=mfvinf*mola/(molv*(1.0-mfvinf*(1-mola/molv)))
yainf= 1-yvinf
molmixtinf=yvinf*molv+(1-yvinf)*mola
romixtinf=1.0e5*molmixtinf/(8314.4*tinf)

! condutividade térmica da mistura em trefprop
condv=0.024*(trefprop/373.15)**1.45
conda=0.032*(trefprop/373.15)**0.84
numcond= (yvprop*condv*molv**3+(1-yvprop)*conda*mola**3)
dencond= (yvprop*molv**3+(1-yvprop)*mola**3)
condmixt=numcond/dencond

! condutividade térmica da mistura em tinf
condv=0.024*(tinf/373.15)**1.45
conda=0.032*(tinf/373.15)**0.84
numcond= (yvinf*condv*molv**3+(1-yvinf)*conda*mola**3)
dencond= (yvinf*molv**3+(1-yvinf)*mola**3)
condmixtinf=numcond/dencond

call viscosidades
! método de Wilke (p.407 Prop.of gases +liq)

le= condmixt/(romixt*cpmixtprop*dvmixt) ! Lewis
sc= viscprop/gama ! Schimdt

```

```
prinf= cpmixtinf*viscinf/condmixtinf ! Prandtl

ugota= (ugotax**2 + ugotay**2)**0.5
umixt= (umixtx**2 + umixty**2)**0.5
deltau= ( ((ugotax-umixtx)**2)+((ugotay-umixty)**2) )**0.5

reyninf= (romixtinf*deltau*r0)/viscinf
reynprop= (romixt*deltau*r0)/viscprop
```

end subroutine propiedades

[illegible]

subroutine viscosidades

use variaveis

```
real viscv,visca
real fiav,fiva
real auxva
real termo1,termo2
```

!!!!!! infinito

$$\text{viscv} = 1\text{e-}07 * (0.3608 * \text{tinf} - 9.9325)$$

```
if (tinf<=1000) then
```

```
visca= 1e-07*(0.34257*tinf+ 81.83)
```

else

```
visca= 1e-07*(0.2653*tinf + 159.1)
```

end if

$$\text{auxva} = (1 + ((\text{viscv}/\text{visca})^{**0.5}) * ((\text{mola}/\text{molv})^{**0.25}))^{**2}$$
$$f_{iva} = auxva / (8 * (1 + (molv / mola))) ** 0.5$$
$$fiav = (visca/viscv) * (molv/mola) * fiva$$
$$\text{termol} = (\text{yvinf} * \text{viscv}) / (\text{yvinf} + \text{yainf} * \text{fiva})$$

```
termo2=(yainf*visca)/(yainf+ yvinf*fiav)
```

$$\text{viscinf} = \text{termo1} + \text{termo2}$$

!!!!!! rprop

```

viscv= 1e-07*(0.3608*trefprop - 9.9325)

if (trefprop <= 1000) then
    visca= 1e-07*(0.3383*trefprop + 96.223)

else
    visca= 1e-07*(0.2657*trefprop + 156.49)

endif

auxva= (1+((viscv/visca)**0.5)*((mola/molv)**0.25))**2
fiva= auxva/(8*(1+(molv/mola)))**0.5

fiav= (visca/viscv)*(molv/mola)*fiva

termo1= (yvprop*viscv)/(yvprop+ yaprop*fiva)
termo2= (yaprop*visca)/(yaprop+ yvprop*fiav)

viscprop= termo1+termo2

```

!!!!!! 1/3

```

tumterco= t0 +(t0-tinf)/3
viscv= 1e-07*(0.3608*(tumterco) - 9.9325)

if (tumterco <= 1000) then
    visca= 1e-07*(0.3383*tumterco + 96.223)

else
    visca= 1e-07*(0.2657*tumterco + 156.49)

end if

auxva= (1+((viscv/visca)**0.5)*((mola/molv)**0.25))**2
fiva= auxva/(8*(1+(molv/mola)))**0.5

fiav= (visca/viscv)*(molv/mola)*fiva

mfvumterco=mfv0+(mfvinf-mfv0)/3
mfaumterco= 1-mfvumterco

yvumterco=mfvumterco*mola/(molv*(1.0-mfvumterco*(1-mola/molv)))
yaumterco=1-yvumterco

termo1= (yvumterco*viscv)/(yvumterco+ yaumterco*fiva)
termo2= (yaumterco*visca)/(yaumterco+ yvumterco*fiav)

```

```
viscumterco= termo1+termo2
```

```
end subroutine viscosidades
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
subroutine arrasto
```

```
use variaveis
```

```
! arrasto em x
```

```
deltaux= umixtx-ugotax
```

```
reynarrx= (romixtinf*(abs(deltaux))*r0)/viscumterco
```

```
if (reynarrx>0.001) then
```

```
    if(Bm<0)then
```

```
        coefarrx= 24/(reynarrx)
```

```
    else
```

```
        coefarrx= 24/(reynarrx*(1+Bm))
```

```
    endif
```

```
    if (coefarrx<0.6) then
```

```
        coefarrx=0.6
```

```
    endif
```

```
    farrx= (romixtinf*coefarrx*pi*(r0**2))*((abs(deltaux)*deltaux) /2)
```

```
    dugotax= (farrx+(dm*ugotax))*(delt/mgota)
```

```
else
```

```
    ugotax=umixtx
```

```
    dugotax=0
```

```
end if
```

```
ugotax= ugotax+dugotax
```

```
gotax= gotax+ugotax*delt
```

```
! arrasto em y considerando o peso da gota
```

```
deltauy= umixty-ugotay
```

```
reynarry= (romixtinf*(abs(deltauy))*r0)/viscumterco
```

```
if (reynarry>0.001) then
```

```
    if(Bm<0)then
```

```

    coefarry= 24/(reynarry)
else
    coefarry= 24/(reynarry*(1+Bm))
endif

if (coefarry<0.6) then
    coefarry=0.6
endif

farry= (romixtinf*coefarry*pi*(r0**2))*((abs(deltauy)*deltauy) /2)

farry=0

.

ay= ((farry-mgota*grav)+(dm*ugotay))*(delt/mgota)
y= ugotay+dugotay
= gotay+ugotay*delt

```

```

    if (auxre<1) then
        auxre=1
    endif

    auxc= (1 + 2*reyninf*Sc)**(1/3)
    correcao= 1 + ((k/2)*(auxc*auxre - 1))/FBm

end if

msirignano= correcao*mss

!dm= mfrossling
dm= msirignano

g0= dm/(4*pi*(r0**2))

end subroutine correcm
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

subroutine calculaq0

use variaveis

!!Spalding
gunga= exp(g0*cpvprop*r0/condmixt)-1.0
q0=cpvprop*g0*(tinf-t0)/gunga

!!Faeth
!qcond=condmixt/r0*(tinf-t0)*log(1+(mfv0-mfvinf)/(1.0-mfv0))/((mfv0-mfvinf)/(1.0-mfv0))
!q0=qcond

!!condução normal(nao considero a transferencia de massa)
!qcond=condmixt/r0*(tinf-t0)
!q0=qcond

end subroutine calculaq0
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

subroutine entrada

use variaveis

open (unit = 1, file = 'C:\fab\tf\entrada.txt' , form = 'formatted')

```

```

open (unit = 2, file = 'C:\fab\tf\resultados.txt' , form = 'formatted' )
open (unit = 3, file = 'C:\fab\tf\verificacoes.txt' , form = 'formatted' )
open (unit = 4, file = 'C:\fab\tf\trajetoria.txt' , form = 'formatted' )

```

```

7   format (f7.3)
9   format (f10.4)
5   format (f5.3)
15  format (e15.9)

```

```

write(2,*) 'DADOS DE ENTRADA:'
write(2,*) "

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,9) dini
write(2,*) 'diametro inicial da gota (em m)',dini

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) tini
write(2,*) 'temperatura inicial na gota (em K)',tini

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) tinf
write(2,*) 'temperatura ao longe (em K)',tinf

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) mfvinf
write(2,*) 'fracao em massa de vapor ao longe',mfvinf

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) rprop
write(2,*) 'local onde as propriedades são definidas',rprop

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) ugotax
write(2,*) 'velocidade inicial da gota em x(m/s)',ugotax

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) ugotay
write(2,*) 'velocidade inicial da gota em y(m/s)',ugotay

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) umixtx
write(2,*) 'velocidade inicial da mistura em x(m/s)',umixtx

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) umixty
write(2,*) 'velocidade inicial da mistura em y(m/s)',umixty

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) mola
write(2,*) 'Massa molar da atmosfera(kg/kmol)',mola

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) molv
write(2,*) 'Massa molar do líquido(kg/kmol)',molv

```

```

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) delt
read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) resol
read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) iconmax

```

```

write(2,*) "
write(2,*)'Pressao na atmosfera igual a 1,0 bar!'
write(2,*) "
write(2,*) "
write(2,*) 'SAIDA de resultados:'
write(2,*) "
write(2,*)' tempo(s)   ! dgota(m) ! Tgota(K) ! g0(kg/s.m2) ! correcao !'

```

```

write(3,*) 'SAIDA de verificações:'
write(3,*) "
write(3,*)' tempo(s)   ! Lemixt ! Scmixt<3   ! reyninf<30 ! Bm<20   !'

```

```

write(4,*) 'SAIDA da trajetória da gota:'
write(4,*) "
write(4,*)' tempo(s)   !Velgotax(m/s) ! Xgota(m) !Velgotay(m/s) ! Ygota(m) !'

```

```

end subroutine entrada

```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

subroutine saida

```

```

    use variaveis

```

```

    write(2,*) tvida,dfinal,t0,g0,correcao
    write(4,*) tvida,ugotax,gotax,ugotay,gotay
    write(3,*) tvida,le,sc,reyninf,Bm

```

```

end subroutine saida

```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

Combustão de jato de gotas de n-decano:

Program comb

```

!      COMBUSTÃO DE GOTAS DE N-DECANO - difusao + conveccao nat + correcao + arrasto
      use variaveis

!      algumas entradas estão no arquivo entrada.txt. Outras estão aqui embaixo
!      depois de call entrada

      call entrada

!      inicio
      mfainf= 1-mfvinf
      t0=tinj
      r0=dini/2

!      constantes
      pi= 3.14159
      e=2.718282
      ptot=1.0e5
      grav=0      !9.81
      Runiv=8314.4 ! J/(mol*K)

      tvida=0 ! tempo de vida da gota
      gotax=0 ! coordenada x da gota
      icon=0
      cont=0

      dfinal=2*r0

      do while((icon<=icontmax).and.(dfinal>1e-06))

          tvida= tvida+delt

          ! prop. líquido      (n-decano)

tc= 617.65
      tb= 447.3
      tbr=tb/tc
      tr=t0/tc

      pc= 2607000 !pressão crítica

      hc= 47641 !entalpia de comb.

      omega= 0.4902

      hlv= Runiv*tc*tbr*((3.978*tbr-3.958+1.555*(log(1e-05*pc)))/(1.07-tbr)) !J/kmolv

```

```

hlv= hlv/molv !J/kg
denliq= 58.08/(0.2503**((1+(1-tr)**(2/7))))
cpliq= 2252.11 !J/kgK até 100C

```

```

!calcula mfv0,yv0,molmixt em fç de t0 e ptot
!está feita para molv=18 e mola=28.97.
!para mudar, tem que mudar na rotina, inclusive eq.de pvsat
call equilibrio

```

```

call propriedades

```

```

mgota= ((4*pi/3)*(r0**3))*denliq

```

```

auxq0= hlv +cpliq*(tb-tinj)
Bm= ((cpmixtprop*(tinf-tb))+ (hc*mfoxinf/s))/auxq0

```

```

! taxa evap. com simetria esférica
g0= (romixt*dvmixt/r0)*(log(1+Bm))
mss= (4*pi*r0**2)*g0

```

```

call correcm

```

```

call arrasto

```

```

!1a lei da termo para tinj próxima a tb (linearização)
q0= g0*(hlv+ cpliq*(tb-tinj))

```

```

rnovo= r0-((g0*delt)/denliq)

```

```

r0=rnovo
dfinal=2*r0

```

```

icont=icont+1
cont=cont+delt

```

```

if (cont>=resol) then
  cont=0
  call saida

```

```

end if

```

```

end do

```

```

write(2,*)

```

```

call saida

```

```

write(2,*)
write(2,*)'iterações=',icont
write(2,*)'máximo de iterações=',icontmax
write(2,*)'delt(s)= ',delt
write(2,*)'resolução=',resol

```

```

end program comb

```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
subroutine equilibrio

```

```

    use variaveis

```

```

    real molmixt0

```

```

! (n-decano)

```

```

    fzero= 5.92714-(6.09648/tr)-(1.28862*log(tr))+(0.169347*(tr**6))
    fum= 15.2518-(15.6875/tr)-(13.4721*log(tr))+(0.43577*(tr**6))
    pvsat= pc*(e**(fzero+omega*fum))

```

```

    yv0= pvsat/ptot
    ya0= 1-yv0
    molmixt0= yv0*molv+ya0*mola
    mfv0= pvsat*molv/(ptot*molmixt0)

```

```

    mfa0= 1-mfv0

```

```

end subroutine equilibrio

```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
subroutine propriedades

```

```

    use variaveis

```

```

    real numcond,dencond

```

```

! propriedades da mistura em trefprop

```

```

    trefprop=t0+(tinf-t0)/rprop
    mfvprop=mfv0+(mfvinf-mfv0)/rprop
    mfaprop= 1-mfvprop
    yvprop=mfvprop*mola/(molv*(1.0-mfvprop*(1-mola/molv)))
    yaprop=1-yvprop
    molmixtref=yvprop*molv+(1-yvprop)*mola
    romixt=ptot*molmixtref/(8314.4*trefprop)

```

```
dvmixt=9.5327e-5*((trefprop**1.5)/ptot)
gama=romixt*dvmixt
```

```
! calor específico da mistura cpmixt em trefprop
```

```
cpvprop= -6.202 +0.954*trefprop -5.202e-04*(trefprop**2)+ 1.078e-
07*(trefprop**3)
!J/kgK

if (trefprop <= 2000) then
    cpaprop= 0.1948*trefprop + 939.41

else
    cpaprop= 0.0015*(trefprop**2) - 6.2137*trefprop + 7766.1

end if

cpmixtprop= mfvprop*cpvprop + mfaprop*cpaprop
```

```
! em tinf
cpvinf= -6.202+ 0.954*tinf -5.202e-04*(tinf**2)+ 1.078e-07*(tinf**3)

if (tinf <= 2000) then
    cpainf= 0.19412*tinf + 948.76
endif

if ((tinf>2000).and.(tinf<=2300)) then
    cpainf= 0.47*tinf + 397
end if

if (tinf>2300) then
    cpainf= 1.7829*tinf - 2622.6
endif

cpmixtinf= mfvinf*cpvinf + mfainf*cpainf
```

```
! prop. mistura em tinf
```

```
yvinf=mfvinf*mola/(molv*(1.0-mfvinf*(1-mola/molv)))
yainf= 1-yvinf
molmixtinf=yvinf*molv+(1-yvinf)*mola
romixtinf=ptot*molmixtinf/(8314.4*tinf)
```

call viscosidades

! método de Wilke para misturas de gases (p.407 Prop.of gases +liq)

! condutividade térmica da mistura em trefprop

cvvprop= cpvprop - Runiv/molv !J/kgK

cvvproping= cvvprop/4186.7 !Btu/lbF

viscvproping= viscvprop/2420 !lb/hft

condving= (viscvproping*cvvproping/molv)*((3.67/cvvproping) + 1.272) ! Btu/hftF

condv= condving*0.578 ! W/mK

conda=0.032*(trefprop/373.15)**0.84

numcond= (yvprop*condv*molv**3+(1-yvprop)*conda*mola**3)

dencond= (yvprop*molv**3+(1-yvprop)*mola**3)

condmixt=numcond/dencond

! condutividade térmica da mistura em tinf

cvvinf= cpvinf - Runiv/molv !J/kgK

cvvinfing= cvvinf/4186.7 !Btu/lbF

viscvinfing= viscvinf/2420 !lb/hft

condving= (viscvinfing*cvvinfing/molv)*((3.67/cvvinfing) + 1.272) ! Btu/hftF

condv= condving*0.578 ! W/mK

conda=0.032*(tinf/373.15)**0.84

numcond= (yvinf*condv*molv**3+(1-yvinf)*conda*mola**3)

dencond= (yvinf*molv**3+(1-yvinf)*mola**3)

condmixtinf=numcond/dencond

le= condmixt/(romixt*cpmixtprop*dvmixt) ! Lewis

sc= viscvprop/gama ! Schimdt

prinf= cpmixtinf*viscvinf/condmixtinf ! Prandtl

ugota= (ugotax**2 + ugotay**2)**0.5

umixt= (umixtx**2 + umixty**2)**0.5

deltat= abs(ugota-umixt)

reyninf= (romixtinf*deltat*r0)/viscvinf

reynprop= (romixt*deltat*r0)/viscvprop

end subroutine propriedades

!!

subroutine viscosidades

use variaveis

real viscv,visca

real fiav,fiva

real auxva

real termo1,termo2

!!!!!! infinito

viscvinf= 2.808e-04*((1.8*tinf)**0.5) !eq. Chapman e Cowling (Handbook)

viscv= viscvinf

if (tinf<=1000) then

visca= 1e-07*(0.34257*tinf + 81.83)

else

visca= 1e-07*(0.2653*tinf + 159.1)

end if

auxva= (1+((viscv/visca)**0.5)*((mola/molv)**0.25))**2

fiva= auxva/(8*(1+(molv/mola))**0.5)

fiav= (visca/viscv)*(molv/mola)*fiva

termo1= (yvinf*viscv)/(yvinf+ yainf*fiva)

termo2= (yainf*visca)/(yainf+ yvinf*fiav)

viscinf= termo1+termo2

!!!!!! rprop

viscvprop= 2.808e-04*((1.8*trefprop)**0.5) !eq. Chapman e Cowling (Handbook)

viscv= viscvprop

```
if (trefprop <= 1000) then
    visca= 1e-07*(0.3383*trefprop + 96.223)
```

```
else
    visca= 1e-07*(0.2657*trefprop + 156.49)
```

```
endif
```

```
auxva= (1+((viscv/visca)**0.5)*((mola/molv)**0.25))**2
fiva= auxva/(8*(1+(molv/mola)))**0.5
```

```
fiav= (visca/viscv)*(molv/mola)*fiva
```

```
termo1= (yvprop*viscv)/(yvprop+ yaprop*fiva)
termo2= (yaprop*visca)/(yaprop+ yvprop*fiav)
```

```
viscprop= termo1+termo2
```

!!!!!! 1/3

```
tumterco= t0 +(t0-tinf)/3
viscv= 2.808e-04*((1.8*tumterco)**0.5) !eq. Chapman e Cowling (Handbook)
```

```
if (tumterco <= 1000) then
    visca= 1e-07*(0.3383*tumterco + 96.223)
```

```
else
    visca= 1e-07*(0.2657*tumterco + 156.49)
```

```
end if
```

```
auxva= (1+((viscv/visca)**0.5)*((mola/molv)**0.25))**2
fiva= auxva/(8*(1+(molv/mola)))**0.5
```

```
fiav= (visca/viscv)*(molv/mola)*fiva
```

```
mfvumterco=mfv0+(mfvinf-mfv0)/3
mfaumterco= 1-mfvumterco
```

```
yvumterco=mfvumterco*mola/(molv*(1.0-mfvumterco*(1-mola/molv)))
yaumterco=1-yvumterco
```

```
termo1= (yvumterco*viscv)/(yvumterco+ yaumterco*fiva)
termo2= (yaumterco*visca)/(yaumterco+ yvumterco*fiav)
```

```
viscumterco= termo1+termo2
```

```
end subroutine viscosidades
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
subroutine arrasto
```

```
use variaveis
```

```
! arrasto em x
```

```
deltaux= umixtx-ugotax
```

```
reynarrx= (romixtinf*(abs(deltaux))*r0)/viscumterco
```

```
if (reynarrx>0.001) then
```

```
    if(Bm<0)then
```

```
        coefarrx= 24/(reynarrx)
```

```
    else
```

```
        coefarrx= 24/(reynarrx*(1+Bm))
```

```
    endif
```

```
    if (coefarrx<0.6) then
```

```
        coefarrx=0.6
```

```
    endif
```

```
    farrx= (romixtinf*coefarrx*pi*(r0**2))*((abs(deltaux)*deltaux) /2)
```

```
    dugotax= (farrx+(dm*ugotax))*(delt/mgota)
```

```
else
```

```
    ugotax=umixtx
```

```
end if
```

```
ugotax= ugotax+dugotax
```

```
gotax= gotax+ugotax*delt
```

```
! arrasto em y considerando o peso da gota
```

```
deltauy= umixty-ugotay
```

```
reynarry= (romixtinf*(abs(deltauy))*r0)/viscumterco
```

```
if (reynarry>0.001) then
```



```
auxre= 2*(reyninf**0.077)
```

```
if (auxre<1) then
```

```
    auxre=1
```

```
endif
```

```
auxc= (1 + 2*reyninf*Sc)**(1/3)
```

```
correcao= 1 + ((k/2)*(auxc*auxre - 1))/FBm
```

```
end if
```

```
!correcao=1
```

```
msirignano= correcao*mss
```

```
!dm= mfrossling
```

```
dm= msirignano
```

```
g0= dm/(4*pi*(r0**2))
```

```
end subroutine correcm
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

```
subroutine entrada
```

```
    use variaveis
```

```
    !open (unit = 1, file = 'C:\meusdo~1\hugo\tf\entrada.txt' , form = 'formatted')
```

```
    !open (unit = 2, file = 'C:\meusdo~1\hugo\tf\resultados.txt' , form = 'formatted' )
```

```
    !open (unit = 3, file = 'C:\meusdo~1\hugo\tf\verificacoes.txt' , form = 'formatted' )
```

```
    !open (unit = 4, file = 'C:\meusdo~1\hugo\tf\trajetoria.txt' , form = 'formatted' )
```

```
open (unit = 1, file = 'C:\fab\tf\entradacomb.txt' , form = 'formatted')
```

```
    open (unit = 2, file = 'C:\fab\tf\resultados.txt' , form = 'formatted' )
```

```
    open (unit = 3, file = 'C:\fab\tf\verificacoes.txt' , form = 'formatted' )
```

```
    open (unit = 4, file = 'C:\fab\tf\trajetoria.txt' , form = 'formatted' )
```

```
7      format (f7.3)
```

```
9      format (f10.4)
```

```
5      format (f5.3)
```

```
15     format (e15.9)
```

```
write(2,*) 'DADOS DE ENTRADA:'
```

```
write(2,*) "
```

```
read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
```

```

read(1,9) dini
write(2,*) 'diametro inicial da gota (em m)',dini

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) tinj
write(2,*) 'temperatura de injeção da gota (em K)',tinj

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) tinf
write(2,*) 'temperatura ao longe (em K)',tinf

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) mfvinf
write(2,*) 'fracao em massa de vapor ao longe',mfvinf

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) mfoxinf
write(2,*) 'fracao em massa de oxidante ao longe',mfoxinf

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) s
write(2,*) 'moles de oxidante/moles de combustível',s

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) rprop
write(2,*) 'local onde as propriedades são definidas',rprop

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) ugotax
write(2,*) 'velocidade inicial da gota em x(m/s)',ugotax

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) ugotay
write(2,*) 'velocidade inicial da gota em y(m/s)',ugotay

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) umixtx
write(2,*) 'velocidade inicial da mistura em x(m/s)',umixtx

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) umixty
write(2,*) 'velocidade inicial da mistura em y(m/s)',umixty

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) mola
write(2,*) 'Massa molar da atmosfera(kg/kmol)',mola

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada

```

```

read(1,7) molv
write(2,*) 'Massa molar do líquido(kg/kmol)',molv

read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) delt
read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) resol
read(1,9) ! pula linha no arquivo de entrada
read(1,7) iconmax

write(2,*) "
write(2,*)'Pressao na atmosfera igual a 1,0 bar!'
write(2,*) "
write(2,*) "
write(2,*) 'SAIDA de resultados:'
write(2,*) "
write(2,*)' tempo(s)   ! dgotax(m) ! Tgotax(K) ! g0(kg/s.m2) ! correcao !'

write(3,*) 'SAIDA de verificações:'
write(3,*) "
write(3,*)' tempo(s)   ! Lemixt ! Scmixt ! reyninf<30 ! Bm<20   !'

write(4,*) 'SAIDA da trajetória da gota:'
write(4,*) "
write(4,*)' tempo(s)   !Velgotax(m/s) ! Xgotax(m) !Velgotay(m/s) ! Ygotax(m) !'

end subroutine entrada
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

subroutine saida

    use variaveis

    write(2,*) tvida,dfinal,t0,g0,correcao
    write(4,*) tvida,ugotax,gotax,ugotay,gotay
    write(3,*) tvida,le,sc,reyninf,Bm

end subroutine saida
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```