

## Relatório Parcial

Título do projeto de pesquisa: Modelagem e simulação computacional para o desenvolvimento de partículas de parafina por spray cooling

Bolsista: Guilherme Augusto de Oliveira Pereira

Orientador(a): Marcio Yuji Nagamachi

Período a que se refere o relatório: Agosto de 2015 a Julho de 2016

### Resumo

O *spray cooling* surge como um dos métodos mais promissores para o preparo de partículas esféricas de parafina. Essas partículas encontram aplicação em grãos-combustíveis de motores-foguete híbridos, substituindo os tradicionais grãos-combustíveis feitos com blocos maciços frágeis de parafina. O estudo desse processo foi conduzido em outro projeto PIBIC, e os dados obtidos são utilizados neste trabalho para desenvolver a sua modelagem e simulação. Com essas informações, será possível ajustar e controlar o processo através da otimização dos seus parâmetros.

### 1. Introdução

O *spray cooling* é um processo eficiente no preparo de partículas esféricas de parafina. Porém, a sensibilidade desse processo demanda que os seus parâmetros sejam ajustados de forma precisa a fim de que as partículas apresentem forma, tamanho e a distribuição adequadas. Por outro lado, esses ajustes devem levar em conta a eficiência e o rendimento do processo. Nesse sentido, a modelagem e simulação são importantes ferramentas que auxiliam na otimização dos ajustes corretos desses parâmetros. Com essa finalidade, este trabalho tem por objetivo desenvolver a modelagem e a simulação do processo de *spray cooling*, a fim de que ele possa ser utilizado na preparação das partículas esféricas de parafina para emprego em motores-foguete híbridos.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Materiais

O equipamento utilizado nesses estudos é um Mini Spray-Dryer B-290 da Buchi, adaptado para utilização como *spray-cooling*. Para a modelagem e simulação foi empregado um computador com processador AMD E-350, com sistema operacional Windows 7 (service Pack 1) e aplicativo Microsoft Visual Studio 2013. O compilador utilizado foi o Visual Basic.

### 2.2 Métodos

O equipamento utilizado é um Mini Spray-Dryer B-290 da Buchi, adaptado para operar com *spray cooling*, conforme mostra a Fig. 1. A parafina é fundida em um reservatório na parte superior do aparelho, e flui por gravidade até ser injetado no bocal do atomizador. A parafina fundida se colide com o ar comprimido a altas velocidades em expansão na saída do bocal e forma um *spray*. A pressão e a vazão do ar comprimido são medidas através de um manômetro e um rotâmetro, conforme mostra a Fig. 1. O *spray* formado na atomização entra em contato com ar frio ventilado que circula na câmara, e as gotículas de parafina fundida se solidificam formando partículas esféricas de parafina.

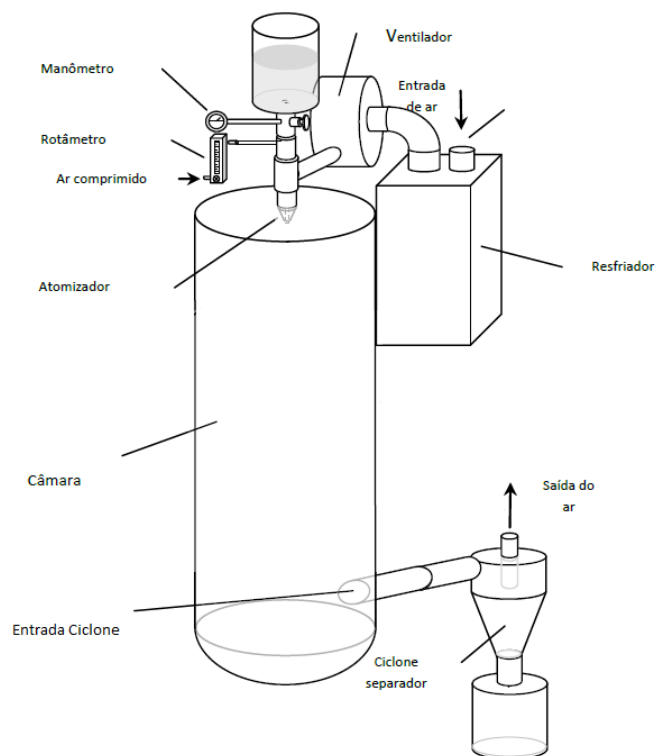


Figura 1 - Equipamento Spray e seus acessórios

## 3. Resultados e Discussão

O estudo foi dividido em quatro partes a fim de facilitar a modelagem dos processos envolvidos em cada segmento do aparelho. A primeira parte corresponde à seção de injeção de ar comprimido; a segunda parte corresponde à seção de injeção de parafina fundida; a terceira

parte corresponde à seção atomização, e a última parte corresponde à seção de resfriamento e separação.

- Parte I – Seção de injeção de ar comprimido

O ar comprimido é fornecido por um compressor e passa por um filtro e um rotâmetro, este último é dotado de uma válvula para o ajuste da vazão. O ar comprimido segue em direção ao atomizador e é ejetado a altas velocidades através de um bocal convergente (Balachandran, 2006 e Shapiro, 1953). O ar colide com o filete de parafina fundida e forma um *spray*, que posteriormente é resfriado. O regime transitório é obtido a partir dos seguintes balanços globais de massa no rotâmetro e no atomizador (Bennett, 1982), respectivamente:

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{A_r}{L} \cdot \left[ R \cdot T_r \cdot \ln\left(\frac{P_m}{P_r}\right) - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Phi_r}{C_r}\right)^2 \right] \quad \text{Eq. 1}$$

$$\frac{dP_o}{dt} = \frac{T_o}{V_{at}} \cdot \left( \frac{\Phi_r}{T_r} \cdot P_o - R \cdot w_g \right) \quad \text{Eq. 2}$$

As interpolações de 1ª ordem por aproximação de Taylor resultam, respectivamente:

$$\Phi_{r,t+\Delta t} = \Phi_{r,t} + \left( \frac{d\Phi_r}{dt} \right)_t \cdot \Delta t \quad \text{Eq. 3}$$

$$P_{o,t+\Delta t} = P_{o,t} + \left( \frac{dP_o}{dt} \right)_t \cdot \Delta t \quad \text{Eq. 4}$$

, em que:  $\Phi_r$  vazão volumétrica no rotâmetro,  $A_r / L$  constante do rotâmetro,  $P_m / P_r$  razão das pressões à montante e à jusante do rotâmetro,  $T_r$  temperatura no rotâmetro,  $V_{at}$  volume do atomizador,  $P_o$  e  $T_o$  pressão e a temperatura de estagnação no atomizador,  $R$  constante universal para o ar,  $C_r$  e  $w_g$  coeficiente da válvula do rotâmetro e vazão mássica de ar comprimido (Ashgriz, 2011) dados, respectivamente, por:

$$C_r = 9,375 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{L_r^{0,24}}{1 - 0,375 \cdot L_r^{0,24}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$w_g = A_g \cdot \sqrt{\frac{k}{R}} \cdot \frac{P_o}{\sqrt{T_o}} \cdot \frac{Ma}{\left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot Ma^2\right)^{\frac{k+1}{2 \cdot (k-1)}}} \quad \text{Eq. 6}$$

, em que:

$$Ma = 1 - e^{-0,798 \cdot [\ln(P_o \cdot 10^{-5})]^{0,779}} \quad \text{Eq. 7}$$

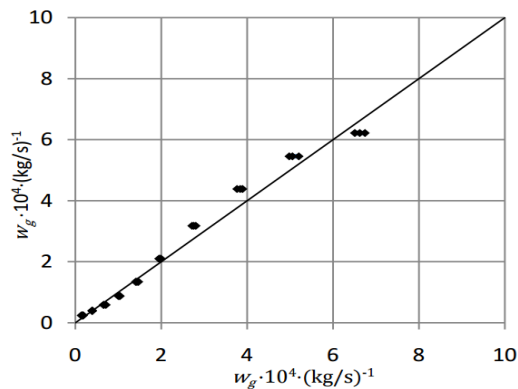


Figura 2 – Dados calculados e experimentais de  $w_g$ .

O regime permanente foi obtido igualando-se a zero a Eq.1 e 2, e as correlações da Eq.5, 6 e 7 foram deduzidas a partir de dados experimentais. As vazões mássicas de ar comprimido  $w_g$  foram calculadas a partir da Eq. 6 e comparadas com os dados experimentais, conforme mostra a Fig. 2. Há boa concordância entre os valores calculados e experimentais.

### - Parte II – Seção de injeção de parafina fundida

A parafina na forma de *pellets* é adicionada, fundida e mantida aquecida no reservatório localizado no topo do equipamento, conforme mostra a Fig. 1. A parafina fundida flui por gravidade e se choca com o ar comprimido em expansão na saída bocal de atomização, formando um *spray* com gotículas de parafina. A vazão da parafina é ajustada por meio de uma válvula situada logo abaixo do reservatório. O regime transitório é obtido a partir dos balanços globais de massa no reservatório e na saída do tubo injetor, respectivamente:

$$\frac{dz_a}{dt} = \frac{\Phi_f}{A_a} - \frac{\Phi_l}{A_a} \quad \text{Eq. 8}$$

$$\frac{d\Phi_l}{dt} = \frac{A_l}{L'} \cdot \left[ \dot{g} \cdot z_a - \frac{\Delta P_c + \Delta P_{ea}}{\rho_l} - \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\Phi_l}{F_v \cdot C_v} \right)^2 \right] \quad \text{Eq. 9}$$

As interpolações de 1ª ordem por aproximação de Taylor resultam, respectivamente:

$$z_{a,t+\Delta t} = z_{a,t} + \left( \frac{dz_a}{dt} \right)_t \cdot \Delta t \quad \text{Eq. 10}$$

$$\Phi_{l,t+\Delta t} = \Phi_{l,t} + \left( \frac{d\Phi_l}{dt} \right)_t \cdot \Delta t \quad \text{Eq. 11}$$

, em que:  $z_a$  cota do nível do reservatório,  $\Phi_f$  vazão de alimentação igual a zero,  $\Phi_l$  vazão de injeção de parafina fundida,  $A_a$  área da seção transversal do reservatório,  $A_l/L'$  constante do tubo injetor,  $\dot{g}$  aceleração da gravidade,  $\Delta P_c$  pressão relativa na câmara,  $\rho_l$  densidade da parafina fundida,  $\Delta P_{ea}$  e  $C_v$  são o efeito de pressurização/aspiração (Crowe, 2006. pag. 8-13, 8-14) e o coeficiente da válvula dados, respectivamente, por:

$$\Delta P_{e\alpha} = (10,5 \cdot Ma^3 - 13,44 \cdot Ma^2 + 3,461 \cdot Ma) \cdot 10^4 \quad \text{Eq. 12}$$

$$C_{v\alpha} = 2,281 \cdot 10^{-7} \cdot (1 - e^{-0,772 \cdot n_v^{1,159}}) \quad \text{Eq. 13}$$

, em que:  $Ma$  número de Mach é obtido da Eq. 7 e  $n_v$  número de voltas de abertura da válvula. O fator de correção da viscosidade  $F_v$  foi correlacionado a partir de dados da literatura (Lipták, 1995):

$$F_v = 0,0027 \cdot Re_v \quad Re_v < 106 \quad \text{Eq. 14}$$

$$F_v = \exp\left(0,05594 - \frac{127,0}{Re_v} - 0,02339 \cdot \ln(Re_v)\right) \quad 106 \leq Re_v < 556 \quad \text{Eq. 15}$$

$$F_v = \exp\left(-0,3433 - \frac{112,1}{Re_v} - 0,03300 \cdot \ln(Re_v)\right) \quad 556 \leq Re_v < 40000 \quad \text{Eq. 16}$$

$$F_v = 1 \quad Re_v > 40000 \quad \text{Eq. 17}$$

O regime permanente foi obtido igualando-se a zero a Eq. 8 e 9, e as correlações da Eq. 12 e 13 foram deduzidas a partir de dados experimentais. As vazões volumétricas de parafina fundida  $\varnothing_l$  foram calculadas através da Eq. 9, em regime permanente, e comparadas com os dados experimentais, conforme mostra a Fig. 3. Há boa concordância entre valores calculados e experimentais.

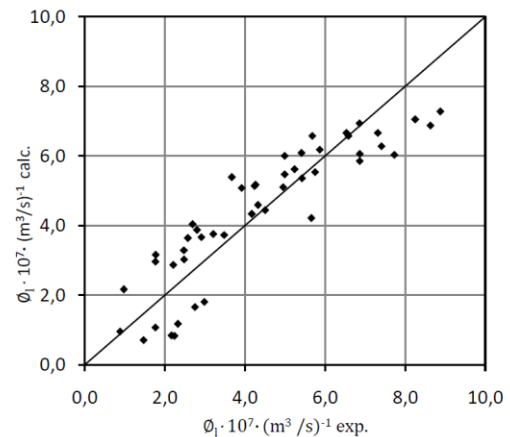


Figura 3 - Correlação de  $\varnothing_l$  calculados e experimentais

### - Parte III – Seção de atomização da parafina fundida

O processo de atomização ocorre com a colisão do ar comprimido com o filete de parafina fundida na saída do bocal de atomização. O filete se quebra em gotas que sucessivamente se quebram em gotículas menores até atingir um diâmetro crítico. O diâmetro crítico está diretamente relacionado com a magnitude da velocidade do ar comprimido, de modo que ele se reduz à medida que a velocidade do ar aumenta. Por outro lado, a tensão superficial na superfície das gotas exerce uma força de resistência a essa deformação que resulta no aumento do diâmetro crítico. O número de Weber é o adimensional que melhor representa

esses dois efeitos e é largamente utilizado em estudos de atomizadores do tipo *two-fluid air-assisted atomizer* empregado neste trabalho. Ele é definido por:

$$We = \frac{\rho_l \cdot v_g^2 \cdot D_l}{\sigma_l} \quad \text{Eq. 18}$$

, em que:  $\rho_l$  densidade da parafina fundida,  $v_g$  velocidade do ar comprimido na saída do bocal de atomização,  $D_l$  diâmetro do tubo de injeção e  $\sigma_l$  tensão superficial da parafina fundida. O outro adimensional utilizado nesses estudos é a razão ar-líquido *ALR*:

$$ALR = \frac{w_g}{w_l} \quad \text{Eq. 19}$$

, em que:  $w_g$  vazão mássica de ar comprimido e  $w_l$  vazão mássica da parafina fundida. O aumento da vazão relativa de ar também produz o aumento do diâmetro crítico, o qual corresponde ao maior diâmetro da função de distribuição das gotas. Os estudos

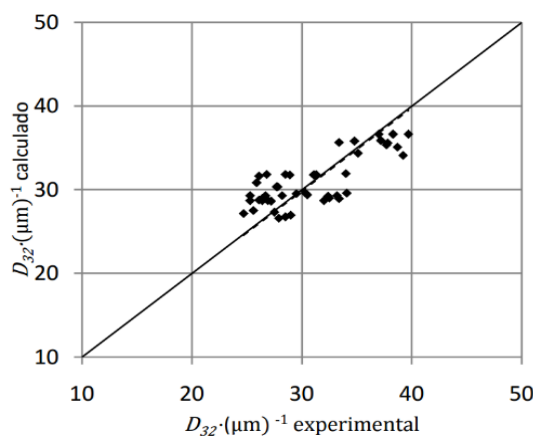


Figura 4 - Correlação de  $D_{32}$  calculados e experimentais

$$D_{32} = e^{-0,066 \cdot ALR + 5,733 \cdot We^{-0,0390}} \quad \text{Eq. 20}$$

Os dados de  $D_{32}$  calculados pela Eq. 20 foram comparados com os dados experimentais, conforme mostra a Fig. 4. Há boa concordância entre os valores calculados e experimentais.

#### - Parte IV - seção de resfriamento e separação

O *spray* formado na atomização da parafina fundida entra em contato com o ar frio que é ventilado para dentro da câmara. As gotas de parafina fundida se solidificam em contato com o ar frio e formam uma dispersão de partículas parafina com o ar circulante na câmara. A dispersão flui através de um ciclone separador, onde as partículas são separadas por centrifugação e coletadas em um recipiente. O ar flui para o centro e para o topo do ciclone

separador onde é removido do equipamento. O regime transiente é obtido a partir do balanço global de massa e energia em torno da câmara de atomização.

$$\frac{dP_c}{dt} = \frac{R}{V_c} \cdot \left( w_v \cdot T_v + w_g \cdot T_g - w_{s_o} \cdot T_c + \frac{w_l \cdot \lambda_l}{c_p} \right) \quad \text{Eq. 21}$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{R \cdot T_c}{P_c \cdot V_c} \cdot \left[ w_v \cdot (T_v - T_c) + w_g \cdot (T_g - T_c) + \frac{w_l \cdot \lambda_l}{c_p} \right] \quad \text{Eq. 22}$$

As interpolações de 1ª ordem por aproximação de Taylor resultam, respectivamente:

$$P_{c,t+\Delta t} = P_{c,t} + \left( \frac{dP_c}{dt} \right)_t \cdot \Delta t \quad \text{Eq. 23}$$

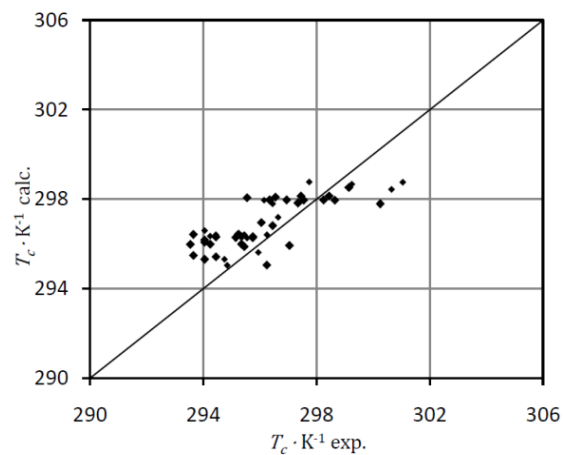
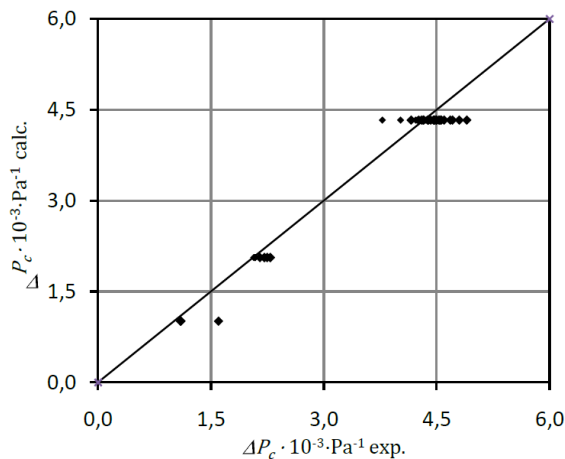
$$T_{c,t+\Delta t} = T_{c,t} + \left( \frac{dT_c}{dt} \right)_t \cdot \Delta t \quad \text{Eq. 24}$$

, em que:  $P_c$  e  $T_c$  pressão e temperatura na câmara,  $V_c$  volume da câmara,  $T_v$  e  $T_g$  temperatura do ar ventilado e do ar comprimido,  $w_l$  vazão mássica de parafina fundida,  $\lambda_l$  calor latente de fusão da parafina,  $c_p$  capacidade calorífica do ar,  $R$  constante universal para o ar (em unidades do SI),  $w_v$  e  $w_{s_o}$  são a vazão mássica do ar ventilado e do ar na saída da câmara, dados por:

$$w_v = A_v \cdot \frac{P_c}{R \cdot T_v} \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot T_v \cdot \left[ \ln \left( \frac{0,37 \cdot L_v^2 - 2,2 \cdot L_v + 100000}{P_{atm}} \right)^{\gamma \cdot T'_v / T_v} - \ln \left( \frac{P_c}{P_{atm}} \right) \right]} \quad \text{Eq. 25}$$

$$w_{s_o} = K_{cs} \cdot A_{s_o} \cdot \frac{P_c}{R \cdot T_c} \cdot \sqrt{2 \cdot R \cdot T_c \cdot \ln \left( \frac{P_c}{P_{atm}} \right)} \quad \text{Eq. 26}$$

, em que:  $A_v$  e  $A_{s_o}$  área da seção transversal da câmara e do orifício de saída,  $P_{atm}$  pressão atmosférica,  $K_{cs}$  constante do ciclone separador (Hoffmann, 2002),  $\gamma$  coeficiente de potência do ventilador e  $T'_v$  temperatura de calibração da câmara. O regime permanente é obtido igualando-se a zero a Eq. 21 e 22. Os coeficientes foram obtidos por ajustes com os dados experimentais:  $K_{cs} = 0,231$  e  $\gamma = 1,226$ .



**Figura 5 – Correlação de  $P_c$  calculado com experimental**      **Figura 6 - Correlação de  $T_c$  calculado com experimental**

Os valores de  $P_c$  e  $T_c$  foram calculados através da Eq. 21 e 22, em regime permanente, e comparados com os dados experimentais, conforme mostra a Fig. 5 e 6. Há boa concordância entre os valores calculados e experimentais.

As modelagens das quatro partes foram integradas de modo a formar o simulador numérico do equipamento, conforme mostra a Fig. 6. O fluxograma do processo mostra ainda, dentro das linhas tracejadas, o esquema de controle do processo a ser desenvolvido no próximo projeto PIBIC.

#### 4. Conclusões

A modelagem do Mini Spray-Dryer Buchi B-290, adaptado para operar com *spray cooling*, foi conduzida em quatro partes: seção de injeção de ar comprimido, seção de injeção de parafina fundida, seção de atomização da parafina fundida e seção de resfriamento e separação. As correlações obtidas nas quatro seções foram utilizadas com as equações de balanços globais e as equações constitutivas para formar a modelagem do simulador. Os resultados obtidos mostram que há boa concordância entre os valores calculados e experimentais. A partir desses resultados, busca-se desenvolver em outro projeto PIBIC um sistema de controle que reduza os efeitos de sensibilidade que esse processo normalmente apresenta.



### 5. Divulgação dos Resultados

Os resultados obtidos neste trabalho serão divulgados por meio de participação em congressos e através da submissão a revistas científicas especializadas.

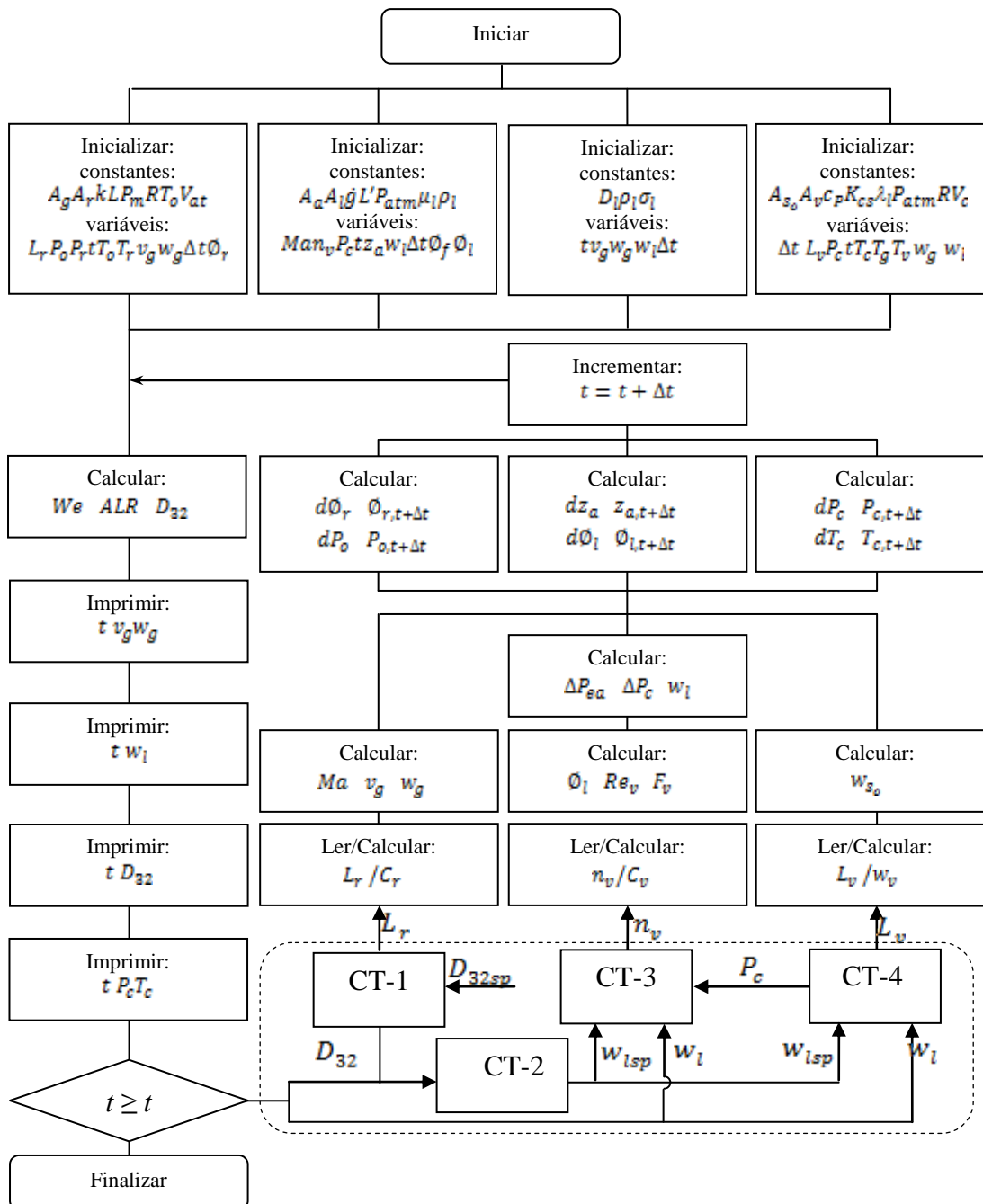


Figura 6 – Fluxograma do simulador



## Referências

1. Balachandran H., **Fundamentals of Compressible Fluid Dynamics.** - Delhi : Prentice Hall India Ltd., 2006.
2. Shapiro A. H., **The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow Volume I.** The Ronald Press Company, New York, (1953).
3. Ashgriz, N., **Handbook of Atomization and Sprays**, New York: Springer Science, (2011)
4. Bennett, C. O., Myers, J. E., & Meyers, J. E., **Momentum, Heat and Mass Transfer**, New York: McGraw-Hill, (1982).
5. Crowe, C. T., **Multiphase Flow Handbook**, Boca Raton: CRC Taylor & Francis, (2006. pag. 8-12, 8-14).
6. Hoffmann, A. C., & Stein, L. E., **Gas Cyclones and Swirl Tubes**, Heidelberg: Springer, (2002, pag. 49)
7. Lipták Béla G., **Instrument Engineer's Handbook**, Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, (1995, pág 590)