

Transferência de Calor II

FEMEC 41071

Prof. João Rodrigo Andrade

joao.andrade@ufu.br

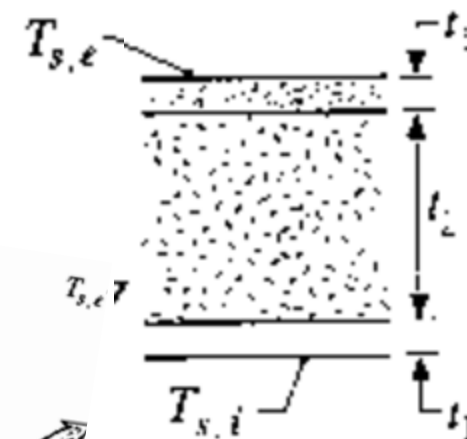
sites.google.com/view/joaorodrigoandrade



Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG

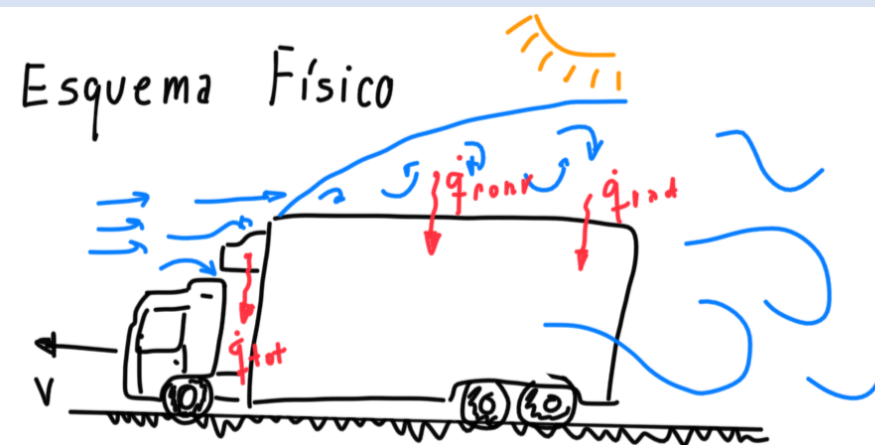
Exemplo 1

7.20 O teto do baú de um caminhão refrigerado é construído com um material composto, sendo constituído por uma camada de isolante de espuma de uretano ($t_2 = 50 \text{ mm}$, $k_i = 0,026 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) entre painéis de liga de alumínio ($t_1 = 5 \text{ mm}$, $k_p = 180 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$). O comprimento e largura do teto são $L = 10 \text{ m}$ e $W = 3,5 \text{ m}$, respectivamente, e a temperatura da superfície interna é $T_{s,i} = -10^\circ\text{C}$. Sejam condições nas quais o caminhão se desloca a uma velocidade de $V = 105 \text{ km/h}$, a temperatura do ar é $T_\infty = 32^\circ\text{C}$ e a irradiação é $G_s = 750 \text{ W/m}^2$. Escoamento turbulento pode ser suposto ao longo de todo o teto.

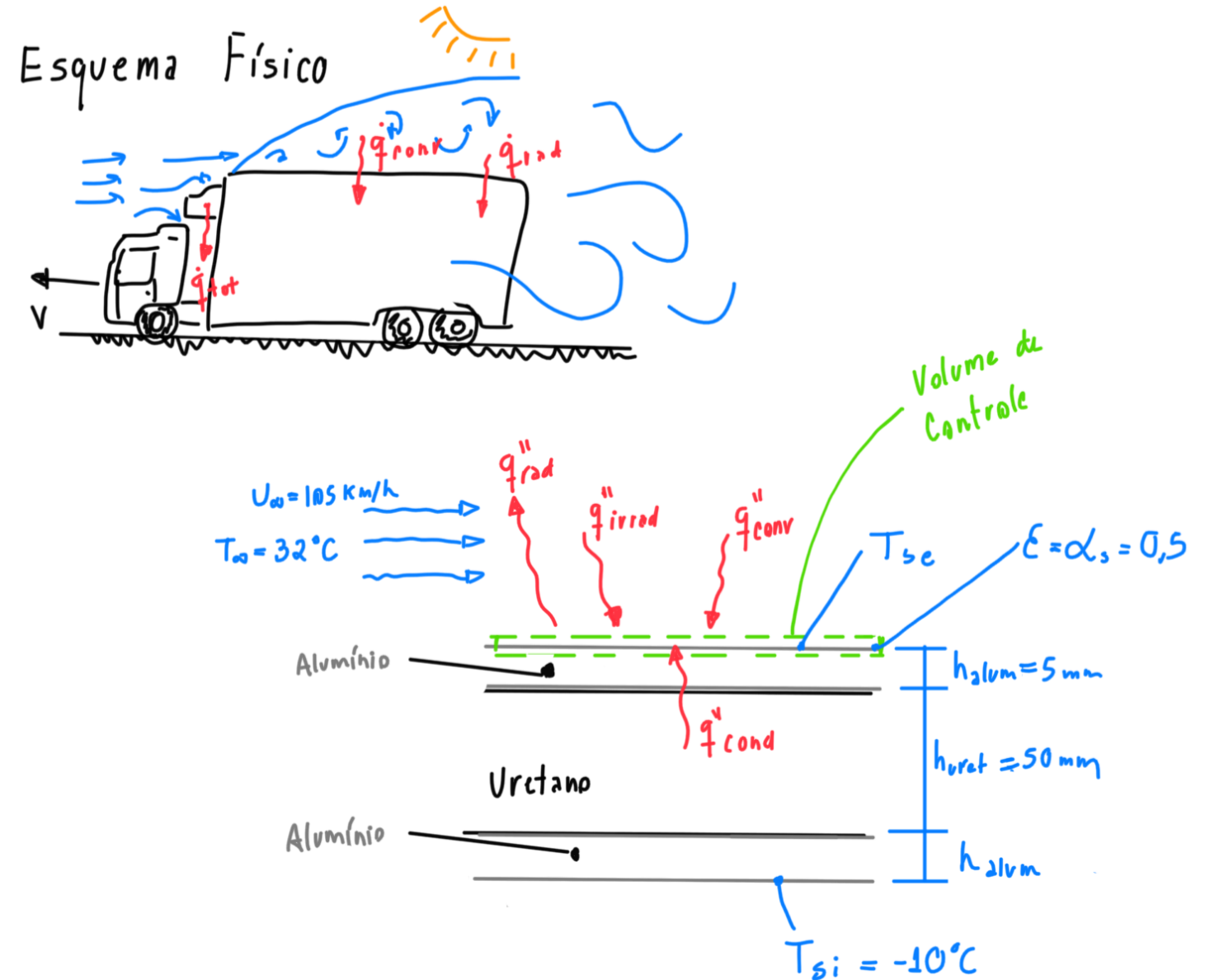


- Para valores equivalentes da absortividade solar e da emissividade da superfície externa ($\alpha_s = \varepsilon = 0,5$), determine a temperatura média da superfície externa $T_{s,e}$. Qual é a carga térmica correspondente imposta ao sistema de refrigeração?
- Um acabamento especial ($\alpha_s = 0,15$, $\varepsilon = 0,8$) pode ser aplicado na superfície externa. Que efeito teria tal aplicação na temperatura superficial e na carga térmica?
- Se, com $\alpha_s = \varepsilon = 0,5$, o teto não estiver isolado ($t_2 = 0$), quais são os valores correspondentes da temperatura superficial e da carga térmica?

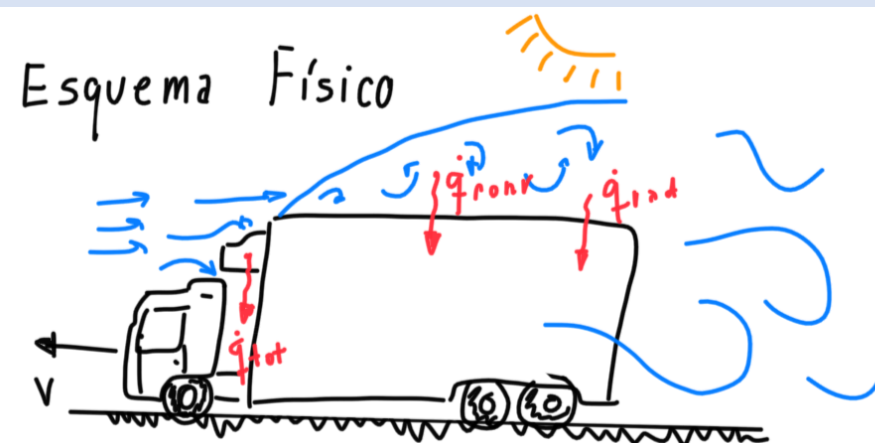
Exemplo 1



Exemplo 1

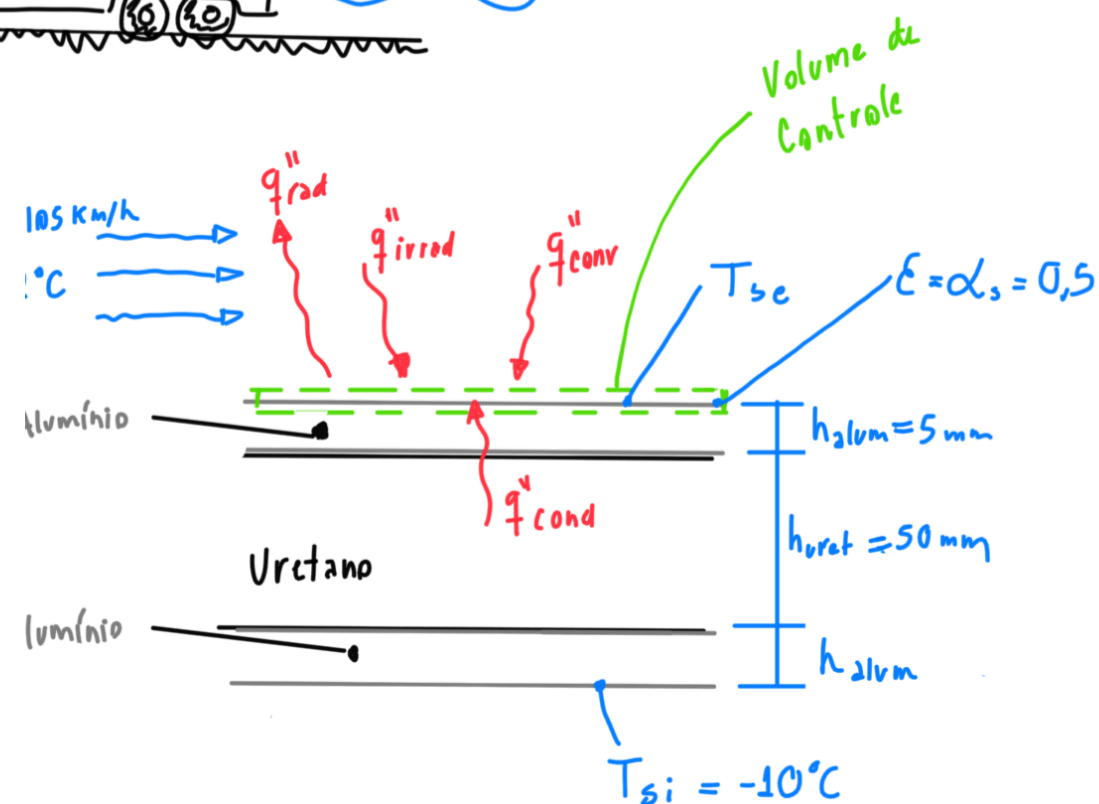


Exemplo 1



Hipóteses:

- Regime permanente.
- Escoam. turbul.
- Cargas térmicas apenas de radiação e convecção.
- Temperat. constante nas sup. externa e interna.



Exemplo 1



Aplicamos inicialmente o balanço de energia na superfície.

$$\dot{q}_{\text{irrad}} + \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{cond}} + \dot{q}_{\text{rad}} = 0 \quad (1)$$

Exemplo 1

Aplicamos inicialmente o balanço de energia na superfície.

$$\dot{q}_{\text{irrad}} + \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{cond}} + \dot{q}_{\text{rad}} = 0 \quad (1)$$

Onde

$$\dot{q}_{\text{irrad}} = A \alpha G_{\alpha} \quad (2)$$

$$\dot{q}_{\text{conv}} = A \cdot \bar{h} (T_{\infty} - T_{se}) \quad (3)$$

$$\dot{q}_{\text{cond}} = \frac{1}{R_t} (T_{si} - T_{se}) \quad (4)$$

$$\dot{q}_{\text{rad}} = -A \epsilon \sigma T_{se}^4 \quad (5)$$

Exemplo 1

Aplicamos inicialmente o balanço de energia na superfície.

$$\dot{q}_{\text{irrad}} + \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{cond}} + \dot{q}_{\text{rad}} = 0 \quad (1)$$

Onde

$$\dot{q}_{\text{irrad}} = A \alpha G_{\alpha} \quad (2)$$

$$\dot{q}_{\text{conv}} = A \cdot \bar{h} (T_{\infty} - T_{se}) \quad (3)$$

$$\dot{q}_{\text{cond}} = \frac{1}{\underbrace{R_t}} (T_{si} - T_{se}) \quad (4)$$

$$\dot{q}_{\text{rad}} = -A \epsilon \sigma T_{se}^4 \quad (5)$$

Na Eq. 3, devemos definir \bar{h} .

Sabemos que o escoamento é turbulento, logo:

$$\bar{N}_u = 0,037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad (6)$$

Exemplo 1

Aplicamos inicialmente o balanço de energia na superfície.

$$\dot{q}_{\text{irrad}} + \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{cond}} + \dot{q}_{\text{rad}} = 0 \quad (1)$$

Onde

$$\dot{q}_{\text{irrad}} = A \alpha G_{\alpha} \quad (2)$$

$$\dot{q}_{\text{conv}} = A \cdot \bar{h} (T_{\infty} - T_{se}) \quad (3)$$

$$\dot{q}_{\text{cond}} = \frac{1}{\underbrace{R_t}} (T_{si} - T_{se}) \quad (4)$$

$$\dot{q}_{\text{rad}} = -A \epsilon \sigma T_{se}^4 \quad (5)$$

Na Eq. 3, devemos definir \bar{h} .

Sabemos que o escoamento é turbulento, logo:

$$\bar{Nu} = 0,037 Re_L^{4/5} Pr^{1/3} \quad (6)$$

Como não conhecemos a temperatur. da sup. externa. Consideramos a seguinte temperatur. para estimativa das propriedades do fluido:

$$T_{se}^* = (T_{si} + T_{\infty})/2 = (32 - 10)/2 = 11^{\circ}\text{C}$$

estimada

$$T_{\text{filme}}^* = (T_{\infty} + T_{se})/2 = (32 + 11)/2 = 21,5^{\circ}\text{C} \approx 295 \text{ K}$$

tabelas

Exemplo 1



Como é uma aproximação, vamos considerar $T_{film} = 300\text{ K}$ p/ consulta direta à Tab. 4.

$$\nu = 15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k_{ar} = 0,0263 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,707$$

Lm

Exemplo 1

Como é uma aproximação, vamos considerar $T_{film} = 300\text{ K}$ p/ consulta direta à Tab. 4.

$$\nu = 15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k_{ar} = 0,0263 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,707$$

Então

$$Re = \frac{U_{\infty} \cdot L}{\nu} = \left(\frac{105 \cdot 10^3}{60^2} \right) \cdot 10 \cdot \frac{1}{15,89 \times 10^{-6}} \cong 18,36 \times 10^6$$

← comprimento do baú 10m

Exemplo 1

Como é uma aproximação, vamos considerar $T_{film} = 300\text{ K}$ p/ consulta direta à Tab. 4.

$$\nu = 15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k_{ar} = 0,0263 \text{ W/mK}$$

$$Pr = 0,707$$

Então

$$Re = \frac{U_{\infty} \cdot \underbrace{L}_{\substack{\text{comprimento} \\ \text{do tubo} \\ 10\text{m}}}}{\nu} = \left(\frac{105 \cdot 10^3}{60^2} \right) \cdot 10 \cdot \frac{1}{15,89 \times 10^{-6}} \cong 18,36 \times 10^6$$

\bar{Nu} é dado por:

$$\bar{Nu} = 0,037 \cdot (18,36 \times 10^6)^{4/5} \cdot 0,707^{1/3} \cong 21,3 \times 10^3$$

O que implica:

$$\bar{h} = \frac{k_{ar} \bar{Nu}}{L} = \frac{0,0263 \times 21,3 \times 10^3}{10} \cong 56,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Exemplo 1

Como é uma aproximação, vamos considerar $T_{\text{film}} = 300 \text{ K}$ p/ consulta direta à Tab. 4.

$$\nu = 15,89 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$k_{\text{ar}} = 0,0263 \text{ W/mK}$$

$$\text{Pr} = 0,707$$

Então

$$\text{Re} = \frac{U_{\infty} \cdot L}{\nu} = \left(\frac{105 \cdot 10^3}{60^2} \right) \cdot 10 \cdot \frac{1}{15,89 \times 10^{-6}} \cong 18,36 \times 10^6$$

← comprimento do tubo 10m

\bar{Nu} é dado por:

$$\bar{Nu} = 0,037 \cdot (18,36 \times 10^6)^{4/5} \cdot 0,707^{1/3} \cong 21,3 \times 10^3$$

O que implica:

$$\bar{h} = \frac{k_{\text{ar}} \bar{Nu}}{L} = \frac{0,0263 \times 21,3 \times 10^3}{10} \cong 56,1 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Nos resta avaliar a R_t , consideramos o seguinte circuito

Exemplo 1



A resist. por condução é:

$$R_{cond} = \frac{L}{K \cdot A}$$

\rightarrow espessura

A resist. total é:

$$R_t = \sum R_{cond}$$

Exemplo 1



A resist. por condução é:

$$R_{cond} = \frac{h}{K \cdot A} \quad \text{espessura}$$

A resist. total é:

$$R_t = \sum R_{cond}$$

Para o cálculo das propriedades, temos:

$$K_{alum} = 180 \text{ N/mK}$$

$$K_{vret} = 0,026 \text{ N/mK}$$

$$K_{alum} \gg K_{vret}$$

Logo

$$R_t = \frac{2 \cdot h_{alum}}{K_{alum} A} + \frac{h_{vret}}{K_{vret} A}$$

$$R_t = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{180 A} + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{0,026 A} \approx \frac{1,92}{A}$$



Exemplo 1

Então, a Eq. 1 é dada por:

$$-\cancel{K} \epsilon \sigma T_{se}^4 + \cancel{h} \cancel{K} (T_w - T_{se}) + \left(\frac{T_{si} - T_{se}}{\cancel{R_+}} \right) + \cancel{K} \alpha G_x = 0$$

\swarrow
 $\frac{1,92}{\cancel{K}}$

$$-\epsilon \sigma T_{se}^4 - \left(\bar{h} + \frac{1}{1,92} \right) T_{se} + \left(\alpha G_x + \bar{h} T_w + \frac{T_{si}}{1,92} \right) = 0$$

Exemplo 1

Então, a Eq. 1 é dada por:

$$-\cancel{\epsilon} \epsilon \sigma T_{se}^4 + \cancel{h} h (T_w - T_{se}) + \left(\frac{T_{si} - T_{se}}{\cancel{R_t} 1,92} \right) + \cancel{\alpha} \alpha G_x = 0$$

$$-\epsilon \sigma T_{se}^4 - \left(\bar{h} + \frac{1}{1,92} \right) T_{se} + \left(\alpha G_x + \bar{h} T_w + \frac{T_{si}}{1,92} \right) = 0$$

$$A T_{se}^4 + B T_{se} + C = 0 \quad (7)$$

Onde

$$A = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} = 2,835 \cdot 10^{-8}$$

$$B = 56,1 + 0,52 \cong 56,7$$

$$C = - \left(0,5 \cdot 750 + 56,1 \cdot 305 + \frac{263}{1,92} \right) \cong -17622,5$$



Exemplo 1

Então, a Eq. 1 é dada por:

$$-\cancel{\epsilon} \epsilon \sigma T_{se}^4 + \cancel{h} \cancel{h} (T_w - T_{se}) + \left(\frac{T_{si} - T_{se}}{R_{\cancel{+}}} \right) + \cancel{\alpha} \alpha G_x = 0$$

\swarrow
 $\frac{1,92}{\cancel{\alpha}}$

$$-\epsilon \sigma T_{se}^4 - \left(\bar{h} + \frac{1}{1,92} \right) T_{se} + \left(\alpha G_x + \bar{h} T_w + \frac{T_{si}}{1,92} \right) = 0$$

$$A T_{se}^4 + B T_{se} + C = 0 \quad (7)$$

Onde

$$A = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} = 2,835 \cdot 10^{-8}$$

$$B = \underbrace{56,1}_{\searrow} + \underbrace{0,52}_{\nearrow} \cong 56,7$$

$$C = - \left(0,5 \cdot 750 + 56,1 \cdot 305 + \frac{263}{1,92} \right) \cong -17622,5$$

Resolvendo Eq (7):

$$T_{se} = \begin{cases} -1,35 \times 10^3 \text{ K} \\ 0,54 \times 10^3 + 1,12 \times 10^3 i \text{ K} \\ 0,54 \times 10^3 - 1,12 \times 10^3 i \text{ K} \end{cases}$$

$\underbrace{306,4 \text{ K}}_{\rightarrow} \rightarrow 33,4^\circ \text{C}$

Exemplo 1

Então, a Eq. 1 é dada por:

$$-\cancel{\epsilon} \epsilon \sigma T_{se}^4 + \cancel{h} h (T_w - T_{se}) + \left(\frac{T_{si} - T_{se}}{R_{\cancel{+}}} \right) + \cancel{\alpha} \alpha G_{\cancel{x}} = 0$$

\swarrow
 $\frac{1,92}{\cancel{x}}$

$$-\epsilon \sigma T_{se}^4 - \left(\bar{h} + \frac{1}{1,92} \right) T_{se} + \left(\alpha G_x + \bar{h} T_w + \frac{T_{si}}{1,92} \right) = 0$$

$$A T_{se}^4 + B T_{se} + C = 0 \quad (7)$$

Onde

$$A = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} = 2,835 \cdot 10^{-8}$$

$$B = 56,1 + 0,52 \cong 56,7$$

$\searrow \gg \nearrow$

$$C = - \left(0,5 \cdot 750 + 56,1 \cdot 305 + \frac{263}{1,92} \right) \cong -17622,5$$

Resolvendo Eq (7):

$$T_{se} = \begin{cases} -1,35 \times 10^3 \text{ K} \\ 0,54 \times 10^3 + 1,12 \times 10^3 i \text{ K} \\ 0,54 \times 10^3 - 1,12 \times 10^3 i \text{ K} \end{cases}$$

\circledast 306,4 K
 \rightarrow 33,4 °C

Refazer procedimento.

Exemplo 1

Então, a Eq. 1 é dada por:

$$-\cancel{\epsilon} \epsilon \sigma T_{se}^4 + \cancel{h} h (T_w - T_{se}) + \left(\frac{T_{si} - T_{se}}{R_{\cancel{+}}} \right) + \cancel{\alpha} \alpha G_{\cancel{a}} = 0$$

$\xrightarrow{1,92}$
 $\cancel{1,92}$

$$-\epsilon \sigma T_{se}^4 - \left(\bar{h} + \frac{1}{1,92} \right) T_{se} + \left(\alpha G_a + \bar{h} T_w + \frac{T_{si}}{1,92} \right) = 0$$

$$A T_{se}^4 + B T_{se} + C = 0 \quad (7)$$

Onde

$$A = 0,5 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} = 2,835 \cdot 10^{-8}$$

$$B = \underbrace{56,1}_{\searrow} + \underbrace{0,52}_{\nearrow} \cong 56,7$$

$$C = - \left(0,5 \cdot 750 + 56,1 \cdot 305 + \frac{263}{1,92} \right) \cong -17622,5$$

Resolvendo Eq (7):

$$T_{se} = \begin{cases} -1,35 \times 10^3 \text{ K} \\ 0,54 \times 10^3 + 1,12 \times 10^3 i \text{ K} \\ 0,54 \times 10^3 - 1,12 \times 10^3 i \text{ K} \end{cases}$$

$\underbrace{306,4 \text{ K}}_{\rightarrow 33,4^\circ \text{C}}$

Refazer procedimento.

Por que $T_{se} > T_w$ e como melhorar este problema?

Exemplo 1

A carga térmica imposta ao sist. refrig. é igual ao fluxo de energia térmica por condução:

$$\dot{q}_{\text{tot}} = -\left(\frac{T_{\text{si}} - T_{\text{se}}}{R_{\text{t},1}}\right) = \frac{-10 + 33,4}{\left(\frac{1,92}{L \cdot W}\right)} = 791,14 \text{ W}$$

Exemplo 1

A carga térmica imposta ao sist. refrig. é igual ao fluxo de energia térmica por condução:

$$\dot{q}_{\text{tot}} = -\left(\frac{T_{\text{si}} - T_{\text{se}}}{R_{\text{t},1}}\right) = \frac{-10 + 33,4}{\left(\frac{1,92}{\text{L} \cdot \text{W}}\right)} = 791,14 \text{ W}$$

Aplicando o acabamento especial, temos o novo polinômio:

$$A = \varepsilon \cdot \sigma = 0,8 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} = 4,54 \times 10^{-8}$$

$$B = 56,7$$

$$C = -(\alpha \cdot 750 + \dots) = -(0,15 \cdot 750 + \dots) \approx 17360$$

Então:

$$T_{\text{se}} = \begin{cases} -1164 \text{ K} \\ \text{imag.} \\ \text{imag.} \\ 299,7 \text{ K} \end{cases} \rightarrow 26,7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Exemplo 1

Considerando o sistema sem isolamento.

$$R_{\text{ext}} = 0$$

$$R_t = \frac{2 \cdot 5 \cdot 10^{-3}}{180 \text{ A}} \cong \frac{5,56 \cdot 10^{-5}}{\text{A}}$$

O novo polinômio é dado por:

$$A = 2,835 \times 10^{-8}$$

$$B = \bar{h} + \frac{1}{5,56 \times 10^{-5}} = 18041,7$$

$$C = -\left(\dots + \frac{263}{5,56 \times 10^{-5}} \right) = 4747701,33$$

$$T_{sc} = 263,1\text{K} \cong -9,9^\circ\text{C}$$

$$\dot{q}_{\text{cond}} = \frac{0,1 \cdot 35}{5,56 \cdot 10^{-5}} \cong 63 \text{ kW}$$

Exemplo 1



```
%-----
%% Setup inicial
%-----

clear      ;
close all  ;
format long ;

%-----
%% Constantes iniciais
%-----
L      = 10 ; % Comprimento total do baú [m]
W      = 3.5; % Largura total do baú [m]
Uinf   = 105; % Velocidade do caminhão [km/h]
Tinf   = 32; % Temperatura do ar [oC]
emis   = 0.5; % Emissividade do material
absort = 0.5; % Absortividade do material
G      = 750; % Irradiação solar [W]
h_alum = 5;   % Espessura da placa de alumínio [mm]
k_alum = 180; % Coeficiente de condução do alumínio [W/(m*K)]
h_uret = 50;  % Espessura da placa de uretano [mm]
k_uret = 26e-3; % Coeficiente de condução do uretano [W/(m*K)]
Tsi     = -10; % Temperatura interna do baú [oC]
Tse     = 10;  % Estimativa inicial da temperatura da superfície externa [oC]
%-----

%-----
%% Correção das unidades
%-----
Uinf   = Uinf*1e3/(60^2); % km/h -> m/s
Tinf   = Tinf + 273.15;   % oC -> K
Tsi     = Tsi + 273.15;   % oC -> K
Tse     = Tse + 273.15;   % oC -> K
h_alum  = h_alum*1e-3;    % mm -> m
h_uret  = h_uret*1e-3;    % mm -> m
%-----

%-----
%% Iterações para convergência do problema
%-----
residuo = 1; % Resíduo para convergência
```


Exemplo 1

```

%-----
%% Iterações para convergência do problema
%-----
residuo = 1; % Resíduo para convergência

while residuo > 1e-3
    Tseo = Tse; % Temperatura na superfície na iteração anterior

    Tar = (Tinf + Tse)/2; % Temperatura para estimativa das propriedades
    [nu_ar,Pr_ar,k_ar] = air_prop(Tar); % Propriedades do ar

    ReL = Uinf*L/nu_ar; % Número de Reynolds

    C = 0.037;
    m = 4/5;
    n = 1/3;
    Nu_b = C*ReL^m*Pr_ar^n; % Correlação para Nusselt médio
    h_b = Nu_b*k_ar/L; % Cálculo do coeficiente de convecção médio

    A = W*L; % Área total
    Rt = 2*h_alum/(A*k_alum) + h_uret/(A*k_uret); % Resistência térmica total

    stef_bol_coef = 5.67e-8; % Coeficiente de Stefan-Boltzmann

    % Coeficientes do polinômio
    a(1) = emis*stef_bol_coef*A;
    a(4) = h_b*A + 1/Rt;
    a(5) = -(A*absort*G + A*h_b*Tinf + Tsi/Rt);

    Tse = roots(a); % Raízes do polinômio
    Tse = Tse(abs(imag(Tse))<1e-10); % Valor real
    Tse = Tse(Tse>0); % Valor real maior que zero

    %Cálculo do resíduo
    residuo = abs(Tse - Tseo)/Tse;
end
%-----

```

```

function [nu,Pr,k] = air_prop(T)
    T = T - 273.15; % K -> oC

    % Tabela de propriedades do ar
    prop_ar = [ ... % Temp[°C]  k[W/(mK)]  nu[m^2/s]  Pr
        10      0.02364      1.338e-5      0.7362
        70      0.02881      1.995e-5      0.7177
        80      0.02953      2.097e-5      0.7154
        90      0.03024      2.201e-5      0.7132
        100     0.03095      2.306e-5      0.7111
        120     0.03235      2.522e-5      0.7073
        300     0.04418      4.765e-5      0.6935
        2000    0.11113      42.70e-5      0.7539 ];

    nu = interp1(prop_ar(:,1),prop_ar(:,3),T); % Viscosidade cinemática do ar [m^2/s]
    Pr = interp1(prop_ar(:,1),prop_ar(:,4),T); % Viscosidade cinemática do ar [m^2/s]
    k = interp1(prop_ar(:,1),prop_ar(:,2),T); % Viscosidade cinemática do ar [m^2/s]
end

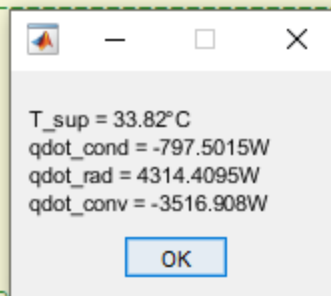
```

Exemplo 1

```
%-----  
% Cálculo do fluxo de calor  
%-----  
qdot_rad = absort*G*A - emis*A*stef_bol_coef*Tse^4;  
qdot_conv = h_b*A*(Tinf-Tse);  
qdot_cond = (Tsi-Tse)/Rt;  
%-----  
  
%-----  
%% Exibindo temperatura final e fluxos de energia térmica  
%-----  
f = msgbox({...  
    ['T_sup = '      ,num2str(Tse-273.15)    , '°C ' ],...  
    ['qdot_cond = ' ,num2str(qdot_cond)      , 'W'   ],...  
    ['qdot_rad = '  ,num2str(qdot_rad)        , 'W'   ],...  
    ['qdot_conv = ' ,num2str(qdot_conv)       , 'W'   ]});  
%-----
```

Exemplo 1

```
%-----  
%% Constantes iniciais  
%-----  
L      = 10 ; % Comprimento total do baú [m]  
W      = 3.5; % Largura total do baú [m]  
Uinf   = 105; % Velocidade do caminhão [km/h]  
Tinf   = 32;  % Temperatura do ar [oC]  
emis   = 0.5; % Emissividade do material  
absort = 0.5; % Absortividade do material  
G      = 750; % Irradiação solar [W]  
h_alum = 5;   % Espessura da placa de alumínio [mm]  
k_alum = 180; % Coeficiente de condução do alumínio [W/(m*K)]  
h_uret = 50;  % Espessura da placa de uretano [mm]  
k_uret = 26e-3; % Coeficiente de condução do uretano [W/(m*K)]  
Tsi     = -10; % Temperatura interna do baú [oC]  
Tse     = 10;  % Estimativa inicial da temperatura da superfície externa [oC]  
%-----
```

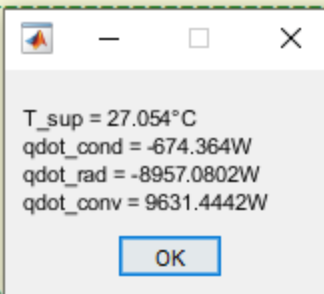


T_{sup} = 33.82°C
q_{dot_cond} = -797.5015W
q_{dot_rad} = 4314.4095W
q_{dot_conv} = -3516.908W

OK

Exemplo 1

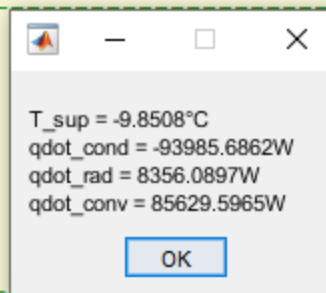
```
%-----  
%% Constantes iniciais  
%-----  
L      = 10 ; % Comprimento total do baú [m]  
W      = 3.5; % Largura total do baú [m]  
Uinf   = 105; % Velocidade do caminhão [km/h]  
Tinf   = 32;  % Temperatura do ar [oC]  
emis   = 0.8; % Emissividade do material  
absort = 0.15; % Absortividade do material  
G      = 750; % Irradiação solar [W]  
h_alum = 5;   % Espessura da placa de alumínio [mm]  
k_alum = 180; % Coeficiente de condução do alumínio [W/(m*K)]  
h_uret = 50;  % Espessura da placa de uretano [mm]  
k_uret = 26e-3; % Coeficiente de condução do uretano [W/(m*K)]  
Tsi     = -10; % Temperatura interna do baú [oC]  
Tse     = 10;  % Estimativa inicial da temperatura da superfície externa [oC]  
%-----
```



T_sup = 27.054°C
qdot_cond = -674.364W
qdot_rad = -8957.0802W
qdot_conv = 9631.4442W
OK

Exemplo 1

```
%-----  
%% Constantes iniciais  
%-----  
L      = 10 ; % Comprimento total do baú [m]  
W      = 3.5; % Largura total do baú [m]  
Uinf   = 105; % Velocidade do caminhão [km/h]  
Tinf   = 32;  % Temperatura do ar [oC]  
emis   = 0.5; % Emissividade do material  
absort = 0.5; % Absortividade do material  
G      = 750; % Irradiação solar [W]  
h_alum = 5;   % Espessura da placa de alumínio [mm]  
k_alum = 180; % Coeficiente de condução do alumínio [W/(m*K)]  
h_uret = 0;   % Espessura da placa de uretano [mm]  
k_uret = 26e-3; % Coeficiente de condução do uretano [W/(m*K)]  
Tsi     = -10; % Temperatura interna do baú [oC]  
Tse     = 10;  % Estimativa inicial da temperatura da superfície externa [oC]  
%-----
```

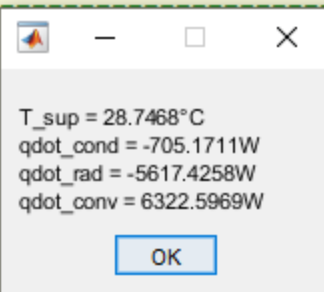


T_{sup} = -9.8508°C
q_{dot_cond} = -93985.6862W
q_{dot_rad} = 8356.0897W
q_{dot_conv} = 85629.5965W

OK

Exemplo 1

```
%-----  
%% Constantes iniciais  
%-----  
L      = 10 ; % Comprimento total do baú [m]  
W      = 3.5; % Largura total do baú [m]  
Uinf   = 105; % Velocidade do caminhão [km/h]  
Tinf   = 32;  % Temperatura do ar [oC]  
emis   = 0.5; % Emissividade do material  
absort = 0.5; % Absortividade do material  
G      = 150; % Irradiação solar [W]  
h_alum = 5;   % Espessura da placa de alumínio [mm]  
k_alum = 180; % Coeficiente de condução do alumínio [W/(m*K)]  
h_uret = 50;  % Espessura da placa de uretano [mm]  
k_uret = 26e-3; % Coeficiente de condução do uretano [W/(m*K)]  
Tsi     = -10; % Temperatura interna do baú [oC]  
Tse     = 10;  % Estimativa inicial da temperatura da superfície externa [oC]  
%-----
```



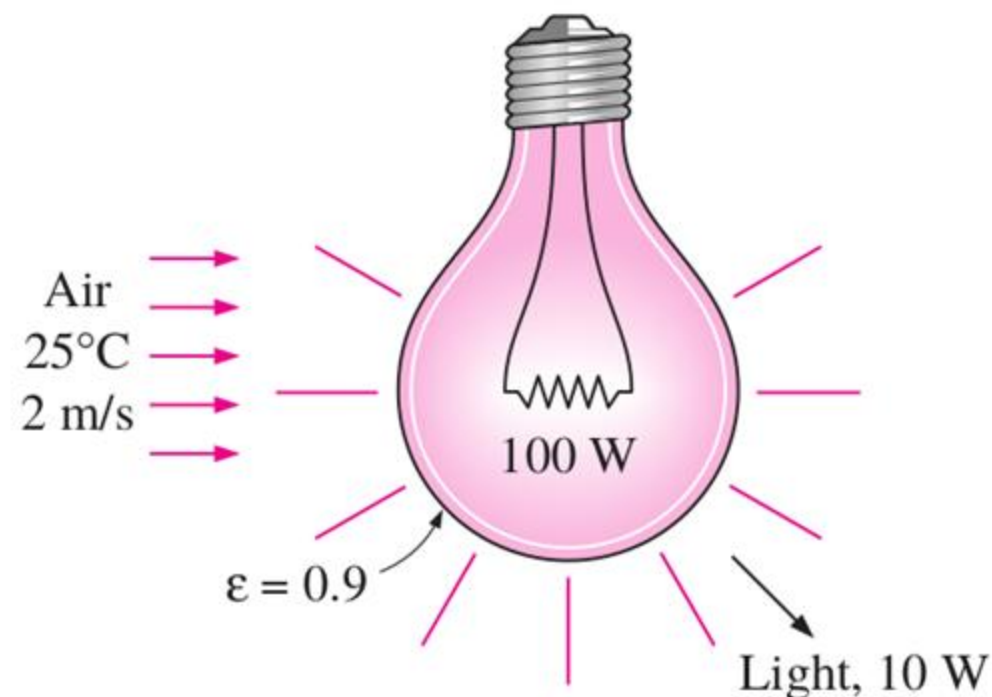
T_{sup} = 28.7468°C
q_{dot}_cond = -705.1711W
q_{dot}_rad = -5617.4258W
q_{dot}_conv = 6322.5969W

OK

Exemplo 2


7-51 An incandescent lightbulb is an inexpensive but highly inefficient device that converts electrical energy into light. It converts about 10 percent of the electrical energy it consumes into light while converting the remaining 90 percent into heat. (A fluorescent lightbulb will give the same amount of light while consuming only one-fourth of the electrical energy, and it will last 10 times longer than an incandescent lightbulb.) The glass bulb of the lamp heats up very quickly as a result of absorbing all that heat and dissipating it to the surroundings by convection and radiation.

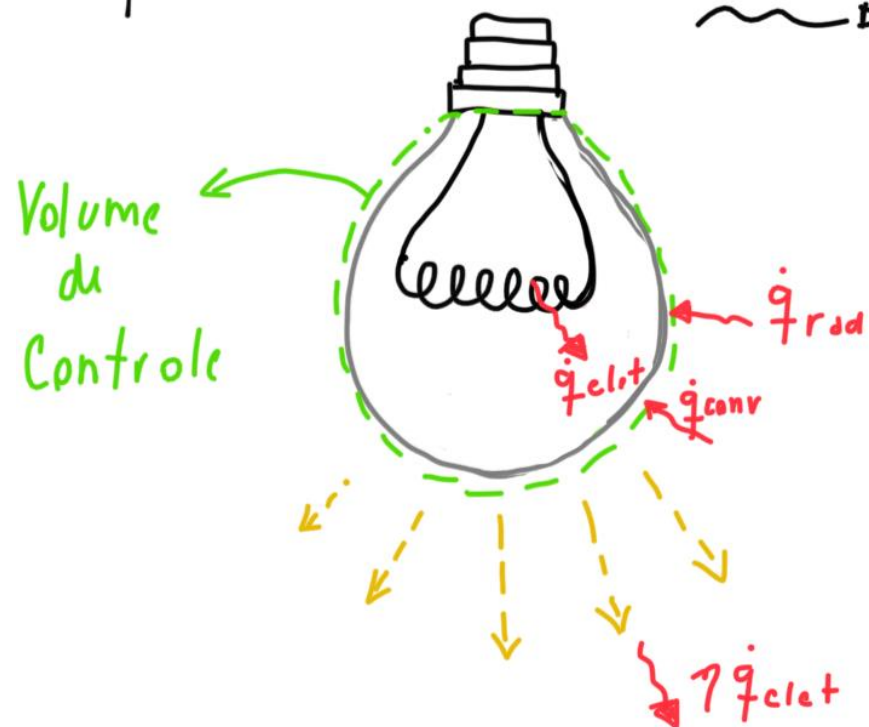
Consider a 10-cm-diameter 100-W lightbulb cooled by a fan that blows air at 25°C to the bulb at a velocity of 2 m/s. The surrounding surfaces are also at 25°C, and the emissivity of the glass is 0.9. Assuming 10 percent of the energy passes through the glass bulb as light with negligible absorption and the rest of the energy is absorbed and dissipated by the bulb itself, determine the equilibrium temperature of the glass bulb.




Exemplo 2

Esquema Físico

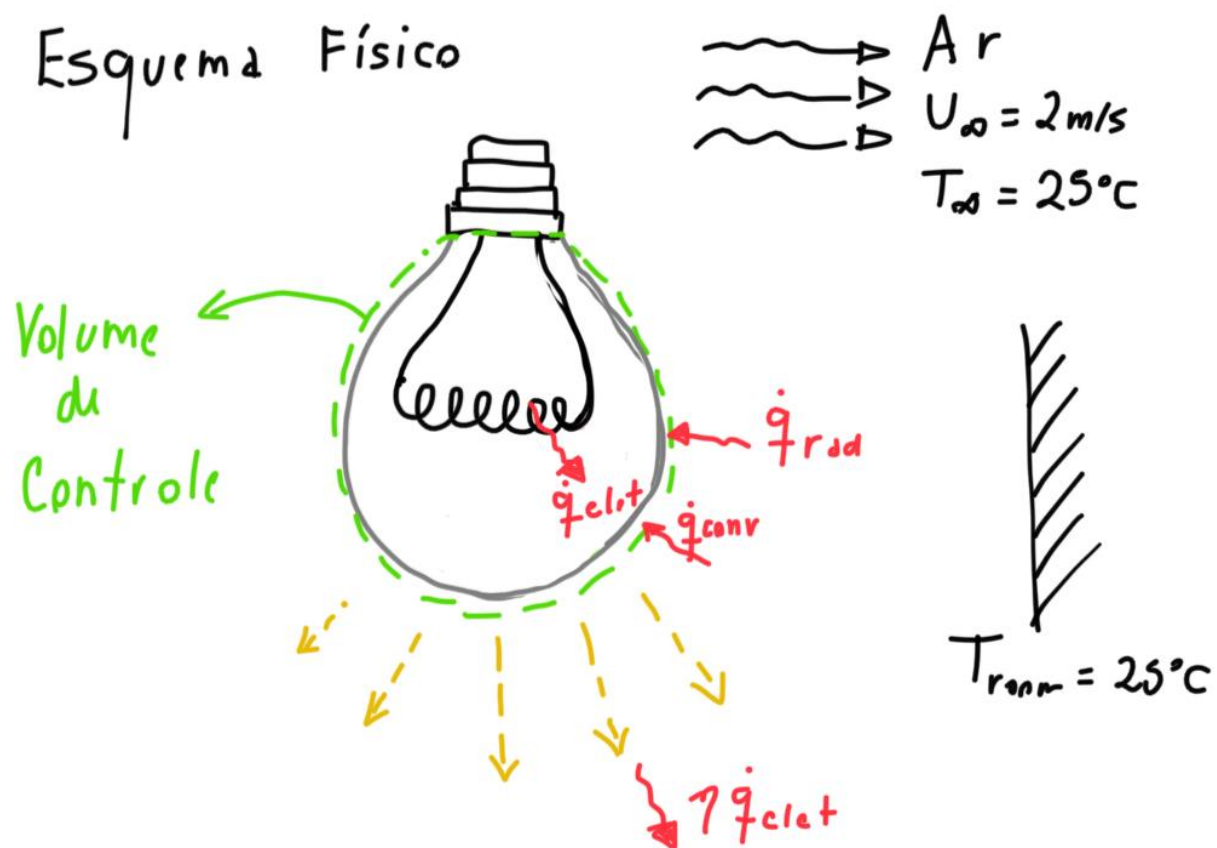
 Ar
 $U_{\infty} = 2 \text{ m/s}$
 $T_{\infty} = 25^{\circ}\text{C}$




 $T_{\text{room}} = 25^{\circ}\text{C}$

Exemplo 2

Esquema Físico



Hipóteses:

- Escoam. permanente.
- Lâmpada c/ geometria esférica.

Fazemos o balanço de energia no volume de controle:

$$\sum \dot{q}_{\text{in}} + \sum \dot{q}_{\text{out}} = 0$$

$$\dot{q}_{\text{elet}} + \dot{q}_{\text{conv}} + \dot{q}_{\text{rad}} = 0 \quad (1)$$

Exemplo 2

Onde

$$\dot{q}_{\text{elet}} = A \cdot (1 - \eta) P_L \quad (2)$$

Handwritten annotations:
- Arrow from η to "eficiência"
- Arrow from P_L to "Potência da lâmpada"

$$\dot{q}_{\text{conv}} = A \cdot \bar{h} (T_{\infty} - T_s) \quad (3)$$

Handwritten annotation:
- Arrow from T_s to " $T_{\text{superfície}}$ "

$$\dot{q}_{\text{rad}} = A \epsilon \sigma (T_{\text{room}}^4 - T_s^4) \quad (4)$$



Exemplo 2

Onde

$$\dot{q}_{\text{elet}} = A \cdot (1 - \eta) P_L \quad (2)$$

Handwritten notes: "eficiência" points to η , "Potência da lâmpada" points to P_L .

$$\dot{q}_{\text{conv}} = A \cdot \bar{h} (T_{\infty} - T_s) \quad (3)$$

Handwritten note: " $T_{\text{superfície}}$ " points to T_s .

$$\dot{q}_{\text{rad}} = A \epsilon \sigma (T_{\text{room}}^4 - T_s^4) \quad (4)$$

Para a convecção, consideramos a lâmpada como uma esfera, logo:

$$\bar{N}_u = 2 + (0,4 Re_D^{1/2} + 0,06 Re_D^{2/3}) Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1/4} \quad (5)$$

Handwritten note: "viscosidade calculada na temperatura da superfície." points to $\left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1/4}$.

$$0,71 \leq Pr \leq 380$$

$$3,5 \leq Re \leq 7,6 \times 10^4$$

$$1,0 \leq (\mu/\mu_s) \leq 3,2$$

* Todas propriedades são avaliadas em T_{∞} , exceto μ_s .

Considerando estimativa inicial $T_s = 50^\circ\text{C} = 323 \text{ K}$



Exemplo 2

$$K(T_\infty) = 0,02551 \text{ W/mK}$$

$$\nu(T_\infty) = 1,562 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\mu(T_\infty) = 1,849 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

$$Pr(T_\infty) = 0,7296 \quad \checkmark$$

$$\mu_s(T_s) = 2,181 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}$$

$$\frac{\mu}{\mu_s} < 1 \quad \times \quad \leftarrow \begin{array}{|l} \text{Erros de} \\ \text{até 30\%} \end{array}$$

O Re é dado por:

$$Re = \frac{U_\infty D}{\nu(T_\infty)} = \frac{2 \times 0,1}{1,562 \times 10^{-5}} = 1,28 \times 10^4$$

Exemplo 2

$$K(T_a) = 0,02551 \text{ W/mK}$$

$$\nu(T_a) = 1,562 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\mu(T_a) = 1,849 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$$

$$Pr(T_a) = 0,7296 \quad \checkmark$$

$$\mu_s(T_s) = 2,181 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$$

$$\frac{\mu}{\mu_s} < 1 \quad \times \quad \leftarrow \begin{array}{|l|} \hline \text{Erros de} \\ \hline \text{até 30\%} \\ \hline \end{array}$$

O Re é dado por:

$$Re = \frac{U_a D}{\nu(T_a)} = \frac{2 \times 0,1}{1,562 \times 10^{-5}} = 1,28 \times 10^4$$

Logo, \overline{Nu} é dado por:

$$\overline{Nu} = 2 + [0,4 Re^{1/2} + 0,06 Re^{2/3}] Pr^{0,4} \left(\frac{\mu}{\mu_s} \right)^{1/4}$$

$$\overline{Nu} = 2 + [0,4 \cdot (1,28 \times 10^4)^{1/2} + 0,06 (1,28 \times 10^4)^{2/3}] \cdot (0,7296)^{0,4} \left(\frac{1,849 \times 10^{-5}}{2,181 \times 10^{-5}} \right)^{1/4}$$

$$\overline{Nu} = 68,0510$$

O coeficiente de convecção térmica é dado por:

Exemplo 2

$$\bar{h} = \frac{\bar{Nu} k}{D} = \frac{68,051 \times 0,02551}{0,1} = 17,36 \frac{W}{m^2 K}$$

Voltando à Eq. 1.

$$(1-\gamma)P_L + \bar{h}A(T_\infty - T_s) + \epsilon\sigma A(T_{room}^4 - T_s^4) = 0$$

$$\underbrace{\epsilon\sigma\pi R^2 T_s^4}_A + \underbrace{\bar{h}AT_s}_B + \underbrace{[-(1-\gamma)P_L - \bar{h}AT_\infty - \epsilon\sigma AT_{room}^4]}_C = 0$$

$$AT_s^4 + BT_s + C = 0$$

Exemplo 2

$$\bar{h} = \frac{\bar{Nu} k}{D} = \frac{68,051 \times 0,02551}{0,1} = 17,36 \frac{W}{m^2 K}$$

Voltando à Eq. 1.

$$(1-\gamma)P_L + \bar{h}A(T_\infty - T_s) + \epsilon\sigma A(T_{room}^4 - T_s^4) = 0$$

$$\underbrace{\epsilon\sigma\pi R^2 T_s^4}_A + \underbrace{\bar{h}AT_s}_B + \underbrace{[-(1-\gamma)P_L - \bar{h}AT_\infty - \epsilon\sigma AT_{room}^4]}_C = 0$$

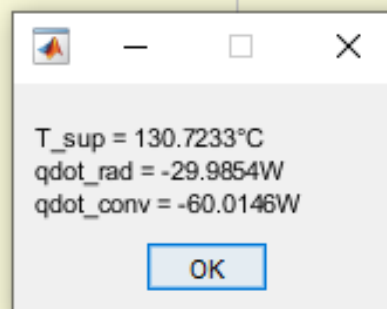
$$AT_s^4 + BT_s + C = 0$$

Resolvendo o polinômio após várias iterações:

$$T_s = \begin{cases} \text{negat.} \\ \text{imag.} \\ \text{imag.} \\ 403,87 \text{ K} = 130,7^\circ\text{C} \end{cases}$$

Exemplo 2

```
%-----  
%% Constantes iniciais  
%-----  
Ts      = 50      ; % Estimativa inicial da temperatura da superficie [oC]  
Tinf     = 25      ; % Temperatura ambiente [oC]  
Troom    = 25      ; % Temperatura das paredes da sala [oC]  
D        = 0.10    ; % Diâmetro da esfera [m]  
emis     = 0.9     ; % Emissividade do vidro  
Pl       = 100     ; % Potência elétrica da lâmpada [W]  
efic     = 0.1     ; % Eficiência da lâmpada  
Uinf     = 2       ; % Velocidade do ar [m/s]  
%-----
```



T_{sup} = 130.7233°C
q_{dot_rad} = -29.9854W
q_{dot_conv} = -60.0146W
OK

Exemplo 2



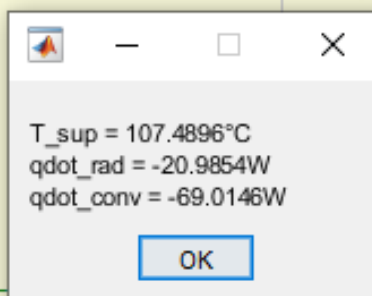
```
%-----  
%% Constantes iniciais  
%-----  
Ts      = 50      ; % Estimativa inicial da temperatura da superficie [oC]  
Tinf    = 25      ; % Temperatura ambiente [oC]  
Troom   = 25      ; % Temperatura das paredes da sala [oC]  
D       = 0.20    ; % Diâmetro da esfera [m]  
emis    = 0.9     ; % Emissividade do vidro  
Pl      = 100     ; % Potência elétrica da lâmpada [W]  
efic    = 0.1     ; % Eficiência da lâmpada  
Uinf    = 2       ; % Velocidade do ar [m/s]  
%-----
```

T_{sup} = 61.1852°C
q_{dot}_{rad} = -29.4515W
q_{dot}_{conv} = -60.5485W

OK

Exemplo 2

```
%-----  
%% Constantes iniciais  
%-----  
Ts      = 50      ; % Estimativa inicial da temperatura da superfície [oC]  
Tinf    = 25      ; % Temperatura ambiente [oC]  
Troom   = 25      ; % Temperatura das paredes da sala [oC]  
D       = 0.10    ; % Diâmetro da esfera [m]  
emis    = 0.9     ; % Emissividade do vidro  
Pl      = 100     ; % Potência elétrica da lâmpada [W]  
efic    = 0.1     ; % Eficiência da lâmpada  
Uinf    = 4       ; % Velocidade do ar [m/s]  
%-----
```





T_{sup} = 107.4896°C
q_{dot}_{rad} = -20.9854W
q_{dot}_{conv} = -69.0146W

OK

Exemplo 2

```
%-----  
%% Constantes iniciais  
%-----  
Ts      = 50      ; % Estimativa inicial da temperatura da superficie [oC]  
Tinf    = 25      ; % Temperatura ambiente [oC]  
Troom   = 25      ; % Temperatura das paredes da sala [oC]  
D       = 0.10    ; % Diâmetro da esfera [m]  
emis    = 0.9     ; % Emissividade do vidro  
Pl      = 100     ; % Potência elétrica da lâmpada [W]  
efic    = 0.9     ; % Eficiência da lâmpada  
Uinf    = 2       ; % Velocidade do ar [m/s]  
%-----
```

 
T_sup = 38.3446°C
qdot_rad = -2.4249W
qdot_conv = -7.5751W



MUITO OBRIGADO!

Transferência de Calor II

FEMEC 41071

Prof. João Rodrigo Andrade

joao.andrade@ufu.br

sites.google.com/view/joaorodrigoandrade



Faculdade de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG