



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

TM-225 Linguagem de Programação I

Professor **Luciano Kiyoshi Araki**

(sala 7-30/Lena-2, lucaraki@ufpr.br, lucianoaraki@gmail.com, fone: 3361-3126)

Internet: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM225/luciano>

LISTA DE EXERCÍCIOS 01 (2011/2)

(TURMA A)

OBSERVAÇÕES:

- (1) Esta lista deve ser executada individualmente ou em duplas.**
- (2) Apresentar o trabalho na forma de arquivo eletrônico, pessoalmente ou por e-mail. Em cada planilha do arquivo deve ser apresentada uma única questão. Identifique de modo claro cada equação/consideração/dado de entrada utilizado.**
- (3) Os dados de entrada fornecidos (temperaturas, velocidades e demais propriedades físicas) devem ser informados uma única vez em cada questão. Utilizar referências absolutas onde couber; na ausência de referências absolutas, haverá desconto no conceito final.**
- (4) Determinadas variáveis possuem definições diferentes em cada questão. Isto se deve ao fato de que, na elaboração das questões, foi adotada a simbologia mais comumente empregada para cada conceito/caso. Portanto, atenção na simbologia de cada questão.**
- (5) DATA DE ENTREGA: 21/12/2011.**

QUESTÃO 01 (valor: 20).

Dentre os mecanismos de transferência de calor, a radiação é a único que não necessita de um meio material para ocorrer. Para sua modelagem, são estudadas as propriedades de corpos negros, que se constituem em corpos ideais, que apresentam como características:

- (1) Trata-se de um absorvedor ideal (o corpo negro absorve toda a energia nele incidente).
- (2) Trata-se de um emissor ideal (nenhum corpo, à mesma temperatura, é capaz de emitir mais energia que um corpo negro).

(3) Trata-se de um emissor difuso (não existe direção preferencial na emissão de um corpo negro).

Para o estudo da emissão de um corpo negro, Planck (em 1900), determinou uma expressão para a chamada intensidade espectral de um corpo negro ($I_{\lambda, cn}$)

$$I_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \frac{2hc_o^2}{\lambda^5 [\exp(hc_o/\lambda kT) - 1]}, \quad (1.1)$$

que é uma função do comprimento de onda λ , dado em metros [m], e da temperatura absoluta T , dado em Kelvins [K]. Na Eq. (1.1), tem-se que: h é a constante universal de Planck, cujo valor é de $6,626 \times 10^{-34}$ J·s; k é a constante universal de Boltzmann, cujo valor é de $1,381 \times 10^{-23}$ J/K; e c_o é a velocidade da luz no vácuo, cujo valor aproximado é de $2,998 \times 10^8$ m/s. A partir da integração da Eq. (1) sobre para uma superfície hemisférica, obtém-se o chamado poder emissivo espectral ($E_{\lambda, cn}$), dado por

$$E_{\lambda, cn}(\lambda, T) = \frac{2\pi hc_o^2}{\lambda^5 [\exp(hc_o/\lambda kT) - 1]}. \quad (1.2)$$

Com base na Eq. (1.2), plote um gráfico log-log com o poder emissivo espectral $E_{\lambda, cn}$ [W/m³] em função do comprimento de onda λ [m]. Considere os seguintes valores para a temperatura T : 50 K, 100 K, 300 K, 1000 K, 3000 K, 6000 K. Para a plotagem do gráfico, utilize comprimentos de onda entre 0,1 e 1000 μm (lembrar que $1 \mu\text{m} = 1 \times 10^{-6}$ m).

QUESTÃO 02 (valor: 45).

A condução de calor em superfícies estendidas (aletas) é um importante caso estudado em transferência de calor, envolvendo a condução de calor no interior de um sólido e a convecção (e/ou radiação) nas fronteiras desse sólido. Tais superfícies são empregadas para aumentar o calor trocado entre um sólido e um fluido (ou ambiente), pela maximização da área de contato em que ocorre o processo de transferência de calor. Aletas são comumente observadas em refrigeradores, radiadores de automóveis/motocicletas e computadores (coolers), entre outras

aplicações. Matematicamente, o fenômeno é modelado através da seguinte equação diferencial (Incropera et al., 2008):

$$\frac{d^2T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_r} \frac{dA_r}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_r} \frac{h dA_s}{k dx} \right) (T - T_\infty) = 0, \quad (2.1)$$

sendo T a temperatura [K]; x a posição ao longo da aleta [m]; A_r a área da seção transversal da aleta [m²]; h o coeficiente convectivo [W/m²K]; k a condutividade térmica do material da aleta [W/mK]; A_s a área superficial em contato com o fluido [m²]; e T_∞ a temperatura do fluido [K]. No caso de uma aleta de seção transversal uniforme, a equação anterior pode ser simplificada fornecendo:

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_r} (T - T_\infty) = 0, \quad (2.2)$$

onde P é o perímetro da seção transversal da aleta [m]. Essa equação diferencial apresenta solução analítica, considerando-se as propriedades constantes. No caso mais realístico, que envolve a transferência de calor convectiva na ponta da aleta, obtém-se a seguinte expressão:

$$T(x) = T_\infty + (T_b - T_\infty) \frac{\cosh[m(L-x)] + \left(\frac{h}{mk} \right) \sinh[m(L-x)]}{\cosh(mL) + \left(\frac{h}{mk} \right) \sinh(mL)}, \quad (2.3)$$

sendo T_b a temperatura da base da aleta [K]; L o comprimento total da aleta [m]; e m um parâmetro adimensional, estimado através da seguinte relação:

$$m = \left(\frac{hP}{kA_r} \right)^{1/2}. \quad (2.4)$$

Já o desempenho da aleta é verificado estimando-se sua eficiência, que relaciona a taxa real de trocas térmicas ocorridas na aleta com a taxa máxima teórica, que seria obtida se toda a aleta possuísse a mesma temperatura observada em sua base. Considerando-se uma aleta do

tipo plana, com seção transversal retangular, a eficiência (η) pode ser estimada pela seguinte expressão

$$\eta = \frac{\tanh(mL_c)}{mL_c}, \quad (2.5)$$

onde L_c é o comprimento corrigido da aleta [m], dado por $L_c = L + (t/2)$, sendo t a espessura da aleta [m].

1. A partir das informações anteriores, considere uma aleta retangular, de cobre ($k = 400$ W/mK), de comprimento $L = 0,200$ m, perímetro $P = 0,110$ m, área de seção transversal $A_{tr} = 2,5 \times 10^{-4}$ m² e espessura $t = 0,005$ m. Esta aleta possui temperatura de base $T_b = 400$ K, estando imersa em um ambiente cuja temperatura é $T_\infty = 300$ K e que oferece um coeficiente convectivo $h = 100$ W/m²K. Neste contexto, calcule a temperatura em cada ponto da aleta, para intervalos de 0,005 m. A seguir, faça um gráfico da temperatura (eixo vertical) *versus* posição.
2. Mantenha todas as informações do item anterior inalteradas, exceto pelo comprimento L , que apresentará uma faixa de valores, variando de 0,020 a 0,500 m, com um passo de 0,020 m. Neste contexto, calcule a temperatura na extremidade da aleta ($x = L$) e compare o valor obtido com o caso limite, no qual considera-se uma aleta de comprimento infinito. No caso de uma aleta de comprimento infinito, a temperatura é obtida através da seguinte expressão

$$T(x) = T_\infty + (T_b - T_\infty) \exp(-mx) \quad (2.6)$$

e informe se a diferença entre a temperatura dada pela expressão (2.3) e a dada pela expressão (2.4) é inferior a 1% (tolerância). Utilize, para tanto, a função lógica "se". A diferença percentual é definida como:

$$dif = \left| \frac{T_{x=L}|_{convectiva} - T_{x=L}|_{comp.infinito}}{T_{x=L}|_{convectiva}} \right| \times 100\% \quad (2.7)$$

3. Mantenha todas as informações do item (1) inalteradas, exceto pelo comprimento L da aleta, que apresentará uma faixa de valores, variando de 0,000 a 0,500 m, com um passo de 0,025 m. Neste contexto, calcule a eficiência da aleta, para cada comprimento. Plote um gráfico da eficiência (eixo vertical) *versus* α , sendo α definido como

$$\alpha = L_c^{3/2} \left(\frac{h}{k L_c t} \right)^{1/2}. \quad (2.8)$$

QUESTÃO 03 (valor: 35).

A convecção de calor ocorre através da movimentação de um fluido sobre uma determinada superfície, estando o fluido e a superfície a diferentes temperaturas. O estudo desse mecanismo de transferência de calor é bastante importante para o projeto de diferentes equipamentos como, por exemplo, os trocadores de calor. A lei básica que rege as trocas térmicas por convecção é conhecida como Lei de Newton do Resfriamento, dada por:

$$q = h A (T_{sup} - T_{\infty}), \quad (3.1)$$

onde: q é a taxa de transferência de calor [W]; h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ou coeficiente convectivo [$W/m^2 \cdot K$], A é a área de troca térmica [m^2]; T_{sup} é a temperatura da superfície [$^{\circ}C$ ou K]; e T_{∞} é a temperatura do fluido em escoamento livre (não afetada pela temperatura da superfície) [$^{\circ}C$ ou K]. Dentre as variáveis anteriormente citadas, destaca-se o coeficiente convectivo, que se constitui no mais importante parâmetro para o estudo da convecção de calor, sendo dependente, dentre outros fatores:

- (1) Da geometria dos elementos no escoamento (placas planas, cilindros, feixes de cilindros, esferas, entre outros).
- (2) Das condições de escoamento (laminar, transição, turbulento).
- (3) Do tipo de escoamento (interno, externo).
- (4) Do tipo de convecção (natural, forçada, mista, com mudança de fase).

A partir desse contexto, considere um experimento conduzido com um cilindro metálico, aquecido internamente por um aquecedor elétrico de tal forma que sua superfície seja mantida a uma temperatura constante T_{sup} . Tal cilindro é submetido a um escoamento de ar, a uma

temperatura T_{∞} , no interior de um túnel de vento. Deseja-se avaliar qual a potência dissipada pelo cilindro para diferentes velocidades u do escoamento de ar. Para tanto, será empregada a correlação proposta por Zukauskas, cuja forma é:

$$\overline{Nu} = C Re^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_{sup}} \right)^{1/4}, \quad (3.2)$$

onde: \overline{Nu} é o número de Nusselt médio [adimensional]; Re é o número de Reynolds [adimensional]; Pr é o número de Prandtl [adimensional]; Pr_{sup} é o número de Prandtl na superfície do cilindro [adimensional]; n é um expoente que depende do número de Prandtl: se $Pr \leq 10$, $n = 0,37$ e se $Pr > 10$, $n = 0,36$; e C e m são constantes que dependem do número de Reynolds, conforme apresentado na tabela a seguir:

Re	C	m
1 – 40	0,75	0,4
40 – 1000	0,51	0,5
$1 \times 10^3 - 2 \times 10^5$	0,26	0,6
$2 \times 10^5 - 1 \times 10^6$	0,076	0,7

O número de Reynolds (Re) se constitui em uma razão entre as forças de inércia e as forças viscosas que atuam em um dado escoamento, sendo avaliado através da seguinte relação:

$$Re = \frac{\rho u D}{\mu}, \quad (3.3)$$

onde: ρ é a massa específica do fluido [kg/m^3]; u é a velocidade do escoamento [m/s]; D é um comprimento característico, que no caso de um cilindro é o seu diâmetro [m]; e μ é a viscosidade do fluido [$\text{Pa}\cdot\text{s}$].

O número de Nusselt (\overline{Nu}), por sua vez, está relacionado ao coeficiente convectivo h através da seguinte expressão:

$$\overline{Nu} = \frac{hD}{k}, \quad (3.4)$$

onde k é a condutividade térmica do fluido [W/m·K].

O cilindro empregado possui diâmetro $D = 20$ mm e comprimento $L = 100$ mm; suas bases não trocam calor com o ar do túnel de vento. A temperatura superficial do cilindro T_{sup} é mantida a 400 K, com $Pr_{sup} = 0,690$, enquanto o ar possui temperatura $T_{\infty} = 300$ K, viscosidade $\mu = 184,6 \times 10^{-7}$ Pa·s, número de Prandtl $Pr = 0,707$, massa específica $\rho = 1,1614$ kg/m³ e condutividade térmica $k = 26,3 \times 10^{-3}$ W/m·K. Avalie os valores do coeficiente convectivo h e da taxa de transferência de calor q para diferentes velocidades de escoamento do ar. Para tanto, empregue uma planilha eletrônica e, onde couber, utilize a função lógica "se". As velocidades do ar u a serem empregadas são: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 50; 100; 200; 500. Plote um gráfico do tipo log-log, para a taxa de transferência de calor q em função da velocidade u .