



Universidad de Chile
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Ingeniería Química

Guía Radiación control 2 IQ46B 2004

Rodrigo Caro E. ¹

¹ Dudas o reclamos a rcaro@ing.uchile.cl

Radiación.

Ley de Wein y definiciones.	2
Placas infinitas.	4
Calculo de resistencia a la radiación.	6
Calculo de temperaturas de equilibrio.	10
Teóricas.	16
Propuestos.	17

Ley de Wein y definiciones.

PROBLEMA 1

Un ingeniero astuto aprovechando sus conocimientos avanzados en transferencia de calor por radiación, se consigue un “pitutito” en la NASA. El trabajo consiste en determinar la temperatura que se establece en la superficie de una nave espacial producto de la radiación térmica solar. Para ello el ingeniero cuenta con la siguiente información: λ_{Max} (radiación térmica solar) = $5 \cdot 10^{-7}$ m, distancia nave – sol = 400 veces el radio del sol. Emisividad del sol = 1; Absorbancia de la nave = 0.5 y ella actúa como cuerpo gris; Área de transferencia de la nave = 10 m^2 . Determine:

- a) La temperatura de la superficie del sol utilizando la ley de Wien.
- b) El calor emitido por el sol (en W) en función del radio solar.
- c) La intensidad de la radiación solar en la distancia de la órbita de la nave.
- d) La temperatura de la nave suponiendo que se encuentra en equilibrio térmico ($Q_{\text{neto}} = 0$).

Como la densidad del espacio es bajísima, supondremos que solo existe transferencia de calor por radiación.

SOLUCION PROBLEMA 1

a) Utilizando la ley de Wien: $T(K) \cdot \lambda_{\text{max}}(m) = 2,884 \cdot 10^{-3}$

Si $\lambda_{\text{Max}} = 5 \cdot 10^{-7}$ m, entonces se tiene : $T(K) = \frac{2.884 \cdot 10^{-3}}{5 \cdot 10^{-7}} = 5768 \text{ K}$

$$b) \quad q = \sigma * T^4 = 5.676 * 10^{-8} * (5768)^4$$

$$q = 62.83 * 10^6 \text{ W/m}^2$$

$$\text{Area superficial del sol} = 4 \pi R_S^2$$

$$Q = q * A = 7.89 * 10^8 R_S^2 \text{ [W]}$$

c) La fuente de energía es la superficie del sol (una esfera de radio R_S) y este calor irradiado se distribuye uniformemente en el espacio que lo rodea. La intensidad de la radiación a una distancia d debe cumplir que:

$$Q = \int_S I \cdot dS \quad \text{donde } I \text{ es la intensidad de la radiación y } S \text{ es la superficie irradiada.}$$

Como la intensidad de radiación es uniforme en coordenadas esféricas para una distancia dada, entonces se tiene que:

$$Q = I * \int_S dS = I(d) * \text{Area}(d) \quad \text{donde } d \text{ es la distancia desde el centro del sol.}$$

$$\text{Area}(d) = 4 \pi d^2 = 4 \pi (R_S + 400R_S)^2 = 4 \pi (401)^2 (R_S)^2$$

$$I = \frac{Q}{\text{Area}} = \frac{7.89 * 10^8 * R_S^2}{4 * \pi * (401)^2 * R_S^2} = 392.63 \text{ [W/m}^2\text{]}$$

$$d) \quad Q_{\text{Neto}} = \text{Calor recibido por radiación} - \text{Calor irradiado}$$

$$\text{Calor recibido} = I * A_{\text{Nave}} * \alpha_{\text{Nave}}$$

$$\text{Calor Irradiado} = \epsilon_{\text{Nave}} * A_{\text{Nave}} * \sigma * T^4$$

Como en el equilibrio el calor neto transferido es nulo entonces el calor recibido será igual al calor irradiado por la nave.

$$I * A_{\text{Nave}} * \alpha_{\text{Nave}} = \epsilon_{\text{Nave}} * A_{\text{Nave}} * \sigma * T^4$$

Como la nave es un cuerpo gris en equilibrio térmico, se considera que

$$\epsilon_{Nave} = \alpha_{Nave}$$

finalmente: $I = \sigma * T^4$

$$392.63 = 5.676 * 10^{-8} * T_{Nave}^4$$

$$T_{Nave} = \left(\frac{392.63}{5.676 * 10^{-8}} \right)^{\frac{1}{4}}$$

$$T_{Nave} = 288.4 \text{ K}$$

Placas infinitas.

PROBLEMA 2

Se coloca un horno industrial en una habitación con paredes de acero. El horno se encuentra a 300°C y posee una emisividad de 0.8. las paredes son de acero pulido con emisividad 0.2 y se encuentran a temperatura ambiente (20°C). Determine el calor perdido por radiación del horno a las paredes en estas condiciones. Si las paredes del recinto se oxidan aumentando su emisividad hasta 0.9 calcule el porcentaje de aumento en las pérdidas de calor por radiación.

Suponga que ambos se comportan como cuerpos grises y poseen superficies paralelas muy grandes con relación a su distancia, siendo sus áreas idénticas e iguales a 50 m².

SOLUCIÓN PROBLEMA 2

Para radiación entre paredes planas paralelas e infinitas (distancia entre ellas mucho mayor que longitudes características) se tiene:

$$Q = \frac{A * \sigma * (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$

En este caso:

$$T_1 = 300^\circ\text{C} = 573.15 \text{ K}$$

$$T_2 = 20^\circ\text{C} = 293.15 \text{ K}$$

$$\epsilon_1 = 0.8$$

$$\epsilon_2 = 0.2$$

$$Q = \frac{50 * 5.676 * 10^{-8} * ((573.15)^4 - (293.15)^4)}{\frac{1}{0.8} + \frac{1}{0.2} - 1}$$

$$Q = 54289 \text{ W}$$

Si ϵ_2 cambia a $\epsilon_2 = 0.9$, entonces:

$$Q = \frac{50 * 5.676 * 10^{-8} * ((573.15)^4 - (293.15)^4)}{\frac{1}{0.8} + \frac{1}{0.9} - 1}$$

$$Q = 209402 \text{ W}$$

$$\% \text{ Aumento} = \frac{Q_f - Q_i}{Q_i} * 100 = \frac{209402 - 54289}{54289} * 100$$

$$\% \text{ Aumento} = 285.7\%$$

Calculo de resistencia a la radiación.

PROBLEMA 3

Por una tubería de hierro 1" ($D_i=2.67$ cm; $D_o=3.34$ cm) circula vapor saturado a 150°C , coeficiente de convección vale $10000 \text{ Kcal} / \text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$. A la temperatura media del tubo la conductividad del hierro es $52 \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$ y su emisividad es 0.90 . Si el ambiente está a 20°C , calcule la cantidad de calor transmitido al exterior por metro de tubo.

Suponga que existe convección natural entre el tubo y el aire que lo rodea

$$\text{utilizando } h = 1.1 * \left(\frac{\Delta T}{D_o} \right)^{0.25}.$$

Repita los cálculos si se aísla la tubería con un material de 2 cm de espesor, de conductividad $0.09 \text{ Kcal/m h } ^\circ\text{C}$ y emisividad 0.70 .

Solución problema 3

Expresamos las resistencias a la transferencia de calor en términos de la superficie externa del tubo.

$$R_{\text{convección}} = \frac{1}{10000 * (2.67/3.34)} = 1.25 * 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C h} / \text{Kcal}$$

$$R_{\text{conducción}} = \frac{(3.34 - 2.67) * 10^{-4}}{52 * (3.00/3.34)} = 1.43 * 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C h} / \text{Kcal}$$

para la convección en la pared externa:

$$h_c = 1.1 * \left(\frac{130}{3.34 * 10^{-2}} \right)^{0.25} = 8.69 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

para la radiación en la pared externa:

$$h_r = \frac{0.90 * 4.92 * 10^{-8} * (423^4 - 293^4)}{130} = 8.39 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}$$

$$h_c + h_r = 17.08 \text{ Kcal} / \text{m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C}.$$

$$R_{conv+rad} = \frac{1}{17.08} = 585 * 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C h/Kcal}$$

Luego se tiene que:

$$Q = \frac{1}{\sum R_i} * A_o * \Delta T = \frac{1}{(1.25 + 1.43 + 585) * 10^{-4}} * 3.34 * 10^{-2} * \pi * (150 - 20)$$

$$Q = 233 \text{ Kcal/h}$$

En el caso de colocar el aislante, haremos el cálculo en forma iterativa suponiendo una temperatura para la cara externa del aislante, y con esta temperatura calculamos la cantidad de calor transmitido a su través, que ha de ser igual a la transmitida por convección y radiación en el estado estacionario, si la temperatura supuesta ha sido correcta.

Como se aprecia en el cálculo anterior la resistencia a la transferencia de calor en las etapas de condensación y conducción del tubo son muy pequeñas respecto de la resistencia en las restantes etapas y serán despreciadas en esta cálculo. Por lo tanto se supone que la superficie interna del aislante esta a la temperatura de condensación del vapor, 150 °C.

$$\text{Para el aislante: } A_m = \pi * \frac{4 * 10^{-2}}{\ln(7.34/3.34)} = 0.16 \text{ m}^2$$

Suponemos una temperatura en la superficie externa del aislante de 100°C

$$Q_{conducción} = \frac{0.09 * 0.16 * (150 - 100)}{2 * 10^{-2}} = 36 \text{ Kcal/h}$$

$$h_{convección} = 1.1 * \left(\frac{80}{7.34 * 10^{-2}} \right)^{0.25} = 6.32 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

$$h_{radiación} = \frac{0.70 * 4.92 * 10^{-8} * (373^4 - 293^4)}{(373 - 293)} = 5.17 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$$

$$Q_{conv+rad} = (6.32 + 5.17) * \pi * 7.34 * 10^{-2} * (100 - 20) = 212 \text{ Kcal/h}$$

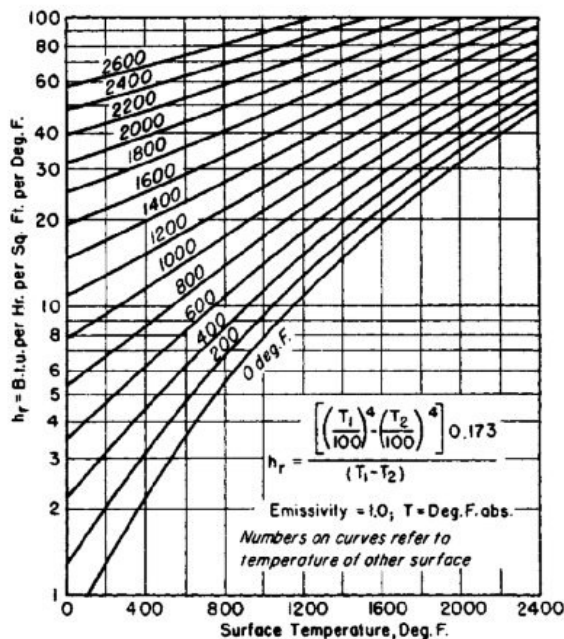
como el calor obtenido para radiación – convección es mucho mayor la temperatura supuesta a sido demasiado alta.

El valor correcto es $t = 53\text{ }^{\circ}\text{C}$ y el calor transferido en estas condiciones es 70 Kcal / h .

PROBLEMA 4.

Un termómetro de vidrio ($\varepsilon = 0.96$) se inserta en el centro de un ducto circular. Por el ducto fluye aire con una velocidad tal que el coeficiente de película entre el termómetro y el aire es $17.7\text{ BTU/hr ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}$.

- Si las paredes del ducto están a $800\text{ }^{\circ}\text{F}$ y el termómetro lee 300°F , calcular la temperatura del aire en el ducto.
- Si el termómetro se rodea con papel plateado ($\varepsilon = 0.03$), determinar la nueva lectura del termómetro.



Solución problema 4

- De la figura se encuentra $h_r = 7.6\text{ BTU/hr ft}^2\text{ }^{\circ}\text{F}$.

$$Q = h_r * \epsilon * (T_{pared} - T_{termómetro}) = h_c * (T_{termómetro} - T_{aire}) = 0$$

$$T_{aire} = 300 - \frac{7.6 * 0.96 * (800 - 300)}{17.7} = 94^\circ F$$

b) Se realiza un nuevo balance de calor para el termómetro:

$$Q = h_r * \epsilon * (T_{papel} - T_{termómetro}) = h_c * (T_{termómetro} - T_{aire}) = 0$$

La temperatura del papel será intermedia entre la temperatura de la pared y la temperatura del aire. En el caso extremo se considera que el papel plateado irradia con la temperatura de la pared, es decir no existe conducción ni convección entre el papel y el flujo de aire.

El papel entonces irradia con emisividad 0.03 y temperatura 800°F. En consecuencia el balance será:

$$Q = h_r * (0.03) * (800 - T_{termómetro}) = h_c * (T_{termómetro} - 94) = 0$$

$$94 = T_{termómetro} - \frac{h_r * (0.03) * (800 - T_{termómetro})}{17.7}$$

Como h_r depende de la temperatura del termómetro, el problema se puede desarrollar en forma iterativa.

Si suponemos la temperatura del termómetro en 100°F, se obtiene $h_r = 6.0$, entonces se verifica la temperatura del gas:

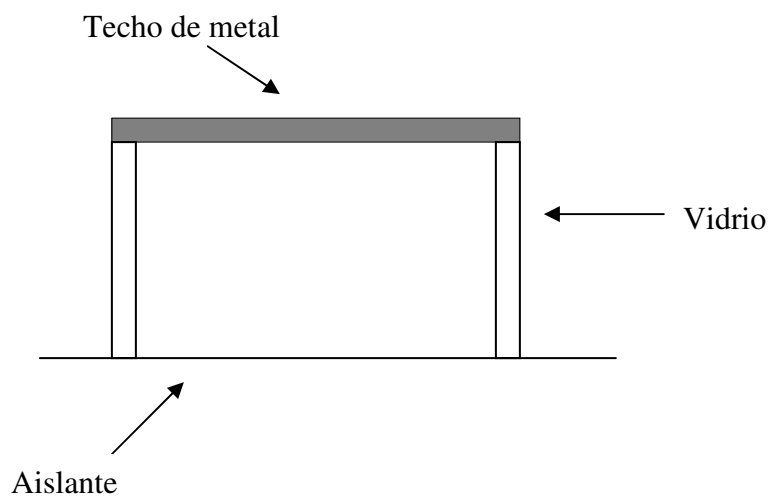
$$94 = T_{termómetro} - \frac{6.0 * (0.03) * (800 - 100)}{17.7} = 93$$

La solución correcta indica que la temperatura que el termómetro leerá en definitiva será 101°F.

Calculo de temperaturas de equilibrio.

PROBLEMA 5.

En un día de verano la intensidad de irradiación solar en Santiago puede suponerse de 1200 W/m^2 . Consideremos un automóvil estacionado directamente al sol, cuyo techo esta opaco y sucio ($\varepsilon = 0,7$), y lo modelamos como una caja de paredes de vidrio (ventanas del auto) como se ve en la figura.



Se conoce el área del techo (2 m^2), el área de los vidrios (3 m^2) y los coeficientes de convección siguientes:

$h_{\text{aire-vidrio}} = 10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	Cara externa
$h_{\text{aire-metal}} = 20 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	Cara externa
$h_{\text{aire-vidrio}} = 5 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	Cara interna
$h_{\text{aire-metal}} = 10 \text{ W/m}^2 \text{ K}$	Cara interna

Si la conductividad del metal y el vidrio dan una resistencia a la transferencia de calor despreciable, no hay radiación por los vidrios y la temperatura del aire afuera del auto es de 20°C:

- Determine la temperatura que se establece en el interior del vehículo (5.5ptos).
- ¿Que medidas tomaría usted para disminuir la temperatura del automóvil, sin moverlo de su posición?(0.5ptos)

Indicación: para resolver el problema debe plantear ecuaciones simultaneas que se resuelven en forma iterativa suponiendo la temperatura del techo del vehículo. Desprecie la radiación hacia dentro del auto desde el techo.

Solución problema 5

i) Techo:

$$\varepsilon \cdot I \cdot A_T = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A_T \cdot T_M^4 + A_T \cdot h_{MO} \cdot (T_M - T_O) + A_T \cdot h_{MI} \cdot (T_M - T_i)$$

$$6703 = 3,973 \cdot (T_M/100)^4 + 30 \cdot T_M - 10 \cdot T_i$$

ii) Vidrio:

$$A_V \cdot h_{VI} \cdot (T_i - T_V) = A_V \cdot h_{VO} \cdot (T_V - T_O)$$

$$T_i = 3 \cdot T_V - 586,3$$

iii) Aire Interior:

$$A_T \cdot h_{MI} \cdot (T_M - T_i) = A_V \cdot h_{VI} \cdot (T_i - T_V)$$

$$2 \cdot 10 \cdot (T_M - T_i) = 3 \cdot 5 \cdot (T_i - T_V)$$

$$20 \cdot T_M - 35 \cdot T_i = -15 \cdot T_V$$

Reemplazando (ii) en (iii) nos queda:

$$20 \cdot T_M - 35 \cdot (3 \cdot T_V - 586,3) = -15 \cdot T_V$$

Despejando T_V :

iv)

$$T_V = (20 \cdot T_M + 20520,5) / 90$$

Resolviendo en forma iterativa las ecuaciones (i) y (iv), dandose valores de T_M , se llegan a los siguientes valores:

$$T_M = 312,84^\circ\text{K} = 39,69^\circ\text{C}$$

$$T_V = 297,53^\circ\text{K} = 24,38^\circ\text{C}$$

$$T_i = 306,28^\circ\text{K} = 33,13^\circ\text{C}$$



Para disminuir la temperatura del automóvil, se debe limpiar (pulir) el techo para así disminuir el ε y bajar el calor recibido por radiación.

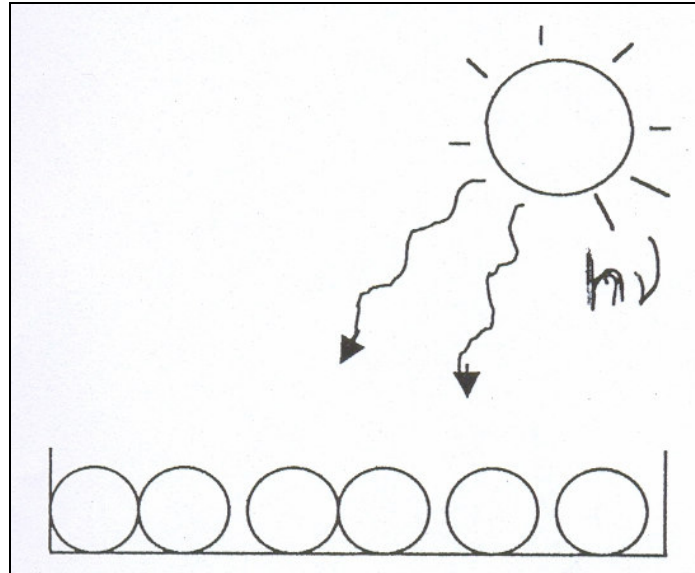
PROBLEMA 6.

En ciertos lugares en la zona norte del país se utiliza el sol para calentar agua. La modalidad mas sencilla es poner varias botellas de vidrio pintadas de negro, llenas de agua, dispuestas en forma horizontal en cajas de madera pintadas de negro interiormente según la configuración indicada en la figura.

Determinar la temperatura máxima que alcanza el agua (en estado estacionario) en un

día en que la radiación solar es de 1000 W/m^2 . Considere que el coeficiente de la superficie de las botellas es $10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}$. La emisividad de la superficie de la

botellas es 0.9 la temperatura en el aire ambiente es 25°C



Solución problema 6.

Asumiendo que $T_{\text{botella}} = T_{\text{agua}} = T_1$

y simplificando el problema, sin considerar la radiación de botellas adyacentes, el balance de calor en estado estacionario para el sistema es:

$$0 = Q_{\text{absorbido x botellas}} - Q_{\text{emitido x botellas}} - Q_{\text{cedido x convección}}$$

$$Q_{\text{absorbido x botellas}} = A_1 I \alpha_{12}, \text{ asumamos } \alpha_{12} = \alpha_{11} = \epsilon_{11} \text{ (ley de Kirchoff)}$$

$$Q_{\text{emitido x botellas}} = A E_1 = A_1 \sigma T_1^4 \epsilon_{11}$$

$$Q_{\text{cedido x convección}} = A_1 h c (T_{\text{agua}} - T_{\text{aire}})$$

⇒ Reemplazando:

$$Q_{\text{absorbido x botellas}} = Q_{\text{emitido x botellas}} - Q_{\text{cedido x convección}}$$

$$A_1 \times 1000 \times 0,9 \text{ (W/m}^2\text{)} = A_1 \cdot 5,676 \cdot 10^{-8} \cdot T_1^4 \cdot 0,9 + A_1 \cdot 10 (T_1 - 298,15)$$

Despejando se obtiene la siguiente ecuación:

$$5,103 \cdot 10^{-8} \cdot T_1^4 + 10 T_1 - 3881,5 = 0$$

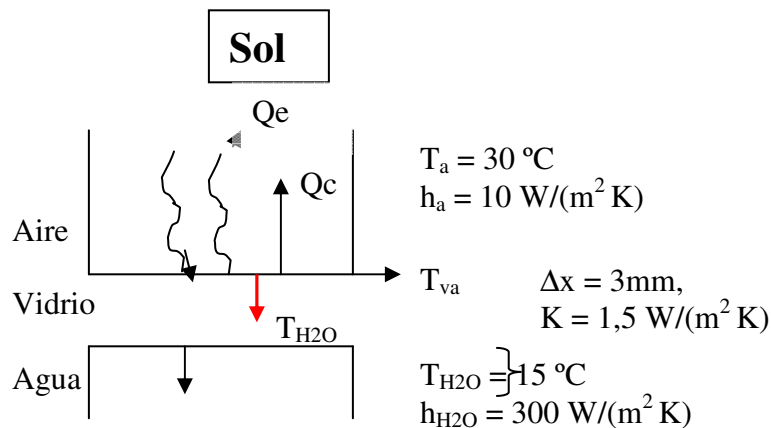
$$\Rightarrow T_1 = 328,59 \text{ K} = 55,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Es conveniente esta disposición de la caja \Rightarrow absorbe más radiación y emite a las botellas.

PROBLEMA 7.

Determine el flujo de calor por unidad de área a través de una lámina de vidrio de 3mm de espesor que está expuesta por un lado a una radiación solar de 1000 W/m² y por el otro tiene agua estanca a 15°C. La temperatura en el ambiente es 30 °C, el h del agua es 300 W/m² °K, el h del aire es 10 W/m² °K, la conductividad del vidrio es 1.5 W/ m °K. El vidrio tiene la superficie expuesta al sol pintada y su emisividad es 0.9.

Solución problema 7.



Dividamos el problema en 3 zonas:

Zona I : aire – vidrio (a, v).

$$q_1 / A = Q_{\text{absorbido}} - Q_{\text{emitido x botellas}} - Q_{\text{cedido x convección}}$$

$$q_1 / A = I \cdot \varepsilon_{11} - \varepsilon_{11} \cdot \sigma \cdot T_{\text{aire}}^4 - h_{\text{aire}} (T_{va} - T_a)$$

$$q_1 / A = 1000 \cdot 0,9 - 0,9 \cdot 5,676 \cdot 10^{-8} \cdot T_{va}^4 - 10 (T_{va} - 303,15)$$

$$q_1 / A = 3930,15 - 5,103 \cdot 10^{-8} \cdot T_{va}^4 - 10 \cdot T_{va}$$

Zona II : vidrio (v).

$$q_2 / A = (k/\Delta x) \cdot (T_{va} - T_{v \text{ H}_2\text{O}})$$

$$q_2 / A = (1,5/0,003) \cdot (T_{va} - T_{v \text{ H}_2\text{O}})$$

$$q_2 / A = 500 \cdot (T_{va} - T_{v \text{ H}_2\text{O}})$$

Zona III : vidrio – agua (v, agua).

$$q_3 / A = h_{\text{H}_2\text{O}} \cdot (T_{v \text{ H}_2\text{O}} - T_{\text{agua}})$$

$$q_3 / A = 300 \cdot (T_{v \text{ H}_2\text{O}} - 288,15)$$

$$q_3 / A = 300 \cdot T_{v \text{ H}_2\text{O}} - 86445$$

en estado estacionario $q_1 = q_2 = q_3$,

así igualando : $q_2 = q_3$

$$500 T_{va} - 500 \cdot T_{v \text{ H}_2\text{O}} = 300 \cdot T_{v \text{ H}_2\text{O}} - 86445$$

$$500 T_{va} = 800 \cdot T_{v \text{ H}_2\text{O}} - 86445$$

$T_{v \text{ H}_2\text{O}} = 0,625 \cdot T_{va} + 108,056$
--

reemplazando en ecuación 1 en q_3 :

$$q_3 / A = 300 \cdot (0,625 \cdot T_{va} + 108,056) - 86445$$

$$q_3 / A = 187,5 \cdot T_{va} - 54028,2$$

igualando $q_1 = q_3$:

$$3930,15 - 5,103 \cdot 10^{-8} \cdot T_{va}^4 - 10 \cdot T_{va} = 187,5 \cdot T_{va} - 54028,2$$

$$0 = 5,103 \cdot 10^{-8} \cdot T_{va}^4 + 197,5 \cdot T_{va} - 57958,35$$

$$\Rightarrow T_{va} = 291,59 \text{ K} = 18,44 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Rightarrow q_1 / A = 647,15 \text{ (W/m}^2\text{)}.$$

Teóricas.

8) Dibuje la curva de distribución de energía radiante emitida por un cuerpo negro en función de la longitud de onda para diferentes temperaturas. En base a lo anterior explique porqué un cuerpo al calentarse mucho se llega primero al rojo y luego se póné blanco.

9) Explique el efecto invernadero asociado al aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera terrestre, que puede provocar un excesivo calentamiento en la tierra. (Aplique la ecuación de WEIN)

10) Deduzca la ecuación que relaciona como el calor transmitido por radiación entre 2 planos paralelos infinitos disminuye con el agregado de n pantallas

11) Deduzca la ecuación que permite evaluar la desviación entre la temperatura de una termocupla (T_c) y la temperatura del gas en que está inmersa (T_g) cuando hay paredes radiantes a T_s

12) Deduzca la expresión de h_r para radiación desde una pared a T_1 hacia un medio a T_3 .

13) En ciertos lugares en la zona norte del país se utiliza el sol para calentar agua. La modalidad mas sencilla es poner varias botellas de vidrio pintadas de negro, llenas de agua, dispuestas en forma horizontal en cajas de madera pintadas de negro interiormente según la configuración indicada en la figura. De la pregunta 6.

a) Porque cree Ud. que es conveniente poner las botellas en una caja en vez de ponerlas simplemente horizontales sobre una superficie.

b) Cree Ud. que es conveniente pintar las cajas de negro interiormente? Opine sobre la posibilidad de ponerlas en un caja hecha de aluminio pulido.

14) Plantee las ecuaciones que permiten explicar porqué una termocupla (o

termómetro) expuesta a la radiación solar entregará una lectura de temperatura ambiente mayor que la que efectivamente existe. Explique como se puede disminuir esa desviación en la medida.

Propuestos.

15) Calcular la pérdida de calor en una tubería metálica por donde fluye vapor. La tubería posee un diámetro externo de 50 [mm], una emisividad de 0,9 y la temperatura de su superficie externa se mantiene en 377°K. El aire atmosférico se encuentra a 238°K.

16) Una estufa eléctrica doméstica con un tubo radiante de 0,5 [m] de largo y 1,5 [cm] de diámetro (emisividad 0,75), se encuentra ubicada en un cuarto con una temperatura en el ambiente y paredes de 10°C. Al conectar el calefactor, el tubo se pone rápidamente rojo y se establece una temperatura de 500°C. El tubo está en el centro de un reflector perfecto cóncavo, y el calefactor está posicionado de tal forma que todo el calor emitido por radiación impacta una de las paredes del cuarto, que tiene un coeficiente de emisión de 0,95.

a) Determine qué fracción del calor generado por el calefactor se utiliza en calentar efectivamente el aire del cuarto (convección)

b) Indique cualitativamente qué sucede con la temperatura del tubo radiante si se induce la convección forzada mediante soplado continuo del tubo con un ventilador y por qué.

c) Qué efecto tiene introducir la convección forzada sobre la sensación térmica de las personas que están en el cuarto

Nota: Para estimar el coeficiente de convección natural, utilice la siguiente expresión:

$$h_c = 1,32 \cdot (\Delta T/D)^{1/4} \quad [\text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{K}],$$

donde D es diámetro de tubo en [m] y ΔT en °K.