

Análisis de Sistemas Dinámicos: Capítulo 6 Modelo de sistemas Térmicos

Ing. Carlos E. Cotrino B. M Sc.

1

Modelos de sistemas físicos

1. Preparar y ejecutar el plan de acción para formular y resolver un modelo. (CDIO 2.1.1.4)
2. Obtener modelos conceptuales y cualitativos de diversos sistemas físicos. (CDIO 2.1.2.2)
3. Establecer las conexiones entre los fenómenos físicos y el modelo. (CDIO 2.1.2.3)
4. Usar modelos cuantitativos y soluciones. (CDIO 2.1.2.4).
5. Generalizar suposiciones para simplificar ambientes y sistemas complejos (CDIO 2.1.2.1)

Modelos de sistemas físicos

6. Discutir una aproximación desde varias disciplinas para asegurar que el sistema se entienda desde todas las perspectivas relevantes. (CDIO 2.3.1.2)
7. Establecer prioridades dentro de las metas generales (CDIO 2.1.1.3).
8. Identificar sistemas propios y sistemas con interacción entre áreas (CDIO 2.3.2.4).
9. Seguir la estructura y el proceso de integración del conocimiento (CDIO 2.4.5.5).

CCB-Oct-2022

3

3

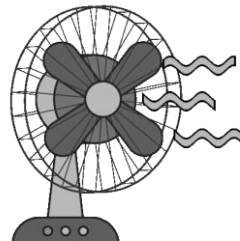
Clase 1

Contenido

1. Definir las variables que describen a los sistemas térmicos.
2. Definir transferencia de calor por conducción.
3. Definir y evaluar resistencia térmica
4. Definir transferencia de calor por convección.

Temas para repasar

- Escalas de temperatura



CCB-Oct-2022

4

4

Temperatura

- Medición del movimiento atómico
- Energía cinética promedio de las partículas.
- A mayor agitación - mayor temperatura
- Propiedad intensiva: no depende del tamaño del sistema
- Dos sistemas en contacto térmico alcanzan la misma temperatura.
- Para definir la temperatura se debe esperar que se alcance el equilibrio térmico.

CCB-Oct-2022

5

5

Variables y Unidades

Variables generalizadas	Variables térmicas	Unidades SI
Esfuerzo, e	Temperatura, T	Kelvin (K) o Celsius ($^{\circ}\text{C}$)
Flujo, f	Tasa de transferencia de calor, $\dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$	Julio/segundo (W)
	Flujo de calor, $\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A}$	$\frac{W}{m^2}$
Energía	$Q = \int f dt$	Julio = W-s

El producto exf NO es potencia.

CCB-Oct-2022

6

6

SI: escala absoluta Kelvin¹

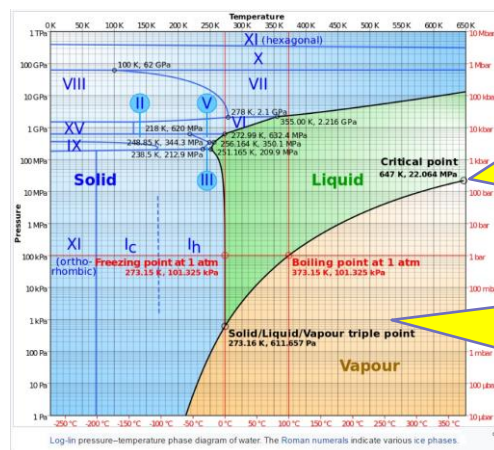
- El punto fijo escogido es el punto triple del agua, estado termodinámico en el cual las fases sólida, líquida y vapor están en equilibrio: $T = 273,16 \text{ K}$ a una presión de $6.03 \times 10^{-3} \text{ atm}$. (612 Pa).
- Un K es la fracción $(1/273.16)$ de T del punto triple del agua
- En la escala K el punto de congelación del agua a 1 atm es de 273,15 K y el punto de ebullición, a la misma presión es de 373,15K. La diferencia de 100K coincide con la escala Celsius

CCB-Oct-2022

7

7

SI: escala absoluta Kelvin¹



Critical point:
where the
difference
between liquid
and gas ceases to
exist

A substance's triple point
is the unique combination
of temperature and
pressure at which the
solid phase, liquid phase,
and gaseous phase can all
coexist in thermodynamic
equilibrium.

CCB-Oct-2022

8

8

SI: escala relativa Celsius¹

- Punto cero: punto de congelación del agua corresponde a la temperatura de equilibrio del hielo y aire saturado de vapor de agua a una presión de 1 atm.
- Experimentalmente el punto de congelación es 0.01 K por debajo del punto triple del agua.
- Por lo tanto:
$$T(^{\circ}\text{C}) \equiv T(\text{K}) - 273.15$$
- La temperatura del vapor de agua que corresponde al punto de ebullición a 1 atm es igual a 100.00 °C

CCB-Oct-2022

9

9

Escala US¹

Absoluta: Rankine

- Se define como:

$$1^{\circ}\text{R} \equiv \frac{1}{1.8}\text{K}$$

- Punto de congelación del agua:

$$273.15 \times 1.8 = 491.67^{\circ}\text{R}$$

Relativa: Fahrenheit

Punto cero esta 32 °F por debajo del punto de congelación del agua en la escala R:

$$T(^{\circ}\text{F}) \equiv T(^{\circ}\text{R}) - 459.67$$

El punto de ebullición del agua a 1 atm corresponde a 212.00 °F

CCB-Oct-2022

10

10

Escalas, unidades y relaciones

$$T(K) = T(^{\circ}C) + 273.15K$$

$$\Delta^{\circ}C = \Delta K$$

$$T(^{\circ}R) = T(^{\circ}F) + 459.67^{\circ}R$$

$$\Delta^{\circ}R = \Delta^{\circ}F$$

$$T(^{\circ}F) = (1.8)T(^{\circ}C) + 32(^{\circ}F)$$

$$^{\circ}R = (9/5)K$$

SISTEMA SI		SISTEMA US	
Absoluto	Ingeniería	Absoluto	Ingeniería
373.15 K	100 $^{\circ}C$	591 $^{\circ}R$	212 $^{\circ}F$
273.15 K	0 $^{\circ}C$	491 $^{\circ}R$	32 $^{\circ}F$
0 Kelvin	-273.15 $^{\circ}C$	0 $^{\circ}R$	-459.67 $^{\circ}F$

CCB-Oct-2022

11

11

Transferencia de Calor

Transferencia de energía a través de las fronteras de un sistema, producida únicamente por la diferencia de temperatura:

- CONDUCCION
- CONVECCION
- RADIACION

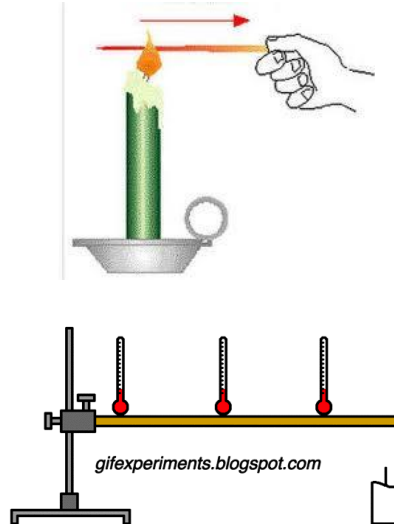
CCB-Oct-2022

12

12

Conducción

- Transferencia de energía producida por la interacción física entre moléculas adyacentes de una sustancia.
- Las de mayor energía (mayor temperatura) transmiten energía a las del nivel energético mas bajo.



CCB-Oct-2022

13

13

Conducción

- Conducción de calor a través de un barra metálica (Ley de Fourier):

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$$

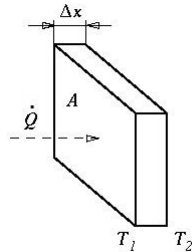
- A = Área normal a la dirección del flujo (m^2) en la dirección x
- k = Conductividad térmica. $\frac{W}{m-K}$
- $\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura en la dirección del
- flujo. (K/m) en la dirección x .
- $\dot{q} = \frac{Q}{A} = -k \frac{dT}{dx}$: flujo de calor por unidad de área.

CCB-Oct-2022

14

14

Conducción²



- k : conductividad térmica $W/(m \cdot K)$ o $BTU/(h \cdot ft \cdot ^\circ R)$.
- \dot{Q} : flujo de calor J/s (W) o BTU/h
- A : área de la sección transversal normal al flujo

CCB-Oct-2022

15

15

Conductividad térmica $W/(m \cdot K)$

Metales buenos conductores de electricidad son buenos conductores de calor.

Fase sólida es mejor conductora que la fase líquida y gaseosa.

No metales son aislantes, excepto cristales como el diamante, zafiro.

Metals		Gases		Building Materials		Other Materials	
Aluminum	235	Air (dry)	0.026	Asphalt	0.75	Cotton	0.04
Brass	109	Argon (gas)	0.016	Brick dense	1.31	Cotton wool	0.029
Copper	401	Carbon dioxide (gas)	0.0146	Brick, fire	0.47	Diamond	1000
Gold	314	Helium	0.15	Brick, insulating	0.15	Engine Oil	0.15
Iron	67	Hydrogen	0.18	Concrete	0.8	Graphite	168
Lead	35	Krypton (gas)	0.0088	Fiberglass	0.048	Ground or soil, dry area	0.5
Nickel	91	Methane (gas)	0.03	Polyurethane foam	0.024	Ground or soil, moist area	
Silver	428	Nitrogen (gas)	0.024	Rock wool	0.043	Polyethylene - low density	0.33
Sodium (liquid)	86	Steam, saturated	0.0184	White pine	0.11	Polypropylene, PP	0.1 - 0.22
Sodium (solid)	135	Xenon (gas)	0.0051	Window glass	1	Porcelain	1.5
Stainless steel	14			Wood, oak	0.17	Sulfur, crystal	0.2
Steel, Carbon 1%	43					Uranium dioxide	8.8
Thorium (metallic)	38					Water	0.58
Uranium (metallic)	27.6						
Zirconium	22.6						
Zirconium alloy (1% Nb)	18						

Conductividad térmica depende de la temperatura. Tabla dada es para 25 °C

https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html

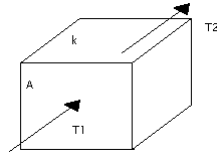
CCB-Oct-2022

16

16

Resistencia térmica

Evaluar la conductividad térmica para una pared plana de espesor L y área A , constante.



$$\dot{Q}dx = -kAdT$$

$$\dot{Q} \int_0^L dx = -kA \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\dot{Q}_x = -\left(\frac{kA}{L}\right)(T_2 - T_1)$$

Flujo de calor por unidad de área:

$$\dot{q} = -\frac{k}{L}(T_2 - T_1) \quad \text{constante}$$

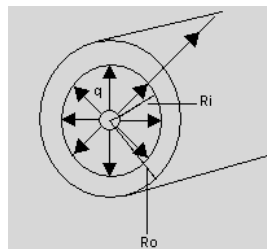
CCB-Oct-2022

17

17

Resistencia térmica²

Para un flujo radial en un tubo de longitud L



$$A = 2\pi Lr$$

$$\dot{Q}_r = -k(2\pi L) \frac{dT}{dr}$$

$$\dot{Q}_r \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -2\pi kL \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$\dot{Q}_r \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) = -2\pi kL(T_0 - T_1)$$

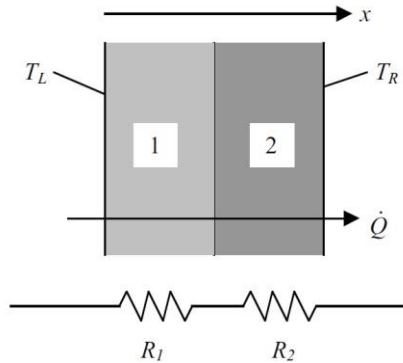
$$\dot{Q}_r = \frac{2\pi kL}{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}(T_i - T_o)$$

CCB-Oct-2022

18

18

Resistencia térmica²



- Analogía con sistemas eléctricos

$$\dot{Q} = \frac{1}{R_T} (T_1 - T_2)$$

- La resistencia térmica equivalente:

$$R_T = \frac{L}{kA}$$

- Conexión serie, flujo constante:

$$\dot{Q} = \frac{T_L - T_R}{R} = \frac{T_L - T_R}{R_1 + R_2}$$

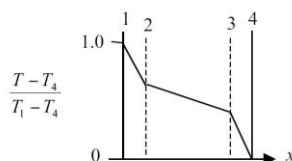
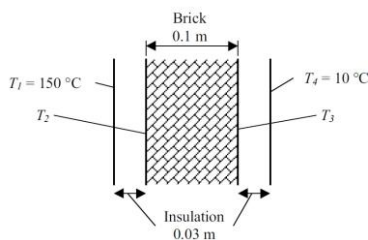
CCB-Oct-2022

19

19

Ejemplo 1²

Una pared plana esta hecha de una capa de ladrillo aislada por ambas caras. La cara interna está a una temperatura $T_1 = 150^\circ\text{C}$ y la externa a una temperatura menor $T_4 = 10^\circ\text{C}$. Cual es el flujo de calor por unidad de área.



$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R_{TOT}} \rightarrow \dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\Delta T}{AR_{TOT}}$$

$$k_{\text{aislamiento}} = 0.07 \text{ W/m-K}; k_{\text{ladrillo}} = 0.7 \text{ W/m-K}$$

$$\text{Áreas iguales: } R_{TOT}A \cong 1 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$$

Flujo de calor constante: 140 W/m^2

$$T_2 \approx 89,8^\circ\text{C} \text{ y } T_3 \approx 70,2^\circ\text{C}$$

Perfil de temperatura

CCB-Oct-2022

20

20

Ejemplo 2 Autocalentamiento Resistencia

- a. Calcular el cambio de resistencia por autocalentamiento de una Resistencia de $1\text{ k}\Omega$, con un TC de $\pm 100\text{ ppm}/^\circ\text{C}$ cuando la temperatura cambia de 25°C a 125°C
- b. Si la resistencia del ejemplo tiene una resistencia térmica (o coeficiente de autocalentamiento) relativamente bajo, de $100^\circ\text{C}/\text{W}$ y una disipación de potencia de $0,5\text{ W}$, ¿cual será el cambio de temperatura?

C. Wells. How to calculate the effects of resistor self-heating

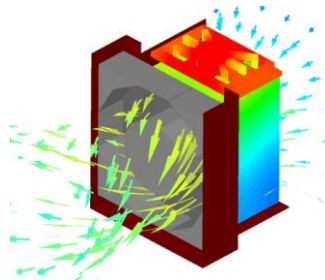
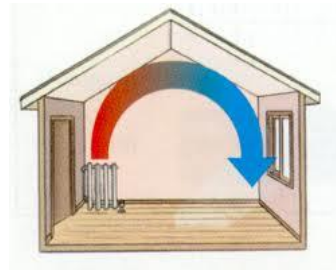
CCB-Oct-2022

21

21

Convección

- Transferencia de calor por movimiento de masa.
- Transferencia de calor desde una superficie hacia un fluido en movimiento.
- Intercambio de energía entre un fluido compacto y una superficie o interfaz.



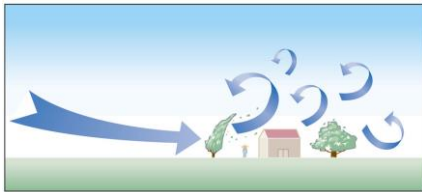
CCB-Oct-2022

22

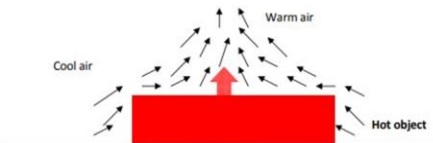
22

Convección Natural

- Movimiento producido por gradientes de densidad dentro del fluido, inducidos por la temperatura: el clima



La superficie externa del objeto se enfriará y la temperatura del aire adyacente al objeto aumentará. El objeto estará rodeado por una capa delgada de aire tibio y se transferirá calor desde esta capa hacia las capas externas de aire.

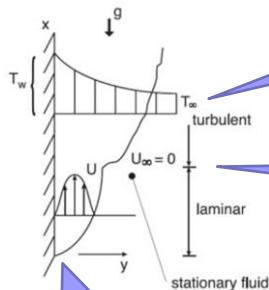


CCB-Oct-2022

23

23

Convección Natural



Cerca al cuerpo la velocidad del flujo es cero: la transferencia de calor del cuerpo al medio en el punto de contacto es por conducción

Números de Grashof mayores de 10^9 el flujo se define como turbulento: prima la fuerza de flotación - buoyancy - sobre las fuerzas viscosas, en esta región la velocidad se define como V_∞ y es constante.

En el punto de transición a laminar, priman las fuerzas de viscosidad, el fluido está en régimen laminar (estacionario) y $V_\infty=0$

- Como la temperatura del aire alrededor del objeto es mayor, la densidad baja y por lo tanto el aire caliente asciende: esta es la corriente de convección natural.

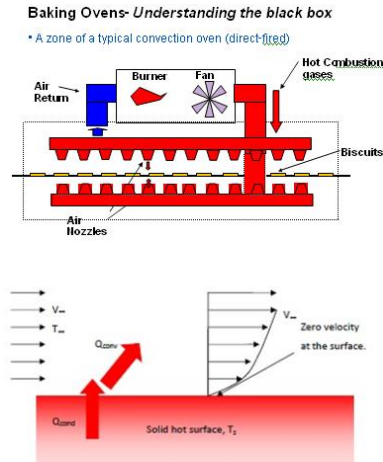
CCB-Oct-2022

24

24

Convección Forzada

- El fluido es forzado, por medios externos como una bomba o un ventilador, para que fluya sobre una superficie o en un tubo.
- La velocidad del fluido sobre la superficie del material se asume cero y por lo tanto la transferencia de calor entre la superficie del sólido y la capa de fluido adyacente a la superficie es por conducción pura, ya que el fluido está estático.



CCB-Oct-2022

25

25

Convección

- La transferencia desde una superficie plana esta dada por:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \bar{h}(T_s - T_F)$$

- \bar{h} : Coeficiente promedio de transferencia de calor $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ o $BTU/(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F)$
- A_s : área m^2 o ft^2
- T_s : temperatura superficial $^\circ C$ o $^\circ F$
- T_F : temperatura fluido $^\circ C$ o $^\circ F$

CCB-Oct-2022

26

26

Convección

Flow type	(W/m ² K)
Forced convection; low speed flow of air over a surface	10
Forced convection; moderate speed flow of air over a surface	100
Forced convection; moderate speed cross-flow of air over a cylinder	200
Forced convection; moderate flow of water in a pipe	3000
Forced Convection; molten metals	2000 to 45000
Forced convection; boiling water in a pipe	50,000
Forced Convection - water and liquids	50 to 10000
Free Convection - gases and dry vapors	5 to 37
Free Convection - water and liquids	50 to 3000
Air	10 to 100
Free convection; vertical plate in air with 30°C temperature difference	5
Boiling Water	3,000 to 100,000
Water flowing in tubes	500 to 1200
Condensing Water Vapor	5,0 - 100,0
Water in free convection	100 to 1200
Oil in free convection	50 to 350
Gas flow on tubes and between tubes	10 to 350

https://www.engineersedge.com/heat_transfer/convective_heat_transfer_coefficients__13378.htm

CCB-Oct-2022

27

27

Ejemplo 3

- Aire a 10 °C fluye bajo convección natural a través de un calentador con temperatura superficial de 50 °C y una superficie de 0.4 m². El coeficiente de transferencia de calor es de $11 \frac{W}{m^2-K}$
- ¿Cuál es la tasa de transferencia de calor?
- Si se emplea un ventilador para impulsar el aire a través del radiador la convección es forzada y el coeficiente de transferencia aumenta a $150 \frac{W}{m^2-K}$
- ¿Cuál es la nueva tasa de transferencia de calor?

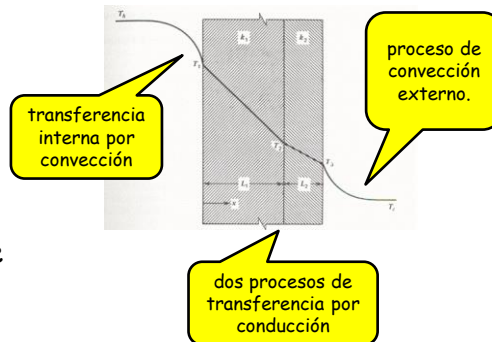
CCB-Oct-2022

28

28

Mecanismos combinados de transferencia de calor

- Conducción, convección y radiación pueden aparecer simultáneamente.
- Hogar de una caldera tiene una capa interna aislante, refuerzo externa por material empleado para soporte mecánico.



CCB-Oct-2022

29

29

Mecanismos combinados de transferencia de calor

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 1} = h_{11} A (T_h - T_1)$$

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = -k_1 A \frac{dT}{dx}$$

$$\dot{Q}_{2 \rightarrow 3} = -k_2 A \frac{dT}{dx}$$

$$\dot{Q}_{3 \rightarrow e} = h_{e3} A (T_3 - T_e)$$

En estado estable todos los flujos de calor son iguales:

$$\dot{Q} = \frac{T_h - T_e}{\frac{1}{h_{11}A} + \frac{L_1}{k_1A} + \frac{L_2}{k_2A} + \frac{1}{h_{e3}A}}$$

Ecuación terminal que solo involucra la diferencia entre la temperatura interna y la externa.

En general el flujo de calor se puede calcular como

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\sum R_T}$$

Una forma corriente de expresar la tasa de transferencia de calor cuando están presentes modos combinados es:

$$\dot{Q} = UA \Delta T$$

U : coeficiente de transferencia de calor, $\frac{W}{m^2 K}$

U y R están relacionados:

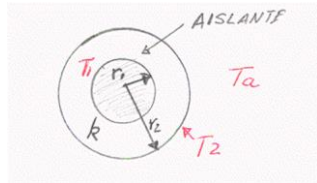
$$U = \frac{1}{A \sum R_T}$$

CCB-Oct-2022

30

30

Ejemplo 4. Alambre eléctrico revestido con un aislante



- Para un cable AWG 6 con aislante de PVC de 1,6 mm de espesor calcular el radio de aislante crítico. La temperatura ambiente es de 25 °C y el coeficiente de transferencia de calor para aire en movimiento varía entre 11,3 y 55 W/m² K.
- Cuál es la pérdida de calor por metro de cable desnudo. Asumir que el coeficiente de transferencia de calor para aire en movimiento es de 20 W/m² K.

CCB-Oct-2022

31

31

Clase 2

Contenido

1. Definir transferencia de calor por radiación.
2. Describir medición de temperatura por IR.

Temas para repasar

- Ondas electromagnéticas



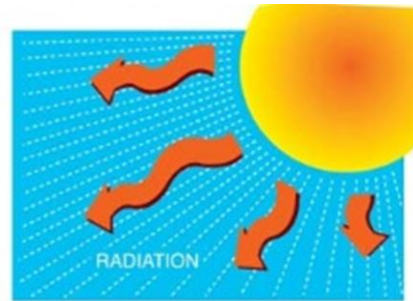
CCB-Oct-2022

32

32

Radiación

- Una partícula cargada en movimiento genera un campo electromagnético.
- Este campo se propaga hacia el exterior a la velocidad de la luz.
- Esta es la transferencia de calor por radiación
- Aplican las leyes de la óptica: reflexión, filtraje, enfoque.
- Esta radiación se puede emplear para medir temperatura.



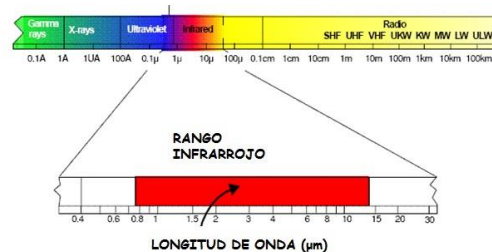
CCB-Oct-2022

33

33

Radiación

- Todo cuerpo con $T > 0 \text{ K}$ emite radiación IR proporcional a la temperatura
- Longitud de onda: $0.7 \text{ A } 1000 \text{ } \mu\text{m}$
- Rango útil para medición: $0.7 \text{ a } 14 \text{ } \mu\text{m}$
- Luz visible: $0.4 \text{ } \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.7 \text{ } \mu\text{m}$



CCB-Oct-2022

34

34

Radiación

- Intensidad de la radiación y λ dependen de temperatura
- Lámpara incandescente: $0.4 \mu\text{m} < \lambda < 0.7 \mu\text{m}$
- Cuando la temperatura disminuye longitud de onda aumenta: infrarrojo
- Cuerpo humano: radiación en el rango medio y alto infrarrojo: $5 \mu\text{m} < \lambda < 15 \mu\text{m}$
- Cero absoluto: no existe radiación electromagnética.

CCB-Oct-2022

35

35

Cuerpo negro

- Cuerpo Negro: absorbe toda la radiación incidente.
- Cuerpo Negro: a cualquier temperatura emite la cantidad máxima de radiación térmica posible.
- La radiación ideal está descrita por la ley de Planck: relación entre magnitud de la radiación a una λ particular y temperatura absoluta (K).

CCB-Oct-2022

36

36

Cuerpo negro

$$W_{b\lambda}(\lambda) = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

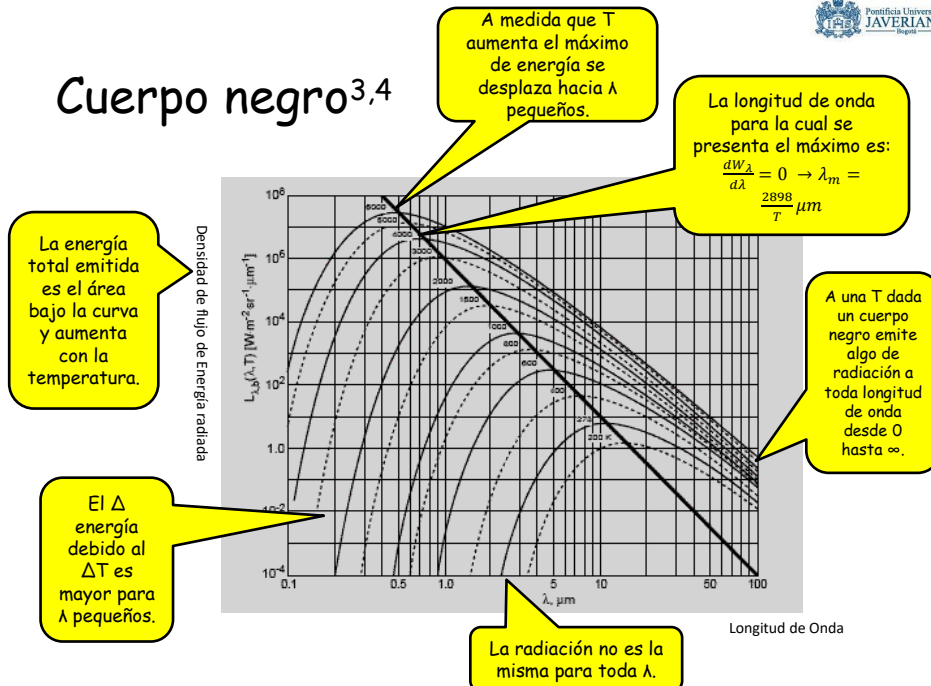
- $W_{b\lambda}$: intensidad radiante hemisférica ($\text{W}/\text{m}^2\text{-}\mu\text{m}$)
- C_1 : $5.97 \times 10^{-17} \text{ W}\cdot\text{m}^2$
- C_2 : $1.44 \times 10^{-2} \text{ m}\cdot\text{K}$
- T : K
- λ : longitud de onda μm

CCB-Oct-2022

37

37

Cuerpo negro^{3,4}



CCB-Oct-2022

38

38

Cuerpo negro

- A una T dada un cuerpo negro emite algo de radiación a toda longitud de onda desde 0 hasta ∞ .
- La radiación no es la misma para toda λ .
- A medida que T aumenta el máximo de energía se desplaza hacia λ pequeños.
- La energía total emitida es el área bajo la curva y aumenta con la temperatura.
- El Δ energía debido al ΔT es mayor para λ pequeños.

CCB-Oct-2022

39

39

Cuerpo negro

- La longitud de onda para la cual se presenta el máximo es:

$$\frac{dE_{b,\lambda}}{d\lambda} = 0 \Rightarrow \lambda_m = \frac{2898}{T} (\mu m)$$

- La energía total radiada para una temperatura T es:

$$E_b(T) = \int_0^{\infty} E_{b,\lambda}(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

CCB-Oct-2022

40

40

Radiación: Ley de Kirchhoff

- α : Indica la cantidad de radiación incidente que absorbe un cuerpo
- ρ : Reflectividad indica la cantidad de radiación incidente que refleja el cuerpo
- τ : Transparencia indica la cantidad de radiación que pasa a través del cuerpo

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

CCB-Oct-2022

41

41

Emisividad

- Cambiar una propiedad implica modificar las otras.
- Objeto sólido: $\gamma = 0$
- Toda la energía absorbida produce un aumento de temperatura y es emitida por el cuerpo:

$$A \leftrightarrow \varepsilon = 1 - \rho$$

- Un espejo es un buen reflector $\rho \rightarrow 1$, pero un mal emisor.

CCB-Oct-2022

42

42

Cuerpo negro

- La emisión que ocurre en una porción del espectro:

$$F_{\lambda_1 T - \lambda_2 T} = \frac{1}{\sigma} \left[\int_0^{\lambda_2 T} \frac{E_{b\lambda}(\lambda)}{T^5} d(\lambda T) - \int_0^{\lambda_1 T} \frac{E_{b\lambda}(\lambda)}{T^5} d(\lambda T) \right]$$

$$= F_{0-\lambda_2 T} - F_{0-\lambda_1 T}$$

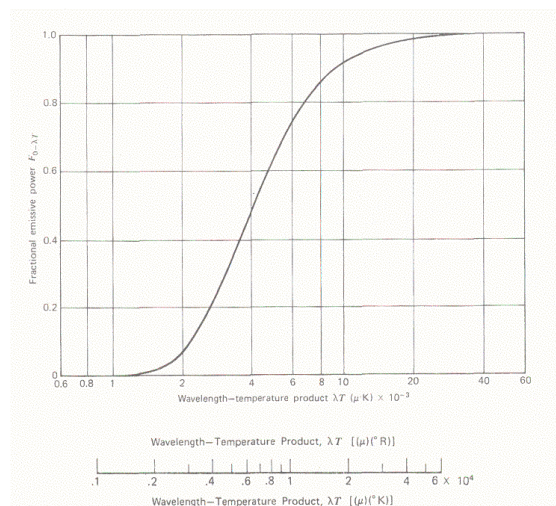
- Los valores de las fracciones F se encuentran tabulados en función del producto λT y se denominan Funciones de radiación de Planck.

CCB-Oct-2022

43

43

Cuerpo negro³



CCB-Oct-2022

44

44

Ejemplo 5⁴

Un instrumento de medición de temperatura por radiación detecta toda la emisión entre 0.65 y 4.5 μm y no es afectado por las frecuencias fuera de este rango. ¿Qué fracción de la emisión total de una superficie negra será detectada para temperaturas de la superficie emisora de 500K, 2500K y 5560K.?

Ref: Thomas E. Michels. PLANCK FUNCTIONS AND INTEGRALS;
METHODS OF COMPUTATION. N A S A TECHNICAL NOTE D 4446

CCB-Oct-2022

45

45

Emisividad

- Para un cuerpo real la desviación de la radiación del cuerpo negro se expresa en función de la emisividad.
- Los cuerpos reales emiten menos energía que el radiador ideal (cuerpo negro) a la misma temperatura.

$$\begin{aligned}\varepsilon_{\lambda,T} &= \frac{\text{Energía radiada por el cuerpo @T}}{\text{Energía radiada por el cuerpo negro @T}} \\ &= \frac{W_{\lambda,a}}{W_{\lambda,b}}\end{aligned}$$

CCB-Oct-2022

46

46

Emisividad

- $\varepsilon_{\lambda,T}$ emisividad espectral hemisférica
- Adimensional y < 1
- Es función de λ y T
- La radiación de un cuerpo real es:

$$W_{\lambda} = \frac{\varepsilon(\lambda, T) C_1}{\lambda^5 (e^{C_2/\lambda T} - 1)}$$

CCB-Oct-2022

47

47

Emisividad

- La parte no visible del espectro $\lambda \geq 0.7 \mu\text{m}$ contiene gran cantidad de energía.
- La energía total emitida por un cuerpo real es:

$$W_{ta} = C_1 \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon(\lambda; T) \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T} - 1} d\lambda$$

CCB-Oct-2022

48

48

Emisividad

- La emisividad total hemisférica:

$$\varepsilon_{t,T} = \frac{W_{ta}}{W_t}$$

- W_t es la energía total radiada por el cuerpo negro a una temperatura T.
- La energía total de un cuerpo real:

$$W_{ta} = 5.67 \times 10^{-12} \varepsilon_{t,T} T^4 \quad \left(\frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \right)$$

CCB-Oct-2022

49

49

Emisividad

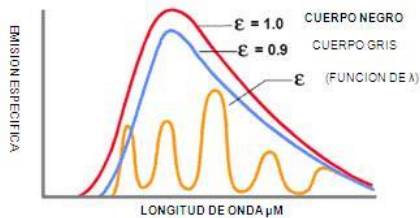
- La longitud de onda depende de la temperatura
- La magnitud de la radiación depende de la superficie
- ε : es función de la constante dieléctrica, del índice de refracción, de la temperatura y de la longitud de onda.

CCB-Oct-2022

50

50

Emisividad³



- Cuerpo gris: $\epsilon < 1$. independiente de λ
- Cuerpos no grises: la emisividad depende de la longitud de onda.

CCB-Oct-2022

51

51

Emisividad³

Un espejo es un buen reflector $\rho \rightarrow 1$, pero un mal emisor.

Material	Emissivity	Material	Emissivity
Blackbody (ideal)	1.00	Green leaves	0.88
Cavity radiator	0.99–1.00	Ice	0.96
Aluminum (anodized)	0.70	Iron or steel (rusted)	0.70
Aluminum (oxidized)	0.11	Nickel (oxidized)	0.40
Aluminum (polished)	0.05	Nickel (unoxidized)	0.04
Aluminum (rough surface)	0.06–0.07	Nichrome (80Ni-20Cr) (oxidized)	0.97
Asbestos	0.96	Nichrome (80Ni-20Cr) (polished)	0.87
Brass (dull tarnished)	0.61	Oil	0.80
Brass (polished)	0.05	Silicon	0.64
Brick	0.90	Silicone rubber	0.94
Bronze (polished)	0.10	Silver (polished)	0.02
Carbon-filled latex paint	0.96	Skin (human)	0.93–0.96
Carbon lamp black	0.96	Snow	0.85
Chromium (polished)	0.10	Soil	0.90
Copper (oxidized)	0.6–0.7	Stainless steel (buffed)	0.20
Copper (polished)	0.02	Steel (flat rough surface)	0.95–0.98
Cotton cloth	0.80	Steel (ground)	0.56
Epoxy resin	0.95	Tin plate	0.10
Glass	0.95	Water	0.96
Gold	0.02	White paper	0.92
Gold-black	0.98–0.99	Wood	0.93
Graphite	0.7–0.8	Zinc (polished)	0.04

CCB-Oct-2022

52

52

Ejemplo 6

- La energía emitida por la superficie de un metal que tiene una emisividad $\varepsilon=0,9$ es de 28 kW/m^2 . ¿Cuál es la temperatura superficial?
- Después de esta medición se verifico la emisividad del material y se encontró que es $\varepsilon = 0,75$. ¿Cuál es el error en la lectura?

CCB-Oct-2022

53

53

Cuerpos negros

- Dos cuerpos negros enfrentados, área infinita y a una distancia r :

$$q_{1-2} = \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4) F_{1-2} = \sigma A_2 (T_1^4 - T_2^4) F_{2-1}$$

- Donde A_1 es el área del cuerpo 1 iluminada por el cuerpo 2 y viceversa, y F_{12} y F_{21} son los factores de forma o factores de vista.

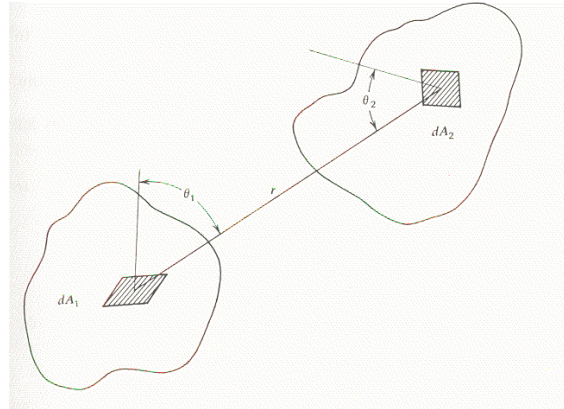
$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{\pi^2} \quad F_{2-1} = \frac{1}{A_2} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \theta_1 \cos \theta_2 dA_1 dA_2}{\pi^2}$$

CCB-Oct-2022

54

54

Cuerpos negros⁵



CCB-Oct-2022

55

55

Cuerpos grises

- Paralelos, isotérmicos e infinitos, el intercambio neto de energía:

$$q_{neto,1} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_2}\right) - 1}$$

- Cuando las áreas A_1 y A_2 enfrentadas son finitas la ecuación anterior se convierte en:

$$q_{neto,1} = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\left(\frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1}\right) + \left(\frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}\right) + \frac{1}{A_1 F_{1-2}}}$$

CCB-Oct-2022

56

56

Cuerpos grises

- El denominador representa la conexión serie de tres "resistencias" térmicas:

$$\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} = \text{"Resistencia" a la emisión del cuerpo 1}$$

$$\frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2} = \text{"Resistencia" a la emisión del cuerpo 2}$$

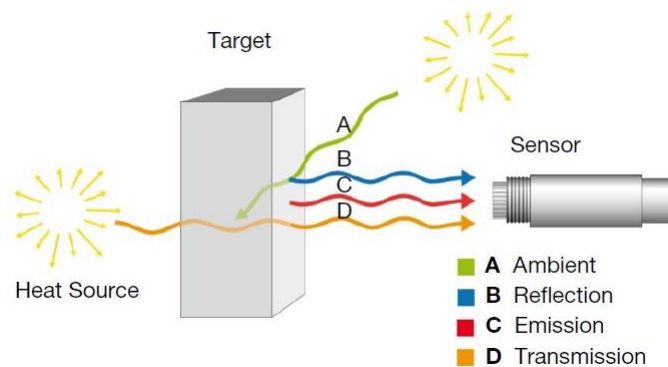
$$\frac{1}{A_1 F_{12}} = \frac{1}{A_2 F_{21}} = \text{"Resistencia" del espacio}$$

CCB-Oct-2022

57

57

Sensores Infrarrojos IR³

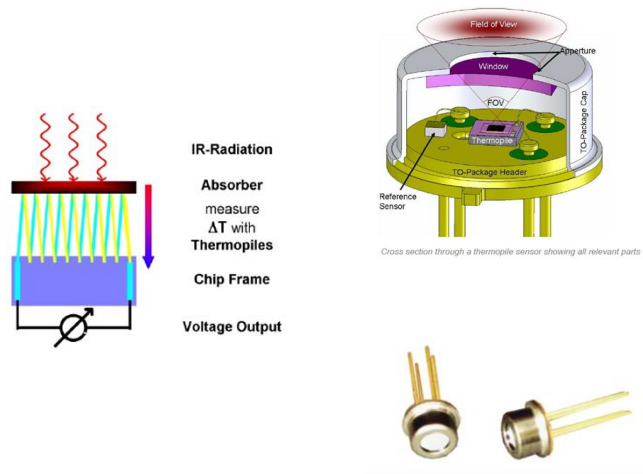


CCB-Oct-2022

58

58

Sensor IR⁵



CCB-Oct-2022

59

59

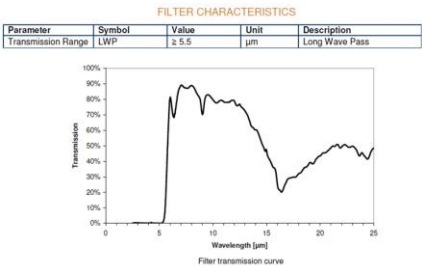
Sensor IR

The thermopile voltage V_{TP} is then determined by:

- object temperature T_{obj}
- emissivity of the object ϵ_{obj}
- ambient temperature T_{sen} (i.e. temperature of the sensor ≠ air or PCB temperature)
- instrument factor s
- correction for filter transmission δ

$$V_{TP} = s \cdot \epsilon_{obj} \cdot (T_{obj}^{4-\delta} - T_{sen}^{4-\delta})$$

Figure 1: Contributions to the thermopile voltage



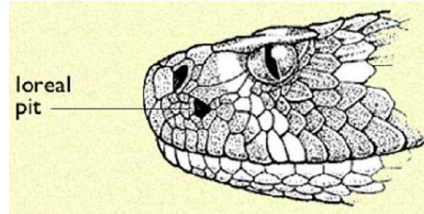
CCB-Oct-2022

60

60

Aplicaciones IR

- **Rattlesnakes** hunt by using highly developed chemosensory capabilities to locate areas of prey activity. They then remain still and ambush animals that come within striking range. The predatory strike is guided by vision and another unique sense, the ability of pit vipers (Crotalinae, including rattlesnakes) to detect **thermal infrared radiation (IR)** invisible to humans and most other animals.



Heat-sensing pits on a rattlesnake
[Victor Klemas](#)

Schraft, H.A., Bakken, G.S. & Clark, R.W. Infrared-sensing snakes select ambush orientation based on thermal backgrounds. *Sci Rep* 9, 3950 (2019).
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-40466-0>

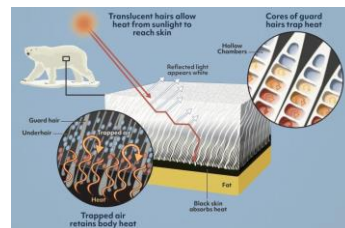
CCB-Oct-2022

61

61

Aplicaciones IR

- One of the most interesting radiative properties of **polar bear fur is that it is invisible in the infrared region.**
- From Kirchoff's law we know that the emissivity of the bear fur is equal to its absorptivity, which at about 0.95 is almost identical to that of the surrounding snow, 0.96
- This is why if the outer temperature of the bear fur is close to that of the surrounding ice and snow, the bear becomes invisible in the infrared.



<https://asknature.org/strategy/fur-absorbs-infrared-radiation-to-prevent-heat-loss/>

CCB-Oct-2022

62

62

Clase 3

Contenido

1. Definir capacidad térmica
2. Modelar un proceso de medición de temperatura.
3. Definir efecto Peltier

Temas para repasar

- Ondas electromagnéticas

CCB-Oct-2022

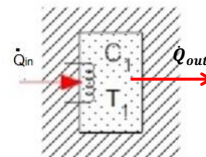
63

63

Almacenamiento de calor

Suposiciones:

- Las propiedades termodinámicas no cambian con la posición.
- No hay acumulación de producto dentro del volumen.
- Sistema se puede describir por ecuaciones diferenciales totales.
- Al sistema se le esta entregando una energía calórica \dot{Q}_{in} , por convección y el sistema entrega una energía calórica \dot{Q}_{out} al medio.
- No hay cambio de fase.



CCB-Oct-2022

64

64

Ley de conservación

- Conservación de energía:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Tasa de energia} \\ \text{entrante al sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Tasa de energia} \\ \text{saliente del sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Tasa de acumulacion} \\ \text{de energia en el sistema} \end{array} \right]$$

- En forma derivada:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C_T} [\dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{out}]$$

- Un cuerpo de masa M y calor específico c tiene una capacidad térmica:

$$C_T = Mc \left(\frac{J}{K} \right)$$

CCB-Oct-2022

65

65

Ejemplo 7

Se deben calentar 0.5 litros de agua, calor específico 4.19 kJ/(kgC), con un calentador resistivo. El calentador se conecta a la línea de alimentación AC monofásica, 120 V y maneja una corriente de 5A.

- ¿Cuánto tiempo se necesita para llevar el agua desde su temperatura inicial de 27 °C al punto de ebullición (a presión atmosférica de 1 bar)?
- ¿Cuánto cuesta este calentamiento si el precio del kW-h es de \$700.
- ¿Cuánto cuesta el mismo calentamiento con gas? (a \$211 kWh equivalente)

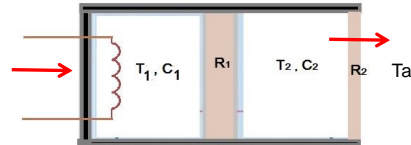
CCB-Oct-2022

66

66

Ejemplo 8¹

Un sistema térmico consiste de dos capacidades y dos resistencias. Se suministra energía calórica \dot{Q}_{in} por un calentador y se pierde hacia el ambiente. El sistema es aislado. Plantear el modelo de estado y las funciones de transferencia $\frac{T_2}{\dot{Q}_{in}}$ y $\frac{T_2}{T_a}$



CCB-Oct-2022

67

67

Ejemplo 9: Medición temperatura

- Un termómetro con capacidad térmica C_T se coloca dentro de un baño líquido con coeficiente de transferencia de calor por convección h_L . La capacidad térmica del líquido es C_L . Obtener las ecuaciones dinámicas para la temperatura del líquido y la temperatura que indica el termómetro.



CCB-Oct-2022

68

68

Ejemplo 9: Medición temperatura

- T_L : Temperatura inicial del liquido (T_L)
- T_T : Temperatura del termómetro (T_T)
- T_a : Temperatura ambiente
- r_i : radio interno
- r_e : radio externo.
- k : conductividad térmica del material
- A : Área de contacto entre el termómetro y el liquido

CCB-Oct-2022

69

69

Ejemplo 10. Disipación en dispositivos electrónicos

Las fuentes de alimentación generan grandes cantidades de calor dentro de los sistemas electrónicos, el cual debe disiparse con rapidez. Una fuente P se monta en un encerramiento metálico E de un computador y todo va instalado dentro del marco F externo. Entre E y F se coloca un disipador S de calor que disipa calor por convección a la atmósfera.

Plantear un modelo en variables de estado tomando como salida la temperatura en la fuente de potencia. La tasa de calor generada por P es constante y conocida (J/s).

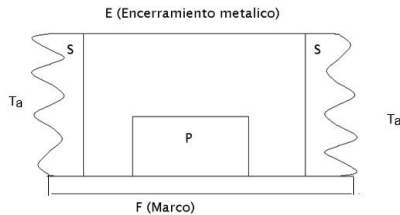
\dot{Q}_P

CCB-Oct-2022

70

70

Ejemplo 10. Disipación en dispositivos electrónicos



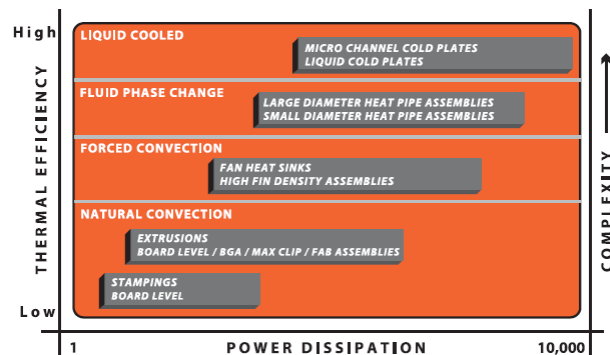
- Como P está en contacto con E hay transmisión de calor por conducción y por radiación. El marco F es aislante y T_s (temperatura del disipador) es aproximadamente constante, lo mismo que T_a

CCB-Oct-2022

71

71

Aplicación: Disipadores^{12,13}

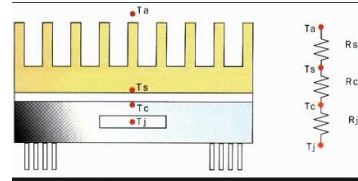


CCB-Oct-2022

72

72

Aplicación: Disipadores^{12,13}



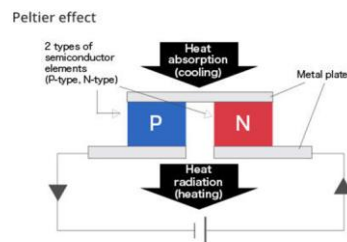
- **Aluminum:** thermal conductivity of 205W/mK, which is good (as a comparison: steel has about 50W/mK).
- **Copper:** thermal conductivity is about twice as high as aluminum - almost 400W/mK. This makes it an excellent material for heat sinks.

CCB-Oct-2022

73

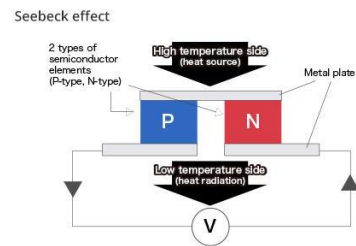
73

Efectos Peltier y Seebeck



Electric current applied to a thermoelectric circuit made of two dissimilar materials will either heat or cool the junction.

https://faculty.sites.iastate.edu/canfield/files/inline-files/Peltier_Cell_590B.pdf



Heat applied to the junction of two dissimilar conductors will create a voltage difference between the ends.

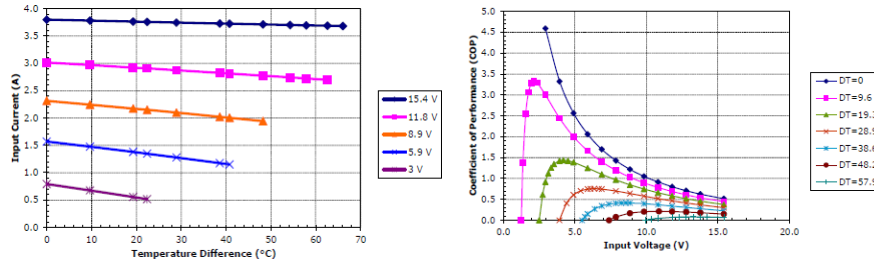
CCB-Mar-2023

74

74

Peltier modules

Coefficient of Performance (COP):
ratio of heat removed to power
input



<https://www.youtube.com/watch?v=9Cuh2msd2lo>

CCB-Mar-2023

75

75

Referencias

1. CLOSE Charles, FREDERICK Dean and NEWELL Jonathan. *Modeling and Analysis of Dynamic Systems*. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons. 2002.
2. WELTY James R. *Engineering Heat Transfer*. New York: John Wiley & Sons. 1978.
3. HORSLEY Michael. *Engineering Thermodynamics*. London: Chapman & Hall. 1993
4. Holman J.P. *Experimental Methods for Engineers*. 7th Edition. Boston: McGraw Hill. 2001
5. C. Smith. and A. Corripio. *Principles and Practice of Automatic Process Control*. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons. 1997.
6. ERONINI UMEZ Eronini. *Dinámica de sistemas y control*. México: Internacional Thomson Editores. 2001.
7. Woods, Robert L. and Kent L. Lawrence. *Modeling and simulation of dynamic systems*. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1997

CCB-Oct-2022

76

76

Referencias

8. TE CONNECTIVITY. THERMOPILE SENSOR FOR CONTACTLESS TEMPERATURE APPLICATION NOTE 10//2018
9. Introduction to Engineering Heat Transfer.
http://ocw.mit.edu/courses/aeronautics-and-astronautics/16-050-thermal-energy-fall-2002/lecture-notes/10_part3.pdf
10. RAYTEK. Principles of Non-Contact temperature Measurement. 2003
11. MURATA. Pyroelectric Infrared Sensors. Cat.No.S21E-7. 2011
12. AAVID THERMALLOY. Standard Products Catalog 2007
13. AVID THERMALLOY. "How to select a heat sink".