



Técnica nuclear por activación neutrónica para optimizar cálculos de resistencias térmicas conductivas en materiales de incrustación en transporte de calor

Carlos Macedonio Montañez Montenegro
carlos.montanez1@unmsm.edu.pe



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Unidad de Posgrado-Ciencias Físicas



Universidad Nacional del Santa
Depart. Acad. De Energía, Física y Mecánica
Escuela Profesional de Ingeniería en Energía

Contenido

I. Introducción

- a. Contexto Problema y oportunidad
- b. Reactor –neutrones-aplicaciones
- c. Resistencias conductivas y transferencia de calor

II. Fundamentos

- a. Flujo neutrónico
- b. Térmico-epitérmico -rápidos
- c. Irradiación y decaimiento
- d. Método absoluto
- e. Intercambiadores de calor
- f. Resistencias térmicas
- g. eficiencia en el transporte de calor

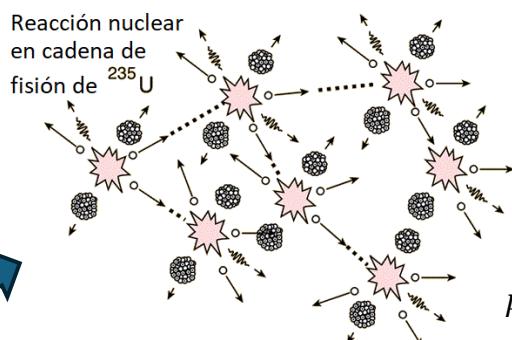
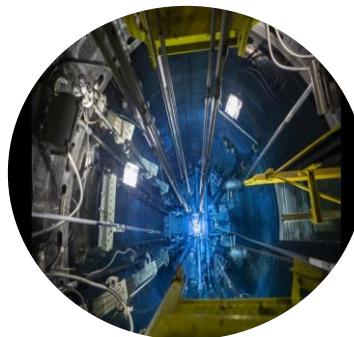
III. Métodos

Método absoluto

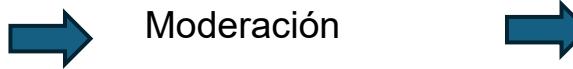
Resistencias térmicas en Transporte de calor

IV. Resultados





$$R = N \int_0^{\infty} \phi(E) \sigma(E) dE$$



$n(\text{rápidos}) \rightarrow n(\text{térmicos})$

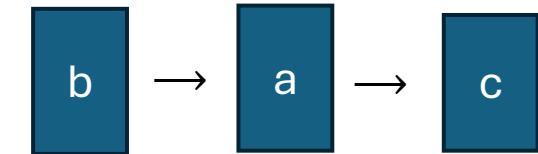
$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}}$$



$k_{eff} = \frac{n^o \text{ neutrones en una generación}}{n^o \text{ neutrones en la generación anterior}}$

Barras de control y criticidad

Alta sección eficaz



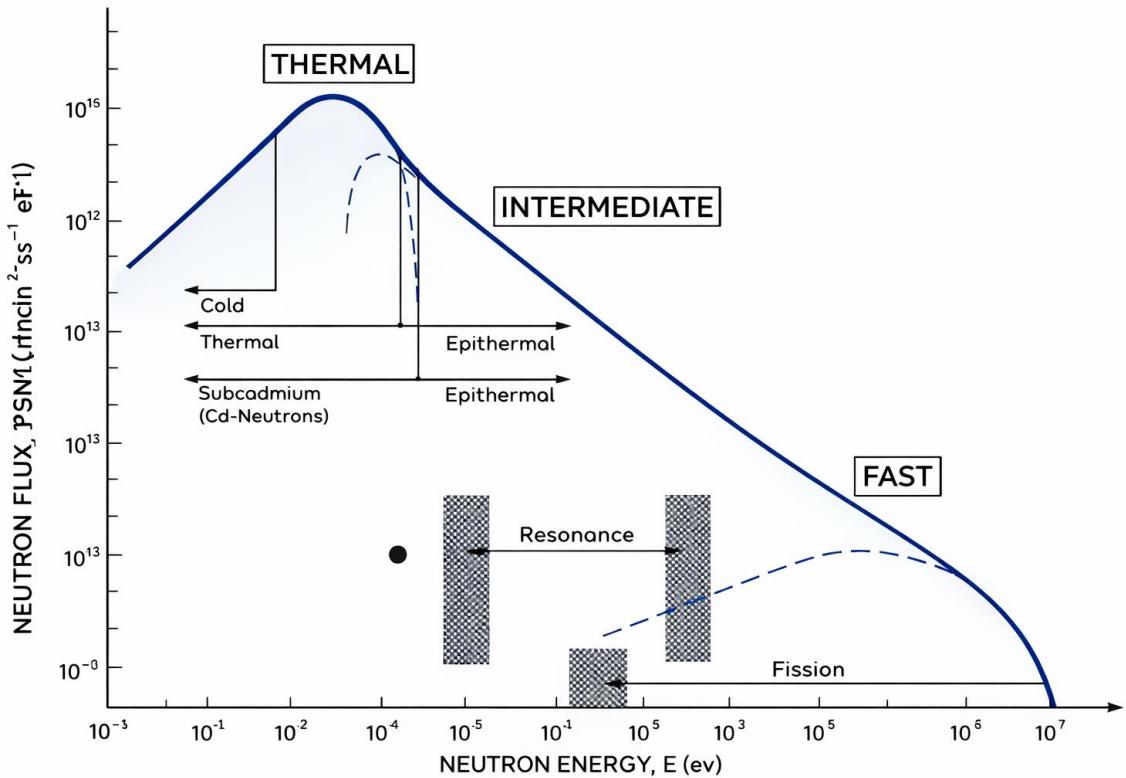
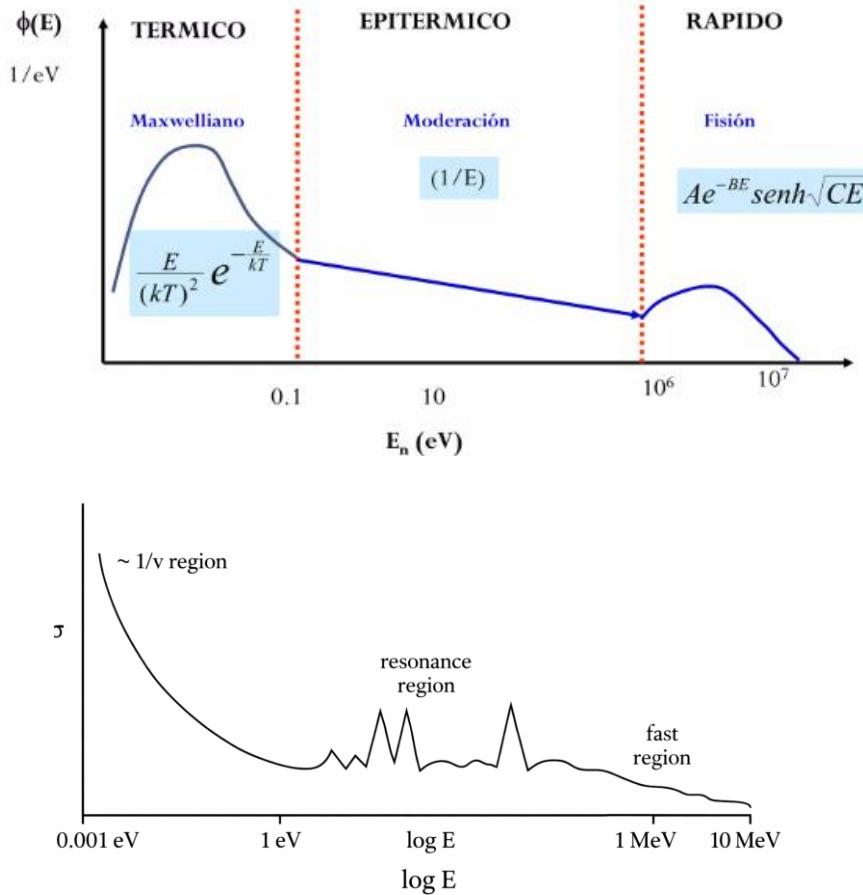
Retirar barras Absorción Criticidad

- Arranque
 - Rango fuente / conteo
 - Rango intermedio
 - Rango de potencia

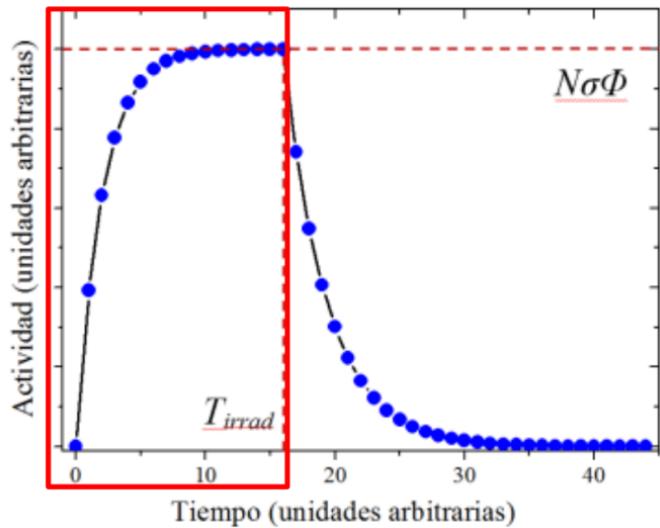
- Detección , tasa de cuentas
- Medible y controlable
- Estabilidad

Subida de potencia y estabilización termo hidráulica

I. Introducción

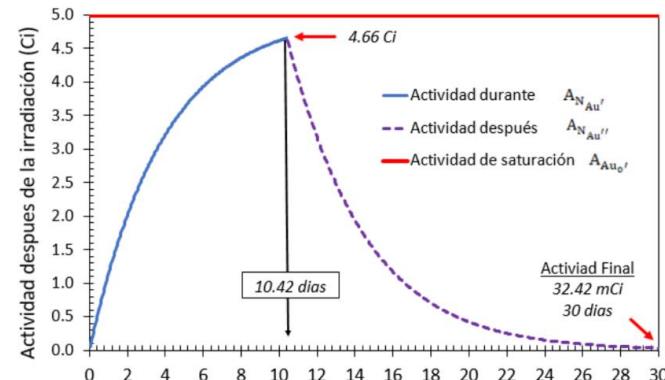


Introducción Irradiación , activación y decaimiento

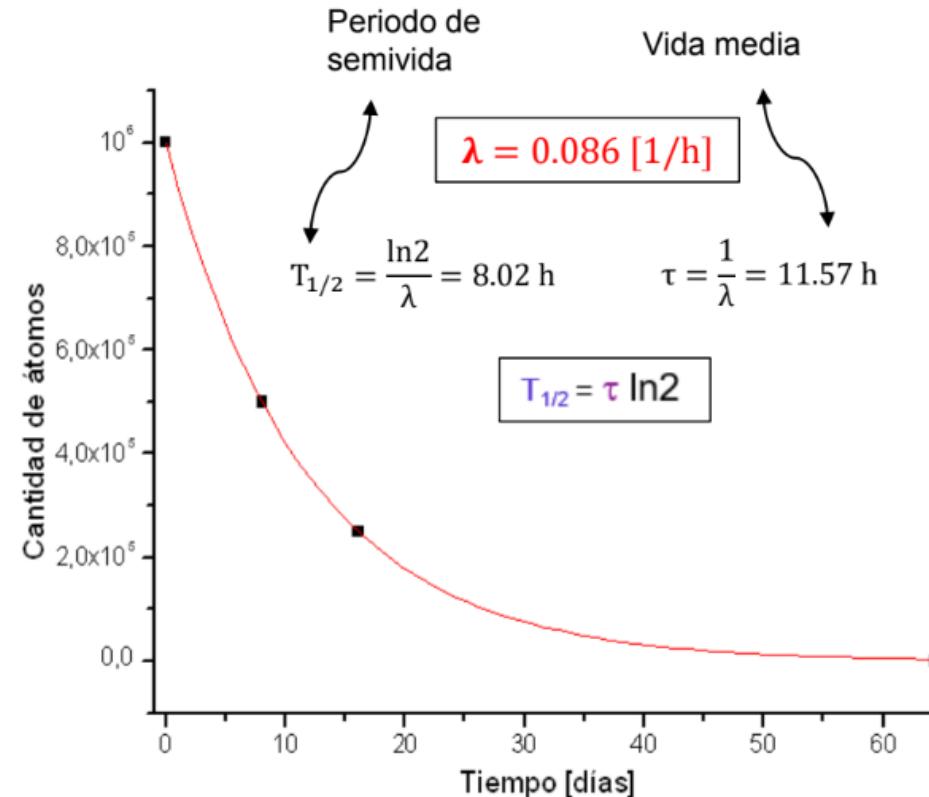


$$A_0 = N\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t_{irrad}})$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t_{cold}}$$



$$C = AI_\lambda \varepsilon \frac{1 - e^{-\lambda t_{irrad}}}{\lambda}$$



I. Metodología

Método absoluto

$$C_i = \frac{N_p}{\emptyset \sigma_i \gamma_i \epsilon (1 - e^{-\lambda t_{irr}}) e^{-\lambda t_{dec}} \frac{(1 - e^{-\lambda t_c})}{\lambda}}$$

C_i : concentración del elemento (i)

N_p : número total de cuentas netas en el pico gamma durante el tiempo de conteo

Φ : flujo neutrónico (n.cm⁻².s⁻¹)

σ_i : sección eficaz de activación (cm², barn=10⁻⁴cm²)

γ_i : rendimiento gamma por desintegración (adimensional)

ϵ : eficiencia absoluta del detector (0 a 1)

t_{irr} : tiempo de irradiación (s)

t_{dec} : tiempo de decaimiento(s)

t_c : tiempo de conteo (s)

λ : constante de decaimiento (s⁻¹)



Metodología

Símbolo	Nombre de la variable	Descripción física	Unidades SI
$r_{(in)}$	Radio interno efectivo	Radio interno hasta la superficie del depósito interno (hollín/ceniza)	m
$r_{(i)}$	Radio interno del tubo	Radio interno del tubo metálico limpio	m
$r_{(0)}$	Radio externo del tubo	Radio externo del tubo metálico	m
$r_{(out)}$	Radio externo efectivo	Radio externo hasta la superficie de la incrustación externa	m
$\delta_{(in)}$	Espesor del depósito interno	Espesor del hollín o ceniza adherida al interior del tubo	m
$\delta_{(out)}$	Espesor del depósito externo	Espesor de incrustación por mal tratamiento del agua	m
$A_{(i)}$	Área interna del tubo	Área interna del tubo metálico (sin depósitos)	m^2
$A_{(o)}$	Área externa del tubo	Área externa del tubo metálico (sin incrustaciones)	m^2
$A_{(in)}$	Área interna efectiva	Área real de convección interna con depósito	m^2
$A_{(out)}$	Área externa efectiva	Área real de convección externa con incrustación	m^2
$h_{(i)}$	Coeficiente convectivo interno	Coeficiente de convección del fluido caliente (gases)	$W/m^2 \cdot K$
$h_{(o)}$	Coeficiente convectivo externo	Coeficiente de convección del fluido frío (agua)	$W/m^2 \cdot K$
$k_{(in)}$	Conductividad del depósito interno	Conductividad térmica del hollín o ceniza	$W/m \cdot K$
$k_{(out)}$	Conductividad del depósito externo	Conductividad térmica de la incrustación externa	$W/m \cdot K$
$k_{(t)}$	Conductividad del material del tubo	Conductividad térmica del material del tubo (acero)	$W/m \cdot K$
$U_{(i)}$	Coeficiente global interno	Coeficiente global de transferencia de calor referido al área interna	$W/m^2 \cdot K$
$U_{(o)}$	Coeficiente global externo	Coeficiente global de transferencia de calor referido al área externa del tubo	$W/m^2 \cdot K$
$U_{(out)}$	Coeficiente global externo efectivo	Coeficiente global referido al área externa efectiva	$W/m^2 \cdot K$
Q	Calor transferido	Tasa de transferencia de calor en el intercambiador	W
	Diferencia media logarítmica de temperatura	Fuerza impulsora térmica promedio	K
$\Delta T_{(LM)}$	Longitud del tubo	Longitud efectiva de intercambio de calor	m
$\dot{m}_{(g)}$	Flujo másico de gases	Flujo másico de gases de combustión	kg/s
$\dot{m}_{(w)}$	Flujo másico de agua	Flujo másico de agua del lado caraza	kg/s



I. Metodología

Fase experimental



Fig.1 Depósitos de hollín



Fig.2. Bomba de opacímetro
 (indicador índice de Bacharach)

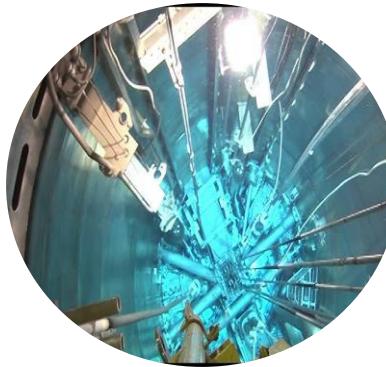


Fig.3. Reactor nuclear

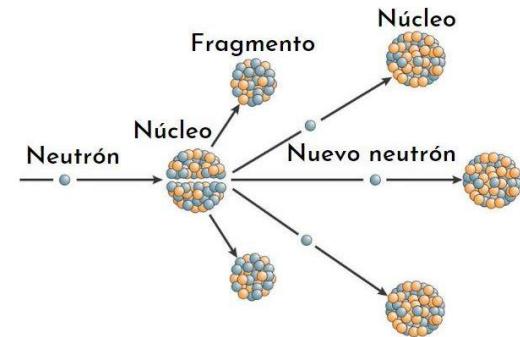


Fig.4. Fisión nuclear , flujo neutrónico



Fig.5. Detector HP Ge

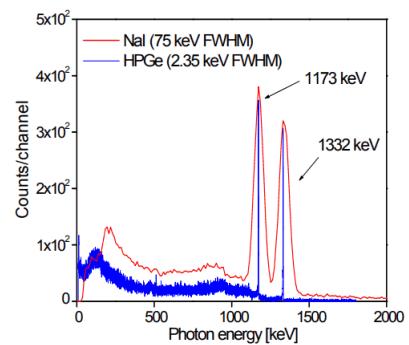


Fig. 6. Detección de multielementos



Fig.7. Interc. De Calor

Modelo de ecuación de Siegert extendida

$$n_{comb}(\%) = f(\text{Siegert} - \sum_1^2 (\text{multielementos}))$$

Fig.8. Integración de los multielementos al cálculo de eficiencia de combustión

I. Metodología

Fase experimental

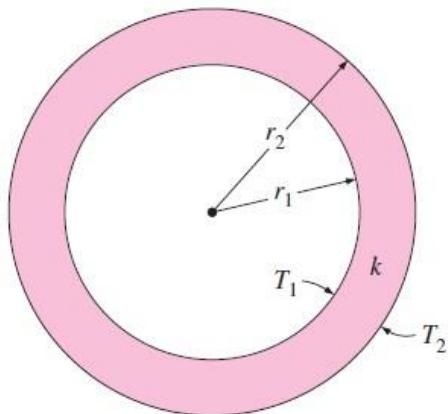


Fig .9 Configuración para conducción del calor en superficies cilíndricas

k_x : Conductividad de hollín y cenizas

k_o : Conductividad del tubo

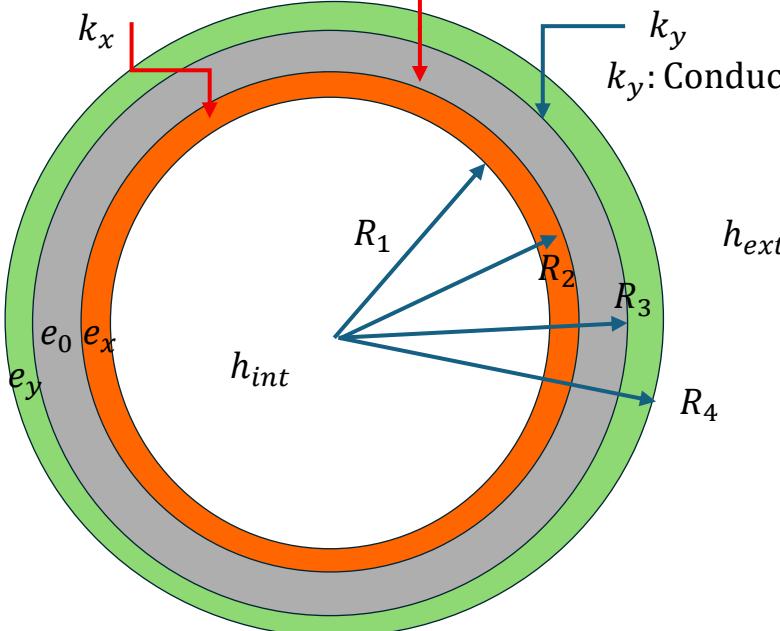


Fig. 10 . Configuración con depósitos de lado interno(gases de combustión) y lado externo(incrustaciones de lado externo)

e_x : Espesor de hollín y cenizas

e_o : Espesor de tubería (cédula)

e_y : Espesor de depositos e incrustaciones de lado del agua



Fig.11 Vista de intercambiador de calor de tubo y coraza(1-2)

I. Metodología

Fase experimental

Cuentas netas en el pico

$$C_{net} = A_0 I_\gamma \varepsilon E_\gamma \left(\frac{1 - e^{-\lambda t_c}}{\lambda} \right)$$

Actividad al inicio del conteo

$$A_0 = \frac{C_{net} * \lambda}{I_\gamma \varepsilon (E_\gamma) (1 - e^{-\lambda t_c})}$$

Método absoluto para concentración(sin comparador)

Núcleos blanco

$$N = \frac{m_E}{M_E} N_A$$

Masa del elemento E, en la muestra.

$$m_E = \frac{A_0 M_E}{N_A \phi \sigma (1 - e^{-\lambda t_i}) e^{-\lambda t_d}}$$

Mezclas para conductividad de sólidos sin poros(k_{solid}), para depósitos heterogéneos

La conductividad térmica del depósito sólido se evaluó mediante una media geométrica ponderada por fracciones volumétricas, expresada en su forma exponencial natural como

$$k_{solid} = \exp \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{m_i}{\rho_i}}{\sum_j \frac{m_j}{\rho_j}} \right) \ln(k_i) \right]$$

donde las fracciones volumétricas se obtienen a partir de las masas de compuestos determinadas por análisis por activación neutrónica mediante el método absoluto.



I. Resultados

Coeficiente global de transporte de calor para el área externa al tubo

$$\frac{1}{U_0 A_0} = R_{total} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{U_0} = A_0 R_{total} \quad \rightarrow \quad A_0 = 2\pi r_0 L$$

$$\frac{1}{U_0} = \frac{r_0}{r_x} \frac{1}{h_i} + \frac{r_0}{k_x} \ln\left(\frac{r_i}{r_x}\right) + \frac{r_0}{k_t} \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) + \frac{r_0}{k_y} \ln\left(\frac{r_y}{r_o}\right) + \frac{r_0}{r_y} \frac{1}{h_0}$$

$$k_{solid} = \exp \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{m_i}{\rho_i}}{\sum_j \frac{m_j}{\rho_j}} \right) \ln(k_i) \right]$$

Coeficiente global de transporte de calor para el área interna al tubo

$$\frac{1}{U_{int}} = \frac{1}{h_i} + \frac{r_x}{k_x} \ln\left(\frac{r_i}{r_x}\right) + \frac{r_x}{k_t} \ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right) + \frac{r_x}{k_y} \ln\left(\frac{r_y}{r_o}\right) + \frac{r_x}{r_y} \frac{1}{h_0}$$

$$\rightarrow Q = \frac{F_T \Delta T_{ml}}{\frac{1}{h_i A_{in}} + \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_x}\right)}{2\pi k_x L} + \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}{2\pi k_t L} + \frac{\ln\left(\frac{r_y}{r_o}\right)}{2\pi k_y L} + \frac{1}{h_i A_{out}}}$$

Obtención de muestras de incrustaciones



Fig.12. Intercambiador de tubos concéntricos

$$Q = \frac{F_T \Delta T_{ml}}{\frac{1}{h_i A_{in}} + \frac{\ln\left(\frac{r_i}{r_x}\right)}{2\pi k_x L} + \frac{\ln\left(\frac{r_0}{r_i}\right)}{2\pi k_t L} + \frac{\ln\left(\frac{r_y}{r_0}\right)}{2\pi k_y L} + \frac{1}{h_o A_{out}}}$$

Depósitos e incrustaciones



Fig.13. Intercambiador de placas



Fig.14. Intercambiador de tubo y coraza

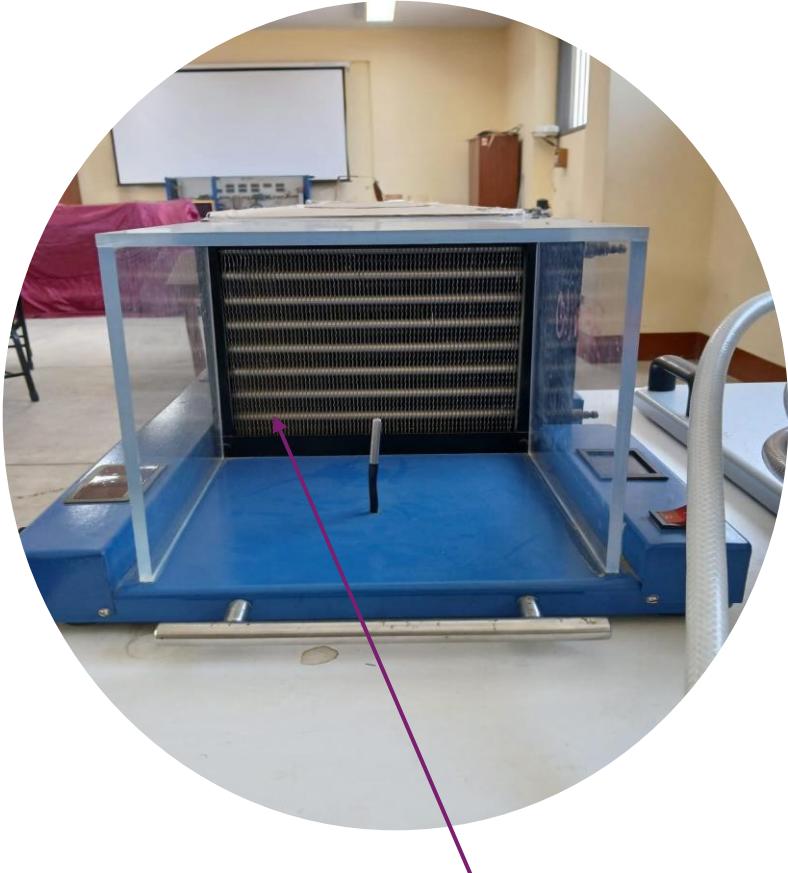


Fig.15 Depósitos e incrustaciones internas en Tubos horizontales
De intercambiador de calor de flujo cruzado



Fig.16 Depósitos en línea de retorno de condensados

Material de incrustaciones en unidad de evaporación (calderín)



Fig.17. Calderín



Fig.18. Panel de control y conectores de fluidos



Fig.19 Intercambiador de calor tipo chaqueta



Fig.20 Modulo de control



$$k_{solid} = \exp \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\frac{m_i}{\rho_i}}{\sum_j \frac{m_j}{\rho_j}} \right) \ln(k_i) \right]$$

Fig 21. Cabezal de intercamb. De tubo y coraza



Fig.22 Acondicionamiento o de entrada



Fig.23 Banco de pruebas

Tabla 1. Flujo de gases constante y flujo masico de agua variable

m(gas) (kg/s)	m(agua) (kg/s)	hi (W/m²·K)	ho (W/m²·K)	Re(gas)	UA (W/K)	Uo (W/m²·K)	Q (kW)	Tg(out)(°C)	Tw(out) (°C)
0.4	0.5	81.9775398	861.5237662	13839.56027	931.5121925	52.01921754	49.44938216	37.26337582	41.65999146
0.4	0.571428571	81.9775398	958.6516412	13839.56027	937.2458685	52.33940802	49.78536553	36.4634154	38.84315543
0.4	0.642857143	81.9775398	1053.37459	13839.56027	941.8700123	52.59763797	50.04428928	35.84693029	36.62360579
0.4	0.714285714	81.9775398	1146.011117	13839.56027	945.6870308	52.81079494	50.24997326	35.35720653	34.83013458
0.4	0.785714286	81.9775398	1236.809973	13839.56027	948.8972187	52.99006416	50.41734953	34.95869159	33.35108511
0.4	0.857142857	81.9775398	1325.970394	13839.56027	951.6388048	53.14316485	50.55624684	34.62798371	32.11059521
0.4	0.928571429	81.9775398	1413.655256	13839.56027	954.0104397	53.27560605	50.67339637	34.34905627	31.05534687
0.4	1	81.9775398	1500	13839.56027	956.0845212	53.39143072	50.77356178	34.11056719	30.14678512
0.4	1.071428571	81.9775398	1585.118876	13839.56027	957.9154503	53.49367683	50.86020879	33.90426479	29.35634646
0.4	1.142857143	81.9775398	1669.109452	13839.56027	959.5449402	53.58467381	50.93591889	33.72400264	28.66242321
0.4	1.214285714	81.9775398	1752.055937	13839.56027	961.0055415	53.66623939	51.00265448	33.56510837	28.04836987
0.4	1.285714286	81.9775398	1834.031686	13839.56027	962.3230476	53.73981399	51.06193399	33.42396668	27.50115731
0.4	1.357142857	81.9775398	1915.101124	13839.56027	963.5181763	53.80655457	51.11495079	33.29773622	27.01044209
0.4	1.428571429	81.9775398	1995.321247	13839.56027	964.6077704	53.86740168	51.16265579	33.18415287	26.56790886
0.4	1.5	81.9775398	2074.742801	13839.56027	965.6056706	53.92312827	51.20581614	33.08139014	26.16679683



Conclusiones

La activación neutrónica revela los múltiples elementos que constituyen las muestras o blancos a irradiar, su ventaja radica en que no deteriora la muestra y es altamente sensible para detección de elementos como metales.

Para activar los multielementos presentes en los blancos como depósitos e incrustaciones , se requiere un flujo neutrónico térmicos suficiente para irradiar, activar y medir su actividad.

Las variables principales del AAN para detección se basa en la sección eficaz de los elementos detectables , sección eficaz, tiempo de vida media, la espectrometría debe asegurar un tiempo de detección y formación adecuado de fotópicos para identificar la energía de cada elemento detectado.

Los depósitos de la parte interna de los tubos presentan características de mayor índice de concentración de metales , al provenir de la combustión de petróleos pesados, caso de petróleos residuales, puede incrementar la conductividad térmica k_x .

Los depósitos e incrustaciones del lado externo del agua, se produce por mala calidad de tratamiento de agua y su composición tiende a concentrar, carbonatos de calcio, sales de magnesio, sulfatos y otras sales minerales por lo que su conductividad térmica se pronostica de menor valor.



Muchas gracias

