ANEXO 2.- FUENTES DE GENERACIÓN DE CALOR

La generación de calor en la superficie o en el interior de una sustancia es consecuencia, en general, de una serie de transformaciones fisicoquímicas de la materia, existiendo una serie de fenómenos que cubren un amplio campo de aplicaciones industriales, tanto en régimen estacionario como transitorio, como:

- Generación de calor por interacciones de la materia asociadas a fenómenos nucleares de fisión o fusión, así como otros fenómenos asociados a partículas o radiaciones, generados por estas interacciones.

- Generación de calor en la materia asociada a la presencia de campos electromagnéticos

- Generación de calor asociada a reacciones químicas

- Generación de calor asociada a fenómenos mecánicos, como la fricción o choques

En lo que sigue haremos una pequeña reseña para entender la naturaleza de estos focos generadores de calor y su distribución espacial, para poder aplicar las ecuaciones de transmisión de calor.

GENERACIÓN DE CALOR POR FENÓMENOS DE FISIÓN NUCLEAR.- Son consecuencia del comportamiento e interacción de los neutrones con los distintos isótopos de átomos pesados de importancia industrial, que a nivel de reactores nucleares, son los de uranio, que existe en la naturaleza con un valor medio de composición isotópica U^{234}(0,0058%), U^{235}(0,72%), U^{238}(99,274%), y los de torio, cuyo isótopo más abundante es el Th^{232} con trazas de otros isótopos.

El efecto de los choques entre los neutrones y la materia dependen de la energía de los neutrones y de la naturaleza de la materia.

Los isótopos fisibles son aquellos átomos que se fisionan por neutrones de cualquier energía; en los reactores nucleares son de importancia primordial los isótopos Pu^{239}, U^{235}, y U^{92}.

Los isótopos fisionables son aquellos átomos que se fisionan con neutrones de energía superior a 1 MeV, siendo los más importantes el U^{238} y el Th^{232}.

La energía desprendida por cada fisión es del orden de 200 MeV, que comparada con los 4 eV por átomo de la reacción química de combustión, $C + O_2 = CO_2$, proporciona una idea de la densidad energética de la energía nuclear de fisión, frente a las reacciones químicas muy exotérmicas.

Los choques de neutrones con la materia pueden ser de muchas formas, desde los de tipo elástico idénticos al choque de bolas de billar, hasta los de adsorción de neutrones por los núcleos, pro-

duciendo nuevos isótopos; de entre estos últimos son importantes la formación de Pu^{239} y U^{233}, por captura de neutrones en la zona de energía de 0,1 MeV.

$$U_{92}^{238} + n_0^1 \rightarrow U_{92}^{239} + \gamma \rightarrow Np_{93}^{239} + \beta \rightarrow Pu_{94}^{239} + \beta$$

$$Th_{90}^{232} + n_0^1 \rightarrow Th_{90}^{233} + \gamma \rightarrow Pa_{91}^{233} + \beta \rightarrow U_{92}^{233} + \beta$$

Los isótopos que originan isótopos fisibles por captura de neutrones se denominan fértiles; los elementos U^{238} y Th^{232} son fértiles y fisionables y su comportamiento, para fisión o captura, viene determinada por las secciones eficaces correspondientes a una determinada energía de los neutrones. Los reactores nucleares comerciales de uranio, producen isótopos de Pu en mayor o menor proporción.

Los reactores regeneradores, producen isótopos fisibles por captura de neutrones, que es superior a la de isótopos fisibles y fisionables consumidos; un reactor de este tipo produce no sólo energía, sino también combustible fisible para alimentar otros reactores.

Tabla B.1.- Valores medios de parámetros nucleares en reactores térmicos T y rápidos R

Isótopo	U_{92}^{238}		U_{92}^{235}		Pu_{94}^{239}		U_{92}^{233}	
Reactor	*T*	*R*	*T*	*R*	*T*	*R*	*T*	*R*
Parámetro	*T*	*R*	*T*	*R*	*T*	*R*	*T*	*R*
σ_t	-	*0,11*	*580*	*1,78*	*740*	*1,91*	*530*	*2,69*
ν	-	*2,61*	*2,42*	*22,51*	*2,9*	*2,96*	*22,5*	*2,57*
α	-	*1,44*	*0,172*	*0,24*	*0,365*	*0,231*	*0,093*	*0,108*
$\eta-1$	-	*0,07*	*1,06*	*1,01*	*1,12*	*1,4*	*1,28*	*11,32*

σ_t *es la sección eficaz microscópica de fisión, en barnios*

ν *es el n° de neutrones producidos por cada neutrón absorbido en una reacción de fisión*

α *es la relación de secciones eficaces microscópicas de captura / fisión*

η *es el número de neutrones producidos por fisión por cada neutrón absorbido en el combustible*

La energía generada en un reactor nuclear es de tipo térmico; el combustible se encuentra contenido en forma de barras o de placas, en vainas construidas con materiales poco absorbentes de neutrones; como éstos producen fisiones, la distribución de focos térmicos dentro del combustible es la misma que la del flujo neutrónico en las barras o en las placas.

La velocidad de generación de calor E viene dada por la velocidad de los procesos de fisión que tienen lugar en cada posición del combustible, en la forma:

$$E = 200\ \Omega_f\ \Phi\ \left(\frac{MeV}{cm^3\,seg}\right) = 200\left(\frac{MeV}{fisión}\right)\sigma_f\ (cm^2)\,N_f\left(\frac{núcleos}{cm^3}\right)\Phi\left(\frac{n_0^1}{cm^2\,seg}\right)$$

en la que:
- Ω_f *es la sección macroscópica de fisión, de la forma,* $\Omega_f = \sigma_f N_f$
- σ_f *es la sección microscópica de fisión*
- N_f *es el número de núcleos fisibles* $/ cm^3$
- Φ *es el flujo neutrónico* $\frac{n_0^1}{cm^2\,seg}$ *en el elemento de volumen considerado*

La variación del calor generado E es consecuencia de la relación existente entre la sección microscópica de fusión σ_f y la energía de los neutrones y la modificación del flujo neutrónico, tanto en su composición de neutrones con mayor o menor energía (por moderación en el medio), como en las capturas de neutrones productivas y no productivas en los materiales del reactor.

La generación de calor por fisiones es prácticamente instantánea extendiéndose desde 10^{-14} seg para los neutrones producidos, hasta los 10^{-7} seg de las radiaciones γ que acompañan al proceso de fisión. La distribución de energía asignada por término medio a los distintos componentes de la fisión viene dada en la Tabla B.2.

En un reactor nuclear, la energía generada por fisiones es del orden del 90%÷ 98% de la energía total, dependiendo del tipo de reactor y de la disposición de los materiales estructurales, refrigerantes y elementos combustibles; el resto de la energía se produce por los campos de radiaciones y partículas, así como por la moderación de neutrones en el refrigerante y materiales.

En los reactores rápidos la moderación tiene que ser mínima para obtener un espectro de neutrones duro que favorezca las capturas en U^{238} para producir Pu^{239}.

Las partículas y radiaciones, en sus choques, producen $\begin{cases} \textit{transformaciones fisicoquímicas} \\ \textit{desprendimiento de calor} \end{cases}$

Las partículas afectan a las propiedades de los materiales, mientras que el calor generado puede alterar las dimensiones o producir tensiones térmicas excesivas, por lo que los aspectos térmicos de un reactor nuclear no quedan circunscritos únicamente a los elementos combustibles, sino que se extienden al comportamiento de los materiales bajo irradiación, lo cual exige el conocimiento

de: $\begin{cases} \textit{- Los flujos de partículas} \\ \textit{- Sus interacciones dentro de los materiales} \\ \textit{- Su absorción en función del espesor, naturaleza y geometría} \end{cases}$

Tabla B.2.- Energía asignada a algunos componentes de fisión

Energía cinética de fragmentos de fisión	*165 MeV*
Radiaciones γ instantáneas	*7 MeV*
Partículas β	*7 MeV*
Energía cinética de los neutrones	*5 MeV*
Radiaciones γ y de productos de fisión	*6 MeV*
Neutrinos	*10 MeV*
Total	*200 MeV*

Las consideraciones anteriores se pueden aplicar a los problemas térmicos relacionados con el tratamiento de combustibles irradiados, donde se genera calor por las especies radiactivas en transformación continua, así como a las aplicaciones de isótopos radiactivos, especialmente las relacionadas con la generación de energía en cantidades no muy elevadas pero de larga duración

Por lo que respecta a la conductividad térmica k, del combustible y de la vaina, durante la combustión en el reactor hay que tener en cuenta que en una barra combustible de pastillas de óxi-

do de uranio UO_2, el material se puede resquebrajar e hinchar por efecto de los gases de fisión, además de los efectos de los productos de fisión y su comportamiento con la vaina; el resultado es una pastilla deformada con puntos de contacto sobre la vaina llena de grietas, que dependen de la fabricación del combustible y de la forma de quemado en el reactor.

Tabla B.3.- Propiedades de combustibles nucleares y vainas

Material		*Densidad* ρ *(gr/cm³)*	*Calor específico* c_p *(Kcal/kg°C)*	*Cond. térmica* k *(Kcal/hm°C)*	*Temp. Fusión °C*
Plutonio	α *(T < 100°C)*	*19,7*		*4,41 (0-100°C)*	
	β *(117°C÷ 200°C)*	*17,7*		*9,02 (0-100°C)*	
	γ *(200°C÷ 300°C)*	*17,14*		*10,9 (0,100°C)*	
	δ *(300°C÷ 475°C)*	*16,02*		*13,9 (0-100°C)*	
	ε *(475°C÷ 637°C)*	*13,3*		*13,6 (0-100°C)*	*637*
Torio	α *(T < 1380°C)*				
	β *(1380÷1690°C)*	*11,6*	*0,028*	*38,1 (500°C)*	*1690*
Uranio	α *(T < 626°C)*	*19,07*	*0,032*	*26,6 (500°C)*	
	β *(662÷769°C)*	*18,1*	*0,043*	*38 (500°C)*	
	γ *(769÷1128°C)*	*18*			
UO_2		*10,97*	*0,075 (100°C)* *0,11 (2300°C)*	*3,75 (500°C)* *1,48 (2000°C)*	*2750*
UO_2 (80%) + PuO_2 (20%)		*11,08*	*0,075 (100°C)* *0,11 (2300°C)*	*2,96 (500°C)* *1,48 (200°C)*	*2780*
ThO_2		*10,01*	*0,054 (25°C)* *0,082 (2000°C)*	*3,96 (500°C)* *2,40 (1000°C)*	*3300*
Zircaloy– 2		*6,57*	*0,072 (100°C)* *0,085 (450°C)*	*10,19 (100°C)* *11,40 (450°C)*	*1848*
Acero inoxidable		*8,03*	*0,12 (0-100°C)*	*12,70 (25°C)* *18 (500°C)*	*1400*

La importancia del comportamiento del combustible en el reactor es fundamental dado que las barras deben permanecer tres años en funcionamiento, además de las paradas, puestas en marcha y variaciones de potencia.

La variación de la conductividad térmica con la temperatura desciende de 6 a 3 Kcal/hm²ºC entre 20 y 1400ºC respectivamente, en forma no lineal, aumentando a partir de esta temperatura; por lo tanto, si la expresión de la conductividad térmica con la temperatura es no lineal, la ecuación diferencial de la distribución de temperaturas será también no lineal y la solución tiene que determinarse por métodos numéricos, perdiéndose las propiedades de superposición, que son la base y fundamento de la generalidad de las ecuaciones de transmisión de calor y de otros campos análogos; sin embargo se puede obtener una solución muy razonable considerando un valor medio de k .

GENERACIÓN DE CALOR POR FENÓMENOS ELÉCTRICOS Y MAGNÉTICOS.- En presencia de campos eléctricos y magnéticos, la materia genera calor por el paso de una corriente eléctrica a través de los circuitos que se forman entre los manantiales y sumideros de los campos citados. Desde un punto de vista térmico, es necesario conocer la distribución de los focos térmicos con objeto de resolver las ecuaciones de distribución de temperatura para aplicar las condiciones de

contorno en cada caso particular; si los focos térmicos se generan por corrientes eléctricas, es necesario conocer estas últimas.

La generación de calor por fenómenos eléctricos y magnéticos es en muchos casos indeseable, como sucede con las pérdidas en los conductores que transportan energía eléctrica o en las máquinas eléctricas.

En otras muchas aplicaciones, la energía eléctrica se transforma en energía térmica, que se aprovecha por las ventajas que presenta frente a otros métodos de calentamiento, como: inercia térmica mínima, limpieza, fácil control, ausencia de llamas, uniformidad, calentamiento local, utilización directa de las redes de energía, procesos de calentamiento independientes, etc.

En el marco de las aplicaciones es frecuente distinguir la generación de calor por calentamiento $\begin{cases} \text{- } \textit{por resistencias eléctricas} \\ \text{- } \textit{por fenómenos de inducción} \\ \text{- } \textit{dieléctrico} \\ \text{- } \textit{por arco eléctrico} \end{cases}$

a) Resistencias eléctricas.- El paso de una corriente eléctrica continua a través de conductores metálicos y no metálicos, genera calor E en la forma:

$E = R\, I^2$, *con:* E *en W,* R *en* Ω, I *en A*

La generación de calor es uniforme en toda la masa del conductor, siempre y cuando R e I sean constantes; en el caso de corrientes alternas, la generación de calor es uniforme para frecuencias inferiores a 1000 ciclos/segundo.

En corriente trifásica: $Q = 1{,}737\, R\, I \cos \varphi$ *, en la que* $\cos \varphi$ *es el factor de potencia*

En corriente alterna, para lograr un valor máximo de $\cos \varphi$ *se deben evitar las inductancias y fases desequilibradas*

La transmisión de calor de la resistencia se puede hacer por convección, conducción y radiación. Las limitaciones de las resistencias eléctricas diseñadas para funcionar en estado sólido son función de la temperatura de fusión del material de la resistencia y del medio ambiente, que puede atacar la resistencia produciendo alteraciones por corrosión, seguidas de posibles cambios dimensionales o estructurales del material. Los focos térmicos se distribuyen uniformemente en la masa del conductor y la distribución de temperaturas es, como sabemos, una parábola, cuyo máximo se encuentra en el eje de simetría del conductor.

Si la resistencia es función de la temperatura T, como sucede en la mayoría de los materiales, la generación de calor no es uniforme y las distintas partes de la resistencias se comportan de forma diferente: $\begin{cases} \text{- } \textit{Si la resistencia aumenta con la temperatura se genera más calor en el centro} \\ \text{- } \textit{Si la resistencia disminuye con la temperatura sucede lo contrario} \end{cases}$

La distribución de la corriente tiende a oponerse a este fenómeno alcanzándose una situación de equilibrio dinámico entre corriente, temperatura y eliminación del calor generado, siendo el fenómeno tanto más acusado, cuanto mayor es la sección de las resistencias y mayor la variación de R con T.

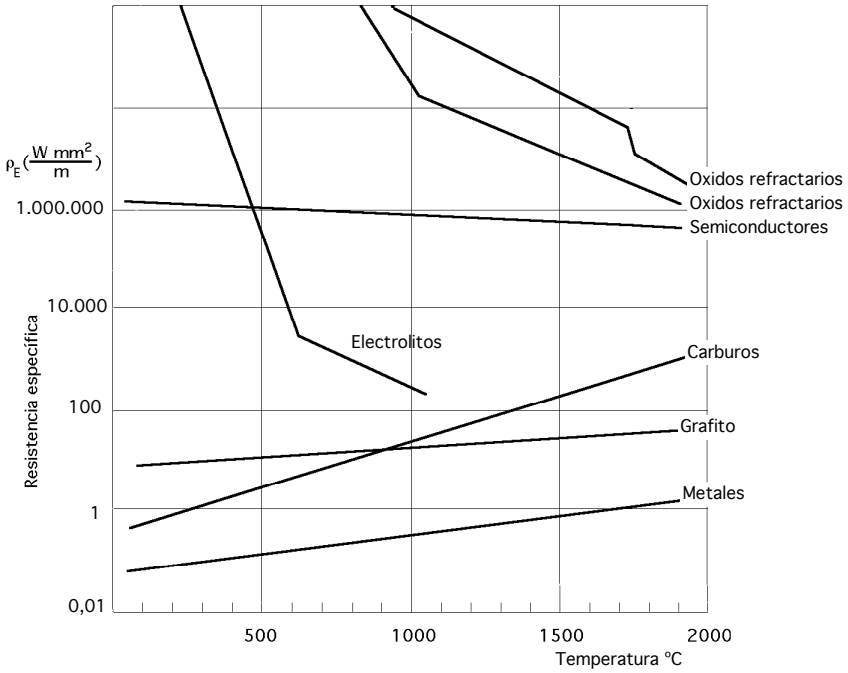


Fig B.1.- Resistencias específicas de algunos materiales

Tabla B.4.- Resistencias específicas de algunos materiales

Material	*Composición*	$T_{máx}$ *(ºC)*	$\rho_E\ (\frac{W\ mm^2}{m})$
Kanthal A	*Cr(23%), Al(6,2%), Co(1,9%), Fe(68,5%)*	*1300*	*1,39*
Nicrome V	*Ni(80%), Cr(20%)*	*1175*	*1,15*
Nicrome	*Ni(60%), Cr(16%), Fe(24%)*	*950*	*1,1*
Mangonic 3	*Ni(97%), Mn(3%)*	*750*	*0,14*
Platino		*1400*	*0,5*
Platino-Rodio	*Pt(87%), Rh(13%)*	*1540*	*0,5*
Molibdeno		*1600-2200*	*0,55*
Tántalo		*2000*	*0,6*
Carburo de silicio (SiC)		*1400-1600*	*1,4*
Carbón, grafito		*2500-3000* *2400*	*9,5* *10*

En los hornos, las resistencias eléctricas se instalan acoplándose a la forma de los mismos, para así obtener los flujos térmicos deseados, siendo la radiación el mecanismo principal de transmisión de calor a temperaturas elevadas.

Las lámparas de rayos infrarrojos funcionan a temperaturas de 2000ºC÷ 3000ºC, y dirigen el calor radiante hacia la superficie del cuerpo receptor, mediante pantallas parabólicas; este sistema es de uso frecuente en el calentamiento de alimentos, secado de pinturas, calentamiento de láminas

de distintos materiales, etc.

Las resistencias se disponen envainadas en materiales adecuados en forma de tubos, placas o cuerpos más complicados que se adaptan a las superficies que constituyen el material a calentar.

La separación entre la resistencia y la vaina se logra por medio de aislantes eléctricos en forma de polvo comprimido (óxido de magnesio), o tubos, como en las planchas eléctricas, calentadores de inmersión, paneles, cintas flexibles con tejidos de materiales de sílice, etc.

b) Calentamiento por fenómenos de inducción.- La variación de un campo magnético da origen a una fuerza electromotriz ***e*** dada por la relación:

$$e = -\frac{d\vec{\Phi}}{dt} = \int \vec{E}^* dS \text{ , en la que } \begin{cases} \frac{d\vec{\Phi}}{dt} \text{ es la variación del flujo magnético con el tiempo} \\ \vec{E}^* \text{ es el campo eléctrico} \end{cases}$$

Si la variación del flujo magnético es alterno, y tiene lugar en el seno de un material conductor:

$$F = F_0 \ sen\,(w\,t) \ , \ \text{siendo: } \begin{cases} w = 2\,\pi\,f \\ f \text{ la frecuencia} \end{cases}$$

originándose una corriente dada por:

$$I = \frac{\Phi_0 \ w}{R^2 + (L\,w)^2} \cos\,(w\,\tau - \varphi)$$

en la que: $tg\,\varphi = \frac{L\,w}{R}$ y $(L\,w)$ es la resistencia inductiva

La energía transformada por efecto Joule, pone de manifiesto la generación de calor E en el conductor, en función de las características del campo inductor y de las propiedades del material donde se desarrolla la corriente, es:

$$E = e\,I\cos\varphi = \frac{F_0^2 \ w^2 R}{R^2 + (L\,w)^2}$$

efecto que es perjudicial cuando no se desea generación de calor, como sucede en las máquinas eléctricas, mientras que es fundamental en el calentamiento por inducción; el conocimiento del calor generado por inducción E, en cada posición del conductor, permite aplicar las ecuaciones de transmisión de calor y conocer la distribución de temperaturas para determinadas condiciones de contorno. Hay que tener en cuenta que en el conductor se superponen campos magnéticos, eléctricos y de temperaturas, a los que se pueden añadir el campo de esfuerzos y deformaciones por causas externas e internas. La resistencia efectiva es la resistencia óhmica incrementada por efecto de la distri-

bución de corriente en los conductores.

En el caso de un conductor cilíndrico recorrido por una corriente, se forma un campo magnético perpendicular a la dirección del campo eléctrico, con líneas que se cierran formando anillos concéntricos que se extienden al exterior e interior del conductor.

En un campo alterno se producen variaciones del flujo magnético dentro del conductor dando lugar a corrientes que se superponen a la corriente principal; el valor del flujo en el conductor viene dado por:

$$F = \int_{r_1}^{r_2} B_z \; L \; dr = \mu \; \mu_0 \; L \int_{r_1}^{r_2} H_z \, dr$$

y la fuerza electromotriz originada:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} = - \mu \; \mu_0 \; L \; \frac{d}{dt} \int_{r_1}^{r_2} H_z \, dr$$

en las que:
- B_z *y* H_z *son la inducción e intensidad del campo*
- μ *es la permeabilidad relativa*
- μ_0 *es la permeabilidad del vacío* = $1{,}256.10^{-8}\, Wseg/cm$
- L *es la longitud del conductor*

El valor de Φ varía linealmente desde el centro si B_z es uniforme; la corriente principal y las corrientes desarrolladas por la variación de Φ tienen sentido contrario cuando se está más próximo al eje, y el mismo sentido en las proximidades de la superficie del conductor.

Este fenómeno se conoce como efecto superficie, con el resultado de una utilización deficiente del conductor y un aumento de la resistencia; el efecto es mayor cuando aumenta la frecuencia y es apreciable en conductores de pequeña sección para valores de f > 1000 ciclos/seg.

La resistencia efectiva R_{ef} se expresa de la forma:

$$R_{ef} = a \, R_0 = \left| \begin{array}{l} a = x + \frac{1}{4} + \frac{3\,x}{64} \\ x = \frac{r_0}{2} \sqrt{\pi \, f \, \frac{\mu \; \mu_0}{\rho_e}} \end{array} \right| = (x + \frac{1}{4} + \frac{3\,x}{64}) \, R_0 = (\frac{r_0}{2} \sqrt{\pi \, f \, \frac{\mu \; \mu_0}{\rho_e}} + \frac{1}{4} + \frac{3\,r_0}{128} \sqrt{\pi \, f \, \frac{\mu \; \mu_0}{\rho_e}}) \, R_0$$

Los conceptos expuestos son aplicables al calentamiento de la masa en presencia del campo inductor y al calentamiento de los conductores de corriente del inductor.

El campo magnético es mayor en las proximidades del inductor y se superpone con los campos producidos por elementos inductores dispuestos convenientemente, y así, en el caso de un solenoide con espiras suficientemente próximas, si se introduce en el interior un conductor, el efecto de las corrientes es uniforme en dirección axial.

En dirección radial, la distribución de corrientes generadoras de calor es exponencial y la generación de calor viene dada por una expresión de la forma:

$$Q = Q_0 \ (Ch\ 4\ \pi\ x \sqrt{\frac{f\ \mu\ \mu_0}{\rho_e}} - cos\ 4\ \pi\ x \sqrt{\frac{f\ \mu\ \mu_0}{\rho_e}})$$

Para valores de la frecuencia *f* elevados, la generación de calor se admite uniforme en un espesor $e = \sqrt{\frac{\rho_e}{f\ \mu\ \mu_0}}$, en el que se ha producido prácticamente todo el calor, viniendo *e* expresada en cm, si ρ_e lo viene en (W cm^2/cm), μ_0 en W seg/cm) y f en ciclos/seg

De la expresión del espesor *e* se deduce que para valores de la frecuencia y para materiales metálicos a temperatura no muy alta, el calentamiento es prácticamente superficial, siendo fácil su desarrollo matemático con manantiales de calor puntuales, lineales o superficiales.

Los calentamientos por inducción presentan la ventaja de generar calor sin contacto físico, localizado en volúmenes determinados y tiempos muy cortos. Las frecuencias que se emplean dependen de la naturaleza de la carga y del tiempo de calentamiento.

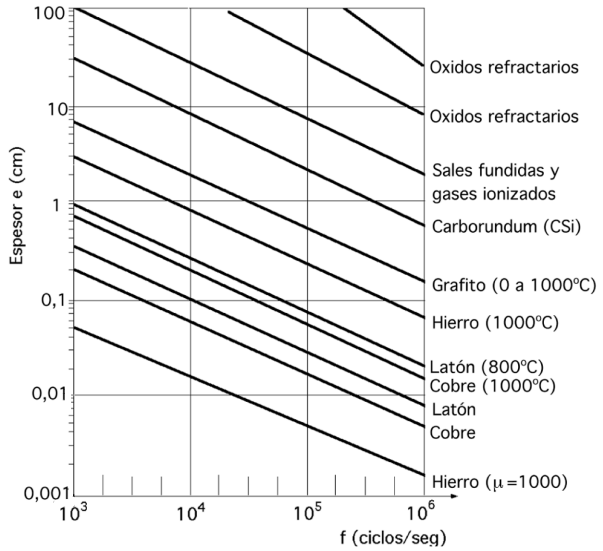


Fig B.2.- Valores del espesor de calentamiento en función de la frecuencia para algunos materiales más usuales

La fusión de metales se extiende desde frecuencias bajas hasta frecuencias del orden de 2.10^5 ciclos/seg. Cuanto menor es la frecuencia, la zona de generación en régimen transitorio es más profunda, añadiéndose la transmisión de calor por conducción a la zona sólida. Las frecuencias más elevadas se utilizan para tratamientos térmicos de materiales en general, incluyendo formas simples como láminas, tubos, o barras, y formas complicadas, como piezas mecanizadas, o partes de un equipo industrial. Los problemas térmicos en régimen transitorio con generación de calor y fenómenos de fusión se complican por la presencia de una interfase sólido-líquido en movimiento.

c) Calentamiento dieléctrico.- Se produce en cuerpos no conductores y, según sus aplicaciones, se conoce como calentamiento por onda corta, diatérmica o calentamiento electrostático. El término calentamiento dieléctrico incluye todas las aplicaciones de generación de calor por la polarización de la materia, en presencia de un campo eléctrico.

Cuando las placas de un condensador se someten a una corriente alterna y existe un material dieléctrico entre las placas, se produce un desplazamiento de cargas en los elementos constituyentes del material y por la naturaleza alterna del campo eléctrico, se originan movimientos de vaivén que producen corrientes y generación de calor en toda la masa del dieléctrico.

- Cuando se trata de un dieléctrico perfecto, estas corrientes no se producen porque en corriente alterna la intensidad y la tensión están desfasadas 90° y la potencia es reactiva (ficticia)

- Si el dieléctrico no es perfecto, aparece una componente de corriente en fase con la tensión, desarrollándose el calentamiento dieléctrico

Si la modificación del ángulo de fase por la presencia del dieléctrico es φ , el calor generado E viene dado por la expresión:

$$E = \frac{V^2}{Z} \cos\varphi \text{ , siendo: } \begin{cases} V \text{ la caída de tensión entre los electrodos, en voltios} \\ Z = \sqrt{R^2 + \frac{1}{(C\,w)^2}} \text{ , la impedancia del sistema} \\ \varphi \text{ el ángulo de pérdidas dieléctricas} \end{cases}$$

Para un condensador plano: $C = \frac{\varepsilon\ \varepsilon_0\ S}{L}$

$$\text{en la que: } \begin{cases} \varepsilon_0 \text{ es la constante absoluta del vacío} = 0{,}885.10^{-13}\,F/cm), \text{ y } \varepsilon \text{ es la constante relativa} \\ S \text{ es la superficie del condensador y } L \text{ la distancia entre placas} \end{cases}$$

Para un condensador plano, el calor generado es:

$$E = \frac{V^2}{L^2}\ C\,w\ \sqrt{1 - \cos^2\varphi}\ \cos\varphi \quad \left(\frac{W}{cm^3}\right)$$

y si $\cos\varphi$ es pequeño:

$$E = \varepsilon\ \varepsilon_0\ E^{*2}\ 2\ \pi\ f \cos\varphi = 5{,}52.10^{-13}\,\varepsilon\ E^{*2} f \cos\varphi \ , \text{ siendo: } \begin{cases} E^* = \text{campo eléctrico} = \frac{V}{L} \\ f \text{ la frecuencia en ciclos/seg} \end{cases}$$

En la Tabla B.5 se dan los valores de ε y φ para distintos materiales, valores que son función de la temperatura y, por lo tanto, de la generación de calor.

En la ecuación anterior E es función de las variables que intervienen en la misma, pero el efecto de f sobre ε y φ puede ser mayor que la relación indicada.

El potencial que se aplica está limitado por la aparición de fenómenos de ruptura del dieléctrico, que para los materiales más frecuentes es del orden de 20 kV; en la práctica se trabaja entre $10 \div 12$ kV con campos eléctricos de $1000 \div 2000$ kV.

La generación de calor dentro del material es función del campo eléctrico y éste puede variar

según sea la forma geométrica del condensador.

Cuando la pieza a calentar es de forma arbitraria, se puede lograr un campo eléctrico uniforme por disposición de las placas del condensador en forma adecuada, dejando un espesor variable de aire entre placas y carga.

Las ventajas del calentamiento dieléctrico en medios no conductores son análogas a las del calentamiento por inducción en medios conductores, añadiéndose en el primer caso la generación de calor en toda la masa, según la distribución del campo eléctrico, los valores de φ , f y la temperatura.

Tabla B.5.- Propiedades de algunos dieléctricos

Material	*T (ºC)*	*ξ(a) ; tg φ (b)*	*10^2 (ciclos / seg)*	*10^3 (ciclos / seg)*	*10^{10} (ciclos / seg)*
Arena	*25*	*(a)*	*3,42*	*2,5*	*2,5*
	25	*(b)*	*0,19*	*0,017*	*0,0036*
Caucho	*25*	*(a)*	*2,4*	*2*	*2*
	25	*(b)*	*10*	*44*	*30*
Cuero	*25*	*(a)*	*30*	*7*	
	25	*(b)*	*140000*	*1000*	
Cuarzo fundido	*25*	*(a)*	*3,78*	*3,78*	*3,78*
	25	*(b)*	*8,5*	*4*	*22,5*
Esteatita (400)	*25*	*(a)*	*5,54*	*60*	*5,7*
	25	*(b)*	*160*	*5,77*	*22*
Fibra de vidrio	*25*	*(a)*	*14*	*5,9*	*4*
	25	*(b)*	*2500*	*800*	*360*
Hielo	*-12*	*(a)*		*4,8*	*3,7*
	-12	*(b)*		*8000*	*7*
Mármol	*25*	*(a)*	*15*	*10*	*8,6*
	25	*(b)*	*2000*	*390*	*120*
PLASTICOS					
Fenol-Formaldeido	*25*	*(a)*	*4,87*	*4,5*	*3,55*
	25	*(b)*	*300*	*210*	*390*
Poliamidas	*25*	*(a)*	*3*	*3*	*2*
	25	*(b)*	*150*	*200*	*100*
Acetato de celulosa	*25*	*(a)*	*3*	*3*	*2*
	25	*(b)*	*100*	*200*	*100*
Resinas silicona	*25*	*(a)*	*3*	*3*	
	25	*(b)*	*17*	*14*	
Cloruro de polivinilo	*25*	*(a)*	*1*	*1*	*1*
	25	*(b)*	*21*	*15*	*50*
Fibra de poliéster	*25*	*(a)*	*2*	*2*	*2*
	25	*(b)*	*7*	*3*	*6*
Vidrio corning	*25*	*(a)*	*8,3*	*12*	*6,62*
	25	*(b)*	*760*	*7,08*	*180*
Vidrio borosilicato		*(a)*	*26*	*14*	*4*
		(b)	*4,5*	*4,05*	*15*

Las frecuencias de trabajo se encuentran entre $10^6 \div 10^8$ ciclos/seg y las temperaturas a partir de 100ºC, para calentamiento de planchas de plástico, aglomerados, fusión de polvos y láminas de materiales de bajo punto de reblandecimiento, hasta la fusión de vidrios y otros cuerpos térmicos a $1.000 \div 1.500$ºC.

El calentamiento dieléctrico tiene aplicaciones específicas que no son posibles con otros procedimientos, como el caso del secado de piezas complicadas, en las que el calentamiento uniforme expulsa el agua del interior sin producir variaciones dimensionales anormales, que den lugar a grietas o resquebrajaduras.

La eliminación de tensiones térmicas, preparación de semiconductores, catalizadores, etc., son otros ejemplos de las distintas aplicaciones que presenta el calentamiento dieléctrico.

d) Arco eléctrico.- Los arcos eléctricos se producen por descargas eléctricas mantenidas a través de gases más o menos ionizados; en un arco eléctrico intervienen tres elementos, cátodo, ánodo y columna de gas, siendo distintas las temperaturas en cada uno de ellos.

El valor máximo corresponde a la columna de gas y es del orden de 6.000ºK en los arcos normales, pudiendo llegar a 10.000ºK en los arcos de antorcha. Las temperaturas del cátodo y del ánodo son del orden de 2.000ºC ÷ 2.500ºC, siendo mayores en el primero.

Las aplicaciones del arco eléctrico son numerosas y se extienden continuamente a medida que se profundiza en el conocimiento de los fenómenos que presenta el comportamiento de los componentes del arco. El calor generado se utiliza para fundir metales, en arco libre, con arco sumergido, o bajo carga.

La soldadura por arco es una de las aplicaciones más frecuentes, a las cuales pueden añadirse la fabricación de nitruros, carburos, etc., y sus compuestos, así como las reacciones químicas con moléculas estables que necesitan elevadas temperaturas para su descomposición.

En un arco eléctrico, la distribución de focos térmicos se complica por la superposición de campos eléctricos, magnéticos y partículas libres con carga en movimiento; la característica común a todos los arcos es la presencia de materia en un estado que se denomina plasma y que intuitivamente se identifica con las llamas.

Un plasma es, en general, la mezcla de tres componentes, electrones, iones positivos, y átomos o moléculas, todos ellos libres y en movimiento, independientemente de su estado sólido, líquido o gas. Los plasmas de gases a temperaturas altas no están en equilibrio, a diferencia de las otras clases de plasmas, Fig B.3. Los plasmas mantienen su neutralidad eléctrica a escala macroscópica, siendo la cantidad de cargas positivas igual a la de cargas negativas.

Cualquier desviación de esta situación produce campos eléctricos elevados que tienden a restablecer el equilibrio. En un gas que tenga, n= 10^{15} (iones/cm^3) de ambos signos y las cargas positivas y negativas se separan x = 1 cm, el valor del campo E es:

$$E = x\ \frac{n\ e}{e_0} = \left| \begin{array}{c} e = \text{carga del electrón } 1{,}609.10^{-19}\ (C) \\ \varepsilon_0 = 8{,}85.10^{-12}\ (F/cm) \end{array} \right| = 1{,}808.10^{4}\ (eV)$$

A escala microscópica la neutralidad del plasma se puede alterar extendiéndose la perturbación a una cierta distancia λ_D, conocida como longitud de Debye. Si las cargas se separan λ_D la energía potencial de longitud de cada partícula vale $k_B\,T$, siendo k_B la constante de Boltzman, cumpliéndose:

$$e\,V = k_B\;T \simeq \frac{n}{e_0}\,e^2\lambda_D^2 \quad \Rightarrow \quad \lambda_D = \sqrt{\frac{k_B\;T\,\varepsilon_0}{e^2\;n}} \;\; con \;\; k_B = 8{,}62.10^{-5}\,(eV/^\circ K)$$

Para una temperatura del plasma de 10^4 ºK:

$$k_B\;T = 8{,}62.10^{-5}{}_x\;10^4 = 0{,}862\,(eV)$$

Características de los arcos eléctricos.- La presión de las zonas de plasma de los arcos eléctricos se extiende desde 10^{-2} kg/cm^2 hasta 100 kg/cm^2 con un grado de ionización variable del 5% ÷50%, Fig 3.B. Los tres componentes del arco, cátodo, plasma y ánodo, son específicos en cada caso particular.

El arco se obtiene acercando los electrodos hasta una posición para la cual se inicia la descarga a través del medio y posteriormente se separan los electrodos a la distancia de funcionamiento. La caída de tensión entre cátodo y ánodo no es muy elevada variando entre 20 ÷220 V, siendo mayor en corriente alterna que en corriente continua.

Las corrientes se extienden $\begin{cases} desde\ 50 \div 100\ A\ para\ bajos\ voltajes \\ hasta\ 10^6\ A\ en\ electrodos\ fríos\ de\ cobre \end{cases}$

En el cátodo se desprenden electrones por emisión termoiónica con una velocidad dada (Richardson), de la forma:

$$v_{elec\,cát} = A\,T^2 exp\,(-\,\frac{B}{T})\;,\; en\;la\;que: \begin{cases} A\ es\ una\ característica\ del\ material\ del\ cátodo,\ con\ T^\circ(K) \\ B = \dfrac{\Phi\;e}{k_B\;T}\;,\; con \begin{cases} \Phi\ trabajo\ de\ extracción\ de\ los\ electrones\ del\ material \\ e\ la\ carga\ del\ electrón \\ k_B\ la\ constante\ de\ Boltzman \end{cases} \end{cases}$$

que se aceleran por el campo eléctrico, produciendo iones positivos en las inmediaciones del cátodo a distancias de 10^{-3} cm, que $\begin{cases} se\ precipitan\ en\ el\ cátodo\ elevando\ su\ temperatura \\ producen\ más\ electrones\ por\ emisión\ secundaria \end{cases}$

La emisión termoiónica se puede aumentar incorporando compuestos que presentan una determinada energía o trabajo de extracción, como los óxidos de torio o bario.

Los cátodos presentan las mayores densidades de potencia, por la naturaleza puntual de los focos térmicos, y pueden ser, $\begin{cases} fríos\ (hierro,\ cobre),\ con\ corrientes\ que\ llegan\ a\ 10^6\ A \\ calientes\ (volframio,\ grafito),\ con\ corrientes\ de\ 10^4\ A \end{cases}$

En el plasma se tienen las temperaturas más elevadas, que pueden llegar hasta 20.000ºK , dependiendo de la composición, corriente y forma geométrica.

La corriente de electrones realiza tres funciones:

- *Genera o mantiene el plasma*
- *Le calienta por efecto Joule*
- *Compensa la presión del plasma por la presión del campo magnético creado por las corrientes*

Cuanto mayor es la distancia entre cátodo y ánodo, los plasmas son tanto mas cilíndricos debido a que el campo eléctrico es casi uniforme y el campo magnético son líneas circulares que confinan el plasma, mientras que a distancias menores el efecto de los campos magnéticos en las proximidades de los electrodos tiene mayor influencia y la forma tiende a ser esférica.

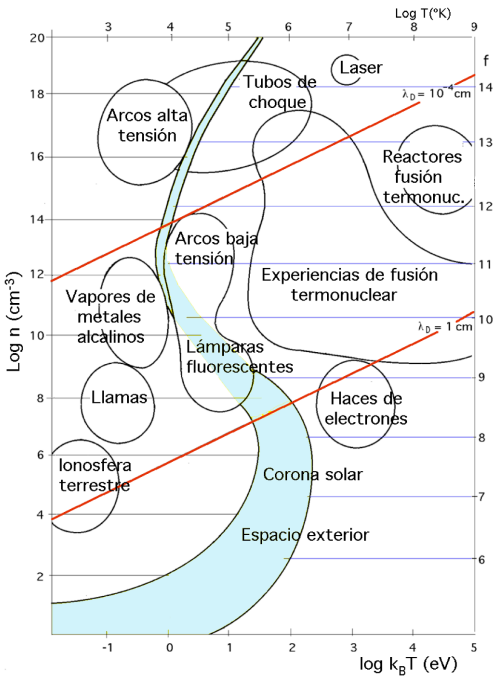


Fig B.3.- Plasmas gaseosos

La temperatura del plasma es función de las pérdidas por radiación, que dependen de:

- *La composición del plasma*
- *Su forma y volumen*
- *Las características del medio que recibe las radiaciones*

En arcos libres en hornos, la carga recibe calor por:

- *Radiación del plasma*
-*Irradiación de los materiales cerámicos refractarios de las paredes*

Si en la carga de uno de los electrodos interviene también la conducción, la influencia de este fenómeno aumenta cuando se trata de arcos sumergidos, debido a que el calentamiento se produce también por la resistencia del propio electrodo.

La naturaleza radiante del plasma viene fijada por todos los procesos que intervienen y provocan la emisión fotónica, incluyendo la presencia de iones procedentes de los materiales del cátodo y del ánodo.

En el ánodo, los electrones pierden su energía $\begin{cases} cinética \\ de\ extracción \end{cases}$, desprendiéndose mayor cantidad de calor que en el cátodo.

Si la superficie del ánodo es pequeña, el aumento de temperatura es grande y se originan fenómenos de emisión termoiónica, que se oponen a la corriente del arco.

La refrigeración en el caso de $\begin{cases} soldadura \\ aumento\ de\ superficie \end{cases}$ minora el fenómeno.

La generación de calor se extiende a 10^{-3} cm de la superficie y su distribución es gaussiana con máximo en el centro del ánodo, dependiendo de las características del plasma y sus dimensiones.

En consecuencia, los componentes del arco, cátodo plasma y ánodo no son independientes y

cada arco eléctrico es el resultado de la serie de fenómenos que tienen lugar en sus componentes. Los focos térmicos son más elevados en el cátodo, pudiéndose considerar uniformes, mientras que en el plasma y ánodo tienen forma de campana de Gauss

GENERACIÓN DE CALOR POR REACCIONES QUÍMICAS.- Desde el punto de vista térmico, las reacciones químicas son las fuentes o sumideros de energía más utilizados y su importancia se extiende desde reacciones muy exotérmicas como son la combustión de carbón, petróleo y combustibles en general, hasta las reacciones que tienen lugar en formas elementales de vida. Este espectro de aplicaciones se extiende desde temperaturas de aproximadamente 10.000ºK, donde la materia se encuentra en estado de plasma, hasta las proximidades del cero absoluto.

La presencia de una reacción química implica la existencia de campos de temperatura cuya distribución exige la existencia de focos o flujos térmicos, con las condiciones de contorno impuestas por un volumen de control correspondiente a un aparato, y su aplicación industrial con materiales y condiciones de funcionamiento.

La cantidad de calor que se desprende, o absorbe, en una reacción química queda determinada por la variación de las funciones termodinámicas que intervienen en el proceso, en la forma:

$$- \frac{\Delta G^\circ}{T} = R \ln K = exp \left(- \frac{\Delta i^\circ}{R\,T} + \frac{\Delta S^\circ}{R}\right)$$

donde ΔG^o, Δi^o y ΔS^o, son las variaciones de energía libre, entalpía y entropía, expresadas en unidades congruentes con R que es la constante universal de los gases perfectos.

Los valores de ΔG^o, Δi^o y ΔS^o se obtienen de Tablas de propiedades termodinámicas a partir de un estado de referencia convenientemente elegido, mientras que $K = \frac{a_D^d \; a_E^e}{a_B^b \; a_C^c}$ es la constante de equilibrio de la reacción $b\,B + c\,C \;\leftrightarrow\; d\,D + e\,E$, en la que los valores de a_D, $a_{E,}$ $a_{B,}$ $a_{C,}$ son las actividades de los componentes de la reacción.

En el equilibrio químico, el estado de referencia se elige a una presión determinada y las actividades vienen dadas a la presión parcial de los componentes. La relación entre K y T se obtiene en la forma:

$$\frac{\partial\left(\frac{\Delta G^\circ}{T}\right)}{\partial T}\Big)_p = \frac{1}{T}\left(\frac{\partial \Delta H^\circ}{\partial T}\right)_p - \frac{\Delta H^\circ}{T^2} - \left(\frac{\partial \Delta S^\circ}{\partial T}\right)_p = \left| \left(\frac{\partial \Delta H^\circ}{\partial T}\right)_p = T\left(\frac{\partial \Delta S^\circ}{\partial T}\right)_p \right| = - \frac{\Delta H^\circ}{T^2}$$

$$R\left(\frac{\partial \ln K}{\partial T}\right)_p = \frac{\Delta H^o}{T^2} \quad \Rightarrow \quad R\left(\frac{\partial \ln K}{\partial (1/T)}\right) = - \Delta H^o \quad \Rightarrow \quad \ln \frac{K_1}{K_2} = \frac{1}{R} \int_{T_1}^{T_2} \frac{\Delta H^\circ}{T^2}\, dT$$

con: $\Delta H^o = \Delta H^o_{T_1} + \int_{T_1}^{T_2} \sum c_p \, dT$

El calor de reacción queda siempre determinado cuando se conocen las propiedades termodi-

námicas de los componentes y las proporciones de los componentes en estado de equilibrio.

En el equilibrio, la velocidad de una reacción química es cero y desde el punto de vista del reactor químico corresponde a una situación límite; de los valores de ΔG^o sólo se pueden desprender resultados cualitativos acerca de las posibilidades de una reacción:

- Si, $\Delta G^o < 0$ *Kcal/mol la reacción es posible*

- Si, $0 < \Delta G^o < 10$ *Kcal/mol la reacción es dudosa*

- Si, $\Delta G^o > 10$ *Kcal/mol la reacción es desfavorable pero no imposible*

El conocimiento de las velocidades de reacción se denomina cinética química y la aplicación de las reacciones químicas al equipo más conveniente constituye el diseño de reactores químicos, donde interviene también el movimiento de fluidos, transmisión de calor, y transferencia de materia.

En la velocidad de una reacción química:

$$r_i^* = \frac{1}{K_i} \frac{dn_i}{dt}$$

$$en\ la\ que: \begin{cases} n_i \text{ es el número de moles del componente i que aparece en la reacción} \\ t \text{ es el tiempo} \\ K_i \text{ depende del estado del sistema} \end{cases}$$

Para una reacción del tipo:

$$a\,A + b\,B \rightarrow c\,C \;;\; v = cte$$

se tiene:

$$r_A^* = \frac{dC_A}{dt} = r_1\ C_A^{a_1} C_B^{b_1}$$

en la que:

- a_1 *y* b_1 *son los órdenes de la reacción con respecto a los componentes A y B; pueden ser números enteros o fraccionarios y no coincidir con los números a y b de la ecuación estequiométrica*

- r_1 *se conoce como constante específica de la reacción, e incluye el efecto de la temperatura y los mecanismos que intervienen o controlan la reacción*

Para un amplio intervalo de temperaturas, r_i^* se expresa por la ecuación de Arrhenius:

$$r_i^* = f_0\ exp\left(-\frac{E}{R\,T}\right)$$

en la que f_0 se conoce como factor de frecuencias y E es la energía de activación.

Si la reacción anterior es reversible, $r^* = r_1\ C_A^a\ C_B^b - r_2\ C_C^c$, en la que r_1 y r_2 son las constantes específicas directa e inversa, que están relacionadas con la constante de equilibrio en la forma:

$$k = \frac{r_1}{r_2} = \frac{C_C^c}{C_A^a \, C_B^b}$$

Las velocidades de reacción se determinan experimentalmente en elementos diferenciales y los resultados se interpretan por distintos mecanismos, dando consistencia lógica a las velocidades obtenidas, lo que permite extrapolar a otras reacciones análogas.

Frecuentemente los mecanismos de difusión de componentes, adsorción sobre superficies y reacción química actúan en serie y la analogía con la ley de Ohm indica que la velocidad controlante corresponde al mecanismo que presenta mayor resistencia.

Si existen reacciones simultáneas, las resistencias están en serie-paralelo y cuando alguna de las resistencias en paralelo es muy elevada, su efecto es despreciable.

Si en una reacción interviene la difusión a temperaturas altas, la velocidad de la reacción es elevada, su resistencia es pequeña y la velocidad controlante es la difusión.

A temperaturas bajas sucede lo contrario y quien controla es la velocidad de reacción.

Con las consideraciones anteriores, el problema de conocer la distribución de focos térmicos se complica por la presencia de campos de concentraciones, fluidos en movimiento y variación de la velocidad de reacción con las concentraciones y temperaturas.

La distribución de temperaturas puede expresarse por la ecuación diferencial:

$$\nabla(k \, \nabla T) = \rho \, c_p \frac{\partial T}{\partial t} + r \, c_p \, (V \, grad \, T) + r_i^* \Delta H \pm E$$

y la distribución de concentración del componente i por:

$$\nabla(D \, \nabla C_i) = \frac{\partial C_i}{\partial t} + V \, grad \, C_i + r_i^* \pm Q_m$$

en las que se incluye la cantidad de materia Q_m y el calor E que se aporta o elimina del sistema.

Estas ecuaciones se pueden tratar como lineales, siempre que sus variables se puedan agrupar convenientemente; los valores de k y D se pueden referir a sólidos o a fluidos en régimen laminar o turbulento.

En los sólidos $(V \, grad \, T)$ y $(V \, grad \, C_i)$ no existen y las ecuaciones quedan reducidas a la conducción y difusión en sólidos con soluciones completamente análogas, si r_i^* se expresa en forma lineal.

Con fluidos se pueden encontrar valores de k y D equivalentes, situación no desconocida puesto que se trata de un caso análogo a la transmisión de calor en sólidos anisótropos, cuya solución se obtiene relacionando los parámetros de anisotropía. El campo de velocidades es el que presenta mayores dificultades, que se simplifican introduciendo grupos adimensionales, como método general de aproximar las ecuaciones no lineales.